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

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
«ДЕРЖАВНИЙ ДОРОЖНІЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ М.П. ШУЛЬГІНА» (ДП «ДЕРЖДОРНДІ»)
M.P. SHULGIN STATE ROAD RESEARCH INSTITUTE STATE ENTERPRISE –
DERZHDORNDI SE

# ДОРОГИ І МОСТИ

**Збірник наукових праць**
Заснований у 2003 р.

**Випуск 28**

# ROADS AND BRIDGES

**Collection of scientific papers**
Established in 2003

**Issue 28**

КИЇВ
KYIV
2023

**ISSN 2524-0994 (Print), ISSN 2786-488X (Online)**

УДК 625.7/.8

Дороги і мости : збірник наукових праць. Київ, 2023. Вип. 28. 284 с.

У збірнику публікуються результати наукових досліджень із питань: впровадження новітніх дорожньо-будівельних 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 дорожньо-транспортної інфраструктури; захисту навколишнього середовища від шкідливого впливу об'єктів дорожньо-транспортної інфраструктури тощо.

Для працівників проєктних і підрядних організацій, науково-дослідних інститутів, викладачів, аспірантів і студентів автомобільно-дорожних 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 техн. наук, проф.* Внукова Н. В.; *д-р техн. наук, проф.* Гамеляк І. П.; *д-р техн. наук, проф.* Дехтяр А. С.; *д-р екон. наук, доц.* Кузькін Є. Ю.; *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. техн. наук, ст. наук. співр.* Вирожемський В. К.; *канд. техн. наук* Головко С. 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; *D.Sc. (Eng.), Prof.* Гаспар Ласло; *Ph.D. (Chem.), Associate Prof.* Оліверо Росі Цезаре; *D.Sc. (Sp. Tech.), Prof.* Самберг Андре; *д-р техн. наук, проф.* Телтаєв Багдат Бурханбайули.

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

**Технічний редактор:** Нівчик Т. С.

**Адреса редакційної колегії:** *03113, м. Київ, просп. Берестейський, 57, ДП «ДерждорНДІ»*, 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 «ДерждорНДІ» (протокол від 19.12.2023 № 12).

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).

Номер свідоцтва про державну реєстрацію збірника Серія КВ № 8005 від 20.10.2003 р.

© Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна», 2023 р.

**ISSN 2524-0994 (Print), ISSN 2786-488X (Online)**

UDC 625.7/.8

Roads and Bridges : collection of scientific papers Kyiv, 2023. Issue 28. 284 p.

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.), Prof.* Nataliia Vnukova; *D.Sc. (Eng.), Prof.* Ihor Gameliak; *D.Sc. (Eng.), Prof.* Anatolii Dehtyar; *D.Sc. (Econ.), Associate Prof.* Yevhen Kuzkin; *D.Sc. (Eng.), 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. (Eng.), Sen.Research.* Valerii Vyrozhemskyi; *Ph.D. (Eng.)* Serhii Holovko; *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; *D.Sc. (Eng.), Prof.* Gaspar Laszlo; *Ph.D. (Chem.), Associate Prof.* Cesare Oliviero Rossi; *D.Sc. (Sp. Tech.), Prof.* Andre Sumberg; *D.Sc. (Eng.), Prof.* Bahdat Teltayev.

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

**Technical editor:** Tetiana Nivchyk.

**Address of Editorial board:** *03113, Kyiv, Beresteiskyi Ave., 57, DerzhdorNDI SE,* 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 № 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 № 886), 275 Transport technology (by type) (Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine as of 17.03.2020 № 409).

Recommended by the decision of the Scientific and Technical Council of DerzhdorNDI SE (Minutes on December 19, 2023 N 12).

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).

Certificate number of the state registration of the collection Series KB N 8005 of 10/20/2003

© M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, 2023

# ЗМІСТ

## ЕКОНОМІКА. МЕНЕДЖМЕНТ

***Безуглий А. О., Бібик Ю. М., Гресько І. Л., Бойко М. О.***
Особливості нової системи ціноутворення в дорожній галузі та шляхи її удосконалення..... 8

***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.....19

***Andrii Ivko***
Models of the project management system for the development of self-managed organizations in the portfolios of infrastructure renewal projects of Ukraine..... 28

***Andrii Bieliatynskyi, Kostyantin Mamonov, Vasyl Goi, Lyudmyla Kovalenko, Serhii Haidenko***
Economic and mathematical modeling of the development of construction enterprises, taking into account the peculiarities of the formation of intelligent economic systems.....38

***Шемаєв В. В., Нємчиков Ю. М., Ананьєв М. Ю., Савицький Е. Е.***
Інструмент фінансування Connecting Europe Facility (CEF) як механізм розвитку конкурентоспроможності транспортної інфраструктури України..... 47

## БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

***Головко С. К.***
Особливості обстеження нежорсткого дорожнього одягу при проєктуванні заходів ремонту із застосуванням технології холодного ресайклінгу.....59

***Гуляєв В. І., Шлюнь Н. В.***
Математичне моделювання внутрішньоструктурних термонапружень, що викликаються полями змінної температури в композитах зі стрижневою арматурою.....68

***Цинка А. О., Ілляш С. І., Зеленовський В. А., Рибальченко С. А.***
Удосконалення вимог до експлуатаційного стану автомобільних доріг..... 80

***Каськів В. І., Соколов О. В.***
Теоретичне обґрунтування використання золи-винесення як наповнювача в асфальтобетоні.....92

***Копинець І. В., Головченко В. С., Желтобрюх А. Д., Соколов О. В.***
Установлення національних вимог до зернового складу асфальтобетонних сумішей згідно з ДСТУ EN 13108-1..... 99

***Копинець І. В., Соколова О. Б., Юнак А. Л.***
Щебенево-мастикові асфальтобетонні суміші – складники, склад, проєктування та вимоги..... 108

***Кривобок О. В., Биковець М. М.***
Аналіз доцільності застосування конструкцій жорсткого дорожнього одягу під час відновлення автомобільних доріг в Україні.....134

***Кровяков С. О., Шестакова С. Є.***
Міцність, зносостійкість і морозостійкість фібробетонів жорстких дорожніх покриттів з базальтовою фіброю та повітровтягуючою добавкою..... 144

***Соколов О. В.***
Підбір оптимальних зернових складів асфальтобетонних сумішей у середовищі MS Excel..... 159

***Терещенко Т. А.***
Застосування «концепції фундаменту» в проєктуванні та влаштуванні дорожнього одягу..... 172

## ГІДРОТЕХНІЧНЕ БУДІВНИЦТВО, ВОДНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ВОДНІ ТЕХНОЛОГІЇ

***Редченко В. П., Завгородній С. С.***
Динамічні випробування мостів імпульсним навантаженням.....185

***Зеленський Б. М.***
Застосування штучного інтелекту для моніторингу технічного стану мостів:
переваги та перспективи.....195

***Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Клименко М. І., Гаркуша І. Ю.***
Дослідження та аналіз технології відновлення гідротехнічних споруд транспортного
будівництва з дорожніх водопропускних труб методом гільзування ..... 203

***Стоянович С. В., Полюга Р. І.***
Дослідження напружено-деформованого стану залізобетонної монолітної попередньо
напруженої прогонової будови шляхопроводу..... 221

## ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

***Беленчук О. В., Попович Н. І., Теплюк Є. Ф.***
Підвищення безпеки руху на транспортних розв’язках в одному рівні..... 234

***Терещенко Т. А.***
Проєктування автомагістралей континентального, субконтинентального та
трансрегіонального сполучення в розрізі положень законодавчих актів ЄС..... 242

***Сістук В. О., Беспалов Д. О., Тарасюк В. П., Іванець Л. І.***
Основні проблеми інженерно-планувальних рішень транспортних розв’язок типу
«розірване кільце» та шляхи їх усунення..... 254

## ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

***Ковальчук В. В.***
Шумозахисні заходи на автомобільних дорогах..... 265

***Харитонова Н. М., Ярощук Л. С.***
Заходи з покращення екологічного стану довкілля у зоні впливу автомобільних доріг..... 275

# CONTENTS

## ECONOMY. MANAGEMENT

***Artem Bezuglyi, Yulia Bibyk, Ihor Hresko, Mariia Boyko***
Features of the new pricing system in the road sector and ways to improve it..... 8

***Artem Bezuglyi, Volodymyr Kaskiv, Bohdan Stasiuk, Serhii Illiash, Yulia Bibyk***
Theoretical aspects and methodological approaches to determining the amount of damage and losses caused to roads as a result of armed aggression..... 19

***Andrii Ivko***
Models of the project management system for the development of self-managed organizations in the portfolios of infrastructure renewal projects of Ukraine..... 28

***Andrii Bieliatynskyi, Kostyantyn Mamonov, Vasyl Goi, Lyudmyla Kovalenko, Serhii Haidenko***
Economic and mathematical modeling of the development of construction enterprises, taking into account the peculiarities of the formation of intelligent economic systems.....38

***Volodymyr Shemayev, Yuriy Nemchikov, Mykola Ananiev, Eduard Savytskyi***
Connecting Europe Facility (CEF) as a financing instrument for developing the ukrainian transport infrastructure competitiveness..... 47

## CONSTRUCTION AND CIVIL ENGINEERING

***Serhii Holovko***
Peculiarities of non-rigid pavement inspection in the design of repair measures using cold recycling technology.....59

***Valerii Gulyayev, Nataliia Shlyun***
Mathematical modeling of internal structural thermal stresses caused by variable temperature fields in composites with rod reinforcement.....68

***Anatolii Tsynka, Serhii Illiash, Volodymyr Zelenovskyi, Serhii Rybalchenko***
Improvement of the requirements for the operational condition of automobile roads..... 80

***Volodymyr Kaskiv, Oleksii Sokolov***
Theoretical substantiation of the use of fly ash as a filler in asphalt.....92

***Ivan Kopynets, Vasyl Holovchenko, Anton Zheltobriukh, Oleksii Sokolov***
Establishment of national requirements for grading of asphalt mixtures according to DSTU EN 13108-1.....99

***Ivan Kopynets, Oksana Sokolova, Alina Yunak***
Stone mastic asphalt mixtures - components, composition, design and requirements..... 108

***Oleksandr Kryvobok, Mykola Bykovets***
Analysis of the feasibility of using rigid pavement structures during the rehabilitation of roads in Ukraine..... 134

***Sergii Kroviakov, Lyubov Shestakova***
Strength, abrasion resistance and frost resistance of fiber concrete of hard pavement with basalt fiber and air-entraining admixture..... 144

***Oleksii Sokolov***
Designing of optimal grading of asphalt mixtures in theMS Excel environment.....159

***Tetiana Tereshchenko***
Application of the «foundation concept» for the road pavement design and construction..... 172

## HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION, WATER ENGINEERING AND WATER TECHNOLOGIES

***Vasyl Redchenko, Serhii Zavhorodnii***
Dynamic testing of bridges with impulse loading..... 185

***Bohdan Zelenskyi***
Application of artificial intelligence for monitoring the technical condition of bridges: advantages and prospects.....195

***Artur Onyshchenko, Mykola Harkusha, Mykola Klymenko, Inna Harkusha***
Research and analysis of the technology of restoration of hydro-technical structures of transportation building from culverts by the sleathing method.....203

***Serhii Stoianovych, Roman Poliuga***
Research of the stressed and deformed state of a reinforced concrete monolithic pre-stressed runway structure..... 221

## TRANSPORT TECHNOLOGIES

***Olha Belenchuk, Natalia Popovych, Yevhen Tepliuk***
Improving traffic safety at intersections..... 234

***Tetiana Tereshchenko***
Design of continental, subcontinental and transregional highways in the context of provisions of legislative acts of EU.....242

***Volodymyr Sistuk, Dmytro Bespalov, Volodymyr Tarasiuk, Lev Ivanets***
The major problems of engineering and planning solutions for «throughabout» type interchanges and ways to address them..... 254

## ENVIRONMENTAL PROTECTION TECHNOLOGIES

***Vitalii Kovalchuk***
Noise protection measures on highways.....265

***Nataliia Kharytonova, Olesia Yaroshchuk***
Measures to improve the environmental condition in the impact zone of highways..... 275

https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.008

**УДК 338.5:625.08**

**Безуглий А. О.**[1], *канд. екон. наук, доц., https://orcid.org/0000-0003-3883-7968*
**Бібик Ю. М.**[1], *канд. екон. наук, https://orcid.org/0000-0002-7197-8909*
**Гресько І. Л.**[1], *https://orcid.org/0000-0002-7175-7436*
**Бойко М. О.**[2], *https://orcid.org/0009-0002-0438-4761*

[1] *Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (ДП «ДержДорНДІ»), м. Київ, Україна*
[2] *Національний транспортний університет (НТУ), м. Київ, Україна*

# ОСОБЛИВОСТІ НОВОЇ СИСТЕМИ ЦІНОУТВОРЕННЯ В ДОРОЖНІЙ ГАЛУЗІ ТА ШЛЯХИ ЇЇ УДОСКОНАЛЕННЯ

***Анотація***

Вступ. Новий підхід до визначення вартості дорожніх робіт та послуг є адаптованим до міжнародних стандартів з порядку формування витрат у дорожній галузі, а зміни, передбачені системою ціноутворення, будуть впроваджуватися усіма учасниками дорожньої галузі.

Проблематика. Необхідними умовами при виконанні робіт з нового будівництва, реконструкції, ремонтів та утримання автомобільних доріг загального користування, що фінансуються за рахунок бюджетних коштів, є забезпечення визначення їх вартості з дотриманням принципів ринкового ціноутворення та із застосуванням вільних цін, своєчасність та правильність здійснення взаєморозрахунків, а також дотримання всіх строків та якісне виконання дорожніх робіт та послуг. Саме тому модель ціноутворення, враховуючи її особливості, потребувала удосконалення та приведення її до сучасних європейських норм та стандартів. При цьому підхід до визначення вартості майбутніх інвестиційних проєктів з нового будівництва, реконструкції, ремонтів та експлуатаційного утримання автомобільних доріг загального користування повинен базуватися на єдиних правилах та методиці, що формуються з врахуванням державних, територіальних, суспільних і приватних інтересів.

Мета. Зміни в системі ціноутворення в дорожній галузі дозволять: забезпечити прозоре та конкурентне середовище на ринку дорожніх робіт та послуг, в результаті чого знизяться витрати на нове будівництво, реконструкцію, капітальний та поточний ремонти та експлуатаційне утримання автомобільних доріг; прискорити реалізацію нових проєктів, а також збільшення їх кількості, що значно сприятиме розвитку дорожньої інфраструктури в Україні, позитивно вплине на економіку, підвищить рівень життя громадян та дозволить залучити інвестиції.

Матеріали та методи. Початком здійснення реформи діючої системи ціноутворення в Україні стало прийняття Закону України від 16.11.2021 № 1881-IX «Про внесення змін до деяких законів України щодо передачі повноважень з нормативного регулювання ціноутворення у галузі будівництва автомобільних доріг загального користування» [1], який набрав чинності з 10.12.2021 року. Вищенаведеним Законом визначено, що розроблення та затвердження методики і правил визначення вартості нового будівництва, реконструкції, ремонтів та утримання автомобільних доріг загального користування здійснює центральний орган виконавчої влади, що забезпечує формування та реалізує державну політику у сфері дорожнього господарства. Також відповідні зміни були внесені до Законів України «Про інвестиційну діяльність» [2] та «Про ціни та ціноутворення» [3].

Важливим етапом реформи ціноутворення стало затвердження Наказу Міністерства інфраструктури України № 273 від 02.05.2022 «Про затвердження Правил визначення вартості будівництва, реконструкції, ремонту та утримання автомобільних доріг загального користування»

(далі – Правила), які є обов'язковими для визначення вартості дорожніх робіт та послуг, що фінансуються за рахунок бюджетних коштів, коштів державних і комунальних підприємств, установ та організацій, а також кредитів, наданих під державні гарантії. Визначені концептуальні засади, загальні правила та поняття в Правилах лягли в основу для розроблення та затвердження Методики визначення вартості дорожніх робіт та послуг.

Результати. Ефективна реалізація пріоритетних напрямків удосконалення системи ціноутворення в дорожній галузі дозволила змінити підходи до визначення оцінки вартості дорожніх робіт і послуг. Нова система ціноутворення є добре структурованою, що забезпечить прозорість і конкурентне середовище на ринку дорожніх робіт та послуг, адже базується на чітко визначених критеріях і стандартах. Отже, переваги нової системи ціноутворення в дорожній галузі полягають у використанні нововведень, які здатні забезпечити здійснення ефективних розрахунків при визначенні вартості дорожніх робіт та послуг на нових об'єктах. Як результат економія бюджетних коштів.

Висновки. Впровадження нової системи ціноутворення в дорожній галузі є досить актуальним для сьогодення, адже нововведення, що передбачені Методикою визначають новий порядок взаємовідносин між замовником і підрядником, де на перший план виходять обсяг, якість, строки виконання дорожніх робіт та послуг, та відповідність проєктній документації. Ключовими новаціями в підходах до ціноутворення є: тверда договірна ціна за укрупненими показниками вартості робіт; можливість застосування баз даних цін зі встановленням вимог до них та удосконаленим механізмом визначення цін на матеріальні ресурси під час складання інвесторської кошторисної документації; прозорий та чіткий механізм формування резерву коштів на покриття додаткових витрат, пов'язаних з інфляційними процесами та коштів на покриття ризиків усіх учасників дорожніх робіт та послуг.

***Ключові слова:*** дорожні роботи та послуги, відомість обсягів робіт (BoQ), система ціноутворення.

## Вступ

Дорожня галузь в Україні є однією з найбільш важливих і перспективних галузей, оскільки вона відіграє важливу роль у розвитку економіки країни, забезпечуючи транспортний зв'язок і вантажні перевезення між різними регіонами. Покращена система ціноутворення в дорожній галузі матиме значний вплив на економіку країни та дозволить забезпечити розвиток її інфраструктури. Отже, у цій статті розглянемо особливості нової системи ціноутворення в дорожній галузі в Україні, звернемо увагу на результати, які можуть бути досягнуті завдяки цьому покращенню, а також проаналізуємо перспективи розвитку дорожньої галузі в Україні завдяки впровадженню нової системи ціноутворення.

Імплементація світового досвіду ціноутворення у будівництві дала змогу привести дорожню галузь до вимог міжнародного рівня, що також дозволило перейти на міжнародний підхід оцінювання вартості проєктів – вимірювати обсяги робіт за міжнародною класифікацією, зокрема Стандартний метод вимірювання в цивільному будівництві, розроблений Інститутом цивільних інженерів (Велика Британія) Civil Engineering Standard Method of Measurement (CESMM4) [4], що вже більш 40 років використовується у багатьох країнах світу.

В Україні CESMM до цього часу застосовували виключно на проєктах Міжнародних фінансових організацій (МФО: Світовий банк, ЄБРР та інші). Успішна реалізація подібних проєктів підтверджує ефективність застосування CESMM в нашій країні. Тому одним із завдань перед дорожньою галуззю постало перенесення такого досвіду в площину проєктів дорожньої інфраструктури, які реалізовуються за кошти Державного бюджету України.

**Мета й завдання роботи.** Метою статті є висвітлення найбільш важливих змін нової системи кошторисного ціноутворення в дорожній галузі.

## Основна частина

Впровадження нової системи ціноутворення в дорожній галузі дозволило в повній мірі перейти на нові стандарти та принципи ціноутворення, це стало можливим завдяки врахуванню також і кращих світових практик з ціноутворення. Міністерство інфраструктури України своїм Наказом від 07.10.2022 року № 753 затвердило Методику визначення вартості дорожніх робіт та послуг щодо визначення вартості нового будівництва, реконструкції, ремонтів та експлуатаційного утримання автомобільних доріг загального користування (далі – Методика). Цей документ завершує законодавчу частину реформи ціноутворення у дорожній галузі та змінює підходи, за якими держава вимірює та оцінює майбутню вартість робіт з нового будівництва, реконструкції, капітального, поточного ремонтів та експлуатаційного утримання автомобільних доріг загального користування.

Положення Методики ціноутворення надають переваги для усіх учасників інвестиційного процесу: замовників, підрядників, громадськості, проєктних, експертних та інжинірингових організацій (**рис. 1**).

***Рисунок 1*** – Переваги нової Методики для учасників ринку дорожніх робіт та послуг

Нова система ціноутворення у дорожній галузі базується на підставі:

1. Правил визначення вартості будівництва, реконструкції, ремонту та утримання автомобільних доріг загального користування.
2. Методики.
3. Класифікатора дорожніх робіт та послуг.
4. Розрахунків витрат ресурсів (галузеві, підприємств, індивідуальні).
5. Бази даних об’єктів-аналогів.
6. Бази даних цін.

**Розглянемо основні зміни та нововведення у системі ціноутворення, які відбулися на стадіях визначення інвесторської кошторисної документації та при складанні ціни пропозиції учасника процедури закупівлі (договірної ціни).**

Відповідно до положень Методики для визначення вартості дорожніх робіт та послуг при складанні інвесторської кошторисної документації можуть використовуватись наступні підходи до розрахунку (**рис. 2**).

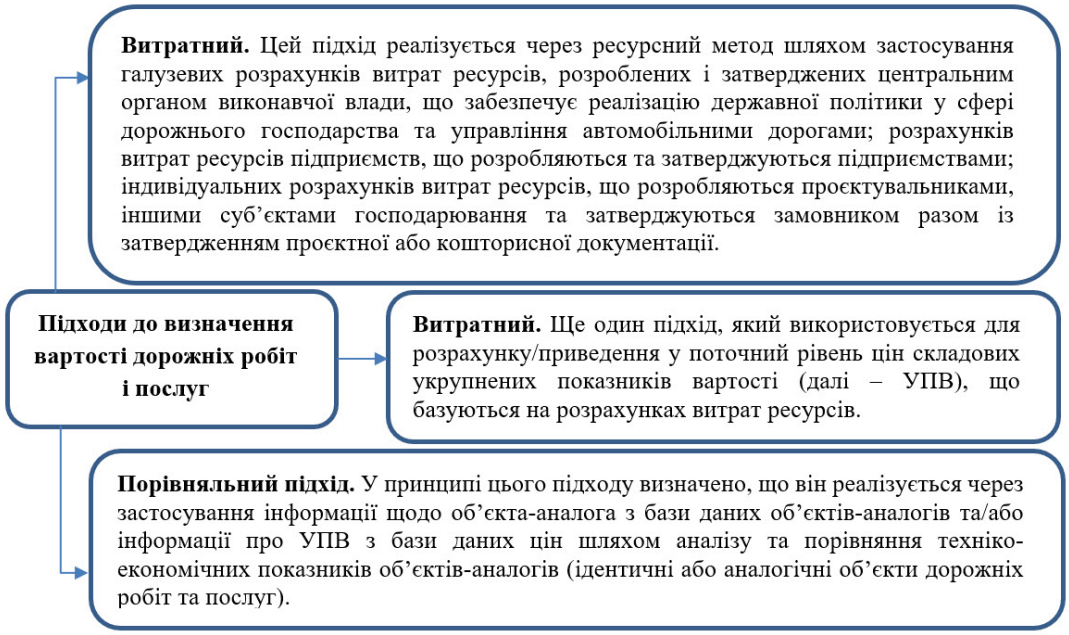



***Рисунок 2*** – Підходи, які використовуються для визначення вартості дорожніх робіт та послуг при складанні інвесторської кошторисної документації

Варто зазначити, що певних змін на стадії складання інвесторської кошторисної документації зазнало визначення поточних цін на матеріальні ресурси – основним нововведенням є те, що ціни приймаються на рівні середніх цін у регіоні (області), що склались на момент розроблення проєктної документації, визначених на підставі бази даних цін або на підставі проведеного замовником, або за його дорученням іншою особою, аналізу ринкових цін (із посиланням на джерела даних про ціни).

Важливими нововведеннями Методики є можливість визначення розміру загальновиробничих, адміністративних витрат та кошторисного прибутку за відсотковими показниками, а не залежно від трудовитрат:

– кошти на покриття загальновиробничих витрат **10 %** від суми прямих витрат;
– кошти на покриття адміністративних витрат **5 %** від суми прямих витрат;
– кошторисний прибуток **15 %** від суми прямих витрат.

Такі нововведення в розрахунках вищенаведених витрат відображають реальну структуру цих витрат та стимулюють дорожні організації до прийняття участі у закупівлях дорожніх робіт та послуг, що призведе до підвищення конкуренції серед дорожніх організацій.

На стадії складання інвесторської кошторисної документації формується відомість обсягів робіт (BoQ) (**рис. 3**), це документ встановленої форми, який відображає перелік необхідних дорожніх робіт та їх обсягів відповідно до розробленої проєктної документації. Відомість BoQ є необхідною для подальшого розрахунку учасником закупівель ціни пропозиції учасника

процедури закупівлі (договірної ціни). Відтепер замовнику необхідно розміщувати відомість обсягів робіт (BoQ) під час подання тендерної пропозиції.

**ФОРМА ВІДОМОСТІ ОБСЯГІВ РОБІТ (BOQ)**
**"ВІДОМІСТЬ ОБСЯГІВ РОБІТ (BOQ)"**

Міжнародна система вимірювання дорожніх робіт та послуг*:
_____

| Кодовий номер** | Назва (короткий опис) | Одиниця виміру | Обсяг | Вартість за одиницю, грн. | Загальна вартість, грн. |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |

* Заповнюється в разі прийняття Замовником рішення про складання відомості обсягів робіт відповідно до міжнародної системи вимірювання дорожніх робіт та послуг
**Під кодовим номером слід розуміти кодовий номер дорожніх робіт чи послуг згідно з класифікацією дорожніх робіт та послуг або відповідною міжнародною системою вимірювання дорожніх робіт та послуг

***Рисунок 3*** – Форма відомості обсягів робіт (BoQ)

Розглянемо переваги використання CESMM4 (**рис. 4**), стандартного методу вимірювання в галузі цивільного інженерного будівництва, що регулює вимірювання й обчислення вартості будівельних робіт.

**Переваги у використанні CESMM4**

- **Стандартизовані вимірювання**: CESMM4 забезпечує стандартизовану систему вимірювання, що дозволяє однаково оцінювати вартість будівельних робіт, незалежно від того, хто здійснює вимірювання.
- **Зменшення помилок**: Використання CESMM4 допомагає зменшити ризик помилок в процесі вимірювання та обчислення вартості робіт, що забезпечує точність і надійність результатів.
- **Економічна ефективність**: CESMM4 дозволяє ефективніше контролювати витрати на будівництво завдяки стандартизації вимірювань і розрахунків, що допомагає зменшити витрати на проєктування, контролювання та виконання робіт.
- **Покращена комунікація**: Використання CESMM4 дозволяє забезпечити однакове розуміння вимог й очікувань між замовником, проєктувальником і виконавцем робіт, що покращує комунікацію та знижує ризик конфліктів.
- **Міжнародне визнання**: CESMM4 є відомим і визнаним стандартом у галузі цивільного інженерного будівництва, що дозволяє використовувати його на міжнародному рівні.

***Рисунок 4*** – Переваги використання CESMM4

Крім того, використання CESMM4 сприяє підвищенню ефективності вимірювання й обчислення вартості дорожніх робіт та послуг в Україні та допомагає покращити комунікацію між сторонами проєкту. Зважаючи на те, що в Україні вже існує адаптована офіційна версія CESMM4, тож компанії, отримавши ліцензію, тепер можуть використовувати цей документ відповідно до вимог своїх проєктів. Узагальнюючи вищенаведене необхідно відмітити, що використання CESMM4 дозволить забезпечити точність проведення розрахунків, їхню ефективність

та однотипність прийняття рішень, а також забезпечить необхідні умови для співпраці з міжнародними організаціями.

Таким чином, на етапі проведення процедури закупівлі замовник надає відомість обсягів робіт (BoQ) без цін, креслення (за наявності) та технічну специфікацію із зазначенням технічних та якісних характеристик предмета закупівлі, а також вимоги до якості матеріалів. У той час як ціну пропозиції учасника процедури закупівлі (договірну ціну) розраховують із використанням УПВ, обсяги та види яких передбачені відомістю обсягів робіт (BoQ), складеною за затвердженою проєктною документацією або дефектним актом.

У свою чергу УПВ розраховується учасником процедури закупівлі на власний розсуд і включає витрати на:

- заробітну плату робітників-будівельників;
- витрати на експлуатацію дорожніх машин і механізмів;
- витрати на дорожньо-будівельні матеріали, вироби та комплекти;
- загальновиробничі й адміністративні витрати;
- інші витрати;
- прибуток.

Нововведенням також є те, що у договорі між замовником і підрядником буде фіксуватися лише тверда договірна ціна з визначеною вартістю робіт за УПВ, під час погодження якої та під час проведення взаєморозрахунків підтверджуючі документи та обґрунтовуючі розрахунки не надаються.

Також запроваджено чітку і прозору методологію визначення коштів на покриття додаткових витрат, пов'язаних з інфляційними процесами та коштів на покриття ризиків усіх учасників дорожніх робіт та послуг. Тепер у тендерній документації замовнику необхідно вказувати суми, які підрядник повинен передбачати в договірній ціні.

Відповідно до нового алгоритму розрахунку, розмір коштів на покриття додаткових витрат, пов'язаних з інфляційними процесами, які призначені на відшкодування збільшення вартості матеріальних ресурсів, спричинених інфляцією, яка може відбутися з моменту складання інвесторської кошторисної документації, на стадії складання інвесторської кошторисної документації визначається наступним чином:

$$К = Сб \cdot (i_{сер} - 1), \quad (1)$$

де К – розмір коштів на покриття додаткових витрат, пов'язаних з інфляційними процесами, грн;

Сб – вартість об'єкта (сума глав 1-9 ЗКР), грн;

$i_{сер}$ – середньозважений прогнозний індекс цін виробників промислової продукції на весь період здійснення дорожніх робіт і послуг:

$$i_{сер} = i_1 / 100 \cdot \ldots \cdot i_n / 100 , \quad (2)$$

де $i_1,\ldots, n$ – розмір коштів на покриття додаткових витрат, пов'язаних з інфляційними процесами, грн;

Кожен учасник процедури закупівлі фіксує однакову суму коштів на покриття додаткових витрат, пов'язаних з інфляційними процесами, у розмірі, передбаченому інвесторською кошторисною документацією та вказаному замовником у тендерній документації. Ця сума коштів відображається в подальшому в договірній ціні і є лімітом для компенсації витрат підрядника, пов'язаних з інфляційними процесами. При узгодженні договірної ціни формується перелік основних матеріальних ресурсів, зміна цін на які може суттєво вплинути на вартість дорожніх

робіт та послуг впродовж періоду їх здійснення, із зазначенням питомої ваги кожного з них у загальній вартості дорожніх робіт і послуг.

На етапі проведення взаєморозрахунків розмір коштів на покриття додаткових витрат, пов'язаних з інфляційними процесами, визначається за формулою:

$$К_р = С_а \cdot I_n, \quad (3)$$

де $К_р$ – розмір коштів на покриття додаткових витрат, пов'язаних з інфляційними процесами, що враховується на етапі проведення взаєморозрахунків;

$С_а$ – загальна вартість виконаних дорожніх робіт і наданих послуг за звітний період без врахування ПДВ, податків, зборів, обов'язкових платежів, суми коштів на покриття додаткових витрат, пов'язаних з інфляційними процесами та суми коштів на покриття ризиків усіх учасників дорожніх робіт та послуг;

$I_n$ – індекс зміни вартості дорожніх робіт та послуг за *n*-ий період, визначений методом покомпонентного прогнозування інфляції, який ґрунтується на факторному аналізі:

$$I_n = \Sigma ((P_{пот}(i) \div P_{баз}(i) - 1) \cdot W_i), \quad (4)$$

де $I_n$ – розмір коштів на покриття додаткових витрат, пов'язаних з інфляційними процесами, грн;

$P_{пот}(i)$ – середня ціна *i*-ого матеріального ресурсу у відповідному регіоні згідно з базою даних цін за останній місяць на момент здачі виконаних дорожніх робіт та наданих послуг;

$P_{баз}(i)$ – середня ціна *i*-го матеріального ресурсу у відповідному регіоні згідно з базою даних цін, зазначена в переліку основних матеріальних ресурсів, складеному відповідно до пункту 6.2 Методики;

$W_i$ – ваговий коефіцієнт *i*-го матеріального ресурсу, що відображає його питому вагу в очікуваній вартості закупівлі дорожніх робіт та послуг за вирахуванням ПДВ, суми коштів на покриття додаткових витрат, пов'язаних з інфляційними процесами, та суми коштів на покриття ризиків усіх учасників дорожніх робіт та послуг, визначений в переліку основних матеріальних ресурсів, складеному відповідно до пункту 6.2 Методики.

Крім того, якщо на окремі матеріальні ресурси $P_{пот}(i)$ менше $P_{баз}(i)$, то при розрахунку індексу зміни вартості дорожніх робіт та послуг такі матеріальні ресурси до розрахунку не приймаються.

До запровадження нової системи ціноутворення використання баз цін при розрахунку вартості дорожніх робіт і послуг було не регламентоване. У Методиці передбачено використання прозорих баз даних цін і баз даних об'єктів-аналогів, що визначають конкретні вимоги до них.

База даних цін має містити інформацію за такими розділами (**рис. 5**).

Бази даних цін можуть створюватися різними суб'єктами, що полегшить порівняння та перевіряння баз на правильність наведених цін. Тобто ціни, які використовують для обчислення вартості дорожніх робіт та послуг, братимуть із публічно доступних і регламентованих баз даних. Такі правила є підґрунтям для створення прозорих і конкуруючих баз даних цін, що дозволить відстежувати ринкові ціни на матеріали, а у разі обчислення майбутньої вартості об'єкта буде точно відоме джерело, ціни якого прийняті для обчислення.

Крім вищенаведених баз даних цін Методика регламентує розроблення Бази даних об'єктів-аналогів (далі – БОА). Вимоги до БОА наведено в додатку 9 Методики, головними з

яких є: збирання, внесення, накопичення та оброблення інформації про дорожні об'єкти. БОА представляє собою інформаційно-аналітичну систему, в якій міститься інформація щодо об'єктів, їх загальної вартості, складових їх вартості. В основному в БОА міститься інформація по об'єктах, роботи на яких були завершені.

***Рисунок 5*** – Інформація, що міститься в Базі даних цін

Крім того, відповідно до Методики БОА має забезпечувати:

– ведення бази даних запроєктованих та побудованих об'єктів дорожніх робіт та послуг з вартісними та технічними показниками;

– фільтрування об'єктів-аналогів за зазначеними параметрами;

– пошук об'єктів-аналогів за зазначеними параметрами;

– оцінювання вартості дорожніх робіт і послуг на підставі вартісних показників об'єктів-аналогів автомобільних доріг і транспортних споруд;

– можливість отримання друкованої інформації про об'єкти-аналоги, що зберігаються в банку даних;

– розподілення рівнів доступу отримання інформації та роботи із системою;

– створення та редагування довідникової інформації, необхідної для внесення даних за об'єктами-аналогами.

Отже, Методика уніфікує та створює єдиний підхід до опису та найменування робіт і послуг, робить прозорішим та оперативнішим аналіз звітів і кошторисних розрахунків, а всі нововведення, що відбулися у новій системі ціноутворення в дорожній галузі сприятимуть її подальшому розвитку. У цілому покращення системи ціноутворення допоможе зменшити витрати, знизити ризики та сприятиме уникненню помилок під час формування кошторисної документації на всіх стадіях інвестиційного процесу та сприятиме підвищенню ефективності капітальних вкладень, забезпечення економії фінансових та інших ресурсів.

## Висновки

Нова реформа дорожньої галузі надає можливість користуватися світовим досвідом ціноутворення робіт і послуг, який набув широкого застосування на практиці у низці країн світу. З огляду на те, що впровадження реформи в системі ціноутворення в дорожній галузі в майбутньому обов'язково принесе свої результати у вигляді завершених об'єктів, виконаних за новими правилами та стандартами з ціноутворення, все ж таки є певні ризики будь-яких фундаментальних змін, а саме складність адаптації до них.

Ключовими перевагами нової системи ціноутворення в дорожній галузі є:

– нові прозорі правила з розрахунку витрат на нове будівництво, реконструкцію,

капітальний, поточний ремонти та експлуатаційне утримання автомобільних доріг, що зробить ці проєкти більш ефективними;

– більше можливостей для залучення іноземних інвестицій для якісної відбудови мережі автомобільних доріг та покращення інфраструктури;

– забезпечення пріоритизації об'єктів і видів робіт на них;

– посилення керованості планування, проєктування, будівництва, утримання та управління дорожніми об'єктами, які є у сфері управління Державного агентства відновлення та розвитку інфраструктури України;

– запровадження низки новацій для уніфікації практик утримання та збереження в належному стані всієї мережі автомобільних доріг державного та місцевого значення;

– використання міжнародної системи вимірювання обсягу дорожніх робіт дозволить залучати до виконання робіт іноземні підрядні організації, досвід і багаторічна практика яких допоможуть у відбудові нашої країни у післявоєнний період;

– значно менше витрачання часу на здійснення розрахунків;

– прозорість і порівнюваність цін між різними об'єктами;

– підвищення конкуренції закупівель.

Проте необхідно зазначити, що наразі певні положення Методики потребують доопрацювань та покращень, а саме:

– сплата коштів за здійснення технічного нагляду та надання послуг інженера-консультанта під час виконання дорожніх робіт і послуг не може здійснюватись у пропорційному відношенні до вартості фактично виконаних дорожніх робіт і послуг за період, а повинна здійснюватись на підставі обґрунтовуючих розрахунків, виходячи з трудовитрат спеціалістів на виконання ними своїх функцій і вартості одного людино-дня, погодженого із замовником;

– оскільки кошти на покриття додаткових витрат, пов'язаних з інфляційними процесами, розраховуються зважаючи на строк здійснення дорожніх робіт і послуг, вид дорожніх робіт і послуг, структуру робіт, вартість матеріальних ресурсів і прогнозне зростання їх вартості, яке визначається на підставі прогнозних індексів цін виробників промислової продукції на наступні періоди, що встановлюються Кабінетом Міністрів України, які наразі є неактуальними, існує необхідність в іншому джерелі зазначених показників;

– під час обчислення додаткових витрат, пов'язаних з інфляційними процесами, що відбувається на підставі порівняльної відомості відповідно до переліку основних матеріальних ресурсів, під час визначення середніх цін матеріальних ресурсів надати можливість користуватись не лише базою даних цін, а, у разі відсутності інформації в базі даних цін, згідно з проведеним замовником аналізом ринкових цін.

Отже, впровадження нової системи ціноутворення у дорожній галузі сприятиме спрощенню форм звітної документації та зменшенню кількості документів, підвищенню конкуренції на ринку, впровадженню інновацій, приведенню системи ціноутворення до кращих світових практик і зменшенню тиску на бізнес.

## Список літератури

1. Про внесення змін до деяких законів України щодо передачі повноважень з нормативного регулювання ціноутворення у галузі будівництва автомобільних доріг загального користування. Закон України від 16.11.2021 № 1881-IX// База даних законодавство України / Верховна рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1881-20#Text (дата звернення: 04.10.2023).

2. Про інвестиційну діяльність. Закон України від 18.09.1991 № 1560-VI, редакція від 10.10.2022 № 2518-IX // База даних законодавство України / Верховна рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1560-12/ed20221010#Text (дата звернення 04.10.2023).

3. Про ціни та ціноутворення. Закон України від 21.06.2012 № 5007-VI, редакція від 09.06.2022 № 2254-IX // База даних законодавство України / Верховна рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5007-17/ed20220609#Text (дата звернення 04.10.2023).

4. CESMM4 Revised: Civil Engineering Standard Method of Measurement. 2021. https://www.icebookshop.com/product/cesmm4-revised-civil-engineering-standard-method-of-measurement (дата звернення 04.10.2023).

**References**

1. Pro vnesennia zmin do deiakykh zakoniv Ukrainy shchodo peredachi povnovazhen z normatyvnoho rehuliuvannia tsinoutvorennia u haluzi budivnytstva avtomobilnykh dorih zahalnoho korystuvannia / Law of Ukraine of 16.11.2021 № 1881-IX // Database of Legislation of Ukraine. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1881-20#Text (Last accessed: 04.10.2023) [in Ukrainian].

2. Pro investytsiinu diialnist / Law of Ukraine of 18.09.1991 № 1560-VI, editorial office of 10.10.2022 № 2518-IX // Database of Legislation of Ukraine. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1560-12/ed20221010#Text (Last accessed: 04.10.2023) [in Ukrainian].

3. Pro tsiny ta tsinoutvorennia / Law of Ukraine of 21.06.2012 № 5007-VI, editorial office of 09.06.2022 № 2254-IX // Database of Legislation of Ukraine. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5007-17/ed20220609#Text (Last accessed:) [in Ukrainian].

4. CESMM4 Revised: Civil Engineering Standard Method of Measurement. 2021. https://www.icebookshop.com/product/cesmm4-revised-civil-engineering-standard-method-of-measurement (Last accessed: 04.10.2023) [in English].

**Artem Bezuglyi**[1], *Ph.D., Associate Prof.*, *https://orcid.org/0000-0003-3883-7968*
**Yulia Bibyk**[1], *Ph.D., https://orcid.org/0000-0002-7197-8909*
**Ihor Hresko**[1], *https://orcid.org/0000-0002-7175-7436*
**Mariia Boyko**[2], *https://orcid.org/0009-0002-0438-4761*

[1] *M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, Kyiv, Ukraine*
[2] *National Transport University (NTU), Kyiv, Ukraine*

## FEATURES OF THE NEW PRICING SYSTEM IN THE ROAD SECTOR AND WAYS TO IMPROVE IT

***Abstract***

Introduction. The new approach to determining the cost of road works and services is adapted to international standards of costs formation in the road sector, and the changes provided by the pricing system will be implemented by all participants of the road sector.

Problem Statement. The necessary conditions for new construction, reconstruction, repair and maintenance of public roads financed from the budget are to ensure that their cost is determined in accordance with the principles of market pricing and using free prices, timely and correct settlements, as well as meeting all deadlines and high-quality road works and services. That is why the pricing model, taking into account its peculiarities, needed to be improved and brought in line with modern European norms and standards. At the same time, the approach to determining the cost of future investment projects

for new construction, reconstruction, repair and maintenance of public roads should be based on uniform rules and methods that are formed taking into account state, territorial, public and private interests.

Purpose. Changes in the pricing system in the road sector will allow to: ensure a transparent and competitive environment in the market of road works and services, resulting in lower costs for new construction, reconstruction, overhaul and current repairs, and operational maintenance of roads; accelerate the implementation of new projects, as well as increase their number, which will significantly contribute to the development of road infrastructure in Ukraine, positively affect the economy, improve the standard of living of citizens, and attract investment.

Materials and methods. The beginning of the reform of the current pricing system in Ukraine was the adoption of the Law of Ukraine dated 16.11.2021 No. 1881-IX «On Amendments to Certain Laws of Ukraine on the Transfer of Powers to Regulate Pricing in the Field of Public Road Construction» [1], which entered into force on 10.12.2021. The above Law stipulates that the development and approval of methods and rules for determining the cost of new construction, reconstruction, repair and maintenance of public roads is carried out by the central executive body that ensures the formation and implementation of state policy in the field of road economy. The Law of Ukraine «On Investment Activity» [2] and the Law of Ukraine «On Prices and Pricing» [3] were also amended accordingly.

An important stage in the pricing reform was the approval of the Order of the Ministry of Infrastructure of Ukraine No. 273 dated 02.05.2022 «On Approval of the Rules for Determining the Cost of Construction, Reconstruction, Repair and Maintenance of Public Roads» (hereinafter – the «Rules»), which are mandatory for determining the cost of road works and services financed from the budget, funds of state and municipal enterprises, institutions and organizations, as well as loans provided under state guarantees. The defined conceptual principles, general rules and concepts in the Rules formed the basis for the development and approval of the Methodology for determining the cost of road works and services.

Results. Effective implementation of the priority areas of improvement of the pricing system in the road sector allowed to change the approaches to determining the cost of road works and services. The new pricing system is well-structured, which will ensure transparency and a competitive environment in the road works and services market, as it is based on clearly defined criteria and standards. Thus, the advantages of the new pricing system in the road sector are the use of innovations that can ensure effective calculations in determining the cost of road works and services at new facilities. As a result, budgetary savings will be achieved.

Conclusions. The introduction of a new pricing system in the road industry is quite relevant today, as the innovations provided for by the Methodology determine a new order of relations between the Customer and the Contractor, where the scope, quality, timing of road works and services, and compliance with the project documentation come to the fore. The key innovations in pricing approaches are: a firm contract price based on aggregate indicators of the cost of works; the possibility of using price databases with the establishment of requirements for them and an improved mechanism for determining prices for material resources when preparing investment estimate documentation; a transparent and clear mechanism for forming a reserve of funds to cover additional costs associated with inflationary processes and funds to cover the risks of all participants in road works and services.

***Keywords:*** road works and services, bill of quantities (BoQ), pricing system.

https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.019

**УДК 338.5:625.7/.8**

**Безуглий А. О.**, *канд. екон. наук, доц., https://orcid.org/0000-0003-3883-7968*
**Каськів В. І.**, *канд. техн. наук, доц., https://orcid.org/0000-0002-8074-6798*
**Стасюк Б. О.**, *доктор філософії з економіки, https://orcid.org/0000-0003-2504-6577*
**Ілляш С. І.**, *канд. техн. наук, https://orcid.org/0000-0002-3001-8012*
**Бібик Ю. М.**, *канд. екон. наук, https://orcid.org/0000-0002-7197-8909*

*Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (ДП «ДержДорНДІ»), м. Київ, Україна*

# ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ТА МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРУ ШКОДИ ТА ЗБИТКІВ, ЗАВДАНИХ АВТОМОБІЛЬНИМ ДОРОГАМ ВНАСЛІДОК ЗБРОЙНОЇ АГРЕСІЇ

***Анотація***

Вступ. Внаслідок широкомасштабного збройного нападу на суверенну територію України та проведення активних бойових дій більшість об'єктів військового, цивільного та інфраструктурного призначення зазнали суттєвих руйнувань або пошкоджень. У таких умовах важливо мати методичні підходи до визначення розміру завданої шкоди внаслідок проведення бойових дій і подальшого економічного оцінювання нанесеної шкоди.

Проблематика. Розгляд даної тематики полягає у необхідності чітко визначити методичні підходи до визначення розміру шкоди та збитків, завданих автомобільним дорогам внаслідок проведення активних бойових дій.

Мета. Сформувати методичні підходи до визначення розміру завданої шкоди внаслідок проведення бойових дій і подальшого її економічного оцінювання. Від детальності та обґрунтованості методичного підходу залежить допустимість достовірності проведення розрахунку та визначення розміру збитків. Для реалізації цього завдання необхідно встановити дефініції понять «шкода» та «збитки», оскільки це різні поняття і мають бути чітко зрозумілі усім фахівцям, які будуть оцінювати величину збитків.

Матеріали та методи. У статті використовується системний підхід, який представляє собою сукупність загальнонаукових методологічних принципів (вимог), в основі яких лежить розгляд об'єктів як систем. Пріоритетом здійснення цього процесу є забезпечення належного рівня об'єктивності даних, своєчасність та актуальність опрацьованої інформації.

Із використанням методів аналізування та синтезування у цій статті запропоновано визначення окремих понять і сформульовано методичні підходи до визначення розміру шкоди та збитків.

Результати. Застосування методичних підходів, наведених у цій статті, дозволять документально зафіксувати, розрахувати та обґрунтувати розмір шкоди та збитків, завданих автомобільним дорогам внаслідок збройної агресії. Даний розрахований розмір шкоди та збитків може слугувати у подальшому підставою для формування потреб Фонду репарацій від сторони-агресора до сторони, яка постраждала внаслідок бойових дій. Запропоновані методичні підходи можуть бути використані під час визначення шкоди та збитків, завданих Україні внаслідок збройної агресії російської федерації, яке здійснюється з урахуванням інших документів, затверджених на рівні Кабінету Міністрів України та центральних органів виконавчої влади України.

Висновки. У цій статті на основі вивчення сучасної практики, літературних і наукових джерел розмежовано та чітко визначено дефініції «шкода» та «збитки». Сформовано алгоритм

дій балансоутримувачів автомобільних доріг, які були зруйновані або пошкоджені внаслідок збройної агресії. Для цілей даної статті запропоновано збитки від зруйнованих або пошкоджених автомобільних доріг класифікувати на прямі та непрямі. Методичні підходи до визначення розміру завданої шкоди внаслідок проведення бойових дій і подальшого економічного оцінювання нанесеної шкоди сформовані з урахуванням сучасних управлінських європейських принципів.

***Ключові слова:*** бойові дії, вартість відновлення, відновлення, збитки, збройна агресія, руйнування, соціально-економічні втрати, оцінювання, фінансування, Фонд репарацій, шкода.

## Вступ

Для встановлення методичних підходів до визначення розміру завданих збитків внаслідок проведення бойових дій та подальшого економічного оцінювання таких збитків необхідно встановити дефініції понять «шкода» та «збитки», оскільки це різні поняття та мають бути чітко зрозумілі усім фахівцям, які будуть визначати розмір збитків та оцінювати величину збитків з метою подальшого визначення суми репарацій.

Так, у роботах різних науковців наводяться різні приклади щодо підходів до визначення понять «шкода» та «збитки»: деякі науковці розглядають їх як синоніми, інші навпаки – розмежовують, наприклад, шкода – це родове поняття негативних майнових наслідків правопорушення, а збитки – це натурально-речова форма виявлення шкоди, якій відповідає один із встановлених в законі способів її відшкодування – відшкодування в натурі (надання речі того ж роду, тієї ж якості чи виправлення пошкодженої речі тощо) [1].

Шкода у цивільному праві розуміється як знищення або зменшення особистого чи суспільного блага. Шкода може бути заподіяна не тільки майну, але й особі людини або діловій репутації юридичної особи. Шкоду можна відшкодувати в натурі, шляхом надання речі того ж роду і якості, виправлення пошкоджень, спростування відомостей, що ганьблять ділову репутацію, компенсації моральної шкоди, а також відшкодування збитків [1].

Від поняття «шкода» слід відрізняти поняття «збитки», які є економічним (вартісним, грошовим) еквівалентом завданої майнової шкоди. Так, у науковій літературі зазначається, що збитки мають подвійну правову природу, адже вони є економічною і юридичною категорією. Проте не будь-які економічні (майнові) збитки набувають ознак юридичної категорії [1, 2].

Поняття «збитки» можливо розглядати не тільки в економічному, а і в юридичному значенні. Як зазначають науковці, дані поняття у юридичній науці не розглядаються як тотожні, але є взаємопов'язаними. «Чистими» економічними збитками вважають негативні наслідки у формі зменшення майнових благ як обумовлені, так і не обумовлені діяльністю фізичних чи юридичних осіб, за настання яких не наступає примусовий обов'язок третіх осіб їх відшкодувати чи компенсувати [3].

Існує думка, якщо економічне розуміння збитків – це зменшення майна, то економічне і юридичне поняття збитків взаємопов'язане, але має різне навантаження за суттю. Так, економічна сутність збитків означає, що для потерпілої особи настають негативні наслідки у вигляді додаткових майнових втрат або неотриманих доходів, які мали б бути отримані за звичайних обставин [4].

Тому незважаючи на наявні результати в наукових дослідженнях інших учених, продовжує існувати необхідність в чіткому розмежуванні дефініцій понять «шкода» та «збитки», а тому авторами для мети даної статті пропонується таке.

Шкода – це результат візуального та/або інструментального обстеження обсягів зруйнованих або пошкоджених внаслідок збройної агресії автомобільних доріг, для яких було зафіксовано відхилення техніко-експлуатаційних показників від вимог проєктної документації, будівельних норм, нормативних і технічних документів тощо.

Шкоду визначають у загальних кількісних і матеріальних вимірах (км, м$^2$, п.м., шт., од. тощо) для автомобільних доріг (та її окремих елементів), як прийнятих в експлуатацію, так і тих, щодо яких будівельні та / або ремонтні роботи не були завершені.

Збитки – це результат економічного оцінювання в грошовому вимірі нанесеної шкоди автомобільним дорогам, що виражається через визначення розміру: витрат, необхідних для відновлення зруйнованих або пошкоджених об'єктів; упущеної вигоди від відсутності можливості користування об'єктом; доходів, які були б одержані, якби не відбулося такої руйнації чи пошкодження.

Виходячи із цих дефініцій понять доцільно зафіксувати, що шкода визначається в натуральних показниках і слугує основою для подальшого економічного оцінювання збитків в грошовому вимірі. У подальшому окремо розглянемо методичні підходи до визначення розміру шкоди та оцінювання розміру збитків.

**Мета й задання роботи**. Сформувати методичні підходи до визначення розміру завданої шкоди внаслідок проведення бойових дій і подальшого її економічного оцінювання. Від детальності та обґрунтованості методичного підходу залежить допустимість достовірності проведення розрахунку та визначення розміру збитків.

## Основна частина

У рамках даної статті розмір шкоди пропонується визначати за результатами інвентаризації, огляду/обстеження зруйнованих або пошкоджених автомобільних доріг, проведеного відповідно до законодавства [5, 6] та за підсумками суцільної інвентаризації. Величина шкоди встановлюється в натуральних одиницях (км, пог.м, од., шт. тощо), наприклад, протяжність зруйнованих або пошкоджених автомобільних доріг та їх складових, можливо – інших об'єктів транспортної інфраструктури.

Для встановлення розміру шкоди необхідно діяти за алгоритмом (**рис. 1**).

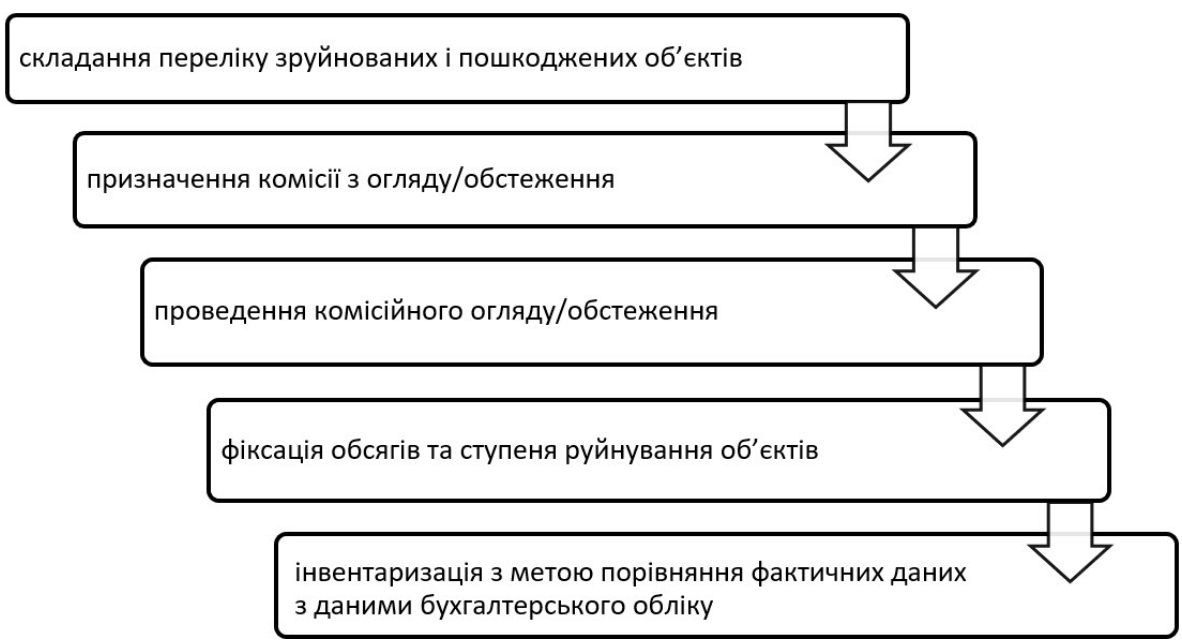



***Рисунок 1*** – Алгоритм дій балансоутримувача об'єктів, які були зруйновані або пошкоджені внаслідок збройної агресії

Перелік зруйнованих і пошкоджених автомобільних доріг, інших об'єктів доцільно складати на підставі фото та відео документальних свідчень. Крім цього, балансоутримувачу рекомендується провести інвентаризацію правовстановлюючих документів на автомобільні дороги, які знаходяться на його балансі та належать йому на праві господарського відання. У разі виявлення втрати правовстановлюючих документів негайно мають вживатись заходи з їх відновлення або дублювання.

Склад комісії з огляду/обстеження має призначатись балансоутримувачем об'єкту, серед якого мають бути атестовані відповідальні виконавці з проєктування, експертизи та обстеження в будівництві. Крім цього, рекомендовано залучення також представників місцевих органів влади, Збройних Сил України, Державної служби з надзвичайних ситуацій, Національної поліції, базової організації з науково-технічної діяльності у будівництві, громадськості тощо.

У ході комісійного огляду/обстеження має бути встановлений факт руйнування або пошкодження автомобільної дороги із фіксацією в одиницях фізичних величин, просторовою та лінійною прив'язкою, фото/відео фіксацією, визначенням геометричних параметрів руйнувань або пошкоджень у прив'язці до кожного конструктивного елементу з детальним описом.

Для оцінювання ступеня руйнування або пошкодження автомобільної дороги внаслідок впливу засобів ураження, пропонується застосовувати експрес-шкалу оцінювання. Ступінь руйнування об'єкта при цьому поділяти на сильні руйнування, середні та слабкі. Для цілей даної статті приймається, що за сильних руйнувань об'єкта обсяг відновлення буде дорівнювати 100 % від величини розрахункової одиниці об'єкта, за середніх руйнувань — до 50 %, за слабких — до 30 %. Відповідно ступінь руйнування об'єкта враховується коефіцієнтами руйнування ($k$): для сильного ступеня руйнування $k = 1{,}0$; для середнього $k = 0{,}5$; для слабкого $k = 0{,}3$.

Враховуючи результати досліджень різних вчених [7-13], для цілей даної статті збитки від зруйнованих або пошкоджених внаслідок збройної агресії автомобільних доріг будуть включати в себе прямі та непрямі збитки.

Прямі збитки

Прямі збитки пропонується оцінювати у грошовому вираженні як витрати на повне відновлення автомобільної дороги за умови збереження всіх її технічних характеристик і властивостей та визначати за формулою:

$$DL = \sum ((V_n \cdot P_n) \cdot k_n + D_n + DC_n + TC_n + BV_n), \quad (1)$$

де $DL$ – (Direct Losses) прямі збитки від зруйнованих або пошкоджених внаслідок збройної агресії автомобільних доріг, грн;

$V_n$ – (Value) розмір шкоди від n-ої зруйнованої або пошкодженої автомобільної дороги в одиницях фізичних величин, км, пог.м, од., шт. тощо;

$P_n$ – (Price) вартість відновлення одиниці $n$-ої зруйнованої або пошкодженої автомобільної дороги, грн/км, грн/пог.м, грн/од., грн/шт. тощо;

$k_n$ – коефіцієнт руйнування $n$-ого об'єкта (сильний ступінь руйнування $k = 1{,}0$; середній $k = 0{,}5$; слабкий $k = 0{,}3$);

$D_n$ – (Design) витрати на обстеження, проєктування (у тому числі інженерні вишукування) та експертизу проєктної документації відновлення $n$-ої зруйнованої або пошкодженої автомобільної дороги;

$DC_n$ – (Disposal Construction) витрати на розбирання та утилізацію конструкцій $n$-ого зруйнованого або пошкодженого об'єкта та очищення від них території (за наявності);

$TC_n$ – (Temporary Construction) витрати на розроблення та впровадження заходів щодо влаштування тимчасових споруд на період відновлення $n$-ої зруйнованої або пошкодженої автомобільної дороги (за необхідності), грн;

$BV_n$ – (Balance Value) залишкова балансова вартість $n$-ої зруйнованої або пошкодженої автомобільної дороги на дату руйнування або пошкодження, грн;

$n$ – відповідна автомобільна дорога.

Ціна відновлення одиниці знищеної або пошкодженої автомобільної дороги може визначатись на підставі розрахунку кошторисної вартості повного комплексу робіт на будівництво нової, аналогічної за техніко-експлуатаційними параметрами, автомобільної дороги.

Кошторисна вартість робіт із нового будівництва автомобільної дороги може бути розрахована в поточному рівні цін за укрупненими показниками вартості робіт на підставі альбомів типових проєктних рішень (проєктів повторного використання) для відновлення об'єкта або на основі інформації з бази даних об'єктів.

Для об'єктів, які отримали повний або середній ступінь руйнування, додатково розраховують кошторисну вартість витрат на розроблення та впровадження заходів щодо улаштування тимчасових споруд на період відновлення відповідної автомобільної дороги (облаштування об'їзних або паралельних доріг, перенесення залізничних шляхів, улаштування тимчасових мостів, переведення ліній електропередач на інші підстанції тощо).

Залишкову балансову вартість знищеної або пошкодженої автомобільної дороги на дату руйнування або пошкодження визначають за результатами проведеної інвентаризації та звірки з даними бухгалтерського обліку.

Непрямі збитки

Економічне оцінювання непрямих збитків полягає у визначенні додаткових витрат ресурсів у зв'язку із порушенням принципів оптимальності маршруту (мінімальні втрати часових, паливно-мастильних, людських та інших ресурсів) і визначаються за формулою:

$$IL = \sum TF_n \cdot C_n \cdot t_n \cdot \Delta l_n, \tag{2}$$

де $IL$ – (Indirect Losses) непрямі збитки від зруйнованих або пошкоджених внаслідок збройної агресії автомобільних доріг, грн;

$TF_n$ – (Transport Flow) розрахункова середньорічна добова інтенсивність руху транспортних потоків вантажів та пасажирів, що переміщується $n$-им видом транспорту, у розрахунку на одну добу, т/км або осіб/км;

$C_n$ – (Cost) собівартість перевезень для $n$-их видів транспорту в розрахунку на одну добу, грн/т або грн/осіб;

$t_n$ – (Time) час необхідності використання неоптимального маршруту для $n$-их видів транспорту в розрахунку на одну добу;

$\Delta l_n$ – (Length) зміна протяжності від оптимального маршруту до фактичного, км;

$n$ – окремий вид транспорту.

Непрямі збитки від зруйнованих або пошкоджених внаслідок збройної агресії автомобільних доріг та їх складових оцінюють за додатковими витратами користувачів доріг на об'їзд ділянки дороги, яка виведена з експлуатації з причини руйнування або пошкодження, за період, необхідний для відновлення зручного та безпечного руху на такій ділянці.

Додаткові витрати як непрямі збитки можуть включати в себе складові згідно з **рис. 2**:

***Рисунок 2*** – Складові додаткових витрат як непрямих збитків від об'єктів, які були зруйновані або пошкоджені внаслідок збройної агресії

Розрахункові суми завданих збитків доцільно конвертувати в іншу валюту з використанням офіційного курсу НБУ на дату завершення складання таких розрахунків для уникнення впливу коливань курсу гривні в умовах воєнного стану. Такі суми наводять поряд із сумами у гривнях та можуть використовуватись, у подальшому, для обчислення обсягів фінансових ресурсів, необхідних для планування відбудови автомобільних доріг.

Під час обчислення вартості повного відновлення об'єкта потрібно враховувати їх кращі зразки, перспективу їхньої довготривалої експлуатації та необхідність відповідності стандартам створення та експлуатації, які застосовують до таких об'єктів у європейських країнах.

## Висновки

На основі вивчення сучасної практики, літературних та наукових джерел розмежовано та чітко визначено дефініції «шкода» та «збитки». Сформовано алгоритм дій балансоутримувачів об'єктів, які були зруйновані або пошкоджені внаслідок збройної агресії. Запропоновано збитки від зруйнованих або пошкоджених автомобільних доріг класифікувати на прямі та непрямі. Методичні підходи до визначення розміру завданої шкоди внаслідок проведення бойових дій та подальшого економічного оцінювання нанесеної шкоди сформовані з урахуванням сучасних управлінських європейських принципів.

Застосування запропонованих в цій статті методичних підходів дозволить зафіксувати, розрахувати та обґрунтувати розмір шкоди та збитків. Даний розрахований розмір шкоди та збитків може слугувати в подальшому підставою для формування потреб Фонду репарацій від сторони-агресора до сторони, яка постраждала внаслідок бойових дій. Запропоновані в цій статті методичні підходи можуть бути використані під час визначення шкоди та збитків, завданих Україні внаслідок збройної агресії російської федерації, яке здійснюється з урахуванням інших документів, затверджених на рівні Кабінету Міністрів України та центральних органів виконавчої влади України.

## Список літератури


1. Митрофанов, І. І., Т. В. Гайкова. «Шкода» та «збитки»: співвідношення понять. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського.* Кременчуг, 2012. Вип 3.74. С. 196–200.
2. Donchyk, M. P., and I. F. Koval. Щодо поняття і складу збитків. *Вісник студентського наукового товариства ДонНУ імені Василя Стуса.* Донецьк, 2018. Вип.10. С. 31–36.
3. Подколзін І. В. Збитки та їх відшкодування в договірному праві України : автореф. дис. … канд. юрид. наук : 12.00.03. Київ, 2009. 22 с.
4. Крисань Т. Є. Збитки як категорія цивільного права України : автореф. дис. … канд. юрид. наук : 12.00.03. Одеса, 2008. 21 с.
5. Про регулювання містобудівної діяльності: Закон України від 17.02.2011 № 3038 – IV, редакція від 02.07.2023 № 3141 – IX // База даних Законодавство України / Верховна рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17#Text (дата звернення: 24.09.2023).
6. Постанова Кабінету Міністрів України: Про затвердження Порядку проведення обстеження, прийнятих в експлуатацію об'єктів будівництва від 12.04.2017 № 257 // База даних Законодавство України / Верховна рада України.URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/257-2017-%D0%BF#Text (дата звернення: 24.09.2023).
7. Stasiuk B.O., Bezuglyi A.O., Kontseva V.V. The rationale of the safety index for estimation of socio-economic costs of road accidents. *Rivista di Studi sulla Sostenibilita'*. 2020(2). P. 129–140. DOI 10.3280/RISS2020-002-S1010.
8. Pechonchyk, Taras I., Kontseva, Valentyna V., Bezuglyi, Artem A. Improvement of the Organizational and Economic Mechanism of Financing in the Road Economy. *Journal of Advanced Research in Law and Economics*, [S.l.]. 2019. V. 10, n. 4. P. 1110–1119. DOI: https://doi.org/10.14505//jarle.v10.4(42).12.
9. Безуглий А.О., Концева В.В., Стасюк Б.О. Теоретичні аспекти визначення показника соціально-економічних втрат від дорожньо-транспортних пригод. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Економічні науки»*. Київ, 2019. Вип. 2 (44). С. 11–18.
10. Безуглий А.О., Концева В.В., Стасюк Б.О. Концептуальні засади визначення та обґрунтування розміру соціально-економічних втрат від дорожньо-транспортних пригод. *Дороги і мости*. Київ, 2020. Вип. 21. С. 18–27. DOI: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.21.018.
11. Безуглий А.О. Оцінка соціально-економічних втрат від дорожньо-транспортних пригод. *Управління проектами, системний аналіз і логістика*. Київ, 2013. Вип. 12. С. 231–238. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Upsal_2013_12_28 (дата звернення: 24.09.2023).
12. Долженкова О.В., Уварова К.В. Прогнозування соціально-економічних втрат від дорожньо-транспортних пригод. *Наукове електронне (онлайн) видання Молодіжний науковий вісник ДНУ ім. О. Гончара. Серія: Економічні науки*. Вип. 4 (14)/2016. С. 89–98.
13. Рингач Н.О. Оцінка безповоротних демографічних втрат, спричинених смертністю в результаті транспортних нещасних випадків в Україні / Демографія та соціальна економіка. Київ, 2017. № 2 (30). С. 61–77. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/dse_2017_2_6 (дата звернення: 24.09.2023).


## References


1. Mytrofanov, I. I., and T. V. Haikova. «Shkoda» ta «zbytky»: spivvidnoshennia poniat ["Damage" and "damages": relationship of concepts.]. *Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho*. Kremenchuh, 2012. Iss. 3.74 (2012). P. 196–200 [in Ukrainian].
2. Donchyk, M. P., and I. F. Koval. Shchodo poniattia i skladu zbytkiv [Regarding the concept

and composition of damages]. *Visnyk studentskoho naukovoho tovarystva DonNU imeni Vasylia Stus*a. Donetsk, 2018. Iss.10. P. 31–36 [in Ukrainian].

3. Podkolzin I. V. Zbytky ta yikh vidshkoduvannia v dohovirnomu pravi Ukrainy [Damages and their compensation in the contract law of Ukraine]: Extended abstract of PhD dissertation: 12.00.03. Kyiv, 2009. 22 p. [in Ukrainian].

4. Krysan T. Ye. Zbytky yak katehoriia tsyvilnoho prava Ukrainy [Damages as a category of civil law of Ukraine] : Extended abstract of PhD dissertation : 12.00.03. Odesa, 2008. 21 p. [in Ukrainian].

5. Pro rehuliuvannia mistobudivnoi diialnosti: Law of Ukraine of 17.02.2011 № 3038 – IV, edition of 02.07.2023 № 3141 – IKh // Database of Legislation of Ukraine / Verkhovna Rada of Ukraine. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17#Text (Last accessed: 24.09.2023) [in Ukrainian].

6. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy: Pro zatverdzhennia Poriadku provedennia obstezhennia, pryiniatykh v ekspluatatsiiu obiektiv budivnytstva vid 12.04.2017 № 257 // Database of Legislation of Ukraine / Verkhovna Rada of Ukraine. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/257-2017-%D0%BF#Text (Last accessed: 24.09.2023) [in Ukrainian].

7. Stasiuk B.O., Bezuglyi A.O., Kontseva V.V. The rationale of the safety index for estimation of socio-economic costs of road accidents. *Rivista di Studi sulla Sostenibilitathis link is disabled*. 2020(2). P. 129–140 [in English].

8. Pechonchyk, Taras I., Kontseva, Valentyna V., Bezuglyi, Artem A. Improvement of the Organizational and Economic Mechanism of Financing in the Road Economy. *Journal of Advanced Research in Law and Economics*, [S.l.]. 2019. V. 10, n. 4. P. 1110–1119. DOI: https://doi.org/10.14505//jarle.v10.4(42).12 [in English].

9. Bezuhlyi A.O., Kontseva V.V., Stasiuk B.O. Teoretychni aspekty vyznachennia pokaznyka sotsialno-ekonomichnykh vtrat vid dorozhno-transportnykh pryhod [Theoretical aspects of determining the indicator of socio-economic losses from traffic accidents]. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu. Seriia «Ekonomichni nauky»*. Kyiv, 2019. Iss. 2 (44). P. 11–18 [in Ukrainian].

10. Bezuhlyi A.O., Kontseva V.V., Stasiuk B.O. Artem Bezugliy, Valentyna Kontseva, Bohdan Stasiuk. The conceptual background of determination and the reasoning of size of socio-economic losses from road accidents. *Dorogi i mosti [Roads and bridges]*. 2020. Iss. 21. P. 18–27. DOI: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.21.018 [in Ukrainian].

11. Bezuhlyi A.O. Otsinka sotsialno-ekonomichnykh vtrat vid dorozhno-transportnykh pryhod [Assessment of socio-economic losses from traffic accidents]. *Upravlinnia proektamy, systemnyi analiz i lohistyka*. Kyiv, 2013. Iss. 12. P. 231–238. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Upsal_2013_12_28 (Last accessed: 24.09.2023) [in Ukrainian].

12. Doljenkova O.V., Uvarova K.V. Prognozuvanny asocialno-economichnykh vtrat vid dorozhnyo-transportnykh prygod [Prognostication of the socio-economic costs of road accidents]. *Naukove elektronne (onlain) vydannia Molodizhnyi naukovyi visnyk DNU im. O. Honchara. Seriia: Ekonomichni nauky*. Dnipropetrovsk, 2016. 4 (14). P. 89–98 [in Ukrainian].

13. Ryngach N. O. Otsinka bezpovorotnykh demografichnykh vtrat, sprychynenykh smertnistu vrezultati transportnykh neshchasnykh vypadkiv v Ukraini [Estimation of irrevocable demographic losses caused by mortality in transport accidents in Ukraine]. *Demografiâ ta socìal'na ekonomìka*. 2017, Kyiv. V. 2 (30). P. 61–77. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/dse_2017_2_6 (Last accessed: 24.09.2023) [in Ukrainian].

**Artem Bezuglyi**, *Ph.D., Associate Prof., https://orcid.org/0000-0003-3883-7968*
**Volodymyr Kaskiv**, *Ph.D., Associate Prof., https://orcid.org/0000-0002-8074-6798*
**Bohdan Stasiuk**, *Ph.D., https://orcid.org/0000-0003-2504-6577*
**Serhii Illiash**, *Ph.D., https://orcid.org/0000-0002-3001-8012*
**Yulia Bibyk**, *Ph.D., https://orcid.org/0000-0002-7197-8909*
*M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, Kyiv, Ukraine*

# THEORETICAL ASPECTS AND METHODOLOGICAL APPROACHES TO DETERMINING THE AMOUNT OF DAMAGE AND LOSSES CAUSED TO ROADS AS A RESULT OF ARMED AGGRESSION

***Abstract***

Introduction. As a result of a large-scale armed attack on the sovereign territory of Ukraine and active hostilities, most of the military, civilian and infrastructure facilities have been significantly destroyed or damaged. In such circumstances, it is important to have methodological approaches to determining the amount of damage caused by hostilities and further economic assessment of the damage.

Problem Statement. Consideration of this topic is the need to clearly define methodological approaches to determining the amount of damage and losses caused to roads as a result of active hostilities.

Purpose. To formulate methodological approaches to determining the amount of damage caused by hostilities and further economic assessment of the damage caused. The accuracy and validity of the methodological approach determines the admissibility of the reliability of the calculation and determination of the amount of funds. To accomplish this task, it is necessary to establish definitions of the concepts of "damage" and "losses", since these are different concepts and should be clearly understood by all professionals who will assess the amount of damage.

Materials and methods. The article uses a systematic approach, which is a set of general scientific methodological principles (requirements) based on the consideration of objects as systems. The priority of this process is to ensure an adequate level of data objectivity, timeliness and relevance of the processed information.

Using the methods of analysis and synthesis, this article proposes definitions of certain concepts and formulates methodological approaches to determining the amount of damage and losses.

Results. The application of the methodological approaches presented in this article will allow documenting, calculating and substantiating the amount of damage and losses caused to roads as a result of armed aggression. This amount of damage and losses, calculated using the methods presented in this article, may serve as a basis for further forming the needs of the Reparations Fund from the aggressor party to the party affected by the hostilities. The methodological approaches proposed in this article can be used in determining the damage and losses caused to Ukraine as a result of the armed aggression of the Russian Federation, which is carried out taking into account other documents approved by the Cabinet of Ministers of Ukraine and central executive authorities of Ukraine.

Conclusions. In this article, based on the study of modern practice, literature and scientific sources, the definitions of "damage" and "losses" are distinguished and clearly defined. An algorithm of actions of the balance holders of highways which were destroyed or damaged as a result of armed aggression is formed. For the purposes of this article, the author proposes to classify losses from destroyed or damaged highways into direct and indirect losses. The methodological approaches to determining the amount of damage caused as a result of hostilities and further economic assessment of the damage caused are formed with due regard for modern European management principles.

***Keywords:*** hostilities, cost of restoration, recovery, losses, armed aggression, destruction, socio-economic losses, assessment, financing, Reparations Fund, damage.

https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.028

**UDC 658.7.011.1:001.2**

**Andrii Ivko**, *Ph.D., https://orcid.org/0000-0002-3388-8355*
*State Agency for Restoration and Development of Infrastructure of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

# MODELS OF THE PROJECT MANAGEMENT SYSTEM FOR THE DEVELOPMENT OF SELF-MANAGED ORGANIZATIONS IN THE PORTFOLIOS OF INFRASTRUCTURE RENEWAL PROJECTS OF UKRAINE

***Abstract***

Introduction. The recovery of Ukraine from the consequences of the full-scale aggression of the russian federation requires the implementation of a whole set of projects, programs and project portfolios. At the same time, the task of choosing a management methodology for such projects is urgent. The analysis of methodological trends shows that the fourth stage of the development of methodological structures is currently underway - from the use of one methodology, through the development of the Agile methodology and the use of management of project collections (programs, portfolios) – project-oriented organizations began to use methodological mixes. As an expedient, it is proposed to investigate the syncretic principle and the corresponding methodology of managing projects, programs and portfolios of projects. This methodology is aimed at solving the urgent problems of creating and developing the methodology of management of restoration projects and is not sufficiently researched.

Problem statement. Projects and portfolios of infrastructure restoration projects of Ukraine are implemented by a large number of participants representing different countries, different management cultures and different project management methodologies. One of the prerequisites for the success and efficiency of restoration projects is the creation of a new methodology that would ensure efficiency in such conditions, to which is added the trend of using by organizations the principles of self-management.

Purpose. Development of project management system models of the development of self-managed organizations in portfolios of infrastructure restoration projects of Ukraine in the context of the development of syncretic project management methodology.

Materials and methods. To achieve the goal, the following models and methods were used: the general scientific method of analysis and synthesis, models and methods of the scientific direction of project and program management, the method of building classification models, set theory. Materials for the analysis were projects and restoration portfolios, the implementation of which is overseen by the State Agency for the Restoration of Infrastructure of Ukraine (SARDI).

The results. The article sets the task of developing models of the project management system for the development of self-managed organizations in the portfolios of infrastructure restoration projects in Ukraine. The relevance of this task are founded. Models of guiding principles of self-managed organizations have been formulated. A classification model of self-managed organizations is proposed. A model of classification of projects of self-managed organizations is created. The conceptual model of the management system of development projects of self-managed organizations is proposed and presented in set form. Prospects for further research in the chosen direction are outlined.

Conclusions. Effective management of projects, portfolios and programs for the restoration of Ukraine in the context of the reconstruction of infrastructure facilities is an urgent practical task that requires the development and research of new scientific approaches. Taking into account the analysis of modern trends in the development of organization management systems and project management systems, a syncretic approach is proposed as such an approach. Within this approach, models of the project management system for the development of self-managed organizations in the portfolios of infrastructure restoration projects of Ukraine are proposed and described. The use of these models is

intended to streamline and systematize the management system of restoration projects and increase its transparency, flexibility and efficiency.

***Keywords:*** infrastructure restoration projects, project and program management, project management methodology, self-managed organization, syncretic methodology.

## Introduction

The conceptual principles of the post-war recovery and development of Ukraine, defined by the President of Ukraine [1], require the implementation of relevant projects, portfolios and infrastructure restoration programs. Effective management of projects, portfolios and programs for the restoration of Ukraine in the context of reconstruction of infrastructure facilities, in turn, is an urgent practical task that requires research and development of new scientific approaches for its solution. The first example of the application of such approaches can be considered the Great Construction of the President of Ukraine [2], which began even before the beginning of the full-scale aggression of the russian federation. During the Great Construction, innovative approaches to project and program management were tested, particularly in the field of road construction. These approaches are currently being further refined, which will be discussed in this article. Significant scale of restoration [3] will require fast, high-quality and effective implementation of the relevant projects, and therefore will require effective management methodologies that would ensure flexibility, proactivity and strict control over the spending of funds.

In the study of the development of project and program management methodologies, it is possible to trace the evolutionary vector of the use of increasingly complex methodological structures.

The first step of evolution should be considered the use of separate project management standards to create the appropriate corporate methodology. In particular, the PMBOK standard [4] of the American Institute of Project Management PMI, due to the fact that this standard appeared first in the project world. After the appearance of other standards, project-oriented organizations faced the task of choosing the most effective and most adequate standard to build their own corporate project management methodology on its basis [5].

The second step in the evolution should be considered the emergence of a flexible IT project management methodology, the use of which quickly spread beyond the IT industry. The so-called Agile methodology proposed new principles of project implementation by small teams in close cooperation with customers for short product creation iterations [6]. Such a concept turned out to be the one that meets the conditions of accelerated digitalization and acceleration of changes both in the project environment and within projects.

In the third step, which took place almost simultaneously with the second (several years later), multi-project management appears, when project-oriented organizations have reached the understanding that development tasks are not solved by individual isolated projects, but only by their aggregates - project programs, project portfolios. Therefore, methodologies and standards of program management and portfolio management began to appear. Until now, only the American Institute of Project Management has already issued the fourth edition of the relevant standards - regarding programs [7] and portfolios [8].

Currently, we can identify the fourth stage of the evolution of project management methodologies. This stage can be associated with the selection of a certain mix (complex, hybrid, convergence) of methodological solutions, which should be the basis of the corporate methodology of project management for self-managed organizations. The first step in this took place in connection with efforts to combine the classical project management methodology and the Agile methodology [9]. It should be noted that in the practice of modern projects (especially in the field of infrastructure and infrastructure restoration) it is quite common, and the results of such a combination are quite successful.

Further research in the field of combining several standards (or methodologies) within one corporate project management system developed in the direction of the analysis of both those

methodologies that are combined, and in the direction of the analysis of the principles of combination. From a simple mixing of methodologies (mix) to a mosaic of elements of different methodologies in a corporate methodology.

The application of such methodological combinations specifically for infrastructure projects, programs and project portfolios was carried out in works [10, 11].

A syncretic approach should be considered a separate method of combining different standards and methodologies in one corporate project management methodology. This approach is called the use of certain properties by individual elements of the system without mixing such properties at the system level. In the case, for example, of syncretic project portfolio management methodology, this approach means that individual portfolio projects use their own management methodology. This approach is justified in the portfolios of infrastructure restoration projects, since the implementation of such projects is planned to involve (and is already involved) participants from various countries that have agreed to help Ukraine in reconstruction. A distinctive feature of most organizations is to preserve their management culture and bring it to the projects they implement. Moreover, it is precisely within the established culture and management methodology that has developed over the years in organizations that they achieve the greatest success. Therefore, the restoration project portfolio management system should have the property of allowing individual participants to use their methodological developments within their projects (or their parts of one project). Research in this direction is related to the works of the author, in particular [12].

Another trend that should be taken into account when developing models and methods of corporate project management methodology by participants in restoration projects is the trend of applying the principles and approaches of self-management in management systems. In accordance with this trend, a new type of organization began to appear, based on new principles - so-called self-managed organizations. It is believed that self-management helps management systems become more efficient, so it can be assumed that self-managed organizations will increasingly become participants in recovery projects.

Therefore, the context of this study is the implementation of projects and portfolios of infrastructure restoration projects by self-managed organizations that implement (or potentially can implement) their activities based on syncretic principles or syncretic project management methodology.

## Main part

We will investigate the specifics of managing projects, programs and project portfolios in self-managed organizations in order to consider ways to increase the effectiveness of the involvement of such organizations in project activities for the restoration and reconstruction of infrastructure objects of Ukraine.

The emergence of the phenomenon, and then the term “self-managed organization”, comes from research in the direction of “spiral dynamics” of organizational development and, above all, the work of F. Laloux [13], where the next stage of organizational development is defined as a new type of organization - “turquoise organizations”. The main characteristics of such organizations are self-management, and the characteristics of employees are self-motivation. Somewhat later, similar ones were developed in the context of holistic management or holacracy [14].

Let’s identify and characterize the main features of self-managed organizations and analyze them. Let’s carry out such an analysis in the form of formulating a model of the guiding principles of self-managed organizations (composed of seven such principles).

1. *Self-determination of tasks.* In self-managed companies, each employee independently formulates his goals and defines tasks, based on the values and mission of the organization. Thus, everyone consciously takes responsibility for the performance of tasks and the quality of such performance, realizing and sharing the organization’s mission and values.

2. *The principle of command (teamwork) and equality*. Solving problems and achieving goals in a self-managed organization are based on the principles of equality, openness, responsibility, and the consciousness of team members. In this context, employees can be called a team with full rights, although this is inconsistent with the classic understanding of a team as a temporary collective to achieve goals, determined in advance and limited in time.

3. *Situational creativity.* Normative documentation and numerous regulations, forms and other formalization regarding rules, norms and description of processes recede into the background in a self-managed organization. In this way, it is similar to organizations working according to the Agile methodology. The way to solving problems (and solving problems) is live communication and creative finding of situationally better ways to solve problems.

4. *Self-motivation.* Formalized motivation is also not used. Motivation can be situationally determined both by each member of the team for himself and collegially by the team for everyone.

5. *Horizontality of connections.* Hierarchical (or vertical) relationships are eliminated or significantly minimized. A leader may exist, but as a rule, he does not play a decisive role, but is rather a moderator of the team's work. An important element of teamwork is constant discussion of the project (projects, project portfolios), the needs of the team and its participants, as well as mutual support (it doesn't matter if it happens face-to-face or remotely in geographically distributed teams).

6. *Satisfaction of team members as a general goal.* The main goal of the organization (or mission, if it has been formulated) in self-managed organizations, as a rule, is shared by all its employees. And on the other hand, a self-managed organization helps to reveal the potential of each employee (team member) in order to achieve his maximum satisfaction from work, which contributes to increasing his return, productivity, efficiency, creativity.

7. *Self-determination of self-management.* The transition to self-management of the organization must be a conscious decision of the entire team. This could be the next step in evolution. However, in order to give up the rules, first it would be better to work for a long time in strict adherence to the rules. Then the direction of movement towards self-management will be conscious and aware, and then the probability of success on the way to effective self-management increases significantly. Not a tribute to fashion, but maximum self-sufficiency, responsibility and self-motivation of each team member - these are the prerequisites for such success.

Let's propose a model of classification of self-managed organizations, with the selection of classification features and classes of organizations corresponding to such features.

*1. According to the declared management concept (self-identification):*

– self-managed organizations;
– holacratic organizations;
– "turquoise" organizations;
– democratic management;
– classic organization.

*2. According to the management concept:*

– democratic management (there is a leader, but he professes a democratic style);
– democracy (decisions are made democratically and implemented authoritarian, according to the concept of Adizes);
– collegial management (there is no formal leader, the leader appears situationally, the concept may be similar to the concept of "dynamic leadership");
– classic management with elements of self-management.

*3. According to the degree of self-management:*

– fully self-managed organization;
– an organization whose decision-making is dominated by self-management;
– an organization that uses elements of self-management in the management system.

*4. By scale (according to the number of personnel):*

– a small self-managed organization similar to a team (up to 20 people);
– medium self-managed organization (from 20 to 100 people);
– hierarchical self-managed organization (from 100 to 500 people);
– large self-managed organization (more than 500 people to 5,000 people);
– self-managed conglomerate (more than 5,000 people);

*5. According to the geographical distribution of the members of the self-managed team:*

– geographically concentrated self-managed organization (one location);
– self-managed organization of initial geographical distribution: self-managed organization represented in one country;
– a self-managed organization of medium geographical distribution: a self-managed organization represented in several countries of the continent;
– a self-managed organization with a large geographical distribution: a self-managed organization represented in several continents;
– maximally geographically distributed: a self-managed organization represented on all continents.

*6. By authority of the leader:*

– maximum authority: the leader is one of the generators of decisions and adopts them, while relying on the collegial opinion of team members, but may not take it into account when making a decision;
– medium authority: the leader is the moderator of decisions and has a decisive vote in their adoption;
– minimal powers: the leader is the moderator of decisions, and does not have a decisive vote in their adoption;
– lack of authority: there is no formal leader in the team.

*7. By the authority of a team member:*

– maximum authority: the possibility of decision-making by a team member, independent definition of tasks and of motivation;
– medium powers: the possibility of influencing decision-making, defining one's tasks and determining one's motivation (influence can be realized through participation in collegial discussions);
– minimum powers: the possibility of proposals for decision-making, for determining one's tasks and for determining one's motivation;
– there is no authority for a team member (as an exception for self-managed organizations, but it is possible under the conditions of the period of the initial transition to self-management).

*8. By decision-making methods:*

– independent decision-making by each team member;
– collective decision-making by the team;
– decision-making by a dynamic manager/leader (not necessarily the same) based on the results of a collegial discussion in the team;
– decision-making by one and the same team leader based on the results of a collegial discussion in the team.

*9. According to the share of the market occupied by:*

– small self-managed organizations (up to 5% of the market);
– niche self-managed organizations (from 5% to 10% of the market);
– medium self-managed organizations (from 10 to 20% of the market);
– large self-managed organizations (from 20 to 30% of the market);
– self-managed scalable organizations (more than 30% of the market).

*10. By size of the budget (annual turnover of the organization):*

– low-budget self-managed organizations (up to UAH 10 million in annual turnover);

– medium-budget self-managed organizations (from 10 to 100 million hryvnias of annual turnover);
– large-budget self-managed organizations (from UAH 100 to 1,000 million annual turnover);
– holding-type self-managed organizations (more than UAH 1 billion in annual turnover);

*11. According to the degree of digitization of management processes:*

– management processes are not digitized;
– the initial level of digitization: some processes are digitized;
– average level of digitization: the main processes are digitized;
– management processes are fully digitized;
– advanced digitization: bots, Big Data and AI are used.

Let's also propose a model for the classification of projects of self-managed organizations, we will also highlight the relevant classification features and distinguish classes of projects corresponding to such features. Such a classification model is given below.

*1. Development projects:*

– territorial development projects;
– organizational innovation implementation projects;
– software update projects / software complexes;
– projects for the development of the information protection system (ensuring cyber security).

*2. Projects of order fulfillment:*

Projects defined by the portfolio of orders of a self-managed organization usually belong to such a feature, the classification of such projects is possible according to:

– customer industries;
– size of customers;
– form of ownership of customers;
– the size of the project budget.

Usually, a set of such projects is associated with a portfolio of projects of a self-managed organization, the direction of implementation of which coincides with the niche occupied by the organization in the market.

*3. Digitization projects:*

– projects for the creation of automated workplaces for specialists (according to the role structure in the projects or the organizational structure of the corresponding positions in the company);
– automation projects of individual business functions;
– automation projects of business areas;
– artificial intelligence (AI) implementation projects.

*4. Marketing projects:*

– marketing projects in classical promotion channels;
– marketing projects of promotion in social networks (SMM);
– marketing projects of promotion in the Internet environment through SEO optimization mechanisms;
– marketing event projects;
– other marketing projects.

*5. Projects to achieve compliance:*

– projects to achieve compliance with current (updated) legal requirements;
– projects to achieve compliance with current (updated) tax requirements;
– projects to achieve compliance with current (updated) environmental requirements;
– projects to achieve compliance with current (updated) anti-corruption requirements;
– projects to achieve compliance with the current (updated) requirements of international standards, for example, the ISO 9000 series standard.

In the context of the research topic, it is worth proposing one more feature of the classification, which concerns the objects whose restoration is taken care of by the State Agency for the Restoration of Infrastructure of Ukraine (SARDI) and whose implementation can involve organizations that are managed according to the principles of self-management.

*6. Restoration projects:*

– projects (portfolios of projects) of restoration of bridges and artificial structures;
– projects (portfolios of projects) of restoration of roads of state importance;
– housing restoration projects;
– projects to restore social infrastructure, medical infrastructure;
– projects of restoration of city and intercity communications;
– projects of restoration (development) of checkpoints at the border;
– airport restoration projects;
– projects to restore logistics chains.

*7. Projects of material and technical support:*

– IT infrastructure provision and development projects;
– projects of provision and development of specialized equipment (for example, projects of acquisition or modernization of construction equipment);
– logistics projects (creation and development of transport and warehouse logistics).

On the basis of the conducted research, we will propose a conceptual model of the management system of development projects of self-managed organizations (**Fig. 1**).

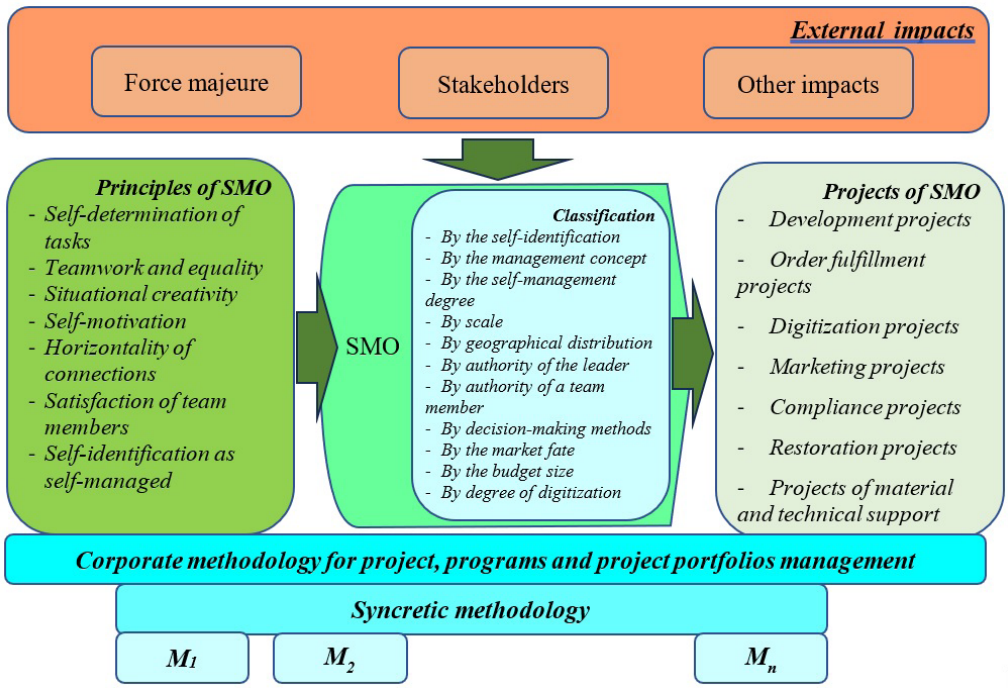



***Figure 1*** – Conceptual model of the management system of development projects of self-managed organizations (SMO)

In this model, the corporate methodology of managing projects, programs and portfolios is based on syncretic methodology. In turn, the syncretic methodology allows individual projects from the portfolio of SMO projects to be guided by their own methodology, and such methodologies should

not be mixed. At the same time, the self-managed organization is subject to external influences (from stakeholders, regulatory bodies, force majeure, etc.). However, in its activity, a self-managed organization is guided by a certain set of principles. The activity and development of a self-managed organization is carried out through projects, programs and project portfolios. At the same time, project activity is classified according to 7 types.

In the set form, such a model can be represented by a formal six:

$$S = <F, C, M, R, E, P> \quad (1)$$

where $F$ – is a set of properties of self-managed organization (SMO) according to the classification proposed above;

$C$ – is a set of models and methods of corporate methodology for managing projects, programs and project portfolios of a self-managed organization;

$M$ – is a set of methodologies used by the syncretic project management methodology of programs and project portfolios;

$R$ – is a set of principles on which the activity of a self-managed organization is based (defined above in the proposed model);

$E$ – is a set of elements of the environment of a self-managed organization and the influences of such an environment;

$P$ – is a set of projects, programs and project portfolios of a self-managed organization.

This set model will be further detailed and investigated from the point of view of both the structure of the elements and the relationships between them.

## Conclusions

Effective management of projects, portfolios and programs for the restoration of Ukraine in the context of the reconstruction of infrastructure facilities is an urgent practical task that requires the development and research of new scientific approaches. Taking into account the analysis of modern trends in the development of organization management systems and project management systems, a syncretic approach is proposed as such an approach. Within this approach, models of the project management system for the development of self-managed organizations in the portfolios of infrastructure restoration projects of Ukraine are proposed and described. The use of these models is intended to streamline and systematize the management system of restoration projects and increase its transparency, flexibility and efficiency.

In general, the models that were proposed and described are aimed at streamlining the activities of self-managed organizations in infrastructure restoration projects, providing such organizations with a methodological basis. Which, in turn, should contribute to the improvement of performance indicators of projects, programs and portfolios of restoration projects.

As prospects for further research, the following direction can also be outlined. To assess the effectiveness of project implementation (that is, to evaluate the management system) with the aim of adjusting both individual management influences and the system as a whole, it would be worthwhile to research and develop indicators for both individual areas (KPI - key performance indicators) and the success of the management system and self-managed organization as a whole (KSI – key success indicators). This will contribute to the improvement of feedback in the management system of self-managed organizations, and therefore contribute to its greater accuracy, flexibility and efficiency.

**References**


1. Pitannya Nazionalnoi rady z vidnovlennya Ukrainy vid naslidkiv viyny: Decree of President of Ukraine of April 21, 2022 №266/2022, editorial office of June 17, 2022 N 411/2022 // Database of Legislation of Ukraine / Verkhovna Rada of Ukraine. Kyiv, 2022. URL: URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/266/2022?lang=en#Text [in Ukrainian].
2. Prohrama Prezydenta Ukrainy «Velyke budivnytstvo» — masshtabna rozbudova yakisnoi infrastruktury Ukrainy [The program of the President of Ukraine «Great construction» is a large-scale development of quality infrastructure of Ukraine]. Kyiv, 2020. URL: https://bigbud.kmu.gov.ua/ (Last accessed: 02.12.2023) [in Ukrainian].
3. Ukraine Reconstruction May Cost $1.1 Trillion. EIB Head Says. URL: https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-06-21/ukraine-reconstruction-may-cost-1-1-trillion-eib-head-says (Last accessed: 29.11.2023) [in English].
4. The Standard for Project Management and a Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) – Seventh Edition. USA, Project Management Institute. 2021. 250 p. [in English].
5. Cockburn A. Selecting a Project's Methodology. *IEEE Software*. 2000. 17(4). P. 64–71 [in English].
6. Stellman A. Learning Agile: Understanding Scrum, XP, Lean, and Kanban. O'Reilly Media. 2013. 420 p. [in English].
7. The Standard for Program Management. Fourth Edition. Project Management Institute. 2017. 179 p. [in English].
8. The Standard for Portfolio Management (2017). Fourth Edition. Project Management Institute. 127 p. [in English].
9. Spundak M. (2014) Mixed agile/traditional project management methodology – reality or illusion? *27th IPMA World Congress. Procedia − Social and Behavioral Sciences*. Vol.119. P. 939–948 [in English].
10. Bushuyev S., Kozyr B. Methodology hybridization of infrastructure projects and programs management. *Herald of the Odessa National Maritime University*. 2020. (61). P. 187–207. DOI: https://doi.org/10.47049/2226-1893-2020-1-5-26 [in Ukrainian].
11. Bushuyev S., Kozyr B., Zapryvoda A. Nonlinear strategic management of infrastructure programs. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2019. No. 4 (10). P. 14–23 [in Ukrainian].
12. Ivko A.V. Approaches of syncretic management in road infrastructure restoration projects. *Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences»*. Kyiv, National Transport University, 2022. Issue 3 (53). P.433–442 [in Ukrainian].
13. Frederic Laloux. Reinventing Organisations: A Guide to Creating Organisations Inspired by the Next Stage of Human Consciousness. Nelson Parker. 2014. 382 p. [in English].
14. Holacracy Constitution. Version 5.0. URL: https://www.holacracy.org/constitution/5-0/ (Last accessed: 02.12.2023) [in English].

**Івко А. В.,** *канд. техн. наук, https://orcid.org/0000-0002-3388-8355*
*Державне агентство відновлення та розвитку інфраструктури України, м. Київ, Україна*

# МОДЕЛІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТАМИ РОЗВИТКУ САМОКЕРОВАНИХ ОРГАНІЗАЦІЙ У ПОРТФЕЛЯХ ПРОЄКТІВ ВІДНОВЛЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ

***Анотація***

Вступ. Відновлення України від наслідків повномасштабної агресії російської федерації вимагає реалізації цілого комплексу проєктів, програм і портфелів проєктів. Водночас актуальною є задача вибору методології управління такими проєктами. Аналіз методологічних трендів показує, що зараз триває четвертий етап розвитку методологічних конструктів – від використання одної методології, через розвиток методології Agile і використання управління сукупностями проєктів (програмами, портфелями) – проєктно-орієнтовані організації почали використовувати методологічні мікси. У якості доцільного пропонується досліджувати синкретичний принцип і відповідну методологію управління проєктами, програмами і портфелями проєктів. Така методологія спрямована на вирішення актуальних задач створення і розвитку методології управління проєктами відновлення і не є достатньо дослідженою.

Проблематика. Проєкти і портфелі проєктів відновлення інфраструктури України реалізуються великою кількістю учасників, які представляють різні країни, різні культури управління та різні методології управління проєктами. Одною з передумов успішності та ефективності проєктів відновлення є створення нової методології, яка б забезпечила ефективність в таких умовах, до яких додається тренд використання організаціями принципів самокерованості.

Мета. Розробка моделей системи управління проєктами розвитку самокерованих організацій у портфелях проєктів відновлення інфраструктури України в контексті розвитку синкретичної методології управління проєктами.

Матеріали та методи. Для досягнення поставленої мети були використані наступні моделі та методи: загальнонауковий метод аналізу та синтезу, моделі та методи наукового напрямку управління проєктами та програмами, метод побудови моделей класифікації, теорія множин. Матеріалами для аналізу служили проєкти і портфелі відновлення, реалізацією яких опікується Державне агентство відновлення інфраструктури України.

Результати. У статті поставлена задача розробки моделей системи управління проєктами розвитку самокерованих організацій у портфелях проєктів відновлення інфраструктури України. Обгрунтована актуальність цієї задачі. Моделі керівних принципів самокерованих організацій сформульовано. Модель класифікації самокерованих організацій запропоновано. Модель класифікації проєктів самокерованих організацій створено. Концептуальну модель системи управління проєктами розвитку самокерованих організацій запропоновано і викладено у множинному вигляді. Перспективи подальших досліджень у обраному напрямку окреслено.

Висновки. Ефективне управління проєктами, портфелями і програмами відновлення України в контексті відбудови об'єктів інфраструктури є актуальним практичним завданням, що потребує розвитку і дослідження нових наукових підходів. З урахуванням аналізу сучасних трендів розвитку систем управління організаціями та систем управління проєктами, у якості такого підходу пропонується синкретичний підхід. В межах такого підходу запропоновані та описані моделі системи управління проєктами розвитку самокерованих організацій у портфелях проєктів відновлення інфраструктури України. Використання зазначених моделей покликано впорядкувати і систематизувати систему управління проєктами відновлення і підвищити її прозорість, гнучкість та ефективність.

***Ключові слова:*** проєкти відновлення інфраструктури, управління проєктами і програмами, методологія управління проєктами, самокерована організація, синкретична методологія.

https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.038

**UDC 338.02:69.003:004.89**

**Andrii Bieliatynskyi**[1], *D.Sc, Prof., https://orcid.org/0000-0002-2158-512X*
**Kostyantyn Mamonov**[2], *D.Sc, Prof.,https://orcid.org/0000-0002-0797-2609*
**Vasyl Goi**[2], *Ph.D., Associate Prof., https://orcid.org/0000-0003-1822-4478*
**Lyudmyla Kovalenko**[2], *Ph.D., Associate Prof., https://orcid.org/0000-0002-5959-9762*
**Serhii Haidenko**[2], *Ph.D., Associate Prof., https://orcid.org/0000-0002-0112-369X*

[1] *North Minzu University, School of Civil Engineering, Yinchuan, Ningxia, China*
[2] *O. M. Beketov National University of Urban Economy, Kharkiv, Ukraine*

# ECONOMIC AND MATHEMATICAL MODELING OF THE DEVELOPMENT OF CONSTRUCTION ENTERPRISES, TAKING INTO ACCOUNT THE PECULIARITIES OF THE FORMATION OF INTELLIGENT ECONOMIC SYSTEMS

***Abstract***

Introduction. The relevance of the research topic is due to the need to develop measures to ensure the development of construction enterprises (BE), using modern intellectual economic systems.

Problem Statement. Proposed measures to ensure the development of construction enterprises, which are aimed at the formation and implementation of intelligent economic systems, the creation of a basis for the growth of the completeness and quality of economic support, the use of geo-informational tools, the construction and improvement of the security and information system, the improvement of social security and standards.

Purpose. Economic and mathematical modeling of the development of construction enterprises, taking into account the peculiarities of the formation of intelligent economic systems.

Materials and methods. The article achieves the goal of economic-mathematical modeling of the integral indicator of the development of construction enterprises, taking into account the peculiarities of the formation of intelligent economic systems. Solved tasks regarding the assessment of the integral indicator of BP development; development of an economic-mathematical model of the influence of the integral factor of the formation of intellectual economic systems on the general indicator of the development of construction enterprises; formation of measures regarding the development of construction enterprises based on the results of economic and mathematical modeling of the relevant factors.

Results. As a result of the research, a theoretical and methodological platform for determining the development of construction enterprises was formed. It is proposed to define the development of construction enterprises as a set of directions for the formation and use of production, economic and human potential, aimed at the formation of strategic and tactical advantages to achieve a better position compared to the past state of BP.

Conclusions. As a result of the study, it was determined that the level of influence of the directions of formation and use of the intellectual economic system on the development of construction enterprises has decreased.This is due to the ambiguity and lack of a systematic approach to the formation and use of an intelligent economic system at construction enterprises, the inhibition of economic indicators, the low level of application of geospatial support, the reduction of social standards, difficulties in the formation of security support and the implementation of security directions. Therefore, it is proposed to develop scientifically based recommendations regarding the formation and use of the intellectual economic system of construction enterprises.

***Keywords:*** development of construction enterprises, assessment, economic-mathematical modeling, intelligent economic systems, economic, geospatial, security, social security.

## Introduction

Modern management conditions of construction enterprises are determined by inhibition of their development directions, which is determined by a decrease in the main indicators of activity, a reduction in the level of production and sale of construction products, the formation and use of production and economic potential, working capital, and the negative influence of internal and external factors. In such conditions, the development of measures to ensure the development of BP based on the application of modern intellectual economic systems is of particular importance.

The purpose of the study is the economic and mathematical modeling of the integral indicator of the development of construction enterprises, taking into account the peculiarities of the formation of intelligent economic systems.

Within the framework of the set goal, the following tasks are solved:

– carry out an assessment of the integral indicator of the development of construction enterprises;

– to develop an economic-mathematical model of the influence of the integral factor of the formation of intelligent economic systems on the general indicator of the development of construction enterprises;

– propose measures for the development of construction enterprises based on the results of economic and mathematical modeling of the relevant factors.

Therefore, the research topic is relevant in the context of ensuring the development of construction enterprises.

**Analysis of theoretical provisions.** Development as a complex category is determined by the multifaceted nature of the formation of factors affecting its transformation. In this context, attention is focused on the formation of a categorical apparatus for determining development, taking into account the peculiarities of the functioning of enterprises, in the works of L. S. Zapasna, G. O. Horina, and K. O. Ivanchuk [1–3].

On the permanent changes taking place in the system of formation and implementation of development directions, which are based on the technical-economic combination of material and personal factors of production, complex technical-technological relations between material elements of productive forces in the system of technical-economic relations are emphasized in the development of S.V. Mocherny. [4]. Dividing the provisions of the presented approach, some scientists highlight the peculiarities of the implementation of processes in the enterprise development system by S. M. Ilyashenko, S. I. Ashmarina [5–6].

A strategic approach to the definition of development was implemented in the scientific works of A. A. Thompson [7].

The identified theoretical provisions indicate the absence of uniform approaches to the formation of a categorical apparatus for the development of construction enterprises. Therefore, it is proposed to define the development of BP as a permanent process that takes into account economic, financial, potential, innovation-investment, security, stakeholder features, the interaction of which leads to the formation of the best state compared to the past.

Based on the theoretical provisions regarding the definition of the development of construction enterprises, the formation of a quantitative basis for making managerial decisions through the application of evaluation procedures is proposed. In this context, the parameters of development assessment are determined through the prism of the competitiveness of enterprises. Andrushkiv B. M., Malyuta L. Ya., Melnyk L. M. [8].

In order to make reasonable management decisions, it is necessary to form a quantitative foundation based on an integral indicator that determines the level of development of enterprises [9–14].

Appropriate criteria are used to assess the development of enterprises, which characterize the formation and use of: funds for the acquisition of external knowledge; the amount of new equipment

purchased; the amount of financing of information and telecommunication technologies as indicators characterizing innovative receptivity; employees who have improved their qualifications; funds spent on improving the qualifications of employees; the total amount of costs for innovative activity; technological processes; innovative products; of research and development in the field [15].

In this context, the following indicators should be noted: general coverage; intermediate liquidity; absolute liquidity; solvency; financial stability; ratio of current and non-current assets; provision of own capital; profitability of enterprises; assets; own capital; operational activity; investment capital.

Taking into account the provisions of theoretical approaches, directions for assessing the development of construction enterprises have been developed, which include a system of actions based on the formation of information and analytical support, methods and models of quantitative and qualitative analysis to determine the appropriate integral indicator, which will allow the formation of a quantitative basis for making informed management decisions.

## Main part

To assess the development of construction enterprises, a multi-level system of indicators was formed (**Table 1**).

***Table 1***

***A multi-level system of indicators for the development of construction enterprises***

| First level | The second level | The third level |
|---|---|---|
| An integral factor in the development of construction enterprises ($I_R$) | economic indices ($R_1$) | changes in sales ($R_{11}$) |
| | | changes in equity ($R_{12}$) |
| | | changes in loan capital ($R_{13}$) |
| | | changes in the ratio of receivables and payables ($R_{14}$) |
| | innovative ($R_2$) | technological upgrade level ($R_{21}$) |
| | | the level of implementation and commercialization of innovations ($R_{22}$) |
| | | level of technical development ($R_{23}$) |
| | investment ($R_3$) | level of investment formation ($R_{31}$) |
| | | investment application level ($R_{32}$) |
| | | level of investment performance ($R_{33}$) |
| | social ($R_4$) | the level of development of the social system at the construction enterprise ($R_{41}$) |
| | | level of social protection ($R_{42}$) |
| | corporate management ($R5$) | quality of corporate governance ($R_{51}$) |
| | | marketing responsibility ($R_{52}$) |
| | | level of development of corporate reputation ($R_{53}$) |
| | | market activity of construction enterprises ($R_{54}$) |
| | | the level of change perception ($R_{55}$) |
| | | the level of development of corporate culture ($R_{56}$) |

***The end of Table 1***

| First level | The second level | The third level |
|---|---|---|
| An integral factor in the development of construction enterprises ($I_R$) | human capital ($R_6$) | the level of human capital formation ($R_{61}$) |
| | | the level of use of human capital ($R_{62}$) |
| | | staff qualification level ($R_{63}$) |
| | | level of service to consumers of construction products ($R_{64}$) |
| | brand indicators of construction products ($R_7$) | the level of brand formation and use ($R_{71}$) |
| | | brand perception ($R_{72}$) |
| | | information protection and brand assurance ($R_{73}$) |
| | | experience in the operation of a construction company ($R_{74}$) |
| | | loyalty of stakeholders to the construction enterprise brand ($R_{75}$) |
| | potential ($R_8$) | the level of formation and use of technical potential ($R_{81}$) |
| | | the level of formation and use of resource potential ($R_{82}$) |
| | | the level of formation and use of organizational potential ($R_{83}$) |
| | | the level of formation and use of marketing potential ($R_{84}$) |
| | | formation and use of human potential ($R_{85}$) |
| | | the level of formation and use of innovative potential ($R_{86}$) |
| | | the level of formation and use of investment potential ($R_{87}$) |

Local indicators of development, which are determined at the third level, are evaluated based on the application of qualitative and quantitative methods (**Table 2**).

***Table 2***

***Methods of assessment of local factors of development of construction enterprises***

| Local factors | Evaluation methods |
|---|---|
| $R_{11}$; $R_{12}$; $R_{13}$; $R_{14}$ | formal (analytical) |
| $R_{21}$; $R_{22}$; $R_{23}$ | expert |
| $R_{31}$; $R_{32}$; $R_{33}$ | expert |
| $R_{41}$; $R_{42}$ | expert |
| $R_{51}$; $R_{52}$; $R_{53}$; $R_{54}$; $R_{55}$; $R_{56}$ | expert |

***The end of Table 2***

| Local factors | Evaluation methods |
|---|---|
| $R_{61}; R_{62}; R_{63}; R_{64}$ | expert |
| $R_{71}; R_{72}; R_{73}; R_{74}; R_{75}$ | expert |
| $R_{81}; R_{82}; R_{83}; R_{84}; R_{85}; R_{86}; R_{87}$ | expert |

At the second level, system indicators are determined by applying the geometric mean model. At the first level, an integrated model for assessing the development of construction enterprises has been developed:

$$I_R = R_1 \cdot K_{R_1} + R_2 \cdot K_{R_2} + R_3 \cdot K_{R_3} + R_4 \cdot K_{R_4} + R_5 \cdot K_{R_5} + R_6 \cdot K_{R_6} + R_7 \cdot K_{R_7} + R_8 \cdot K_{R_8}, \quad (1)$$

де $K_{R_1}, K_{R_2}, K_{R_3}, K_{R_4}, K_{R_5}, K_{R_6}, K_{R_7}, K_{R_8}$ – weighting coefficients characterizing the mutual influence of system factors of the development of construction enterprises and their influence on the integral indicator, which are determined by the method of analysis of hierarchies, resp. unit.

On the basis of the evaluated indicators and the developed model, an integral indicator of the development of construction enterprises was determined (**Figure 1**).

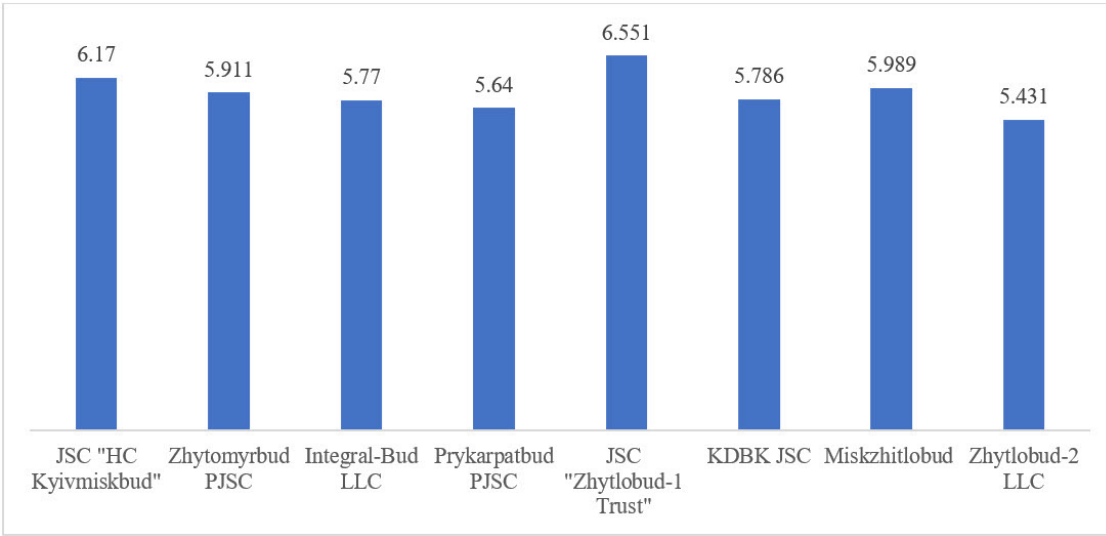



***Figure 1*** – The results of the assessment of the integral indicator of the development of construction enterprises, resp. unit

As a result of the study, an average level of development support was determined for Zhytomyrbud PJSC, Integral-Bud LLC, Prykarpatbud PJSC, KDBK JSC, Miskzhitlobud Construction Company LLC, Zhytlobud-2 LLC. JSC «HC Kyivmiskbud» JSC and JSC «Zhytlobud-1 Trust» observe a high level of development rates.

Economic-mathematical modeling is carried out by implementing a complex of interrelated directions, which are characterized by information and analytical support, development of the appropriate model, coefficients of correlation and determination, criteria of reliability and adequacy.

Information and analytical support is formed on the basis of the results of an integral assessment of the factors of development of construction enterprises and the formation and use of an intelligent economic system. In addition, a comparative analysis of the values of integral indicators was carried out, the results of which are presented in **Figure 2**.

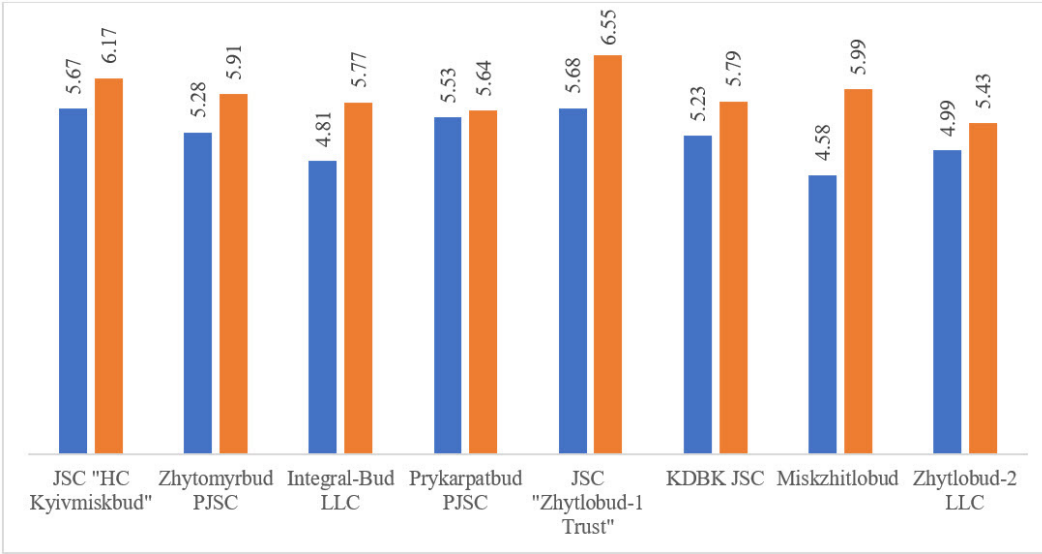



***Figure 2*** – Comparative analysis of integral indicators of development, formation and use of the intellectual economic system of construction enterprises, resp. unit

The economic-mathematical model of the influence of the integral factor of the formation and use of the intellectual economic system on the integral indicator of the development of construction enterprises is as follows:

$$I_R = 0.379 \; x \; I_k + 3.92. \tag{3}$$

The results of the evaluation of correlation and determination coefficients:

$$R = 0.47;$$

$$R^2 = 0.22.$$

The results of evaluating the criteria of adequacy and reliability of the economic-mathematical model of the influence of the integral factor of the formation and use of the intellectual economic system on the integral factor of the development of construction enterprises are presented in the **Table 3**.

***Table 3***

***The results of evaluating the adequacy and reliability criteria of the economic-mathematical model of the influence of the integral factor of the formation and use of the intellectual economic system on the integral factor of the development of construction enterprises***

| Criteria | Calculated values | Table values |
|---|---|---|
| Fisher's F-test | $F_{розр.} = 111.617$ | 5.318 |
| Student's t-test | $t_{розр.} = 3.289$ | 2.447 |
| DW- criterion of Durbin Watson | $DW = 1.305$ | $d_1$=0.763<br>$d_2$=1.332 |

***The end of Table 3***

| Criteria | Calculated values | Table values |
|---|---|---|
| Testing for homo and heteroskedasticity | $t_1 = 0.098$ | 2.447 |

The economic-mathematical model is not tested for multicollinearity, as it is univariate in nature. The calculated criteria testify to the adequacy and reliability of the developed economic-mathematical model of the influence of the integral factor of the formation and use of the intellectual economic system on the integral factor of the development of construction enterprises.

## Conclusions and proposal

Thus, as a result of the study, the definition of the development of construction enterprises is proposed as a set of directions for the formation and use of production, economic and human potential, aimed at the formation of strategic and tactical advantages to achieve a better position compared to the past state of BP.

As a result of the study, it was determined that the level of influence of the directions of formation and use of the intellectual economic system on the development of construction enterprises has decreased. This is due to the ambiguity and lack of a systematic approach to the formation and use of an intelligent economic system at construction enterprises, the inhibition of economic indicators, the low level of application of geospatial support, the reduction of social standards, difficulties in the formation of security support and the implementation of security directions. Therefore, it is proposed to develop scientifically based recommendations regarding the formation and use of the intellectual economic system of construction enterprises.

Proposed measures to ensure the development of construction enterprises, which are aimed at the formation and implementation of intelligent economic systems, the creation of a basis for the growth of the completeness and quality of economic support, the use of geo-informational tools, the construction and improvement of the security and information system, the improvement of social security and standards.

## References

1. Zapasna L. S. Economic essence of enterprise development. *Culture of the peoples of the Black Sea region*. 2006. No. 96. P. 33–37 [in English].
2. Horina G. O. The dialectic of the concept of "enterprise development". *Black Sea Economic Studies*. 2016. Issue 8. P. 123–127 [in English].
3. Ivanchuk K.O. Theoretical approaches to determining the essence of the "enterprise development" category. *Strategy and mechanisms of regulation of industrial development.* 2012. P. 231–239 [in English].
4. Mocherny S.V. Methodology of economic research: [monograph] / S.V. Lviv, 2001. 416 p. [in Ukrainian].
5. Ilyashenko S. M. Problems of management of innovative development of enterprises in the transitive economy. Sumy, 2005. 582 p. [in Ukrainian].
6. Ashmarina S. I. Development of the management system of organizational changes at a industrial enterprise. Samara, 2008. 154 p. [in English].
7. Thompson A. A. Strategic management: concepts and situations for: [trans. with English under ed. N. M. Makarova]. M., 2006. 928 p. [in English].

8. Andrushkiv B. M., Malyuta L. Ya., Melnyk L. M. Strategic management of innovative development of the enterprise. Ternopil: TNTU, 2010. 271 p. [in English].

9. Mamonov K. A. Methodological approach to the integral assessment of the regional lands use territorial development. *Geodesy and Cartography*. Vol. 45, №. 3, 2019. P. 110–115. [in Ukrainian].

10. Mamonov K., Grytskov E., Velychko V., Troian V. The Formation and use of the Construction Enterprise Brand to Ensure Interaction with Stakeholders. *Management Theory and Studies for Rural Business and Infrastructure Development.* Vol. 42. № 4. Vytautas Magnus University, 2020. P. 434–440 [in Ukrainian].

11. Mamonov K., Velychko V., Grytskov E., Zubarev D. Econometric modeling of the level of stakeholder interaction at construction enterprises*. Ukrainian Metrological Journal. Economic aspects of metrology and econometrics,* No. 2. Kh.: NCC "Institute of Metrology", 2020. P. 72–77 [in Ukrainian].

12. Mamonov K., Velychko V., Grytskov E., Prunenko D., Achckasov A. Staikholder-oriented enterprise management model enterprises. *Financial and credit activity: problems of theory and practice*. 2020. № 4. P. 396–410 [in Ukrainian].

13. Mamonov K.A., Dymchenko E.V., Grytskov E.V., Velychko V.A. Integrated approach for assessing the level of stakeholder interaction on construction enterprises. *European Proceedings of Social and Behavioural Sciences. EpSBS*. 2021. P. 1054–1063 [in Ukrainian].

14. Mingming Wen,Chang Liu, Jun Du. Measurement of Coordinated and Coupled Development and Evaluation of Sustainable Development for Marine Economic-Ecological Complex System. *Hindawi Discrete Dynamics in Nature and Society.* Vol. 2021. 12 p. [in English].

15. Semenchenko N. V., Moroz O. S. Formation of the system of the main primary indicators of the innovative development of the enterprise // effective economy. 2013. No. 5. URL: http://nbuv. gov.ua/UJRN/efek_2013_5_75 [in Ukrainian].

**Бєлятинський А. О.**[1], *д-р техн. наук, проф., https://orcid.org/0000-0002-2158-512X*
**Мамонов К. А.**[2], *д-р екон. наук, проф., https://orcid.org/0000-0002-0797-2609*
**Гой В. В.**[2], *канд. екон. наук, доц., https://orcid.org/0000-0003-1822-4478*
**Коваленко Л. Б.**[2], *канд. фіз.-мат. наук, доц., https://orcid.org/0000-0002-5959-9762*
**Гайденко С. М.**[2], *канд. екон. наук, доц., https://orcid.org/0000-0002-0112-369X*

[1] *Університет Північного Міньцу, Школа будівництва, Їньчуань, Китай*
[2] *Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Україна*

## ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ БУДІВЕЛЬНИХ ПІДПРИЄМСТВ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ЕКОНОМІЧНИХ СИСТЕМ

***Анотація***

Вступ. Актуальність теми дослідження зумовлена необхідністю розроблення заходів щодо забезпечення розвитку будівельних підприємств (БП), використовуючи сучасні інтелектуальні економічні системи.

Постановка проблеми. Запропоновані у статті заходи щодо забезпечення розвитку будівельних підприємств, спрямовані на формування та впровадження інтелектуальних економічних систем, створення бази для зростання повноти та якості економічного забезпечення, використання геоінформаційних засобів, будівництва та вдосконалення системи безпеки та інформації, покращення соціального забезпечення та стандартів.

Мета. Економіко-математичне моделювання розвитку будівельних підприємств із урахуванням особливостей формування інтелектуальних економічних систем.

Матеріали та методи. У статті досягнуто мету економіко-математичного моделювання інтегрального показника розвитку будівельних підприємств з урахуванням особливостей формування інтелектуальних економічних систем. Вирішені задачі щодо оцінки інтегрального показника розвитку АТ; розроблення економіко-математичної моделі впливу інтегрального фактора формування інтелектуальних економічних систем на загальний показник розвитку будівельних підприємств; формування заходів щодо розвитку будівельних підприємств за результатами економіко-математичного моделювання відповідних факторів.

Результати. У результаті дослідження сформовано теоретико-методологічну платформу визначення розвитку будівельних підприємств. Запропоновано визначити розвиток будівельних підприємств як сукупність напрямків формування та використання виробничо-економічного та кадрового потенціалу, спрямованих на формування стратегічних і тактичних переваг для досягнення кращого становища порівняно з минулим станом ВР.

Висновки. У результаті дослідження встановлено, що знизився рівень впливу напрямів формування та використання інтелектуальної економічної системи на розвиток будівельних підприємств. Це пов'язано із неоднозначністю та відсутністю системного підходу до формування та використання інтелектуальної економічної системи на будівельних підприємствах, гальмування економічних показників, низький рівень застосування геопросторового забезпечення, зниження соціальних стандартів, труднощі у формуванні забезпечення безпеки та реалізації напрямків безпеки. Тому пропонується розробити науково обґрунтовані рекомендації щодо формування та використання інтелектуальної економічної системи будівельних підприємств.

***Ключові слова:*** розвиток будівельних підприємств, оцінка, економіко-математичне моделювання, інтелектуальні економічні системи, економіка, геопростір, безпека, соціальна безпека.

https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.047

**УДК 656.078.13**

**Шемаєв В. В.**[1], *д-р екон. наук, https://orcid.org/0000-0001-5599-3941*
**Нємчиков Ю. М.**[2], *https://orcid.org/0009-0008-3311-1934*
**Ананьєв М. Ю.**[3], *канд. екон. наук, https://orcid.org/0000-0002-9459-9522*
**Савицький Е. Е.**[3], *канд. екон. наук, доц., https://orcid.org/0000-0002-1937-5828*

[1] *Транспортна академія України, м. Київ, Україна*
[2] *АТ «Укрзалізниця», м. Київ, Україна*
[3] *Київський національний економічний університет імені Вадима Гетьмана, м. Київ, Україна*

# ІНСТРУМЕНТ ФІНАНСУВАННЯ CONNECTING EUROPE FACILITY (CEF) ЯК МЕХАНІЗМ РОЗВИТКУ КОНКУРЕНТОСПРОМОЖНОСТІ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ

***Анотація***

Вступ. Активна інтеграція до Європейського Союзу, водночас з блокадою морських портів та різницею стандартів функціонування транспортного сектору, особливо на прикордонних пунктах пропуску, створює відчутне навантаження на пропускну спроможність транспортно-логістичної системи України, що, у свою чергу, вимагає пошуку і залучення різних інструментів для зміцнення конкурентоспроможності української інфраструктури та її успішного сполучення з глобальними ланцюгами постачань.

Проблематика. Транспортна інфраструктура є ключовим фактором конкурентоспроможності економіки. Вона забезпечує доступ до ринків, ресурсів і послуг, а також сприяє економічному зростанню та розвитку. Однак, виклики глобальних змін у сфері транспорту, що обумовлюють необхідність постійної модернізації і розвитку інфраструктури, ставлять під сумнів конкурентоспроможність країн та регіонів, які не можуть забезпечити якісну та ефективну інфраструктуру.

Використання інструменту фінансування Connecting Europe Facility (CEF) надає унікальну можливість для покращення національної транспортної інфраструктури, забезпечення її достатнього фінансування з метою розвитку транскордонного співробітництва та підвищення конкурентоспроможності.

Мета. Аналіз потенціалу можливостей та користі від участі в програмі фінансування ЄС CEF 2022 для розвитку транспортної інфраструктури на прикладі діяльності АТ «Укрзалізниця» і Державним агентством відновлення та розвитку інфраструктури України (далі – бенефіціари) щодо підвищення її конкурентоспроможності та відповідності сучасним вимогам ефективності та екологічності транспорту.

Матеріали та методи. Методологія роботи містить теоретичні методи обробки даних з метою виокремлення засад участі України в інструменті фінансування CEF. За допомогою техніко-економічного аналізу, синтезу та класифікації, а також узагальнення накопиченої інформації було досліджено шляхи розвитку конкурентоспроможності інфраструктури, досягнуто необхідних висновків для трактування успішності та перспектив участі України в інструменті фінансування CEF для розвитку транспортної галузі.

Результати. Дослідження підтверджує, що участь України в програмі фінансування CEF сприяє покращенню якості та доступності транспортної інфраструктури. Фінансова підтримка CEF дозволяє Україні провести модернізацію, підвищити швидкість і надійність перевезень, що робить її більш конкурентоспроможною на міжнародному ринку та сприяє розвитку транскордонного співробітництва та зменшенню негативного впливу на екологію.

Висновки. Участь України у програмі фінансування Connecting Europe Facility (CEF) є важливим інструментом для підвищення конкурентоспроможності її транспортної інфраструктури. Ефективне використання цього інструменту допоможе зміцнити позиції у транспортно-логістичному секторі, сприяти економічному зростанню та сталому розвитку. Імплементація європейських стандартів функціонування транспортного сектору в Україні та розвиток транскордонних пунктів переходу є темою подальших наукових досліджень.

***Ключові слова:*** конкурентоспроможність, транспортна інфраструктура, Connecting Europe Facility (CEF), транскордонне співробітництво, прикордонні пункти переходу, залізничне сполучення.

## Вступ

Connecting Europe Facility (CEF) – це фонд Європейського Союзу (ЄС), який був створений у 2014 році для фінансування проєктів у галузі транспорту, енергетики, цифрових технологій і телекомунікацій, спрямованих на покращення інфраструктури. Метою CEF є прискорення інвестицій у транс'європейські мережі та залучення фінансування з державного та приватного секторів, підвищуючи правову визначеність і дотримуючись принципу технологічної нейтральності. Фонд забезпечує максимальну взаємодію між транспортним, енергетичним і цифровим секторами, таким чином зменшуючи витрати на впровадження проєктів. Фінансування проєктів, що подаються на CEF, передбачає, що половину вартості сплачує країна-заявниця за рахунок власних / кредитних ресурсів, решта 50% фінансування надається в рамках програми CEF. Слід зазначити, що Фонд CEF є ключовим інструментом фінансування ЄС у реалізації Європейського Зеленого Курсу та важливим фактором, що сприяє досягненню цілей Союзу з декарбонізації на 2030 та 2050 роки. CEF приносить користь людям у всіх державах-членах, оскільки він спрощує та забезпечує надійність подорожей, підвищує енергетичну безпеку Європи, одночасно дозволяючи більше використовувати відновлювані джерела енергії, а також сприяє транскордонній взаємодії між державними адміністраціями, підприємствами та громадянами. Окрім надання грантів, CEF пропонує фінансову підтримку проєктам за допомогою інноваційних фінансових інструментів, таких як гарантії та проєктні облігації. Ці інструменти створюють значний вплив на використання бюджету ЄС і збільшують залучення подальшого фінансування від приватного сектору та інших учасників державного сектору.

CEF – це фінансовий інструмент для реалізації європейської політики також і у транспортно-логістичному секторі. Він спрямований на підтримку інвестицій у розбудову нової транспортної інфраструктури в Європі або реконструкцію та модернізацію існуючої. Бюджет фонду становить **25,8 млрд** євро. З 2014 року програма CEF підтримала понад 1300 проєктів на загальну суму 29,8 млрд євро в транспортному секторі. Загалом у рамках конкурсу CEF Transport 2022, що завершився 18 січня 2023 року, було подано 353 заявки. За підсумками оцінки було відібрано 107 пропозицій для фінансування CEF. Інвестиції сприятимуть зміцненню транспортного сполучення та підвищенню конкурентоспроможності внутрішнього ринку як для пасажирів, так і для вантажних перевезень, а також підвищенню якості життя та зниження викидів.

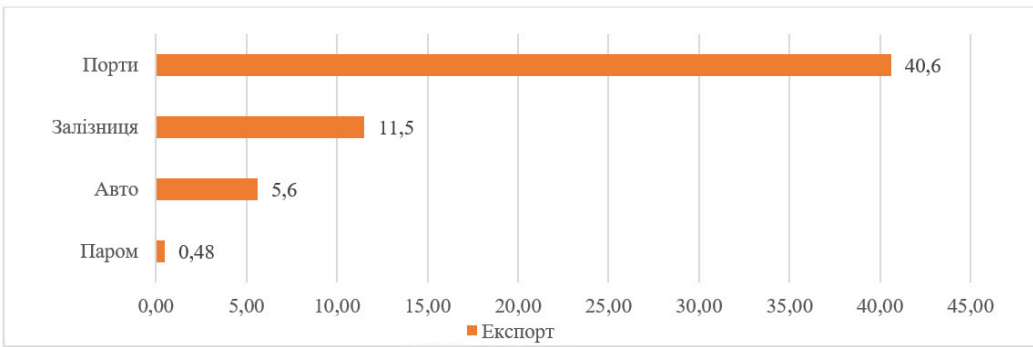
Транс'європейські транспортні мережі (TEN-T) включають в себе мережу транспортних коридорів і пріоритетних проєктів, спрямованих на поліпшення з'єднання між країнами ЄС і зниження транспортних бар'єрів. Це важлива ініціатива для розвитку транспортної інфраструктури в Європі. Включення України до TEN-T дозволяє позбутися наявних перешкод у проведенні логістичних операцій, забезпечує можливість залучення європейських інвестицій для модернізації транспортної інфраструктури, отримання доступу до інструментів допомоги ЄС для розбудови української частини мережі TEN-T, і допомагає зменшити логістичні витрати, підвищити якість

послуг у галузі вантажних перевезень. TEN-T складається з базової та комплексної мережі. Базова мережа (core network) включає найважливіші з'єднання, що об'єднують великі міста та вузли, і має бути завершена до 2030 року. Вона має відповідати найвищим стандартам якості інфраструктури. Комплексна мережа (comprehensive network) з'єднує всі регіони ЄС з основною мережею, забезпечуючи доступність транспорту навіть до периферійних та віддалених регіонів (має бути завершена до 2050 року). З доопрацюванням регламенту додали розширену базову мережу (extended core network) як проміжний етап, який має бути завершено до 2040 року [5].

## Основна частина

Військові дії на території України спричинили значні зміни у структурі логістичних маршрутів. Обмеження доступу до можливостей користування логістичними шляхами Азовського моря, починаючи з 2014 року, а пізніше і повна блокада портів Чорного моря після початку повномасштабного вторгнення, мають негативні наслідки через урізання зовнішньоекономічних зв'язків України з країнами-партнерами по всьому світу. Так, раніше значна частка українського зерна експортувалася саме через чорноморські порти. Після лютого 2022 року цей обсяг значно зменшився, хоч частка портів у структурі експорту залишилася доволі великою головним чином через Зернову угоду (див. **рис. 1**).

З огляду на вищезазначене, важливим засобом збереження та розвитку зовнішньоекономічної діяльності України за даних умов є залізнична інфраструктура. Так, у 2022 році залізницею загалом експортували 33 млн тонн вантажу. Протягом березня-липня 2022 року місячний обсяг експорту зерна залізничними шляхами через західні кордони збільшився з 416 тис. тонн до 940 тис. тонн [9].




*Джерело: складено авторами на основі [14]*

***Рисунок 1*** – Обсяг експорту українського зерна за типом транспорту у 2022 році

Крім того, залізничне сполучення забезпечує реалізацію евакуаційних заходів, переміщення військової техніки, а також гуманітарних вантажів. Тим не менш, залізниця поки не має достатньої потужності, щоб у повній мірі компенсувати логістичні втрати від блокади портів, на які до війни припадало (30–40) % зовнішньої торгівлі України.

Основними перешкодами для розвитку цього напрямку є:

– низький рівень інтеграції транспортної інфраструктури України з країнами ЄС;

– низька ефективність роботи пунктів переходу через державний кордон та їх низька пропускна спроможність;

– необхідність оновлення рухомого складу.

Фінансовий інструмент ЄС CEF стане ключовим для покращення транспортного сполучення з Європейським Союзом шляхом включення України до транс'європейських мереж.

Наразі українська сторона спільно з партнерами з Польщі, Угорщини, Словаччини та Румунії працює над підготовкою до підписання шести грантових угод за проєктними пропозиціями, які були відібрані в червні цього року. Три проєктні пропозиції від АТ «Укрзалізниця», решта – від Державного агентства відновлення та розвитку інфраструктури України (див. **табл. 1**).

***Таблиця 1***

***Проєктні пропозиції АТ «Укрзалізниця» та Державного агентства відновлення та розвитку інфраструктури України для участі у програмі ЄС CEF 2022***

| № | Аплікаційна форма | Назва проєкту | Міжнародний пункт пропуску | Орієнтовна сума гранту ЄС, млн євро |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Україна –Польща, залізниця PL - UA Rail | Шляхи солідарності між Україною та ЄС – оптимізація та модернізація транспортних потоків з точки зору пропускної здатності інфраструктури, сумісності та ефективності послуг перетину кордону на основних залізничних пунктах пропуску Польщі та України | Мостиська/Медика (UA/PL) | 28,5 |
| | | | Ягодин/Дорогуськ (UA/PL) | |
| 2 | Україна –Польща, дороги PL - UA Road | Шляхи солідарності між Україною та ЄС – оптимізація та модернізація транспортних потоків з точки зору пропускної здатності інфраструктури, сумісності та ефективності послуг перетину кордону на основних автомобільних пунктах пропуску між Польщею та Україною | Ягодин/Дорогуськ (UA/PL) | 20,5 |
| | | | Рава Руська/ Гребенне (UA/PL) | |
| | | | Краківець/Корчова (UA/PL) | |
| 3 | Україна – Угорщина / Словаччина, залізниця SK - HU - UA Rail | Шляхи солідарності між Україною та ЄС – оптимізація та модернізація транспортних потоків з точки зору пропускної здатності інфраструктури, сумісності та ефективності послуг перетину кордону на залізничних пунктах пропуску України / Угорщини / Словаччини | Чоп/Захонь (UA/HU) | 22,825 |
| | | | Чоп/ Чієрна-над-Тисою (UA/SK) | |
| | | | Батєво/Еперьєшке (UA/HU) | |
| 4 | Україна – Угорщина / Словаччина, дороги HU - UA Road | Шляхи солідарності між Україною та ЄС – оптимізація та модернізація транспортних потоків з точки зору пропускної здатності інфраструктури, сумісності та ефективності служб перетину кордону на основних автомобільних пунктах пропуску України та Угорщини | Чоп/Захонь (UA/HU) | 5,285 |
| | | | Лужанка/ Берегшурань (UA/HU) | |
| 5 | Україна – Румунія, дороги RO - UA Road | Транскордонна інфраструктура Сірет Румунія - Україна | Вадул-Сірет/ Дорнешти (UA/RO) | 5,285 |
| 6 | Україна – Румунія, залізниця RO - UA Rail | Шляхи солідарності між Україною та ЄС – покращення залізничної прикордонної інфраструктури Вадул-Сірет/ Вікшані (UA/RO) | Вадул-Сірет/ Вікшані (UA/RO) | 1,2225 |
| | | | *Всього* | 83,62 |

*Джерело: складено авторами на основі проєктних пропозицій АТ «Укрзалізниця» та Державного агентства відновлення та розвитку інфраструктури України*

Якщо розглянути лише залізницю, то в Україні налічується 19 залізничних прикордонних пунктів на кордонах із Молдовою, Румунією, Угорщиною, Словаччиною, та Польщею. Тим не менш, на прикордонних пунктах переходу регулярно утворюються черги. Вирішенню цієї проблеми посприяло б будівництво євроколії. В Україні ширина між залізничними коліями складає 1 520 мм, у той час як в ЄС – 1 435 мм. Це змушує вдаватися до перевалки вантажу в інший вагон, що призначений для колій іншої ширини, або переставляти вагон на інші вагонні візки [10]. Тому розбудова транспортної інфраструктури та її інтеграція до ЄС є важливим питанням на порядку денному. Його розв'язання можливе у випадку тісної співпраці з сусідніми країнами. Так, ЄС інвестуватиме в модернізацію української залізниці в рамках фінансового інструменту CEF [11].

Зміцнення міжнародних відносин та регіонального співробітництва між Україною і ЄС має важливе значення для обох сторін, як у політичному, так і в економічному плані. Враховуючи той факт, що ЄС залишається стратегічним комерційним партнером України, участь у спільних ініціативах з державами-членами ЄС стосовно транскордонної інфраструктури є одним з найбільш пріоритетних векторів розвитку секторальної інтеграції України до ЄС. В цьому контексті, в березні 2019-го року, Європейська комісія (ЄК) разом з Європейським виконавчим агентством з клімату інфраструктури та навколишнього середовища (CINEA) і Європейським інвестиційним банком (ЄІБ) позитивно оцінили розширення співпраці між Україною та ЄС, запросивши українську сторону до участі в інфраструктурних проєктах, що будуть фінансуватись в рамках CEF. За допомогою фінансового інструменту CEF, Україна може впроваджувати політику та стандарти європейської транспортної інфраструктури, інтегрувати свій транспортний комплекс до простору Транс'європейських транспортних мереж (TEN-T), збільшувати пасажиро- і вантажопотік прикордонних переходів з країнами ЄС за рахунок реконструкції існуючої інфраструктури та розширення інфраструктури європейської колії шириною 1 435 мм на території України, оновлення рухомого складу та інших об'єктів для зміни між коліями різної ширини.

У рамках програми CEF, Державне агентство відновлення та розвитку інфраструктури України та АТ «Укрзалізниця», братимуть участь у спільних з Польщею, Угорщиною-Словаччиною та Румунією проєктах, що спрямовані на покращення пропускної спроможності прикордонних пунктів переходу з європейськими країнами та розвитку їх інфраструктури. Хронологічний порядок дій, окреслений в **табл. 2**, демонструє, що з початком 2023-го року, Україна почала виконувати перші кроки на шляху до імплементації інфраструктурних проєктів, передбачених для CEF.

***Таблиця 2***

***Хронологія дій української сторони щодо участі в програмі ЄС CEF 2022***

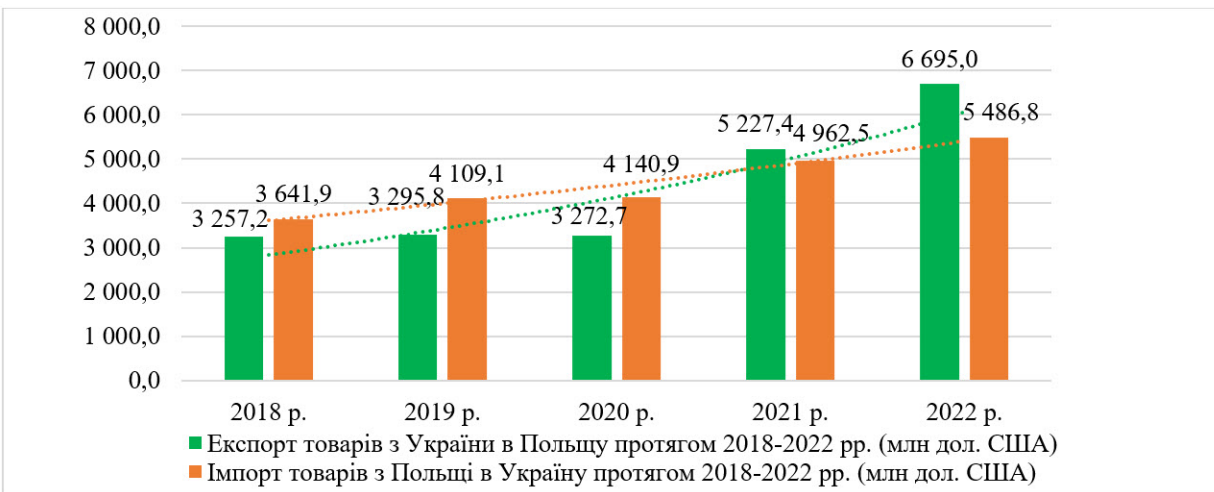
| Дата | Дія |
|---|---|
| 18.01.2023 | Подання бенефіціарами до CINEA проєктних пропозицій у рамках програми ЄС CEF 2022 |
| 21.06.2023 | Затвердження CINEA проєкиних пропозицій, поданих бенефіціарами |
| 20.07.2023 | Підписання бенефіціарами Декларацій доброчесності |
| 21.10.2023 | Підписання Угоди про грант між CINEA та координаторами проєктів |
| До 20.11.2023 | Підписання бенефіціарами Договору про приєднання (Accession form) до Угоди про грант |
| До 20.11.2023 | Підписання бенефіціарами Угоди про консорціум (Consortium agreement), яка регулює фінансові та організаційні питання між координатором і бенефіціарами |

*European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency – CINEA*
*Джерело: складено авторами*

Передбачено, що імплементація проєктів здійснюватиметься за рахунок грантових коштів ЄС на умовах співфінансування у розмірі 50 % загальних прийнятних витрат. Виплата коштів CEF здійснюватиметься згідно зі схемою, встановленою в Угоді про грант. Кожен проєкт має певну кількість звітних періодів, пов'язаних з виплатами. Обов'язкове і вчасне надання технічних і фінансових звітів буде прямою підставою для 50 % відшкодування понесених витрат. Загалом, в рамках взаємодії з фондом CEF для визначених країн Центрально-Східної Європи передбачається виділення 250 млн євро, на реалізацію запланованих проєктів, де частка участі України становить близько 18,5 % [15].

У рамках програми ЄС CEF 2022 планується надавати фінансову підтримку АТ «Укрзалізниця» та Державному агентству відновлення та розвитку інфраструктури України для розбудови прикордонних переходів з Польщею, Румунією, Словаччиною та Угорщиною. Метою проєкту є покращення сполучення між ЄС та Україною з точки зору інфраструктурної спроможності, функціональної сумісності та ефективності послуг з перетину кордону. Дані прикордонні пункти переходу відіграють важливу роль у наданні гуманітарної допомоги, економічному розвитку та логістиці подвійного використання. У період з 2018 по 2022 рік загальний експорт та імпорт товарів зростав і має тенденцію до збільшення. Це свідчить про позитивні зміни в торговельних відносинах між Україною та Польщею (див. **рис. 2**).

АТ «Укрзалізниця», за оперативними даними, перевезла у вересні 2023 року у всіх видах сполучення 12,035 млн тонн вантажів, а у 2022 році було провезено 16,9 млн тонн вантажів через залізничні прикордонні переходи між Україною та Польщею. Також від початку війни, вже близько 12 млн українців перетнули кордон із Польщею. Умови повномасштабної війни призвели до суттєвих змін у структурі українського зовнішньоекономічного обміну. Основну частину експорту та імпорту України в цей період обробляється через західні прикордонні переходи з Польщею, де основну роль відіграють залізничні перевезення.




*Джерело: складено авторами на основі [7]*

***Рисунок 2*** – Динаміка товарообігу між Україною та Польщею за 2018-2022 рр.

Однак виявилося, що українська та польська інфраструктура не були належним чином підготовлені до обробки таких великих обсягів вантажів, які раніше транспортувалися через морські порти, які зараз заблоковані. Зокрема, польська інфраструктура більше спрямована на імпорт, а не на експорт. Польська та українська залізниці узгодили спільний план розвитку пасажирських і вантажних залізничних перевезень між двома країнами з метою збільшення

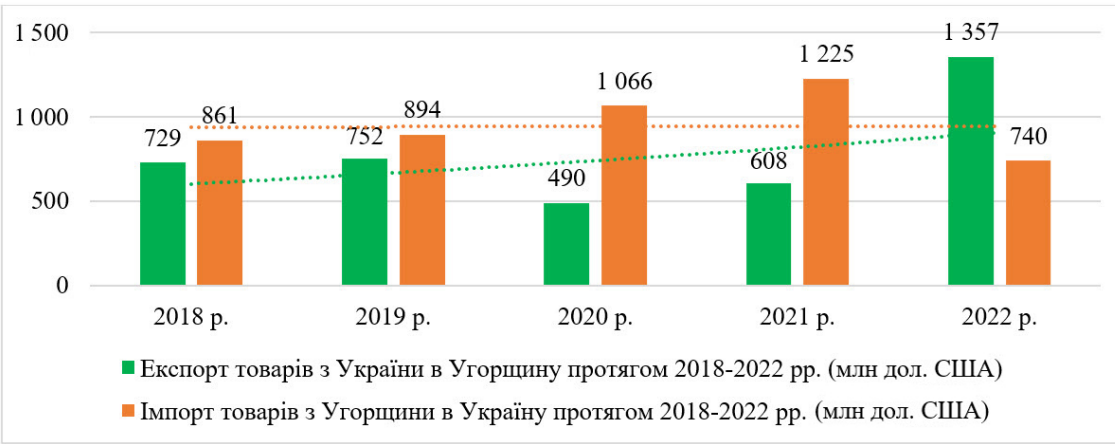
експортного та імпортного потенціалу. Один з основних принципів цієї угоди полягає в гарантуванні безпечних та безперервних перевезень пасажирів і вантажів.

Проєктними пропозиціями АТ «Укрзалізниця» передбачено розвиток прикордонних пунктів переходу, що є частиною коридорів TEN-T, зокрема: єврколії 1 435 мм, купівля обладнання та модернізація прикордонних пунктів переходу для розвитку вантажного та пасажирського сполучення з Євросоюзом. Заходи призведуть до покращення організації залізничного руху та підвищення пропускної спроможності прикордонних пунктів переходу. Тому, проєкт є життєво важливим для забезпечення надійного та стійкого залізничного сполучення між Польщею та Україною, що має важливе значення для добробуту та мирного розвитку Європи. Розвиток прикордонних пунктів переходу на мережі TEN-T також дозволить диверсифікувати вантажні та пасажирські перевезення, зменшить ризики перебоїв внаслідок війни.

Ще один проєкт з розвитку транспортної інфраструктури буде реалізовуватися Україною спільно з Угорщиною та Словаччиною. Важливість розбудови логістичних зв'язків з цими країнами обумовлюється, насамперед, обсягами торгівлі з ними. Крім того, через Угорщину й Словаччину пролягають важливі транзитні шляхи, коли мова йде про торгівлю з іншими членами ЄС. Зокрема, розглядаючи показники товарообігу України з Угорщиною, незважаючи на війну, спостерігається позитивна тенденція (див. **рис. 3**).

Так, у 2022 році обсяг експорту українських товарів порівняно з попереднім періодом зріс на 223,5 % і склав $ 1,36 млрд. Найбільшу частку в обсягах експорту склали електронагрівальні прилади, кукурудза та насіння соняшника. Обсяги імпорту навпаки скоротилися на 60,4 % ($ 0,74 млрд) порівняно з показниками 2021 року [12].

Зважаючи на вищезазначене, реалізація нових проєктів, наприклад, модернізація прикордонної інфраструктури між Україною та Угорщиною, стали б запорукою зростання обсягів торгівлі між країнами.



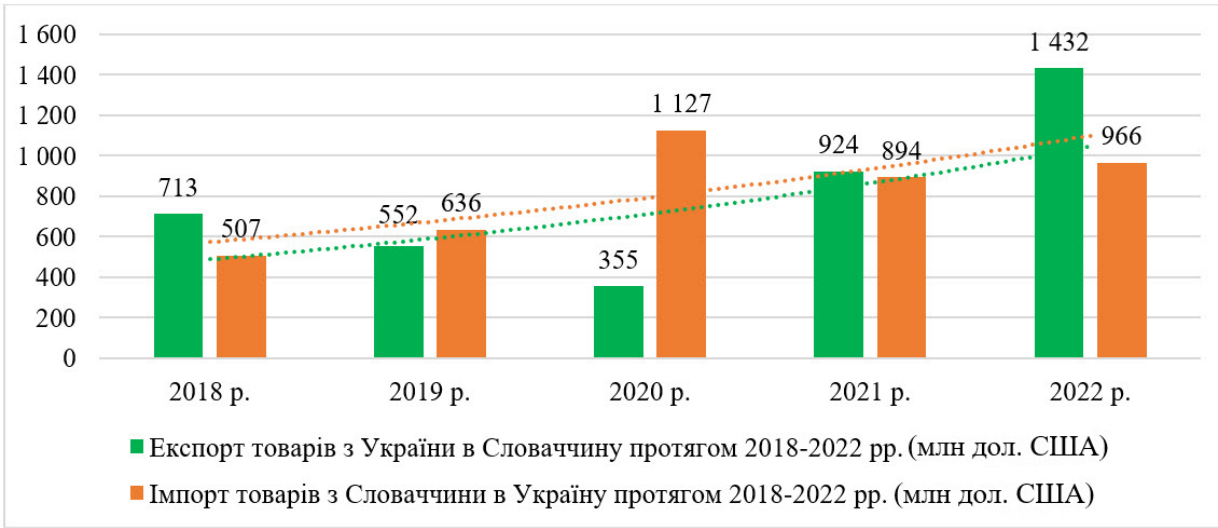

*Джерело: складено авторами на основі [12]*

***Рисунок 3*** **–** Динаміка товарообігу між Україною та Угорщиною за 2018-2022 рр.

Словаччина теж залишається перспективним торговельним партнером. Так, попри початок активної фази війни в Україні за результатами 2022 року було зафіксовано рекордний за останні 15 років показник зростання обсягів товарообігу між Україною та Словаччиною (+28,2 %) (див. **рис. 4**).

За результатами 2022 року показник українського експорту до Словаччини склав $ 1,4 млрд, (+55 % порівняно з показниками 2021 року). Основними статтями експорту були руди (37,2 %), мінеральні палива (19,5 %) та зернові культури (7,6 %). Обсяги імпорту зі Словаччини у 2022 році

збільшилися на 8,0 % і сягнули $ 966 млн [12]. Активний розвиток торгівлі з цими країнами лише підтверджує необхідність розвитку транспортної інфраструктури, зокрема залізниці. Тому, в рамках фінансування CEF також буде реалізовуватися проєкт із розбудови пункту переходу Чоп – Чєрна-над-Тисою / Захонь, який поєднує Україну зі Словаччиною та Угорщиною. Проєктом передбачено розбудово інтермодального терміналу на станції Чоп [13]. Крім того, буде проведено реконструкцію 8 км колії 1 435 мм на ділянці Батьово-Дяково. Також, буде проведено роботи із відновлення існуючої колії 1 435 мм завдовжки 22 км на ділянці залізниці Чоп-Ужгород.




*Джерело: складено авторами на основі [12]*

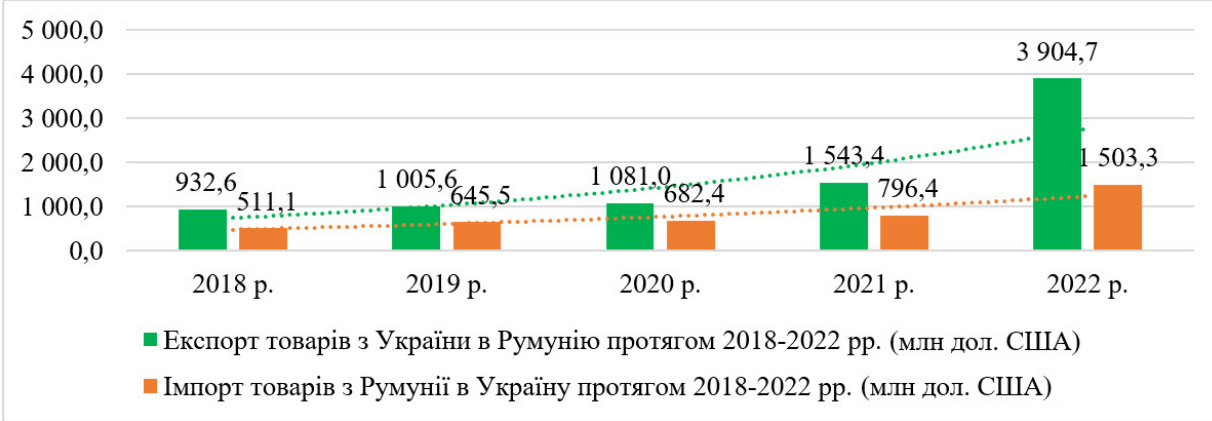
***Рисунок 4*** – Динаміка товарообігу між Україною та Словаччиною за 2018–2022 рр.

Представлена статистична інформація на **рис. 5** відображає те, що загальний обсяг товарообороту між Україною та Румунією в період з 2018 по 2022 роки збільшився більше ніж утричі – на 374,6 %, починаючи з 1 443,8 млн дол. США, до 5 408,0 млн дол. США. Варто підкреслити той факт, що експорт товарів до Румунії протягом аналізованого періоду виріс на 418,7 %, з 932,6 млн дол. США, до 3 904,7 млн дол. США, відповідно, а об'єм імпорту підвищився на 294,1 %, з 511,1 млн дол. США, до 1 503,3 млн дол. США.

Двостороннє співробітництво України з Румунією в рамках програми CEF передбачає покращення вантажних та пасажирських перевезень через українсько- румунський кордон, зокрема через скорочення часового інтервалу, необхідного для технічного супроводу поїздів під час їх курсування між двома країнами, і, таким чином, збільшення транскордонної пропускної здатності та покращення мобільності. Реалізація даного проєкту надасть Україні можливість запровадити повну модернізацію залізничних шляхів відповідно до стандартів TEN-T та концепції Європейської системи управління залізничним рухом (ERTMS), включаючи навантаження на вісь, швидкість, електрифікацію, довжину поїзда тощо. Одним із економічних обґрунтувань доцільності покращення організаційних та експлуатаційних питань стосовно залізничного сполучення між Україною і Румунією – є демонстрація обсягів структури зовнішньої торгівлі товарами між країнами впродовж останніх п'яти років, що зображено на **рис. 5**.

Крім того, впродовж 2022-го року, спостерігається динамічний приріст товарообігу між країнами, в середньому на 224,3%. В результаті блокади морських портів України, товарообіг між Україною і Румунією продовжує невпинно зростати, а отже реконструкція існуючих та будівництво нових залізничних і автомобільних сполучень, що відповідатимуть європейським стандартам,

зменшить навантаження на функціонування прикордонного транспортно-логістичного сектору двох країн та забезпечить життєздатну і конкурентоспроможну альтернативу автомобільному транспорту як для вантажних, так і для пасажирських перевезень.




*Джерело: складено авторами на основі [7, 16, 17]*
***Рисунок 5*** **–** Динаміка товарообігу між Україною та Румунією за 2018-2022 рр.

## Висновки

Розвиток транспортної інфраструктури завжди мав стратегічне значення для держави, а від початку блокади азовських та чорноморських портів це питання набуло невідкладного характеру. Забезпечення експортно-імпортних операцій, проведення евакуаційних заходів, гуманітарних вантажів, перевезення пасажирів та інший вантажообіг в умовах війни стали першочерговими задачами для країни.

Програма ЄС CEF виступає важливим фінансовим інструментом модернізації транспортної інфраструктури, метою якого є реалізація європейської політики у даному секторі. Він спрямований на підтримку інвестицій у модернізацію залізничної та автомобільної інфраструктури в Європі та на прикордонних переходах з країнами-сусідами ЄС.

У рамках програми ЄС CEF планується фінансування низки проєктів в Україні, що передбачають розбудову прикордонних переходів України з Польщею, Румунією, Словаччиною та Угорщиною. Реалізація таких проєктів сприятиме прискоренню інтеграції транспортної інфраструктури України до ЄС завдяки підвищенню її конкурентоспроможності.

## Список літератури

1. Connecting Europe Facility. EC, 2023. URL: https://cinea.ec.europa.eu/programmes/connecting-europe-facility_en (дата звернення: 10.10.2023).
2. About the Connecting Europe Facility. EC, 2023. URL: https://cinea.ec.europa.eu/programmes/connecting-europe-facility/about-connecting-europe en (дата звернення: 10.10.2023).
3. Mobility and Transport. EC, 2023. URL: https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/sustainable-transport-eu7-billion-available-key-infrastructure-projects-under-connecting-europe-20_en (дата звернення: 10.10.2023).
4. Trans-European Transport Network (TEN-T). EC, 2023. URL: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/infrastructure-and-investment/trans-european-transport-network-ten-t_en (дата звернення: 10.10.2023).
5. TEN-T Revision. EC, 2023. URL: http://bit.ly/45plGdx (дата звернення: 10.10.2023).
6. Укрзалізниця у вересні збільшила обсяги вантажоперевезень на 3%. Київ, 2023.

URL: https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3769139-ukrzaliznica-u-veresni-zbilsila-obsagi-vantazoperevezen-na-3.html (дата звернення: 10.10.2023).

7. Bilateral trade between Ukraine and Poland, Romania, Hungary, Slovakia. URL: https://www.trademap.org/ (дата звернення: 10.10.2023).

8. Залізничні ворота у світ: в якому стані перебувають вантажні перевезення між Україною та Польщею. Київ, 2022, URL: https://gmk.center/ua/posts/zaliznichni-vorota-u-svit-v-yakomu-stani-perebuvajut-vantazhni-perevezennya-mizh-ukrainoju-ta-polshheju/ (дата звернення: 10.10.2023)

9. Петровський Д. Як вітчизняний транспорт допоміг вижити українській економіці та її громадянам під час війни. Львів, 2022. URL: https://www.unian.ua/economics/transport/yak-vitchiznyaniy-transport-dopomig-vizhiti-ukrajinskiy-ekonomici-ta-jiji-gromadyanam-pid-chas-viyni-12105600.html (дата звернення: 10.10.2023).

10. Уляницький Д. Проблема на 8,5 см. Україна розпочне будівництво колії, яка з'єднає українську залізницю з європейською. Чому це дуже важливо. Київ, 2023. URL: https://forbes.ua/inside/ukraina-rozpochne-budivnitstvo-evrokolii-abi-zednati-svoyu-zaliznitsyu-z-evropeyskoyu-detali-proektu-30052022-6280 (дата звернення: 10.10.2023).

11. ЄС виділить Укрзалізниці кошти для реалізації євроінтеграційних проєктів. Київ, 2022. URL: https://www.uz.gov.ua/press_center/up_to_date_topic/613039/ (дата звернення: 10.10.2023).

12. Офіційний сайт Національного банку України. Київ, 2023. URL: https://bank.gov.ua/ (дата звернення: 10.10.2023).

13. ЄС виділить гранти на реалізацію залізничних проєктів в Україні. Київ, 2023. URL: https://www.epravda.com.ua/news/2023/06/23/701494/ (дата звернення: 10.10.2023)

14. Стан зовнішньої торгівлі продуктами АПК. Київ, 2023. URL: https://public.tableau.com/views/vl_Export_of_Agriproducts_v2/Dashboard1?:language=en-US&:display_count=n&:origin=viz_share_link:showVizHome=no&:embed=true (дата звернення: 10.10.2023).

15. EU to improve cross-border connections between Ukraine, Moldova, and their EU neighbours. EC, 2023. URL: https://euneighbourseast.eu/news/latest-news/eu-to-improve-cross-border-connections-between-ukraine-moldova-and-their-eu-neighbours/ (дата звернення: 10.10.2023).

16. Географічна структура зовнішньої торгівлі товарами у 2018 році. Київ, 2018. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/zd/ztt/ztt_u/ztt1218_u.xlsx (дата звернення: 10.10.2023).

17. Географічна структура зовнішньої торгівлі товарами у 2019 році. Київ, 2019, URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2019/zd/ztt/ztt_u/ztt1219_u.xlsx (дата звернення: 10.10.2023).

**References**

1. Connecting Europe Facility. URL: https://cinea.ec.europa.eu/programmes/connecting-europe-facility_en (Last accessed: 10.10.2023) [in English].

2. About the Connecting Europe Facility. URL: https://cinea.ec.europa.eu/programmes/connecting-europe-facility/about-connecting-europe-facility_en (Last accessed: 10.10.2023) [in English].

3. Mobility and Transport. URL: https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/sustainable-transport-eu7-billion-available-key-infrastructure-projects-under-connecting-europe-2023-09-26_en (Last accessed: 10.10.2023) [in English].

4. Trans-European Transport Network (TEN-T). URL: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/infrastructure-and-investment/trans-european-transport-network-ten-t_en (Last accessed: 10.10.2023) [in English].

5. TEN-T Revision. URL: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/infrastructure-and-investment/trans-european-transport-network-ten-t/ten-t-revision_en (Last accessed: 10.10.2023) [in English].

6. Ukrzaliznytsia u veresni zbilshyla obsiahy vantazhoperevezen na 3% [In September, Ukrzaliznytsia increased the volume of freight transportation by 3%]. Kyiv, 2023. URL: https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3769139-ukrzaliznica-u-veresni-zbilsila-obsagi-vantazoperevezen-na-3.html (Last accessed: 10.10.2023) [in Ukrainian].

7. Bilateral trade between. Ukraine and Poland, Romania, Hungary, Slovakia. URL: https://www.trademap.org/ (Last accessed: 10.10.2023) [in English].

8. Zaliznychni vorota u svit: v yakomu stani perebuvaiut vantazhni perevezennia mizh Ukrainoiu ta Polshcheiu [Railway gateway to the world: what is the state of freight transportation between Ukraine and Poland]. URL: https://gmk.center/ua/posts/zaliznichni-vorota-u-svit-v-yakomu-stani-perebuvajut-vantazhni-perevezennya-mizh-ukrainoju-ta-polshheju/ (Last accessed: 10.10.2023) [in Ukrainian].

9. Petrovskyi D. Yak vitchyznianyi transport dopomih vyzhyty ukrainskii ekonomitsi ta yii hromadianam pid chas viiny [How domestic transport helped the Ukrainian economy and its citizens to survive during the war]. URL: https://www.unian.ua/economics/transport/yak-vitchiznyaniy-transport-dopomig-vizhiti-ukrajinskiy-ekonomici-ta-jiji-gromadyanam-pid-chas-viyni-12105600.html (Last accessed: 10.10.2023) [in Ukrainian].

10. Ulianitskyi D. Problema na 8,5 sm. Ukraina rozpochne budivnytstvo kolii, yaka ziednaie ukrainsku zaliznytsiu z yevropeiskoiu. Chomu tse duzhe vazhlyvo [The problem at 8.5 cm. Ukraine will start construction of a track that will connect the Ukrainian railway with the European one. Why is this very important?]. URL: https://forbes.ua/inside/ukraina-rozpochne-budivnitstvo-evrokolii-abi-zednati-svoyu-zaliznitsyu-z-evropeyskoyu-detali-proektu-30052022-6280 (Last accessed: 10.10.2023) [in Ukrainian].

11. IeS vydilyt Ukrzaliznytsi koshty dlia realizatsii yevrointehratsiinykh proiektiv [The EU will allocate funds to Ukrzaliznytsia for the implementation of European integration projects]. URL: https://www.uz.gov.ua/press_center/up_to_date_topic/613039/ (Last accessed: 10.10.2023) [in Ukrainian].

12. Ofitsiinyi sait Natsionalnoho banku Ukrainy (Official website of the National Bank of Ukraine). URL: https://bank.gov.ua/ (Last accessed: 10.10.2023) [in Ukrainian].

13. IeS vydilyt hranty na realizatsiiu zaliznychnykh proiektiv v Ukraini [The EU will allocate grants for the implementation of railway projects in Ukraine]. URL: https://www.epravda.com.ua/news/2023/06/23/701494/ (Last accessed: 10.10.2023) [in Ukrainian].

14. Stan zovnishnoi torhivli produktamy APK [State of foreign trade in agricultural products]. URL: https://public.tableau.com/views/vl_Export_of_Agriproducts_v2/Dashboard1?:language=en-US&:display_count=n&:origin=viz_share_link:showVizHome=no&:embed=true (Last accessed: 10.10.2023) [in Ukrainian].

15. EU to improve cross-border connections between Ukraine, Moldova, and their EU neighbors. URL: https://euneighbourseast.eu/news/latest-news/eu-to-improve-cross-border-connections-between-ukraine-moldova-and-their-eu-neighbors/ (Last accessed: 10.10.2023) [in English].

16. Heohrafichna struktura zovnishnoi torhivli tovaramy u 2018 rotsi [Geographical structure of foreign trade in goods in 2018]. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/zd/ztt/ztt_u/ztt1218_u.xlsx (Last accessed: 10.10.2023) [in Ukrainian].

17. Heohrafichna struktura zovnishnoi torhivli tovaramy u 2019 rotsi [Geographical structure of foreign trade in goods in 2019]. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2019/zd/ztt/ztt_u/ztt1219_u.xlsx (Last accessed: 10.10.2023) [in Ukrainian].

**Volodymyr Shemayev**[1], *D.Sc., https://orcid.org/0000-0001-5599-3941*
**Yuriy Nemchikov**[2], *https://orcid.org/0009-0008-3311-1934*
**Mykola Ananiev**[3], *Ph.D., https://orcid.org/0000-0002-9459-9522*
**Eduard Savytskyi**[3], *Ph.D., Associate Prof., https://orcid.org/0000-0002-1937-5828*
[1] *Transport Academy of Ukraine, Kyiv, Ukraine*
[2] *JSC "Ukrainian railways", Kyiv, Ukraine*
[3] *Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman, Kyiv, Ukraine*

# CONNECTING EUROPE FACILITY (CEF) AS A FINANCING INSTRUMENT FOR DEVELOPING THE UKRAINIAN TRANSPORT INFRASTRUCTURE COMPETITIVENESS

***Abstract***

Introduction. Active integration into the European Union, at the same time as the blockade of seaports and the difference in the standards of the transport sector, especially at border crossing points, creates a significant load on the capacity of the transport and logistics system of Ukraine, which, in turn, requires the search and involvement of various tools for strengthening competitiveness of Ukrainian infrastructure and its successful connection with global supply chains.

Problem Statement. Transport infrastructure is a key factor of the economy competitiveness. It provides access to markets, resources and services and promotes economic growth and development. However, the challenges of global changes in the field of transport, which determine the need for constant modernization and development of infrastructure, call into question the competitiveness of countries and regions that cannot provide high-quality and efficient infrastructure.

The use of the Connecting Europe Facility (CEF) funding tool provides a unique opportunity to improve the national transport infrastructure, ensure its sufficient funding in order to develop cross-border cooperation and increase competitiveness.

Purpose. Analysis of the opportunities potential and benefits from participation in the EU CEF 2022 funding program for the development of transport infrastructure by the example of JSC "Ukrainian railways" and the State Agency for Restoration and Infrastructure Development of Ukraine (hereinafter – the beneficiaries) in terms of increasing its competitiveness and compliance with the efficiency and environmental requirements for transport.

Materials and methods. The work methodology includes theoretical methods of data processing in order to identify the principles of Ukraine's participation in the CEF financing instrument. With the help of technical and economic analysis, synthesis and classification, as well as generalization of the accumulated information, the ways of developing the competitiveness of the infrastructure were investigated, the necessary conclusions were reached for the interpretation of the success and prospects of Ukraine's participation in the CEF financing tool for the development of the transport industry.

Results. The study confirms that Ukraine's participation in the CEF financing program contributes to improving the quality and accessibility of transport infrastructure. CEF's financial support allows Ukraine to modernize, increase the speed and reliability of transportation, which makes it more competitive on the international market and contributes to the development of cross-border cooperation and reducing the negative impact on the environment.

Conclusions. Ukraine's participation in the Connecting Europe Facility (CEF) financing program is an important tool for increasing the competitiveness of its transport infrastructure. Effective use of this tool will help strengthen the position in the transport and logistics sector, promote economic growth and sustainable development. The implementation of European standards for the functioning of the transport sector in Ukraine and the development of BCP area are the subject of further scientific research.

***Keywords:*** competitiveness, transport infrastructure, Connecting Europe Facility (CEF), cross-border cooperation, border crossing points, railway connection.

https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.059

**УДК 625.7/.8**

**Головко С. К.**, *канд. техн. наук, https://orcid.org/0000-0002-9517-7049*

*Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»), м. Київ, Україна*

# ОСОБЛИВОСТІ ОБСТЕЖЕННЯ НЕЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ ПРИ ПРОЄКТУВАННІ ЗАХОДІВ З РЕМОНТУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ ХОЛОДНОГО РЕСАЙКЛІНГУ

***Анотація***

Проблематика. Спостереження за працездатністю об'єктів відновлених за технологією холодного ресайклінгу показує, що необхідно більше уваги приділяти діагностиці стану існуючого дорожнього одягу та прогнозуванню процесів, що обумовлюють передчасне руйнування.

Мета. Пошук рішень щодо уточнення стану існуючого дорожнього одягу та більш детального визначення чинників його руйнування.

Методи дослідження. Аналітично-експериментальний із застосуванням комп'ютерного моделювання.

Висновки. За результатами проведених досліджень розроблено алгоритм проведення обстеження, який складається з двох послідовних етапів. Де за результатом першого етапу обстеження не тільки збираються дані, а і складається програма проведення другого етапу обстеження. За результатами другого етапу обстеження формується план-схема однотипних ділянок автомобільної дороги, визначається необхідність додаткових підготовчих робіт, щодо усунення локальних місць з руйнуваннями, та розробляють конструктивні і технологічні рішення з ремонту дорожнього одягу за технологією холодного ресайклінгу з визначенням глибини фрезерування, кількості та складу кам'яних матеріалів, що додатково додаються у суміш, склад в'яжучого тощо.

***Ключові слова:*** автомобільна дорога, дорожній одяг нежорсткий, інструментальне обстеження, холодний ресайклінг.

## Вступ

Досвід науково-технічного супроводу ремонту дорожніх одягів із застосуванням технології холодного ресайклінгу показує суттєві переваги даної технології у забезпеченні міцності конструкції дорожнього одягу. Проте, у ряді випадків після проведення ремонту спостерігаються передчасні руйнування, які ймовірно пов'язані з недооцінкою чинників руйнування «старої» конструкції.

Технологія холодного ресайклінгу передбачає фрезерування «старого» дорожнього одягу на визначену глибину, додавання кам'яних матеріалів, в'яжучого або в'яжучих, всі ці операції дозволяють влаштовувати шар основи за даної товщини. Нижні шари основи дорожнього одягу, за цією технології, не підлягають обробленню, а тому, ділянки зі «слабкою» основою не ліквідуються, що у подальшому обумовлює передчасне руйнування.

Також, досвід показує, що на етапі лабораторного аналізу необхідно більш детально оцінювати склад матеріалів існуючого дорожнього одягу, як за протяжністю, так і по глибині. Оскільки, мають місце випадки суттєвої неоднорідності складу, і, якщо, для цих ділянок не розробити спеціальні заходи то, з часом, там можуть утворитись передчасні руйнування.

**Основна частина**

В Україні для ремонту автомобільних доріг з 2005 р. почали активно використовувати технологію холодного ресайклінгу. Спостереження показують, що для більшості об'єктів дана технологія дозволяє забезпечувати необхідну довговічність, проте є ділянки автомобільних доріг на яких вже через кілька років спостерігаються передчасні руйнування або надмірні деформації.

Обстеження ділянок з передчасним руйнуванням показує, що причиною є недостатнє урахування факторів, які обумовили руйнування «старого» дорожнього одягу. Тобто, при обстеженні, не були проведені додаткові дослідження щодо визначення причин цих руйнувань, а також , в подальшому, при обробці результатів обстеження, не було проведені додаткові робіти з уточнення глибини фрезерування існуючого дорожнього одягу та призначенні найбільш доцільного, з врахуванням місцевих умов, складу суміші, виготовленої за технологією холодного ресайклінгу.

***Рисунок 1*** – Руйнування дорожнього одягу через два роки після ремонту

Практика показує, що враховуючи складнощі обстеження особливо, коли на автомобільній дорозі, відбувається інтенсивний рух автотранспорту, обстеження виконують без влаштування шурфів та інших додаткових досліджень.

Не рідко, перед початком обстеження не вдається ознайомитись з технічною документацією на автомобільну дорогу, оскільки на цілий ряд об'єктів існують тільки технічні паспорти у паперовій формі, які немає можливості оновити, а тому регіональні Служби відновлення та розвитку інфраструктури інформацію не надають. Подібна ситуація з системою СУСП (Система управління станом покриття), інформацію в якій часто застаріла, бо відсутні дані для її оновлення.

Також, досі у багатьох науковців та проєктувальників досить скептичне відношення до візуального обстеження. Вважається, що оскільки результати візуального обстеження не можна підставити у розрахунок конструкції, то вони не є важливим. Разом з тим, огляд інформації показує, що в багатьох Європейських та інших країнах, завжди, перед виконанням інструментальних діагностичних випробувань, виконують відеодіагностичне обстеження, нерідко із залученням лазерного та радарного сканування дорожнього одягу.

Наведене вище показує, що візуальне обстеження, як і аналіз технічної документації є важливими складовими оцінки стану об'єкта і, на думку автора, можуть бути використані для розроблення програми інструментального обстеження. Тому пропонується, при проведенні науково-технічного супроводу, збір даних для проєктування ремонту дорожнього одягу, із застосуванням технології холодного ресайклінгу, виконувати двома окремими етапами.

Де на першому етапі виконувати збір даних про існуючу конструкцію дорожнього одягу з технічної документації та проводити візуальне обстеження. Далі, за визначеними даними, розробляється програма для інструментального обстеження, з прив'язкою до пікетажу та визначенням обсягу і видів інструментальних досліджень. На другому етапі виконується інструментальне обстеження та лабораторні дослідження. За результатами проведених робіт складають звіт, який включає:

– картограму конструкції існуючого дорожнього одягу;
– поперечні розрізи конструкції дорожнього одягу;
– відомість ділянок руйнувань, що передбачають додаткові роботи;
– відомість модулів пружності існуючого дорожнього одягу.

На основі звіту про обстеження складають план-схему однотипних ділянок автомобільної дороги, які визначають шляхом комплексного аналізу стану дорожнього одягу.

**Перший етап**

***Збір технічної документації про існуючу конструкцію дорожнього одягу***

Дані про існуючу конструкцію дорожнього одягу збирають шляхом обробки фондових документів та документів, що знаходяться у дорожніх організаціях (проєкт автомобільної дороги минулих років, технічний паспорт автомобільної дороги, матеріали експлуатаційної служби тощо), дані з електронних баз даних: системи управління станом покриттів (СУСП), електронний паспорт автомобільної дороги (ЕПАД тощо). Це дозволяє одержати наступну інформацію:

– існуюча конструкція дорожнього одягу;
– зміни конструкції дорожнього одягу в ході її експлуатації;
– поширення дорожнього одягу;
– руйнування дорожнього одягу проїзної частини;
– модулі пружності;
– наявність ділянок пучиноутворення, їх місце розташування та протяжність.

Збір інформації про рух автотранспорту, а саме:

– інтенсивність руху;
– склад транспортного потоку (особливу увагу приділити визначенню кількості автомобілів великої вантажопідйомності);
– дані про можливий рух автотранспортних засобів, технічні показники яких перевищують нормативні, а саме: осьове навантаження на автомобільну дорогу відповідно до [1].

Доцільно аналізувати всю доступну інформацію, але там, де достовірна інформація відсутня, необхідно виконати облік інтенсивності дорожнього руху. Порядок обліку руху автотранспортних засобів наведений в [2].

Детальний аналіз складу транспортного потоку враховують при проєктуванні дорожнього одягу автомобільних доріг I–III категорій. Для дорожнього одягу автомобільних доріг IV–V категорій, аналіз транспортного потоку здійснюють для планування робіт з метою мінімізації перешкод дорожньому руху.

Візуальне обстеження включає відеодіагностику та детальне візуальне обстеження.

***Відеодіагностика***

Метою відеодіагностики є загальна оцінка стану дорожнього одягу і визначення границь однотипних ділянок дорожнього одягу. Рекомендується при відеодіагностиці виконувати відеозйомку ділянки із використанням спеціалізованого обладнання та програмного забезпечення для отримання фото або відео зображення поверхні покриву автомобільних доріг (шляхом

відеосканування або іншими методами) з метою його подальшої комп'ютерної обробки для визначення типу та геометричних розмірів дефектів і складання електронного абрису стану дорожніх покривів.

Порядок виконання відеодіагностики наведений в [3].

***Детальне візуальне обстеження***

Ділянку автомобільної дороги по всій довжині оглядають на швидкості пішохода. При цьому докладно реєструють руйнування дорожнього одягу, оцінюють грунтово-гідрологічні умови, а також стан дренажу, геометричні особливості такі, як круті ухили, віражи тощо. У ході детального візуального обстеження визначають різні види руйнувань дорожнього одягу реєструють за кількістю та розташуванням.

***Складання програми інструментального обстеження.***

За даними технічної документації на існуючу конструкцію дорожнього одягу та візуального обстеження складається програма інструментального обстеження, де вказують методи визначення товщини кожного конструктивного шару, з урахуванням ширини проїзної частини, загальної товщини монолітних шарів, зернового складу щебеневих шарів та інших параметрів. Визначають необхідну кількість шурфів або кернів, їх розташування, кількість зразків, що відбирають для лабораторних випробувань на кожній з ділянок дорожнього одягу.

Необхідно відмітити, що результати інструментальних вимірювань можуть мати значні відхилення від середніх значень, тому їх обсяг потрібно призначати таким, щоби за результатом обробки були отримані достовірні дані. Особливо це стосується таких показників як модуль пружності і склад матеріалів, що обумовлено виконанням різного виду ремонтних робіт за тривалий експлуатаційний період.

Також, перед проведенням інструментального обстеження необхідно оформити дозвіл в регіональній Службі відновлення та розвитку інфраструктури та відповідному департаменті патрульної поліції.

**Другий етап**

***Шурфи***

Шурфи мають важливе значення для дослідження дорожнього одягу. Крім корисної візуальної оцінки матеріалів окремих шарів, що відкривається на стінках шурфу, де можна брати зразки для лабораторних випробувань. Це дає можливість оцінити якість матеріалу існуючого дорожнього одягу на предмет його найбільш ефективного використання для приготування нової суміші за методом ресайклінгу.

Шурфи дозволяють одержати наступні показники:

– товщина шарів дорожнього одягу;
– щільність шарів;
– вологість матеріалу шарів;
– стан різних шарів, наприклад, ступінь розтріскування і цементації кожного із шарів дорожнього одягу.

Зазвичай шурфи закладають на зовнішній частині смуги руху, але в деяких випадках може виявитися доцільним закласти їх і в інших місцях, наприклад, поперек ушкодженого узбіччя. Шурфи можуть мати також форму щілини поперек усієї ширини смуги руху (**рис. 2**) для визначення глибини деформації нижче рівня замикаючого шару. Звичайна глибина шурфів 1,0 м. Матеріал для досліджень береться з кожного шару. Для остаточно відкритого шурфу детально реєструється його профіль, зразки матеріалу різних шарів передаються в лабораторію для дослідження.

***Керни***

Перевага відбору кернів порівняно із закладкою шурфів полягає в тому, що відібрати керн значно швидше, він створює менше перешкод руху автотранспорту і значно дешевше (**рис. 3**).

Керни дозволяють точно визначити товщину монолітних шарів, стан в'яжучого, природу кам'яних матеріалів. Вони зручні для лабораторного визначення фізико-механічних характеристик.

***Рисунок 2*** – Влаштування шурфу в існуючому дорожньому одязі з метою дослідження визначення складу матеріалів шарів

Недоліком відбору кернів є обмеження глибини їх відбирання, як правило до (200–300) мм. Незв'язані матеріали і ґрунт не можуть бути представлені в зразку, оскільки вони випадають із керна при відбиранні. Тому в багатьох випадках цим методом неможливо визначити товщину незв'язаних матеріалів.

***Рисунок 3*** – Відібраний керни з дорожнього одягу для лабораторного аналізу

При відбиранні кернів для підбору складу суміші, що буде влаштовуватись за методом холодного ресайклінгу, слід виходити з того, що кількість зразків, призначених для лабораторних випробувань, повинна забезпечити визначення фізико-механічних показників згідно з [4, 5].

***Зондування активної зони земляного полотна***

Зондування дозволяє встановити стан верхньої частини земляного полотна, що розташований під дорожнім одягом у межах глибини активної зони, яка становить від 1,5 м до 2,5 м. Порядок виконання робіт із зондування земляного полотна наведений у [6].

Зондування є непрямим методом визначення механічних властивостей ґрунту земляного полотна. Кількісну оцінку характеристик механічних властивостей ґрунтів за результатами зондування здійснюють на основі залежності між показниками опору ґрунтів зануренню зонда та показниками характеристик ґрунтів, які визначені за унормованими прямими методами. Випробування ґрунту методом динамічного зондування виконують з допомогою занурення зонда ударним способом.

***Модуль пружності***

Рекомендовано проводити вимірювання модуля пружності для оцінки стану існуючої конструкції. Визначення модуля пружності існуючого дорожнього одягу здійснюють згідно з вимогами [7].

Для цього застосовують методи динамічного навантаження на конструкцію дорожнього одягу (установки FWD, УДВО-НТУ тощо) та/або використовують методи статичного навантаження (випробування прогиноміром, штампові випробування).

На ділянках доріг, де деформації покриву пов'язані з недостатньою несною здатністю (сітка тріщин, полога колійність, проломи тощо), слід виконувати більше вимірювань, з метою встановлення межі слабкої ділянки і обробку даних проводити окремо від основних вимірювань. На цих ділянках вимірювання пружного прогину слід поєднувати з визначенням вологості ґрунту і порівнювати її з розрахунковою.

***Лабораторний аналіз***

Можливість застосування технології холодного ресайклінгу також визначається за результатом аналізу складу матеріалів у шарах дорожнього одягу. За цими даними приймають рішення щодо необхідності коригування складу фрезерованого матеріалу, при влаштуванні шару за технологією холодного ресайклінгу.

При проведенні лабораторних досліджень повинна бути виявлена наявність речовин, які можуть послабити активність того чи іншого в'яжучого. Для цементу такими речовинами є сульфати (гіпс), сульфіти (пірит) та органічні включення (нафта, торф тощо). Для бітуму такими матеріалами є глинисті частки у надмірній кількості та хлориди у складі фрезерованої суміші.

Для обробки фрезерованих сумішей можуть бути використані мінеральне, органічне або комбінація цих в'яжучих. За результатами лабораторних випробувань призначають в'яжуче та його кількість. Виконання робіт з лабораторного аналізу проводять згідно з [4, 5].

За результатами інструментального обстеження існуючого дорожнього одягу, здійснюють комплексний аналіз і уточняють причини руйнування існуючого дорожнього одягу, а також визначають можливість ремонту дорожнього одягу за технологією холодного ресайклінгу.

За результатами обстеження складають план-схему однотипних ділянок автомобільної дороги, які визначають шляхом комплексного аналізу стану дорожнього одягу за такими параметрами:

- стан дорожнього одягу;
- кліматичні грунтово-гідрологічні умови;
- характерні руйнування дорожнього одягу;
- модуль пружності дорожнього одягу.

Також визначають локальні ділянки, де необхідно виконати додаткові роботи щодо усунення факторів передчасного руйнування (зсув, здимання дорожнього одягу чи ґрунту, недостатня щільність, перезволоження, надмірна кількість органічного в'яжучого тощо).

Дані, отримані шляхом обстеження, дозволяють обґрунтовано призначити розрахункові показники та виконати розрахунок варіантів конструкцій дорожнього одягу, відповідно до вимог [1, 8]. Метою розрахунку є визначення товщини шару, що влаштовують за методом холодного ресайклінгу, та товщин вище розташованих шарів. Далі, за техніко-економічним аналізом та рекомендаціями, наведеними у [9–14] визначають оптимальний варіант конструкцій дорожнього одягу та, відповідно, глибину фрезерування, кількість кам'яних матеріалів, що додатково додають у суміш, вміст в'яжучого, а також склад машин і механізмів для виконання ремонтних робіт за технологією холодного рсайклінгу.

## Висновки

Аналіз причин передчасних руйнувань, що виникли через кілька років після ремонту нежорсткого дорожнього одягу показав, що на етапі інструментального обстеження необхідно проводити додаткові дослідження з метою встановлення чинників, які викликають такі руйнування, як зсуви, здимання, утворення колії та мережі тріщин тощо.

З цією метою пропонується обстеження виконувати двома етапами. На першому етапі проводити аналіз технічної документації і візуальне обстеження (відеодіагностику). За зібраними даними складати програму інструментального обстеження з встановленням кількості кернів, потребою влаштування шурфів на окремо визначених ділянках, обґрунтування проведення зондування активної частини земляного полотна, георадарних досліджень щодо встановлення однорідності складу та товщин шарів існуючого дорожнього одягу, визначати крок вимірювання модуля пружності на поверхні покриву, необхідність пошарового вимірювання модуля пружності, призначати обсяг відбору проб матеріалів з метою визначення складу, щільності та вологості тощо.

На другому етапі, згідно програми, виконується інструментальне обстеження та лабораторні дослідження, за результатом яких складається план-схема однотипних ділянок автомобільної дороги, визначається необхідність додаткових підготовчих робіт, щодо усунення локальних місць з руйнуваннями, та розробляють конструктивні і технологічні рішення з ремонту дорожнього одягу за технологією холодного ресайклінгу з визначенням глибини фрезерування, кількості та складу кам'яних матеріалів, що додатково додаються у суміш, склад і кількість в'яжучого тощо.

## Список літератури

1. ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. Київ, 2015. 104 с. (Інформація та документація).

2. ДСТУ 8824:2019 Автомобільні дороги. Визначення інтенсивності руху та складу транспортного потоку. Київ, 2019. 72 с. (Інформація та документація).

3. СОУ 45.2-00018112-080:2011. Автомобільні дороги. Оцінка та реєстрація стану дорожніх покриттів та технічних засобів автомобільних доріг автоматизованими системами відеодіагностики. Київ, 2011. 54 с. (Інформація та документація).

4. ДСТУ 8976:2020 Матеріали дорожні, виготовлені за технологією холодного ресайклінгу. Технічні умови. Київ, 2020. 72 с. (Інформація та документація).

5. ДСТУ 8977:2020 Матеріали дорожні, виготовлені за технологією холодного ресайклінгу. Методи випробування. Київ, 2020. 62 с. (Інформація та документація).

6. ДСТУ Б В.2.1-9:2016 Ґрунти. Методи польових випробувань статичним і динамічним зондуванням. Київ, 2016. 66 с. (Інформація та документація).

7. ДСТУ Б В.2.3-42:2016 Автомобільні дороги. Методи визначення деформаційних характеристик земляного полотна та дорожнього одягу. Київ, 2016. 67 с. (Інформація та документація).

8. ГБН В.2.3-37641918-559:2019 Дорожній одяг нежорсткий. Проектування. Київ, 2019. 58 с. (Інформація та документація).

9. Головко С. К. Аналіз варіантів конструкцій нежорсткого дорожнього одягу із застосуванням методу аналізу ієрархій. *Дороги і мости*. Київ, 2022. № 25. С 31–42. DOI: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.25.031.

10. Головко С.К. Раціональні способи повторного використання асфальтобетону при реконструкції автомобільних доріг: дис. … канд. техн. наук. Київ, 1998. 203 с.

11. Головко С.К. Нові підходи у підвищенні капітальності дорожніх одягів при їх ремонті. *Дороги і мости*. Київ. 2020. № 22 С. 86–94. DOI: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.22.086.

12. В. Жданюк, Д. Сибільський. Рециклювання дорожніх одягів. Ч. 1–3. Харків, 2006. 114 с.

13. Р В.2.7-37641918-887:2017 Рекомендації з підбору складу та застосування бітумомінеральних сумішей з використанням асфальтобетонної крихти. Київ. 2017. 54 с. (Інформація та документація).

14. ТТР 42.1-37641918-418:2017 Типовий технологічний регламент на виготовлення бітумомінеральних сумішей з використанням асфальтобетонної крихти. Київ. 2017. 32 с. (Інформація та документація).

**References**

1. DBN V.2.3-4:2015 Avtomobilni dorohy. Chastyna I. Proektuvannia. Chastyna II. Budivnytstvo [State Building Norms (DBN V.2.3-4:2015) Highways. Part I. Design. Part II. Building]. Kyiv, 2016. 104 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

2. DSTU 8824:2019 Avtomobilni dorohy. Vyznachennia intensyvnosti rukhu ta skladu transportnoho potoku [State Standard of Ukraine (DSTU 8824:2019) Automobile roads. Determination of traffic intensity and composition of traffic flow]. Kyiv, 2019. 72 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

3. SOU 45.2-00018112-080:2011 Avtomobilni dorohy. Otsinka ta reiestratsiia stanu dorozhnikh pokryttiv ta tekhnichnykh zasobiv avtomobilnykh dorih avtomatyzovanymy systemamy videodiahnostyky [Standard of organization of Ukraine (SOU 45.2-00018112-080:2011) Automobile roads. Assessment and registration of the condition of road surfaces and technical means of highways by automated video diagnostic systems]. Kyiv, 2011. 54 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

4. DSTU 8976:2020 Materialy dorozhni, vyhotovleni za tekhnolohiieiu kholodnoho resaiklinhu. Tekhnichni umovy [State Standard of Ukraine (DSTU 8976:2020) Road materials manufactured using cold recycling technology]. Kyiv, 2020. 72 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

5. DSTU 8977:2020 Materialy dorozhni, vyhotovleni za tekhnolohiieiu kholodnoho resaiklinhu. Metody vyprobuvannia [State Standard of Ukraine (DSTU 8977:2020) Road materials, produced by cold recycling technology. Test methods]. Kyiv, 2020. 19 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

6. DSTU B V.2.1-9:2016 Hrunty. Metody polovykh vyprobuvan statychnym i dynamichnym zonduvanniam [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.1-9:2016) Soils. Methods of field tests by static and dynamic probing]. Kyiv, 2016. 62 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

7. DSTU B V.2.3-42:2016 Avtomobilni dorohy. Metody vyznachennia deformatsiinykh kharakterystyk zemlianoho polotna ta dorozhnoho odiahu [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.342:2016) Automobile roads. Methods of determining the deformation characteristics of the ground surface and road surface]. Kyiv, 2016. 67 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

8. HBN V.2.3-37641918-559:2019 Dorozhnii odiah nezhorstkyi. Proektuvannia (Departmental Building Norms (HBN V.2.3-37641918-559:2019) Non rigid pavement. Designing). Kyiv, 2019. 58 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

9. Serhii Holovko. Analysis of non-rigid pavement design options using the hierarchy analysis method. Dorogi i mosti [Roads and bridges]. Kyiv, 2022. Iss. 25. P. 31–39. DOI: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.25.031 [in Ukrainian].

10. Holovko S.K. Ratsionalni sposoby povtornoho vykorystannia asfaltobetonu pry rekonstruktsii avtomobilnykh dorih [Rational methods of reuse of asphalt concrete in the reconstruction of highways]. PhD (Ing.). Kyiv, 1998. 203 p. [in Ukrainian].

11. Sergey Golovko New approaches to increase the capitality of pavements in their repair // Dorogi i mosti [Roads and bridges]. Kyiv, 2020. Iss. 22. P. 86–94. DOI: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.22.086 [in Ukrainian].

12. Zhdaniuk V., Sybilskyi D. Retsykliuvannia dorozhnikh odiahiv (Recycling of road clothes). Ch. 1–3. Kharkiv, 2006. 114 p. [in Ukrainian].

13. R V.2.7-37641918-887:2017 Rekomendatsii z pidboru skladu ta zastosuvannia bitumomineralnykh sumishei z vykorystanniam asfaltobetonnoi krykhty [Recommendations (R V.2.7-37641918-887:2017) Recommendations for selecting the composition and application of bituminous-mineral mixtures using asphalt concrete crumb]. Kyiv, 2017. 54 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

14. TTR 42.1-37641918-418:2017 Typovyi tekhnolohichnyi rehlament na vyhotovlennia bitumomineralnykh sumishei z vykorystanniam asfaltobetonnoi krykhty [Standard technological regulations for the production of bituminous-mineral mixtures using asphalt concrete crumb]. Kyiv, 2017. 32 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

**Serhii Holovko**, *Ph.D.*, *https://orcid.org/0000-0002-9517-7049*

*M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, Kyiv, Ukraine*

## ON THE PECULIARITIES OF NON-RIGID PAVEMENT INSPECTION IN THE DESIGN OF REPAIR MEASURES USING COLD RECYCLING TECHNOLOGY

***Abstract***

Problem Statement. Observation of the performance of objects restored by cold recycling technology shows that more attention should be paid to diagnosing the condition of existing pavement and predicting the processes that cause premature deterioration.

Purpose. To find solutions to clarify the condition of the existing pavement and to determine in more detail the factors of deterioration.

Research methods. Analytical and experimental with the use of computer modeling.

Conclusions. Based on the results of the research, an algorithm for conducting the survey was developed, which consists of two consecutive stages. This algorithm is based on the results of the first stage of the survey that provides that not only data are collected, but also envisages that a program for the second stage of the survey is drawn up. Based on the results of the second stage of the survey, a plan diagram of the same type of road sections is formed, the need for additional preparatory work to eliminate local areas with deterioration is determined, and constructive and technological solutions for the repair of pavement using cold recycling technology are developed with the determination of the depth of milling, the amount and composition of stone materials that are additionally added to the mixture, the composition of the binder, etc.

***Keywords:*** highway, non-rigid pavement, instrumental inspection, cold recycling.

https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.068

**УДК 625.825**

**Гуляєв В. І.**, *д-р техн. наук, проф., https://orcid.org/0000-0002-5388-006X*
**Шлюнь Н. В.**, *канд. техн. наук, доц., https://orcid.org/0000-0003-1040-8870*
*Національний транспортний університет, м. Київ, Україна*

# МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВНУТРІШНЬОСТРУКТУРНИХ ТЕРМОНАПРУЖЕНЬ, ЩО ВИКЛИКАЮТЬСЯ ПОЛЯМИ ЗМІННОЇ ТЕМПЕРАТУРИ В КОМПОЗИТАХ ЗІ СТРИЖНЕВОЮ АРМАТУРОЮ

***Анотація***

Вступ. Термомеханічні ефекти, що виникають в неоднорідних композитних матеріалах під впливом температури, суттєво впливають на міцність і довговічність виготовлених з них конструкцій. Особливий вплив ці ефекти мають на термодеформування мостових та дорожніх конструкцій в умовах сезонних то добових змін температури навколишнього середовища. Вони викликаються неоднорідністю термомеханічних параметрів його фракцій і арматури. До теперішнього часу явища термомеханічного деформування армованих конструкцій вивчена не достатньо, тому задачі їх дослідження є актуальними.

Проблематика. Проблематика виконаних досліджень полягає у встановленні закономірностей термомехнічного деформування композитних матеріалів (включаючи цементобетони й асфальтобетони), які підсилені армуючими стрижнями, в полях змінних температур.

Мета. Мета роботи полягає у виведенні математичних співвідношень, які визначають внутрішньоструктурні термонапруження в композитах, що викликані змінними полями температур і неоднорідністю матеріалів.

Матеріали та методи. У даній роботі на базі положень теорії термопружності поставлена задача про аналітичне дослідження внутрішньоструктурних термонапружень в композитах із стрижневою арматурою під впливом полів змінної температури при умовах термомеханічної несумісності компонент системи. Розроблена математична модель термопружного деформування неоднорідного матеріалу, що містить триточкову систему звичайних диференціальних рівнянь із граничними рівностями на краях області, виділеної для обчислення та на поверхні контакту арматури з матрицею. Методами математичного аналізу побудовано розв'язок цих рівнянь для випадку експоненціального розподілення температури, який є загальним розв'язком рівняння теплопровідності. Сформульовані функції розподілення переміщень і напружень.

Результати. На прикладі асфальтобетонного матеріалу, армованого сталевими стрижнями, побудовані функції розподілення термопереміщень та внутрішьоструктурних термонапружень для різних випадків екпоненціального розподілення температури в системі при типових значеннях термомеханічних характеристик фаз системи.

Висновки. У результаті математичного моделювання встановлено, що в випадках термодеформування композитних матеріалів в змінних полях температури реалізуються два механізми виникнення внутрішньоструктурних термонапружень в системі: внутрішній механізм та градієнтний механізм. Показано, що навіть за порівняно невисоких значеннь температури внутрішньоструктурні термонапруження можуть досягати суттєвих значень. Вони максимальні на контактній поверхні, мають локальний характер і швидко спадають по мірі віддалення від неї. При цьому зі зміною показників експоненти функції зміни температури поля термонапружень мають схильність до суттєвої перебудови. Розглянуті приклади із практики.

***Ключові слова:*** внутрішньоструктурні термонапруження, змінні поля температури, композит, стрижнева арматура.

## Вступ

Задача про розподілення термонапружень в циліндричних пружних тілах при температурах, які змінюються в радіальному напрямі, описується звичайними диференціальними рівняннями, розв'язок яких, побудовано в монографії [1]. Ця задача отримує ускладнення, якщо пружне циліндричне тіло (стрижень) знаходиться у пружному середовищі (матриці) та за умови несумісності термомеханічних параметрів фракцій системи (композитного матеріалу) вона зазнає дії температурного поля. Така задача описується триточковою системою звичайних диференціальних рівнянь з додатковими крайовими рівняннями та умовою сполучення функцій на контактній поверхні. Її розв'язок застосовний до частинних аспектів термоміцності композитів зі стрижневою (волокнистою) арматурою побудований в замкненій формі в роботах [1,3,6]. Деякі загальні питання утворення полів термонапружень в композитах обговорюються в статтях [3–5]. В них виділені внутрішній та зовнішній механізми виникнення термонапружень в однорідних та неоднорідних пружних тілах. У роботах [1,3,10] акцентовано, що внутрішній механізм більшою мірою проявляється в композитних матеріалах з несумісними термомеханічними характеристиками їх фаз, причому поля виникнення термонапружень локалізуються в околах армуючих включень.

У той же час в наукових публікаціях суттєву увагу приділяють питанням визначення наведених (ефективних) характеристик композитів та комбінуванню фаз з від'ємними та додатними значеннями коефіцієнтів термічного лінійного розширення з метою доведення їх до нуля [12,13]. При цьому не береться до уваги можливість прояву внутрішнього механізму генерування суттєвих внутрішньоструктурних термонапружень.

Якщо поля температури у пружному середовищі змінюються за просторовими змінними, то виникає можливість прояву ще одного, градієнтного, механізму генерування термонапружень [1, 11]. В композитних матеріалах він реалізується сумісно з внутрішнім механізмом, тому його теоретичне вивчення пов'язано з деякими труднощами. В даній роботі ці ефекти досліджуються методами математичного аналізу з використанням основних положень теорії термопружності [2, 7-9, 13]. Побудовані системи диференціальних рівнянь, отримані їх аналітичні розв'язки. Розглянуті прикладні задачі для асфальтобетонних композитних матеріалів.

## Постановка задачі

Розглянемо термопружне деформування пружного циліндричного стрижня 1 радіусу $r_1$ в пружному середовищі 2 радіусу $r_2$ (**рис. 1**) за умови, що $r_2$ може прямувати до $\infty$.

Нехай варіація $\theta(r)$ температури системи змінюється в радіальному напрямі $\theta(r) = T(r) - T_0$, де $T(r)$ – поточна температура, $T_0$ – деяке її початкове значення, при якому система не напружена. У поточному стані відносні деформації тіла 1 та середовища 2 в циліндричній системі координат $Or\varphi z$ складають [1,2]:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_r^{(1)}(r) &= \frac{1}{E_1}\left[\sigma_r^{(1)} - \nu_1\left(\sigma_\varphi^{(1)} + \sigma_z^{(1)}\right)\right] + \alpha_1\theta(r),\\
\varepsilon_\varphi^{(1)}(r) &= \frac{1}{E_1}\left[\sigma_\varphi^{(1)} - \nu_1\left(\sigma_r^{(1)} + \sigma_z^{(1)}\right)\right] + \alpha_1\theta(r),\\
\varepsilon_r^{(2)}(r) &= \frac{1}{E_2}\left[\sigma_r^{(2)} - \nu_2\left(\sigma_\varphi^{(2)} + \sigma_z^{(2)}\right)\right] + \alpha_2\theta(r),\\
\varepsilon_\varphi^{(2)}(r) &= \frac{1}{E_2}\left[\sigma_\varphi^{(2)} - \nu_2\left(\sigma_r^{(2)} + \sigma_z^{(2)}\right)\right] + \alpha_2\theta(r).
\end{aligned} \tag{1}$$

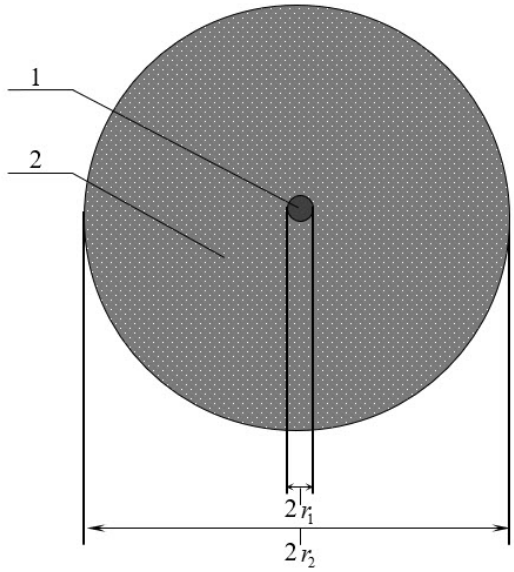



***Рисунок 1*** – Геометрична схема пружного стрижня 1, включеного у пружне середовище 2

Приймемо, що

$$\varepsilon_z^{(1)}(r)=\varepsilon_z^{(2)}(r)=0 \qquad \sigma_z^{(1)}(r)=\nu_1\left(\sigma_r^{(1)}+\sigma_\varphi^{(1)}\right)-E_1\alpha_1\theta, \quad \sigma_z^{(2)}(r)=\nu_2\left(\sigma_r^{(2)}+\sigma_\varphi^{(2)}\right)-E_2\alpha_2\theta. \quad (2)$$

З системи рівнянь (1), (2) випливає:

$$\begin{aligned}\sigma_r^{(i)}&=\frac{E_i}{(1+\nu_i)(1-2\nu_i)}\left[(1-\nu_i)\varepsilon_r^{(i)}+\nu_i\varepsilon_\varphi^{(i)}-(1+\nu_i)\alpha_i\theta\right],\\ \sigma_\varphi^{(i)}&=\frac{E_i}{(1+\nu_i)(1-2\nu_i)}\left[(1-\nu_i)\varepsilon_\varphi^{(i)}+\nu_i\varepsilon_r^{(i)}-(1+\nu_i)\alpha_i\theta\right] \quad (i=1,2).\end{aligned} \quad (3)$$

Напишемо також рівняння рівноваги при осьовій симетрії:

$$\frac{d\sigma_r^{(i)}}{dr}+\frac{2_r^{(i)}-\sigma_\varphi^{(i)}}{r}=0 \quad (i=1,2) \quad (4)$$

та додамо до них рівняння для відносних деформацій:

$$\varepsilon_r^{(i)}=\frac{du^{(i)}}{dr}, \qquad \varepsilon_\varphi^{(i)}=\frac{u^{(i)}}{r}, \qquad (i=1,2). \quad (5)$$

Використовуючи наведені співвідношення, можна побудувати систему двох неоднорідних диференціальних рівнянь:

$$\frac{d}{dr}\left[\frac{1}{r}\frac{d\left(u^{(i)}r\right)}{dr}\right]=\frac{1+\nu_i}{1-\nu_i}\alpha_i\frac{d\theta}{dr} \quad (i=1,2). \quad (6)$$

Після її двократного інтегрування отримаємо:

$$u^{(1)}(r)=\frac{1+\nu_1}{1-\nu_1}\frac{\alpha_1}{r}\int_0^r\theta\rho d\rho+C_1r+\frac{C_2}{r}\qquad(0\le r\le r_1),$$
$$u^{(2)}(r)=\frac{1+\nu_2}{1-\nu_2}\frac{\alpha_2}{r}\int_{r_1}^r\theta\rho d\rho+C_3r+\frac{C_4}{r}\qquad(r_1\le r\le r_2),\tag{7}$$

де $C_i\left(i=\overline{1,4}\right)$ – константи інтегрування, які знаходяться з крайових умов:

$$u^{(1)}(0)=0,\tag{8}$$
$$u^{(1)}(r_1)=u^{(2)}(r_1),\tag{9}$$
$$\sigma_r^{(1)}(r_1)=\sigma_r^{(2)}(r_1),\tag{10}$$
$$\sigma_r^{(2)}(r)\to 0\ \text{при}\ r\to\infty.\tag{11}$$

З рівнянь (7), (8) випливає, що для триточкової крайової задачі, що розглядається

$$C_2=0.\tag{12}$$

Щоб скористатися умовами (9) – (11), перепишемо рівняння (5) у вигляді:

$$\varepsilon_r^{(1)}(r)=-\frac{1+\nu_1}{1-\nu_1}\frac{\alpha_1}{r^2}\int_0^r\theta\rho d\rho+C_1+\frac{1+\nu_1}{1-\nu_1}\alpha_1\theta,$$
$$\varepsilon_\varphi^{(1)}(r)=\frac{1+\nu_1}{1-\nu_1}\frac{\alpha_1}{r^2}\int_0^r\theta\rho d\rho+C_1\qquad(0\le r\le r_1),$$
$$\varepsilon_r^{(2)}(r)=-\frac{1+\nu_2}{1-\nu_2}\frac{\alpha_2}{r^2}\int_{r_1}^r\theta\rho d\rho+C_3-\frac{1}{r^2}C_4+\frac{1+\nu_2}{1-\nu_2}\alpha_2\theta,\tag{13}$$
$$\varepsilon_\varphi^{(2)}(r)=\frac{1+\nu_2}{1-\nu_2}\frac{\alpha_2}{r^2}\int_{r_1}^r\theta\rho d\rho+C_3+\frac{C_4}{r^2}\qquad(r_1\le r\le r_2).$$

За їх допомогою представимо вирази для термонапружень:

$$\sigma_r^{(1)}(r)=-\frac{E_1}{1-\nu_1}\frac{\alpha_1}{r^2}\int_0^r\theta\rho d\rho+\frac{E_1}{(1+\nu_1)(1-2\nu_1)}C_1,$$
$$\sigma_\varphi^{(1)}(r)=\frac{E_1}{1-\nu_1}\frac{\alpha_1}{r^2}\int_0^r\theta\rho d\rho+\frac{E_1}{(1+\nu_1)(1-2\nu_1)}C_1-\frac{E_1\alpha_1\theta}{(1-\nu_1)},$$
$$\sigma_r^{(2)}(r)=-\frac{E_2}{1-\nu_2}\frac{\alpha_2}{r^2}\int_{r_1}^r\theta\rho d\rho+\frac{E_2}{(1+\nu_2)(1-2\nu_2)}C_3+\frac{E_2}{(1+\nu_2)}\frac{1}{r^2}C_4,\tag{14}$$
$$\sigma_\varphi^{(2)}(r)=\frac{E_2}{1-\nu_2}\frac{\alpha_2}{r^2}\int_{r_1}^r\theta\rho d\rho+\frac{E_2}{(1+\nu_2)(1-2\nu_2)}C_3+\frac{E_2}{(1+\nu_2)}\frac{1}{r^2}C_4-\frac{E_2}{(1-\nu_2)}\alpha_2\theta.$$

Використовуючи рівності (7), (14), представимо умови (9) – (11) у формі:

$$r_1 C_1 - r_1 C_3 - \frac{1}{r_1} C_4 = -\frac{1+\nu_1}{1-\nu_1}\frac{\alpha_1}{r_1}\int_0^{r_1}\theta\rho d\rho, \tag{15}$$

$$\frac{E_1}{(1+\nu_1)(1-2\nu_1)} C_1 - \frac{E_2}{(1+\nu_2)(1-2\nu_2)} C_3 + \frac{E_2}{(1+\nu_2)}\frac{1}{r_1^2} C_4 = \frac{E_1}{1-\nu_1}\frac{\alpha_1}{r_1^2}\int_0^{r_1}\theta\rho d\rho, \tag{16}$$

$$-\frac{E_2}{(1-\nu_2)}\frac{\alpha_2}{r^2}\int_{r_1}^{r}\theta\rho d\rho C_1 + \frac{E_2}{(1+\nu_2)(1-2\nu_2)} C_3 - \frac{E_2}{(1+\nu_2)}\frac{1}{r^2} C_4 \to 0 \text{ при } r \to \infty. \tag{17}$$

З умови (17) випливає

$$C_3 = \frac{(1+\nu_2)(1-2\nu_2)}{(1-\nu_2)}\frac{\alpha_2}{r^2}\int_{r_1}^{+\infty}\theta\rho d\rho \quad \text{при} \quad r \to \infty, \tag{18}$$

і системи рівнянь (15), (16) зводяться до вигляду

$$\begin{aligned} &C_1 - \frac{1}{r_1^2} C_4 = -\frac{1+\nu_1}{1-\nu_1}\frac{\alpha_1}{r_1^2}\int_0^{r_1}\theta\rho d\rho + \frac{(1+\nu_2)(1-2\nu_2)}{(1-\nu_2)}\frac{\alpha_2}{r^2}\int_{r_1}^{+\infty}\theta\rho d\rho, \\ &\frac{E_1}{(1+\nu_1)(1-2\nu_1)} C_1 + \frac{E_2}{(1+\nu_2)}\frac{1}{r_1^2} C_4 = \frac{E_1}{1-\nu_1}\frac{\alpha_1}{r_1^2}\int_0^{r_1}\theta\rho d\rho + \frac{E_2}{(1-\nu_2)}\frac{\alpha_2}{r^2}\int_{r_1}^{+\infty}\theta\rho d\rho \text{ при } 8\ r \to \infty. \end{aligned} \tag{19}$$

Введемо позначення:

$$\begin{aligned} &a_{11} = 1, \qquad a_{12} = -\frac{1}{r_1^2}, \\ &a_{21} = \frac{E_1}{(1+\nu_1)(1-2\nu_1)}, \qquad a_{22} = \frac{E_2}{(1+\nu_2)}\frac{1}{r_1^2}, \\ &b_1 = -\frac{(1+\nu_1)}{(1-\nu_1)}\frac{\alpha_1}{r_1^2}\int_0^{r_1}\theta\rho d\rho + \frac{(1+\nu_2)(1-2\nu_2)}{(1-\nu_2)}\frac{\alpha_2}{r^2}\int_{r_1}^{+\infty}\theta\rho d\rho, \\ &b_2 = \frac{E_1}{(1-\nu_1)}\frac{\alpha_1}{r_1^2}\int_0^{r_1}\theta\rho d\rho + \frac{E_2}{(1-\nu_2)}\frac{\alpha_2}{r^2}\int_{r_1}^{+\infty}\theta\rho d\rho. \end{aligned} \tag{20}$$

Використовуючи їх, знаходимо значення констант:

$$\begin{aligned} &C_1 = \frac{(b_1 a_{22} - b_2 a_{12})}{(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})}, \\ &C_2 = 0, \\ &C_3 = \frac{(1+\nu_2)(1-2\nu_2)}{(1-\nu_2)}\frac{\alpha_2}{r^2}\int_{r_1}^{r}\theta\rho d\rho \ \text{ при } \ r \to \infty, \\ &C_4 = \frac{(a_{11}b_2 - a_{21}b_1)}{(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})}, \end{aligned} \tag{21}$$

а потім переміщень (7) та термонапружень (14). При цьому вирази для переміщень (7) зводяться до вигляду:

$$u_1(r)=\frac{1+\nu_1}{1-\nu_1}\frac{\alpha_1}{r}\int_0^r\theta\rho d\rho+r\frac{(b_1a_{22}-b_2a_{12})}{(a_{11}a_{22}-a_{12}a_{21})},$$
$$u_2(r)=\frac{1+\nu_2}{1-\nu_2}\frac{\alpha_2}{r}\int_{r_1}^r\theta\rho d\rho+r\frac{(1+\nu_2)(1-2\nu_2)}{(1-\nu_2)}\frac{\alpha_2}{r^2}\int_{r_1}^r\theta\rho d\rho+\frac{1}{r}\frac{(a_{11}b_2-a_{21}b_1)}{(a_{11}a_{22}-a_{12}a_{21})}\quad\text{при } r\to\infty. \tag{22}$$

Запишемо також співвідношення для термонапружень:

$$\sigma_r^{(1)}(r)=-\frac{E_1}{1-\nu_1}\frac{\alpha_1}{r^2}\int_0^r\theta\rho d\rho+\frac{E_1(b_1a_{22}-b_2a_{12})}{(1+\nu_1)(1-2\nu_1)(a_{11}a_{22}-a_{12}a_{21})},$$
$$\sigma_\varphi^{(1)}(r)=\frac{E_1}{1-\nu_1}\frac{\alpha_1}{r^2}\int_0^r\theta\rho d\rho+\frac{E_1(b_1a_{22}-b_2a_{12})}{(1+\nu_1)(1-2\nu_1)(a_{11}a_{22}-a_{12}a_{21})}-\frac{E_1\alpha_1\theta}{(1-\nu_1)},$$
$$\sigma_r^{(2)}(r)=-\frac{E_2}{1-\nu_2}\frac{\alpha_2}{r^2}\int_{r_1}^r\theta\rho d\rho+\frac{E_2}{1-\nu_2}\frac{\alpha_2}{r^2}\int_{r_1}^\infty\theta\rho d\rho+\frac{E_2(a_{11}b_2-a_{21}b_1)}{r^2(1+\nu_2)(a_{11}a_{22}-a_{12}a_{21})}, \tag{23}$$
$$\sigma_\varphi^{(2)}(r)=\frac{E_2}{1-\nu_2}\frac{\alpha_2}{r^2}\int_{r_1}^r\theta\rho d\rho+\frac{E_2}{1-\nu_2}\frac{\alpha_2}{r^2}\int_{r_1}^\infty\theta\rho d\rho+\frac{E_2(a_{11}b_2-a_{21}b_1)}{r^2(1+\nu_2)(a_{11}a_{22}-a_{12}a_{21})}-\frac{E_2}{(1-\nu_2)}\alpha_2\theta.$$

На відміну від випадку полів постійної температури [6] при температурі, що змінюється за просторовими змінними напруження $\sigma_r^{(1)}(r)$ та $\sigma_\varphi^{(1)}(r)$ залежать від $r$, а напруження $\sigma_r^{(2)}(r)$, $\sigma_\varphi^{(2)}(r)$ містять доданок, що спадає пропорційно величині $r^{-2}$, та доданок, у явній формі, що залежить від $\theta$.

## Аналіз числових результатів

У якості прикладу розглянемо випадок, коли сталевий армуючий стрижень 1 додали в асфальтобетонну матрицю 2. Значення термомеханічних параметрів цих фракцій складають: $E_1$ = 200 ГПа, $\lambda_1$ = 115 ГПа, $\mu_1$ = 76,5 ГПа, $\nu_1$ = 0,3, $\alpha_1 = 1\cdot10^{-5}$ °C$^{-1}$, $r_1$ = 0,004 м, $E_2$ =2,4 ГПа, $\lambda_2$ = 1,38 ГПа, $\mu_2$ = 0,923 ГПа, $\nu_2$ = 0,3, $\alpha_2 = 2\cdot10^{-5}$ °C$^{-1}$, $r_1$ = 0,004 м.

Нехай приріст температури дорівнює (**рис. 2**).

$$\theta(r)=\theta_0+ae^{-br}. \tag{24}$$

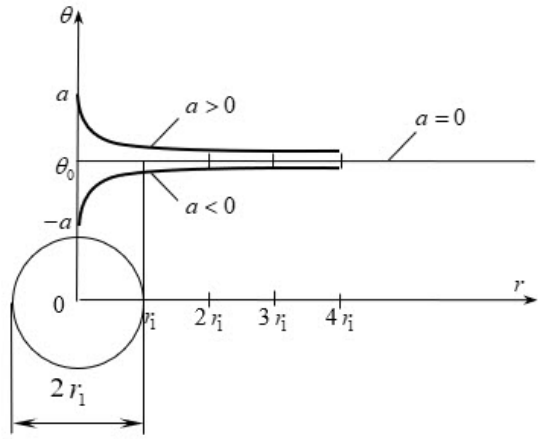



***Рисунок 2*** – Схема розподілення приросту температури $\theta(r)$ у пружній системі

Експоненціальну зміну функції $\theta(r)$ у вигляді (24) вибрано у зв'язку з тим, що експонента являє собою один з найбільш зустрічних частинних розв'язків рівняння теплопровідності. На **рис. 2**, побудованому при $b > 0$, максимальне значення $\theta(r)$ має місце на осі включення 1 при $a > 0$ і далі воно спадає за експонентою, наближуючись до горизонталі $\theta(r) = \theta_0$. При $a < 0$ функція $\theta(r)$ має найбільше значення на осі $Or$.

Відмітимо, що для функції температури вигляду (24) її градієнт є змінним вектором, тому в даному випадку до внутрішнього механізму зародження термонапружень додається також Градієнтний механізм.

Для обчислення термонапружень (23) необхідно в рівняння (20) підставити інтеграли $\int_0^r \theta\rho d\rho$ і $\int_{r_1}^r \theta\rho d\rho$. Перший інтеграл обчислюють за допомогою формули інтегрування частинами:

$$\begin{aligned}&\int_0^r \theta(\rho)\rho d\rho = \int_0^r \left(\theta_0 + ae^{-br}\right)\rho d\rho = \frac{\theta_0 r^2}{2} + a\int_0^r e^{-br}\rho d\rho = \frac{\theta_0 r^2}{2} - \frac{a}{b}\int_0^r \rho d\left(e^{-br}\right) = \\ &= \frac{\theta_0 r^2}{2} - \frac{a}{b}\rho e^{-br}\Big|_0^r + \frac{a}{b}\int_0^r e^{-br} d\rho = \frac{\theta_0 r^2}{2} - \frac{a}{b}e^{-br} r - \frac{a}{b^2}e^{-br} + \frac{a}{b^2} \quad (0 \le r \le r_1).\end{aligned} \tag{25}$$

Аналогічно обчислюється другий інтеграл:

$$\int_{r_1}^r \theta(\rho)\rho d\rho = \int_{r_1}^r \left(\theta_0 + ae^{-br}\right)\rho d\rho = \frac{\theta_0\left(r^2 - r_1^2\right)}{2} - \frac{a}{b}re^{-br} + \frac{a}{b}r_1 e^{-br_1} - \frac{a}{b^2}e^{-br} + \frac{a}{b^2}e^{-br_1} \quad (r \ge r_1). \tag{26}$$

Підставляючи ці значення в праві частини рівностей для функцій $b_1(r)$, $b_2(r)$ в (20), обчислюємо значення констант $C_i\left(i = \overline{1,4}\right)$ в (21), а потім і напруження $\sigma_r(r)$ та $\sigma_\varphi(r)$ за формулами (23). Зазвичай внутрішньоструктурні термонапруження мають найбільше значення на інтерфейсній поверхні $r = r_1$.

Тоді

$$\begin{aligned}&\int_0^r \theta(\rho)\rho d\rho = \frac{\theta_0 r_1^2}{2} - \frac{a}{b}\left(r_1 + \frac{1}{b}\right)e^{-br_1} + \frac{a}{b^2}, \\ &\int_{r_1}^r \theta(\rho)\rho d\rho - \int_{r_1}^{r_1} \theta(\rho)\rho d\rho = 0, \\ &\frac{1}{r^2}\int_{r_1}^r \theta(\rho)\rho d\rho = \frac{\theta_0}{2} \text{ при } r \to \infty.\end{aligned} \tag{27}$$

При цьому

$$C_3 = \frac{(1+\nu_2)(1-2\nu_2)}{2(1-\nu_2)}\alpha_2\theta_0. \tag{28}$$

Розглянемо випадок $\theta_0 = -20$ °C, $a = \pm 5$ °C при $b = 100$; 200 та 300 м$^{-1}$. Значення температури $\theta(r)$ у вибраних точках на осі $Or$ при $r_1 = 0{,}004$ м наведені в ***табл. 1***.

*Таблиця 1*

***Значення температури в характерних точках системи***

| $a$, °C | | $b$ = 100 м$^{-1}$ | $b$ = 200 м$^{-1}$ | $b$ = 300 м$^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|
| $a$ = 5 | $\theta(r)$, °C | –15 | –15 | –15 |
| | $\theta(r_1)$, °C | –16,65 | –17,76 | –18,49 |
| | $\theta(2r_1)$, °C | –17,76 | –18,99 | –19,54 |
| $a$ = 0 | $\theta(r)$, °C | –20 | –20 | –20 |
| | $\theta(r_1)$, °C | –20 | –20 | –20 |
| | $\theta(2r_1)$, °C | –20 | –20 | –20 |
| $a$ = –5 | $\theta(r)$, °C | –25 | –25 | –25 |
| | $\theta(r_1)$, °C | –23,35 | –22,24 | –21,51 |
| | $\theta(2r_1)$, °C | –22,24 | –21,00 | –20,45 |

З цих даних випливає, що найбільші значення градієнта температури $\theta(r)$ реалізуються у зоні інтерфейсної поверхні $r = r_1$. У цих же зонах мають місце і найбільші значення термонапружень.

Значення констант $C_i\left(i=\overline{1,4}\right)$ за вибраних параметрів системи наведені в **табл. 2**.

*Таблиця 2*

***Значення констант інтегрування***

| $a$, °C | $b$, м$^{-1}$ | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $a$ = 5 | 100 | –8,1458 | 0 | –14,857 | $-1{,}006 \cdot 10^{-4}$ |
| | 200 | –6,4616 | 0 | –14,857 | $-1{,}184 \cdot 10^{-4}$ |
| | 300 | –6,6972 | 0 | –14,857 | $-1{,}317 \cdot 10^{-4}$ |
| $a$ = 0 | | –7,5528 | 0 | –14,857 | $-1{,}802 \cdot 10^{-4}$ |
| $a$ = –5 | 100 | –8,9578 | 0 | –14,857 | $-2{,}549 \cdot 10^{-4}$ |
| | 200 | –8,6439 | **0** | –14,857 | $-2{,}421 \cdot 10^{-4}$ |
| | 300 | –8,4084 | 0 | –14,857 | $-2{,}287 \cdot 10^{-4}$ |

Обчислені за таких даних термонапруження на поверхні $r = r_1$ тіла 1 та середовища 2 подані в **табл. 3**. Аналіз цих результатів дозволяє зробити висновок, що при, навіть, порівняно невеликому однаковому прирості температури ($a$ = 0 °C, $\theta$ = –20 °C) в арматурі 1 та матриці 2 напруження в асфальтобетонному середовищі складають десятки процентів від значення її границі міцності при розтягуванні, яке може бути в 5 – 6 разів менше його границі міцності при стисканні. Крім того при $a$ = 5 °C напруження $\sigma_r^{(2)}(r)$ та $\sigma_\varphi^{(2)}(r)$ мають різні знаки. Це означає, що напруження розтягування в асфальтобетоні при $a$ = 5 °C реалізуються у будь-якому випадку. Відмітимо, що при спільній дії термічного та транспортного навантаження ці термонапруження можуть виявитися критичними.

*Таблиця 3*

***Значення термонапружень в тілі 1 та середовищі 2 на поверхні*** $r = r_1$

| $a$, °C | $b$, м$^{-1}$ | $\sigma_r^{(1)}(r_1)$, МПа | $\sigma_\varphi^{(1)}(r_1)$, МПа | $\sigma_r^{(2)}(r_1)$, МПа | $\sigma_\varphi^{(2)}(r_1)$, МПа |
|---|---|---|---|---|---|
| $a = 5$ | 100 | –0,5696 | 0,8518 | –0,5696 | 0,3399 |
| | 200 | –0,5491 | 1,5870 | –0,5491 | 0,3955 |
| | 300 | –0,5339 | 1,8457 | –0,5339 | 0,4301 |
| $a = 0$ | | –0,4777 | –0,4777 | –0,4777 | 0,4777 |
| $a = –5$ | 100 | –0,3858 | –1,8059 | –0,3858 | –0,29989 |
| | 200 | –0,4063 | –2,5424 | –0,4063 | –0,2794 |
| | 300 | –0,4218 | –2,8115 | –0,4218 | –0,2639 |

При $a = –5$ °C всі напруження є стискаючими, оскільки вони від'ємні. Однак ця обставина також не покращує ситуацію, оскільки при зміні напрямку теплообмінного режиму вона змінюється на обернену.

Ефект Градієнтного механізму ініціювання внутрішньоструктурних термонапружень, що здійснюється в даному випадку, може супроводжуватись, також тим, що тут можуть втрачатися умови для прояву принципу Сен-Венана. Це зумовлено тим, що температура системи виявляється змінною у всіх її точках, градієнт температури ніде не дорівнює нулю, та термонапруження, що ним викликаються, можуть також не прямувати до нуля (або прямувати до нуля дуже повільно) при віддалені від джерела термічного збурення.

## Висновки

1. Поставлена задача про теоретичне моделювання явища зародження внутрішньоструктурних термонапружень в композитному матеріалі, що містить стрижневу арматуру з відмінними термомеханічними параметрами, при дії термічного збурення вздовж радіальної координати.

2. Сформульована триточкова система звичайних диференціальних рівнянь з додатковими умовами на краях області визначення розв'язку та константними рівняннями сумісності розв'язків на інтерфейсній поверхні. Побудовано розв'язок цієї системи, знайдені функції переміщень, деформацій і напружень для випадку зміни температури системи вздовж радіальної координати за експоненціальним законом.

3. Аналіз цих розв'язків свідчить про те, що поля термонапружень в системі в значній мірі визначаються показниками експоненти температури та їх вклад в термопошкодження системи може бути помітним.

## Список літератури

1. Гуляєв В.І., Гайдайчук В.В., Мозговий В.В., Густєлєв О.О., Заєць Ю.О., Шевчук Л.В., Шлюнь Н.В. Термопружний стан багатошарових дорожніх покриттів. Київ, НТУ, 2018. 252 с.

2. Коваленко А.Д. Основы термоупругости: Киев, 1970. 239 с.

3. Шлюнь Н.В., Заєць Ю.О. Про внутрішній механізм термопошкоджень в армованих композитах з термомеханічною несумісністю їх фаз. *Вісник НТУ. Серія «Технічні науки»*. Київ, НТУ, 2022. Вип. 3 (53). С. 427–432.

4. Elwardany M.D., King G., Planche J.P., Rodezno C., Christensen D., Fertig Ill R.S., Kuhn K.H., Bhuiyan F.H. Internal restraint damage mechanism for age-induced pavement surface damage. *Asphalt Paving Technol: J. Assoc. Asphalt Paving Technol*. 2019. 88 c.

5. Elwardany M., Planche J.-P., King G. Universal and practical approach to evaluate asphalt binder resistance to thermally-induced damage. *Construction and Building Materials*. 2020. 255, 119331. P. 1–18.

6. Gulyayev V.I., Mozgovyi V.V., Shlyun N.V., Shevchuk L.V. Modelling negative thermomechanical effects in reinforced road structures with thermoelastic incompatibility of coating and reinforcement materials. System Research and Information Technologies. 2022. 2. P. 117–127.

7. Hetnarski R.B., Eslomi M.R. Thermalstress – Advanced Theory and Applications Springer Scieience Business Media B.V. 2009.

8. Noda, N., Hetnarski, R.B. and Tanigawa, Y. Thermal Stresses. 2nd edition, New York: Taylor and Francis. 2003.

9. Nowacki W. Thermoelasticity, 2 nd ed. Oxford: PWN – Polish Scientific Publishers, Warsaw and Pergamon Press. 1986.

10. Rozen W., Ketler E., Hashin Z., Hollow glass fibre reinforced plastics. General Electric Missile & Space devision. Philadelphia, 1962.

11. Setiawan Dian M. The role of temperature differential and subgrade quality stress, curling, and deflection behavior of rigid pavement. Journal of the mechanical behavior of Materials. 2011. V.29, Issue 5-6. id.10,12 p.

12. Takenaka K., Negative Thermal Expansion Materials: Technological Key for Control of Thermal Expansion. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2012. Vol. 13. P. 1–11. DOI: 10.1088/1468-6996/13/1/013001.

13. Trussdell C. Carson D.E. Thermoelasticity, Encyclopedia of Physics, Vol.via/2, Berlin, spring, 1972.

## References

1. Huliaiev V.I., Haidaichuk V.V., Mozghovyi V.V., Hustieliev O.O., Zaiets Yu.O., Shevchuk L.V., Shliun N.V. Termopruzhnyi stan bahatosharovykh dorozhnikh pokryttiv [Thermoelastic state of multilayer road surfaces]. Kyiv, NTU, 2018. 252 p. [in Ukrainian].

2. Kovalenko A.D. Osnovy termoupruhosty [Fundamentals of thermoelasticity]. Kyiv, 1970. 239 p. [in Russian].

3. Shliun N.V., Zaiets Yu.O. Pro vnutrishnii mekhanizm termoposhkodzhen v armovanykh kompozytakh z termomekhanichnoiu nesumisnistiu yikh faz [On the internal mechanism of thermal damage in reinforced composites with thermomechanical incompatibility of their phases]. *Visnyk NTU. Seriia «Tekhnichni nauky»*. Kyiv, NTU, 2022. Iss. 3 (53), P. 427–432 [in Ukrainian].

4. Elwardany M.D., King G., Planche J.P., Rodezno C., Christensen D., Fertig Ill R.S., Kuhn K.H., Bhuiyan F.H. Internal restraint damage mechanism for age-induced pavement surface damage. Asphalt Paving Technol: J. Assoc. Asphalt Paving Technol. 2019. 88 p. [in English].

5. Elwardany M., Planche J.-P., King G. Universal and practical approach to evaluate asphalt binder resistance to thermally-induced damage. *Construction and Building Materials*. 2020. 255, 119331. P. 1–18 [in English].

6. Gulyayev V.I., Mozgovyi V.V., Shlyun N.V., Shevchuk L.V. Modelling negative thermomechanical effects in reinforced road structures with thermoelastic incompatibility of coating and reinforcement materials. *System Research and Information Technologies*. 2022. 2. P.117–127. 403 DOI: https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2022.2.09 [in English].

7. Hetnarski R.B., Eslomi M.R. Thermalstress – Advanced Theory and Applications Springer Scieience Business Media B.V., 2009 [in English].

8. Noda, N., Hetnarski, R.B. and Tanigawa, Y. Thermal Stresses. 2nd edition, New York: Taylor and Francis. 2003 [in English].

9. Nowacki W. Thermoelasticity, 2 nd ed. Oxford: PWN – Polish Scientific Publishers, Warsaw and Pergamon Press. 1986 [in English].

10. Rozen W., Ketler E., Hashin Z., Hollow glass fibre reinforced plastics. General Electric Missile & Space devision. Philadelphia, 1962 [in English].

11. Setiawan Dian M. The role of temperature differential and subgrade quality stress, curling, and deflection behavior of rigid pavement. Journal of the mechanical behavior of Materials. 2011. V.29. Issue 5-6, id.10,12 p. [in English].

12. Takenaka K., Negative Thermal Expansion Materials: Technological Key for Control of Thermal Expansion. Science and Technology of Advanced Materials. 2012. Vol. 13. P. 1–11. DOI: 10.1088/1468-6996/13/1/013001 [in English].

13. Trussdell C. Carson D.E. Thermoelasticity, Encyclopedia of Physics, Vol.via/2, Berlin, spring, 1972 [in English].

**Valerii Gulyayev**, *D.Sc., Prof., https://orcid.org/0000-0002-5388-006X*
**Nataliia Shlyun**, *Ph.D., Associate Prof., https://orcid.org/0000-0003-1040-8870*
*National Transport University (NTU), Kyiv, Ukraine*

## MATHEMATICAL MODELING OF INTERNAL STRUCTURAL THERMAL STRESSES CAUSED BY VARIABLE TEMPERATURE FIELDS IN COMPOSITES WITH ROD REINFORCEMENT

***Abstract***

Introduction. Thermomechanical effects arising in heterogeneous composite materials under the influence of temperature significantly affect the strength and durability of structures made of them. These effects have a special influence on the thermal deformation of bridge and road structures under conditions of seasonal and daily changes in ambient temperature. They are caused by non-uniformity of the thermomechanical parameters of its fractions and fittings. Until now, the phenomenon of thermomechanical deformation of reinforced structures has not been sufficiently studied, therefore the tasks of their research are urgent.

Problem Statement. The problem of the performed research is to establish the laws of thermomechanical deformation of composite materials (including cement concrete and asphalt concrete), which are reinforced with reinforcing rods, in the fields of variable temperatures.

Purpose. The purpose of the work is to derive mathematical ratios that determine intrastructural thermal stresses in composites caused by variable temperature fields and heterogeneity of materials.

Materials and methods. In this work, based on the provisions of the theory of thermoelasticity, the task of analytical research of intrastructural thermal stresses in composites with rod reinforcement under the influence of variable temperature fields under conditions of thermomechanical incompatibility of the

system components is set. A mathematical model of thermoelastic deformation of a non-homogeneous material has been developed, containing a three-point system of ordinary differential equations with boundary equalities at the edges of the area selected for calculation and on the surface of the contact of the reinforcement with the matrix. The solution of these equations for the case of exponential temperature distribution, which is the general solution of the heat conduction equation, was constructed using the methods of mathematical analysis. Displacement and stress distribution functions are formulated.

Results. On the example of asphalt concrete material reinforced with steel rods, distribution functions of thermal displacements and intrastructural thermal stresses are constructed for various cases of exponential temperature distribution in the system at typical values of the thermomechanical characteristics of the system phases.

Conclusions. As a result of mathematical modeling, it was established that in cases of thermal deformation of composite materials in variable temperature fields, two mechanisms of the occurrence of intrastructural thermal stresses in the system are implemented: the internal mechanism and the gradient mechanism. It is shown that even at relatively low temperature values, intrastructural thermal stresses can reach significant values. They are maximal on the contact surface, have a local character and rapidly decrease with distance from it. At the same time, with a change in the exponents of the function of the temperature change, the field of thermal stresses has a tendency to be significantly rearranged. Examples from practice are considered.

***Keywords:*** infrastructural thermal stresses, variable temperature fields, composite, rod reinforcement..

https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.080

**УДК 625.745.1:691**

**Цинка А. О.**, *канд. техн. наук, https://orcid.org/0000-0002-0357-2325*
**Ілляш С. І.**, *канд. техн. наук, https://orcid.org/0000-0002-3001-8012*
**Зеленовський В. А.**, *https://orcid.org/0000-0001-5834-5456*
**Рибальченко С. А.**, *https://orcid.org/0000-0002-4628-9546*

*Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (ДП «ДержДорНДІ»), м. Київ, Україна*

# УДОСКОНАЛЕННЯ ВИМОГ ДО ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО СТАНУ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

***Анотація***

Вступ. У цій статті розглядається питання щодо удосконалення вимог до експлуатаційного стану автомобільних доріг загального користування та вулиць (далі – автомобільних доріг) і залізничних та трамвайних переїздів на підставі аналізу діючих нормативно-правових актів, нормативних документів, технічної літератури, яка відноситься до об'єктів стандартизації, з урахуванням вимог щодо безпеки та охорони довкілля на стадії експлуатації автомобільної дороги.

Проблематика. Значна кількість дорожньо-транспортних пригод, що відбулися через дефекти складових автомобільних доріг, вимагає удосконалення організування та проведення оглядань і обстежень автомобільних доріг із встановленням відповідності визначеного ряду показників нормативним вимогам. Крім того, у резолюції, прийнятій Генеральною Асамблеєю ООН від 31.08.2020 № 74/299 «Підвищення безпеки дорожнього руху у всьому світі», зазначено, що смертності та тяжкому травматизму в результаті дорожньо-транспортних пригод у більшості випадків можна запобігти на підставі створення більш безпечної інфраструктури автомобільних доріг, чому також сприяє розроблення нормативних документів, які встановлюють сучасні технічні вимоги до експлуатаційного стану автомобільних доріг.

Мета роботи. Забезпечення безпеки та комфортних умов для учасників дорожнього руху, підвищення довговічності автомобільних доріг і встановлення чітких однозначних вимог до експлуатаційного утримування автомобільних доріг.

Матеріали і методи. У статті використано діючі стандарти України, матеріали європейських і світових форумів щодо безпеки дорожньої інфраструктури, вітчизняний та світовий досвід, здобутий під час будування, ремонтування та експлуатування автомобільних доріг.

Результати. Установлено рівні вимог до експлуатаційного стану автомобільних доріг, зміни та доповнення до утримування їх окремих складових з урахуванням сучасних вимог.

Висновки. ДСТУ 3587:2022 «Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги. Вимоги до експлуатаційного стану» є основоположним документом, який регламентує основні вимоги щодо експлуатаційного утримування автомобільних доріг загального користування та вулиць. Його перегляд дав можливість урахувати найсучасніші науково обґрунтовані вимоги щодо підвищення безпеки на автомобільних дорогах під час їх експлуатування, що одночасно сприятиме забезпеченню збереження якісних показників, зокрема міцності та надійності всіх елементів автомобільних доріг. Оцінювання відповідності автомобільних доріг вимогам зазначеного національного стандарту має здійснюватись на етапі експлуатування, у тому числі під час оцінювання їхнього технічного стану на основі відповідних міждержавних стандартів,

а планування різних видів дорожніх робіт на поточному етапі експлуатування дозволить проводити реальне оцінювання ефективності варіантів призначених заходів щодо продовження строку експлуатування дорожніх конструкцій.

***Ключові слова:*** автомобільна дорога, безпека дорожнього руху, дефект, дорожній покрив, експлуатаційне утримування, організування дорожнього руху, рівні вимог до експлуатаційного стану, технічні засоби організації дорожнього руху.

## Вступ

Директивою Європейського Парламенту і Ради 2008/96/ЄС від 19.11.2008 «Про управління безпекою дорожньої інфраструктури» визначено, що одним з напрямків вирішення проблем безпеки є встановлення вимог щодо проведення обстежень стосовно безпеки дорожнього руху, у тому числі періодичного та цільового інспектування дорожньої безпеки, що зобов'язує до періодичного перевіряння та ідентифікації характеристик і дефектів на автомобільних дорогах, які потребують усунення.

Представниками передових країн світу на ІІІ Глобальній міністерській конференції з безпеки дорожнього руху, що відбулася 19 – 20.02.2020 у м. Стокгольмі (Швеція), було ухвалено Стокгольмську декларацію, згідно з якою зобов'язалися використовувати та просувати законодавство та стандарти щодо проєктування, будування та експлуатування автомобільних доріг і забезпечити їх виконання.

Стратегією підвищення рівня безпеки дорожнього руху в Україні до 2024 року, схваленою розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21.10.2020 № 1360-р, встановлено, що невідповідність стандартів безпеки дорожнього руху сучасним вимогам є однією з причин виникнення проблем з безпеки дорожнього руху. Одним з напрямків реалізації цієї Стратегії є проведення оцінювання безпеки наявної дорожньої інфраструктури та запровадження інженерних рішень щодо поліпшення показників безпеки, що неможливо виконати без встановлення відповідними стандартами вимог до складових елементів автомобільної дороги.

Ураховуючи вищезазначене, забезпечення дотримання вимог будівельних норм і нормативних документів у сфері експлуатаційного утримування автомобільних доріг загального користування та вулиць є одним з пріоритетних напрямків державної політики у дорожньому господарстві.

Роботи з перегляду ДСТУ 3587 [8] пов'язані із напрямком держави до приведення вітчизняних нормативних документів до європейських і світових вимог і потребою урахування змін у наявних та прийняття нових національних стандартів, будівельних норм, інших документів, які стосуються вимог до експлуатаційного стану:

– автомобільних доріг (рівності дорожнього покриву, коефіцієнта зчеплення колеса автомобіля з вологим покривом, вимоги щодо видимості у напрямку руху на перехрестях і кривих у плані та гранично допустимих величин пошкоджень елементів автомобільних доріг – покриву проїзної частини, люків оглядових колодязів і дощоприймачів зливостічних колодязів, підземних і наземних пішохідних переходів, порушень відміток оголовків рельс, поверхонь узбіч, біопереходів, шумозахисних екранів, розділювальних смуг, укосів);

– технічних засобів організування дорожнього руху (дорожніх знаків, дорожньої розмітки, огороджень, світлофорів, напрямних пристроїв, протизасліплювальних екранів, шумових смуг, засобів заспокоєння руху (дорожніх пагорбів), штучного освітлення, тактильних наземних покажчиків перед пішохідними переходами, бортових каменів);

– автомобільних доріг в екстремальних умовах (зимовий період або за підвищених температур).

## Виклад основного матеріалу

Базовими документами для визначення вимог до експлуатаційного стану є ДБН В.2.3-4 [6], ДБН В.2.3-5 [7] та низка національних стандартів, які визначають загальні технічні вимоги до окремих складових автомобільних доріг.

Значно розширено сферу дії ДСТУ 3587 [9] та уточнено окремі положення стандарту. За останні двадцять п'ять років розвиток технічних засобів організування дорожнього руху та вимог до складових автомобільних доріг зріс настільки, що тільки перелік нормативних документів, використаних під час розроблення проєкту ДСТУ 3587 [9], виріс у чотири рази. У цьому стандарті враховані вимоги сучасних нормативних документів, у тому числі гармонізованих з європейськими стандартами:

– ДСТУ EN 1317-1:2018 Дорожні стримувальні системи. Частина 1. Терміни та загальні методи випробування;

– ДСТУ EN 1317-2:2018 Дорожні стримувальні системи. Частина 2. Класи експлуатаційних характеристик, критерії прийнятності ударних випробувань і методи випробування огородження бар'єрного та парапетного типів;

– ДСТУ Б EN 1433:2016 Лотки водовідвідні для транспортних і пішохідних зон. Класифікація, вимоги до виготовлення, методи випробувань, маркування та оцінка відповідності.

Переглянутий ДСТУ враховує забезпечення інклюзивності – вимог міжнародного стандарту ДСТУ ISO 23599:2017 «Вироби для надання допомоги сліпим і людям зі слабким зором. Тактильні індикатори пішохідної зони». Дотримання вимог цього стандарту сприятиме своєчасному відновленню тактильних смуг і дозволить покращити умови пересування сліпим і людям зі слабким зором.

Важливою складовою нововведень у ДСТУ 3587 [9] є запровадження рівнів вимог до експлуатаційного стану окремо для автомобільних доріг загального користування (**табл. 1**) та вулиць (**табл. 2**), які визначають ступінь відповідності постійних (які не змінюються в процесі експлуатування або змінюються лише під час реконструювання та капітального ремонтування) геометричних параметрів, характеристик автомобільної дороги нормативним вимогам. Із впровадженням розподілу автомобільних доріг за рівнями вимог визначають їх пріоритет із підтримання споживчих властивостей.

***Таблиця 1***

***Рівні вимог до експлуатаційного стану автомобільних доріг загального користування***

| Рівень вимог | Автомобільні дороги загального користування згідно з ДБН В.2.3-4 | Інтенсивність руху в транспортних одиницях, авт./добу |
|---|---|---|
| 1 | міжнародні та національні | понад 7 000 |
| 2 | міжнародні та національні | до 7 000 |
| | регіональні та територіальні | понад 3 000 |
| 3 | регіональні та територіальні | до 3 000 |
| | обласні | понад 1 000 |
| 4 | всі інші, що не увійшли до (1–3) | – |

Також важливою складовою нововведень у ДСТУ 3587 [9] є надання термінів та визначень позначених ними понять для загального їх розуміння та використання, зокрема таких як:

– поточне оглядання автомобільної дороги;
– спеціальне обстеження автомобільної дороги;
– цільове оглядання автомобільної дороги.

***Таблиця 2***

***Рівні вимог до експлуатаційного стану вулиць***

| Рівень вимог | Категорія вулиць згідно з ДБН В.2.3-5 |
|---|---|
| А | магістральні дороги |
| Б | магістральні вулиці загальноміського значення |
| В | магістральні вулиці районного значення, житлові вулиці, дороги в науково-виробничих, промислових і комунально-складських зонах, проїзди |
| Г | паркові дороги, дороги господарського призначення, пішохідні та велосипедні доріжки |

У ДСТУ 3587 [9] визначено періодичність проведення вищезазначених оглядання та обстежень.

Без проведення цих заходів неможливе своєчасне виявлення дефектів і невідповідностей за окремими показниками експлуатаційного стану автомобільних доріг і прийняття відповідних рішень.

Визначення періодичності проведення поточних оглядань елементів автомобільної дороги у прив'язці до рівня вимог (**табл. 3**) дозволить дорожній організації, відповідальній за утримування ділянки автомобільної дороги, удосконалити організування виконання робіт.

***Таблиця 3***

***Періодичність проведення поточних оглядань елементів автомобільної дороги***

| Рівень вимог до експлуатаційного стану | | Періодичність проведення |
|---|---|---|
| автомобільних доріг загального користування | вулиць | |
| 1 | А | щотижня |
| 2 | Б | щодекадно |
| 3 | В | щомісячно |
| 4 | Г | щоквартально |
| **Примітка**. Для автомобільних доріг, що пролягають у гірській місцевості, строки проведення поточних оглядань за потреби можуть бути скорочені. | | |

Однією з важливих складових нововведень в ДСТУ 3587 [9] є також запровадження ідентифікації дефектів дорожнього покриву. ДСТУ 3587 [8] не розділяв види дефектів проїзної частини та надавав загальну кількість на одиницю дорожнього покриву. Тому у додатку нового документа надано види дефектів, у тому числі дорожнього покриву, що впливають на безпеку дорожнього руху. Ідентифікація дефектів дорожнього покриву за видами, у поєднанні з додатком А «Класифікатор основних типів руйнувань та деформацій дорожнього одягу» ДСТУ 8954 [10], надають допомогу експлуатаційній організації з визначення причин виникнення дефекту і вибору методу його ліквідації, а відповідно більш якісного і дешевшого ремонтування.

У ДСТУ надаються науково обґрунтовані граничні величини дефектів дорожнього покриву за окремими видами та рівнями вимог (**табл. 4**).

Важливою складовою нововведень є нові вимоги до показників рівності дорожнього покриву, які удосконалено за результатами проведення наукових досліджень, доповнено сучасним профілометричним методом (за індексом IRI) і викладено в **табл. 5**. Використання профілометричного методу дозволяє швидко і точно визначити показник рівності поверхні дорожнього покриву.

*Таблиця 4*

***Гранично допустимі величини дефектів дорожнього покриву***

| Ч.ч. | Види дефектів дорожнього покриву | Гранична величина дефектів дорожнього покриву за рівнем вимог | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 1, А | 2, Б | 3, В | 4, Г |
| 1 | Вибоїни, проломи, руйнування крайки площею не більше ніж 0,08 м$^2$ і завглибшки до 4 см, м$^2$ на 1 000 м$^2$ покриву, не більше ніж | 0,08 (0,80) | 0,28 (1,40) | 0,70 (3,75) | 1,40 (5,40) |
| 2 | Вибоїни, проломи, руйнування крайки площею більше ніж 0,08 м$^2$ і завглибшки більше ніж 4 см | Заборонено | | | |
| 3 | Гребінки та зміщення завглибшки не більше ніж 4 см, м$^2$ на 1 000 м$^2$ покриву, не більше ніж | 5 | 8 | 20 | 30 |
| 4 | Гребінки та зміщення покриву завглибшки більше ніж 4 см | Заборонено | | | |
| 5 | Колійність асфальтобетонного покриву, глибина, мм, не більше ніж | 20/30 | 25/35 | 30/40 | 40 |
| 6 | Висота зміщень плит цементобетонного покриву, мм, не більше ніж | 10 | 10 | 15 | 20 |
| 7 | Відколи цементобетону від арматури | Заборонено | | | |
| 8 | Випотівання площею однієї плями не більше ніж 1,5 м$^2$ і загальною площею м$^2$ на 1 000 м$^2$ покриву, не більше ніж | 1,5 | 2,7 | 5,0 | 8,0 |
| 9 | Випотівання площею більше ніж 1,5 м$^2$ | Заборонено | | | |
| 10 | Наявність сторонніх предметів | Заборонено | | | |
| 11 | Забруднення проїзної частини | Заборонено | | | |

**Примітка 1.** У 1 значення дефекту в дужках наведено для весняного періоду.
**Примітка 2.** У 5 до косої лінії наведено значення дефекту для автомобільних доріг загального користування, після косої лінії – для вулиць.
**Примітка 3.** Вимоги до експлуатаційного стану автомобільних доріг поширюються на з'їзди з них у межах радіусу спряження.
**Примітка 4.** Вимоги 8 та 9 не розповсюджуються на зимовий період.
**Примітка 5.** Вимоги 10 розповсюджуються на сторонні предмети, які можуть бути причиною виникнення ДТП.
**Примітка 6.** Вимоги 11 розповсюджуються на забруднення, що зменшують коефіцієнт зчеплення нижче нормативного значення.

*Таблиця 5*

***Вимоги до показників рівності дорожнього покриву***

| Показник рівності дорожнього покриву, що виміряний | Рівень вимог для автомобільних доріг | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | А | Б | В | Г |
| Профілометричним методом (індекс IRI), м/км, не більше ніж | 2,7 | 3,1 | 3,5 | 4,1 | 3,1 | — | — | — |
| Поштовхоміром, см/км, не більше ніж | 100 | 130 | 170 | 240 | 130 | 130 | 170 | 240 |
| Триметровою рейкою:<br>а) граничні значення просвітів під час прокладання в поздовжньому напрямку, мм, не більше ніж<br>б) частка загальної кількості вимірів, що перевищують граничні значення, %, для вимірювання у поздовжньому напрямку, мм, не більше ніж | 5<br>5/9 | 7<br>5/11 | 9<br>7/12 | 12<br>7/30 | 7<br>5/9 | 7<br>5/11 | 9<br>7/12 | 12<br>7/30 |

У новому документі мінімальне значення коефіцієнта поздовжнього зчеплення призначено окремо: 0,35 – для доріг загального користування; 0,40 – для вулиць. Вимоги до зчеплення підвищено і мінімальне значення коефіцієнта 0,30 для прямих ділянок доріг зараз не дозволено. Покращення контролю за коефіцієнтом зчеплення дорожнього покриву підвищить безпеку та комфортність дорожнього руху.

З ДСТУ 3587 [8] вилучено вимоги до видимості у напрямку руху та розміщення зелених насаджень, що вже встановлені ДБН В.2.3-4 та ДБН В.2.3-5 з відповідним посиланням на них.

Додатково встановлено вимоги до утримування зелених насаджень із урахуванням забезпечення видимості сигналів світлофорів, дорожніх знаків і джерел освітлення, що підвищить якість орієнтування водіїв і пішоходів.

ДСТУ враховує загальнодержавний напрямок на влаштування велосипедних доріжок у населених пунктах країни, зокрема містить посилання на ДСТУ 8906:2019 «Планування та проєктування велосипедної інфраструктури. Загальні вимоги», і встановлює вимоги щодо дотримання габаритів наближення для зелених насаджень, стану покриву велосипедних доріжок і строків ліквідації дефектів. Установлено вимоги до строків проведення та якості снігоочищення велосипедних доріжок. Дотримання всіх зазначених вимог значно підвищить безпеку та комфортність руху велосипедистів.

Уперше встановлені вимоги до стану розділювальних смуг і висоти трав'яного покриву, що підвищить безпеку руху у разі з'їзду транспортного засобу з проїзної частини.

Підвищені вимоги до стану мостів, а зокрема:

– просідання у місцях сполучення насипу земляного полотна зі стоянами мостів зменшено з 4,0 см до 2,0 см;

– введені вимоги до водовідведення з проїзної частини та тротуарів;

– введені вимоги до окремих елементів щодо дефектів і руйнувань, зокрема не допускається наявність дефектів і руйнувань елементів транспортної споруди, що не дозволяє безпечно ними користуватися пішоходам і велосипедистам (тріщини між тротуарними консолями та наскрізні проломи тротуарних плит, деформації, розриви та інші пошкодження елементів перил, руйнування сходів тощо).

Ці нововведення мають потрійний ефект – підвищать безпеку та комфортність руху транспорту та пішоходів, зменшать вплив транспортних засобів на мости і підвищать їх строк експлуатування, зменшать можливість руйнувань, що можуть призвести до падіння або осипання елементів конструкцій.

Із урахуванням Директиви Європейського парламенту та Ради Європи ЕС 2004/54 від 29.04.04 щодо мінімальних вимог безпеки для тунелів уперше встановлено вимоги до систем вентиляції, освітлення, енергозбереження та протипожежної безпеки тунелів, які спрямовані на забезпечення мінімально необхідного рівня безпеки в автомобільних тунелях. Більшість європейських країн вже включили до своїх національних нормативних документів основні принципи, викладені в цій Директиві.

Важливою складовою забезпечення безпеки руху є дорожня розмітка. На численні прохання дорожньо-експлуатаційних організацій в ДСТУ 3587 [9] уточнено строки відновлення дорожньої розмітки з урахуванням кліматичних умов. Також підвищені вимоги до строку відновлення дорожньої розмітки для типів 1.12 – 1.15: його зменшено з 30 до 15 діб.

З ДСТУ 3587 [8] вилучено вимоги до зовнішнього освітлення, що вже встановлені ДБН В.2.3-4 та ДБН В.2.3-5 із відповідним посиланням на них і підвищено перелік ділянок доріг, на яких не дозволено відімкнення та зниження рівня освітлення в темну пору доби. До цих ділянок додатково віднесені магістральні вулиці та дороги населених пунктів, житлові та пішохідні вулиці, транспортні споруди, велосипедні доріжки, майданчики для стоянки транспортних засобів

і відпочинку учасників дорожнього руху та дороги у межах населених пунктів у разі інтенсивності руху транспортних засобів в обох напрямках більше ніж 100 од./год. Наявність на зазначених об'єктах освітлення значно підвищить безпеку та комфортність руху.

Окремої уваги заслуговують вперше встановлені вимоги до трамвайного полотна та контактних і кабельних мереж трамвайних, тролейбусних та інших лінійно-кабельних споруд.

У багатьох випадках, особливо в старовинних містах (Львів, Київ, Вінниця тощо), трамвайне полотно є складовою проїзної частини вулиць. ДСТУ 3587 [9] встановлює вимоги до утримування полотна, періодичності проведення робіт з технічного обслуговування його елементів і величин та строків ліквідації дефектів дорожнього покриву трамвайної колії, які прирівняні до допустимих величин і строків ліквідації дефектів дорожнього покриву вулиці. Встановлення однакових вимог до обох складових проїзної частини вулиць не тільки підвищить безпеку руху, але і їхній естетичний вигляд.

Технічне обслуговування та ремонтування контактних і кабельних мереж трамвайних і тролейбусних ліній, які розташовані над автомобільною дорогою або вулицею в межах смуги відведення або червоних ліній вулиць, повинні забезпечити експлуатаційні параметри, що передбачені нормативною та/або проєктною документацією. Виконання цієї умови забезпечить надійність об'єкта від обривів та підпалів і, відповідно, безпечний рух транспортних засобів під час проїзду під ними.

ДСТУ 3587 [9] визначає вимоги до утримування зупинок маршрутного транспорту, які передбачають відповідність висоти та поперечного похилу посадкового майданчика, бордюру по межі заїзної частини, системи поверхневого водовідведення у межах зупинкового та посадкового майданчиків і стану дорожнього покриву вимогам будівельних норм. Дотримання цих вимог забезпечить комфортність та безпеку громадян, що очікують маршрутний транспорт.

ДСТУ 3587 [9] доповнено новими підрозділами, які вперше встановлюють вимоги до експлуатаційного утримування технічних засобів організування дорожнього руху та інженерного облаштування автомобільних доріг, а саме:

- шумових смуг;
- засобів для уповільнення швидкості руху;
- шумозахисних екранів;
- спеціальних тактильних смуг;
- автоматизованих технічних засобів організування дорожнього руху;
- протизасліплювальних екранів;
- дорожніх дзеркал;
- засобів заспокоєння дорожнього руху;
- огорож для запобігання виходу тварин на автомобільну дорогу;
- біопереходів.

Вимоги до експлуатаційного утримування автомобільних доріг у зимовий період надано окремим розділом. ДСТУ 3587 [8] встановлював строк на повне снігоочищення автомобільних доріг загального користування вісім годин і не надавав вимог для вулиць населених пунктів. Строки проведення оброблення автомобільних доріг протиожеледними матеріалами (ПОМ) у новому ДСТУ визначено з урахуванням рівнів вимог для всіх автомобільних доріг (**табл. 6**).

Документом передбачено можливість профілактичного оброблення покриву ПОМ за наявності відповідного прогнозу погоду, що дозволяє прийняти попереджувальні заходи з недопущення виникнення зимової слизькості.

Також з урахуванням рівнів вперше надані вимоги до якості очищення автомобільних доріг (**табл. 7**).

*Таблиця 6*

***Строки проведення оброблення ПОМ та снігоочищення покриву автомобільних доріг***

| Види робіт і строки їх проведення під час зимового утримування | Рівень вимог до автомобільних доріг | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | А | Б | В | Г |
| Оброблення дорожнього покриву з моменту виявлення зимової слизькості, год, не більше ніж | 3 | 4 | 6 | 12 | 2 | 3 | 4 | 8 |
| Очищення дорожнього покриву після закінчення снігопаду, год, не більше ніж | 4 | 6 | 8 | 16 | 3 | 5 | 6 | 10 |
| Очищення узбіч, посадкових майданчиків, після закінчення снігопаду, діб, не більше ніж | 1,5 | 2,5 | 4 | 8 | 1,5 | 2,5 | 4 | 8 |
| Очищення майданчиків для стоянки ТЗ і відпочинку учасників дорожнього руху та автомобільних стоянок діб, не більше ніж | 2,5 | 4 | 8 | 12 | 2,5 | 4 | 8 | 12 |

*Таблиця 7*

***Вимоги до якості очищення автомобільних доріг***

| Рівень вимог | Ширина очищення від снігу, %, не менше ніж | | Товщина снігового накату на, см, не більше ніж | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | проїзної частини | узбіч, тротуарів, пішохідних та велосипедних доріжок | проїзної частини | узбіч | тротуарів, пішохідних та велосипедних доріжок |
| 1 | 100 | 80 | немає | 2,0 | — |
| 2 | 80 | 70* | немає | 2,5 | — |
| 3 | 80 | 65* | 3,0 | 3,5 | — |
| 4 | 60 | 60* | 10,0 | 12,0 | — |
| А– | 100 | 100 | немає | — | немає |
| Г | 80 | 80* | 3,0 | — | немає |

* Стосується лише тротуарів, пішохідних та велосипедних доріжок.
**Примітка.** Ширина очищення проїзної частини автомобільної дороги від снігу для рівнів вимог А—В, де існує окрема смуга для руху громадського транспорту, може бути зменшена до 90 %.

Нововведення щодо експлуатаційного утримування автомобільних доріг у зимовий період дозволять призначати профілактичні заходи, визначати пріоритетні ділянки, досягати зменшення витрат на утримування, і загалом краще підготуватися до ліквідації зимової слизькості.

ДСТУ 3587 [9] доповнено новими додатками:

– додатком А «Рівні вимог до експлуатаційного стану автомобільних доріг»;
– додатком Б «Форма журналу оглядів автомобільних доріг»;
– додатком В «Форма журналу приймання і здачі чергувань та оглядів на залізничному переїзді»;
– додатком Г «Форма журналу оглядів контактної мережі»;
– додатком Д «Види дефектів, що впливають на безпеку дорожнього руху»;
– додатком Е «Бібліографія».

## Висновок

ДСТУ 3587 [9] встановлює науково обґрунтовані сучасні вимоги безпеки до автомобільних доріг під час їх експлуатаційного утримування, а також форми оцінювання відповідності цим вимогам, що визначено Стратегією підвищення рівня безпеки дорожнього руху в Україні до 2024 року стосовно невідповідності стандартів безпеки дорожнього руху сучасним вимогам.

Комплексне впровадження цього ДСТУ 3587 [9], разом із низкою інших нормативних документів, а саме:

– ДСТУ 8954:2019 Автомобільні дороги. Оцінювання рівня дефектності дорожнього одягу [10];

– ДСТУ 8993:2020 Автомобільні дороги. Рівні обслуговування під час експлуатаційного утримування [11];

– ДСТУ 8992:2020 Автомобільні дороги. Настанова з обґрунтування рівнів обслуговуванняпід час експлуатаційного утримування [12];

– ДСТУ 9196:2020 Автомобільні дороги. Правила призначення ремонтних заходів [13];

– ДСТУ 9185:2022 Настанова щодо зимового утримування автомобільних доріг, дозволить проводити більш якісне оцінювання безпеки наявної дорожньої інфраструктури та запроваджувати інженерні рішення щодо поліпшення показників безпеки [14].

Дотримання вимог ДСТУ 3587 [9] є прямим обов'язком дорожніх експлуатаційних організацій, органів управління автомобільних доріг та місцевих органів виконавчої влади для забезпечення безперервних, безпечних, економічних та зручних умов для учасників дорожнього руху. Його впровадження дозволить підвищити надійність і довговічність всіх елементів автомобільних доріг, захист життя і здоров'я громадян та їх майна, а також навколишнього природного середовища.

## Список літератури

1. Резолюція 74-й Генеральної Асамблеї ООН «Підвищення безпеки дорожнього руху у всьому світі» від 31 серпня 2020 року № A/RES/74/299. URL: https://sci.ldubgd.edu.ua (дата звернення: 02.03.2023).

2. Декларація III Глобальній міністерській конференції з безпеки дорожнього руху, що відбулася 19 – 20 лютого 2020 року у м. Стокгольмі, Швеція. URL: https://medtransvp.com.ua (дата звернення: 02.03.2023).

3. Про управління безпекою дорожньої інфраструктури: Директива Європейського парламенту і Ради 2008/96/ЄС від 19.11.2008 р. № ОВ L 319. // База даних Законодавство України / Верховна Рада України. URL: https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/55-GOEEI/2008-96-es.pdf (дата звернення: 01.03.2023).

4. Директива Європейського Парламенту та Ради Європейського Союзу 2004/54/ЄС від 29.04.2004 щодо мінімальних вимог щодо безпеки тунелів транс'європейської дорожньої мережі. // Офіційний журнал N L 167, 30.04.2004.

5. Стратегія підвищення рівня безпеки дорожнього руху в Україні на період до 2024 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21.10.2020 № 1360-р // База даних Законодавство України / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1360-2020-%D1%80#Text (дата звернення: 01.03.2023).

6. ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Частина І. Проектування Частина ІІ. Будівництво. Київ, 2016. 104 с. (Інформація та документація).

7. ДБН В.2.3-5:2018 Вулиці та дороги населених пунктів. Київ, 2018. 61 с. (Інформація та документація).

8. ДСТУ 3587-97 Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги, вулиці та залізничні переїзди. Вимоги до експлуатаційного стану. Київ, 1997. 38 с. (Інформація та документація).

9. ДСТУ 3587:2022 Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги. Вимоги до експлуатаційного стану. Київ, 2022. 23 с. (Інформація та документація).

10. ДСТУ 8954:2019 Автомобільні дороги. Оцінювання рівня дефектності дорожнього одягу. Київ, 2019. 45 с. (Інформація та документація).

11. ДСТУ 8993:2020 Автомобільні дороги. Рівні обслуговування під час експлуатаційного утримування. Київ, 2020. 61 с. (Інформація та документація).

12. ДСТУ 8992:2020 Автомобільні дороги. Настанова з обґрунтування рівнів обслуговування під час експлуатаційного утримування. Київ, 2020. 15 с. (Інформація та документація).

13. ДСТУ 9196:2020 Автомобільні дороги. Правила призначення ремонтних заходів. Київ, 1997. 23 с. (Інформація та документація).

14. ДСТУ 9185:2022 Настанова щодо зимового утримування автомобільних доріг. Київ, 1997. 6 с. (Інформація та документація).

**References**

1. Rezoliutsiia 74-y Heneralnoi Asamblei OON «Pidvyshchennia bezpeky dorozhnoho rukhu u vsomu sviti» of 31 serpnia 2020 roku № A/RES/74/299 Resolution of the 74th UN General Assembly «Improving road safety around the world» dated August 31, 2020 No. A/RES/74/299), URL: https://sci.ldubgd.edu.ua (Last accessed: 01.03.2023) [in Ukrainian].

2. Deklaratsiia III Hlobalnii ministerskii konferentsii z bezpeky dorozhnoho rukhu, shcho vidbulasia 19 – 20 liutoho 2020 roku u m. Stokholmi, Shvetsiia [Declaration to the 3rd Global Ministerial Conference on Road Safety held on February 19-20, 2020, Stockholm, Sweden]. URL: https://medtransvp.com.ua (Last accessed: 01.03.2023) [in Ukrainian].

3. Pro upravlinnia bezpekoiu dorozhnoi infrastruktury: Dyrektyva Yevropeiskoho parlamentu i Rady (On the management of road infrastructure safety: Directive 2008/96/EC of the European Parliament) 2008/96/IeS of 19.11.2008 r. № OB L 319 // Database of Legislation of Ukraine / Verkhovna Rada of Ukraine. URL: https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/55-GOEEI/2008-96-es.pdf (Last accessed: 01.03.2023) [in Ukrainian].

4. Dyrektyva Yevropeyskoho Parlamentu ta Rady Yevropeyskoho Soyuzu 2004/54/YES vid 29.04.2004 shchodo minimalnykh vymoh shchodo bezpeky tuneliv transyevropeys′koyi dorozhnoyi merezhi [Directive of the European Parliament and the Council of the European Union 2004/54/EC dated 04/29/2004 regarding minimum safety requirements for tunnels of the trans-European road network // Official journal]. N L 167, 04/30/2004 [in Ukrainian].

5. Stratehiia pidvyshchennia rivnia bezpeky dorozhnoho rukhu v Ukraini na period do 2024 roku: Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 21.10.2020 № 1360-r [Strategy for increasing the level of road safety in Ukraine for the period until 2024] // Database of Legislation of Ukraine / Verkhovna Rada of Ukraine. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1360-2020-%D1%80#Text (Last accessed: 01.03.2023) [in Ukrainian].

6. DBN V.2.3-4:2015 Avtomobilni dorohy. Chastyna I. Proektuvannia. Chastyna II. Budivnytstvo [State Building Norms (DBN V.2.3-4:2015) Highways. Part I. Design. Part II. Building]. Kyiv, 2016. 104 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

7. DBN V.2.3-5:2018 Vulytsi ta dorohy naselenykh punktiv [State Building Norms (DBN V.2.3-5:2018) Streets and roads settlements]. Kyiv, 2018. 61 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

8. DSTU 3587-97 Bezpeka dorozhnoho rukhu. Avtomobilni dorohy, vulytsi ta zaliznychni pereizdy. Vymohy do ekspluatatsiinoho stanu [State Standard of Ukraine (DSTU 3587-97) Road traffic safety automobile roads, streets and railway crossings]. Kyiv, 1997. 38 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

9. DSTU 8954:2019 Avtomobilni dorohy. Otsiniuvannia rivnia defektnosti dorozhnoho odiahu [State Standard of Ukraine (DSTU 8954:2019) Motor roads. Evaluation of level of imperfectness of pavement]. Kyiv, 2019. 45 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

10. DSTU 3587:2022 Bezpeka dorozhnoho rukhu. Avtomobilni dorohy. Vymohy do ekspluatatsiinoho stanu [State Standard of Ukraine (DSTU 3587-97) Road traffic safety. Mootor roads. The requirements to operation condition. Kyiv, 2022. 23 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

11. DSTU 8993:2020 Avtomobilni dorohy. Rivni obsluhovuvannia pid chas ekspluatatsiinoho utrymannia [State Standard of Ukraine (DSTU 8993:2020) Guidelines for winter road maintenance]. Kyiv, 2020. 61 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

12. DSTU 8992:2020 Avtomobilni dorohy. Nastanova z obgruntuvannia rivniv obsluhovuvannia pid chas ekspluatatsiinoho utrymannia [State Standard of Ukraine (DSTU 8992:2020) Roads. Directive for levels of service grounding at the routine maintenance]. Kyiv, 2020. 15 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

13. DSTU 9196:2020 Avtomobilni dorohy. Pravyla pryznachennia remontnykh zakhodiv. [State Standard of Ukraine (DSTU 9196:2020) Automobile roads. Rules for assigning repair measures]. Kyiv, 1997. 23 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

14. DSTU 9185:2022 Nastanova shchodo zymovoho utrymannia avtomobilnykh dorih [State Standard of Ukraine (DSTU 9185:2022) Guidelines for winter road maintenance]. Kyiv, 1997. 6 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

**Anatolii Tsynka**, *Ph.D., https://orcid.org/0000-0002-0357-2325*
**Serhii Illiash**, *Ph.D., https://orcid.org/0000-0002-3001-8012*
**Volodymyr Zelenovskyi**, *https://orcid.org/0000-0001-5834-5456*
**Serhii Rybalchenko**, *https://orcid.org/0000-0002-4628-9546*
*M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, Kyiv, Ukraine*

## IMPROVEMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE OPERATIONAL CONDITION OF AUTOMOBILE ROADS

***Abstract***

Introduction. This article considers the issue of improving the requirements for the operational condition of public highways and streets (hereinafter referred to as highways) and railway and tram crossings based on the analysis of current legal acts, regulatory documents, technical literature, which refers to the objects of standardization, taking into account the requirements for safety and environmental protection at all stages of the road life cycle, in particular operational maintenance.

Problem Statement. A significant number of traffic accidents that occurred due to defects in the components of highways require improvement in the organization and conduct of inspections and surveys of highways with the establishment of compliance of a certain number of indicators with regulatory requirements. In addition, the resolution adopted by the UN General Assembly dated 31.08.2020 No. 74/299

«Improving road safety around the world» states that deaths and serious injuries as a result of road traffic accidents can in most cases be prevented on the basis of creating a safer highway infrastructure, which also contributes to the development of regulatory documents that establish modern technical requirements for the operational condition of highways

Purpose. Ensuring safety and comfortable conditions for road users, increasing the durability of highways and establishing clear and unambiguous requirements for the operational maintenance of highways.

Materials and methods. The article uses current standards of Ukraine, materials of European and world forums on the safety of road infrastructure, national and international experience gained during the construction, repair and operation of highways.

Results. Levels of requirements for the operational condition of highways, changes and additions to the maintenance of their individual components, taking into account modern requirements, have been established.

Conclusions. State Standard of Ukraine DSTU 3587:2022 «Road traffic safety. Automobile roads. Requirements for operational condition» is a fundamental document that regulates the main requirements for the operational maintenance of public roads and streets. Its revision made it possible to take into account the most modern, scientifically based requirements for improving the safety of highways during their operation, which will simultaneously contribute to ensuring the preservation of quality indicators, in particular, the strength and reliability of all highway elements. Assessment of the compliance of highways with the requirements of the specified national standard must be carried out at all stages of their life cycle, including for assessments of their technical condition based on relevant interstate standards, and the planning of various types of road works at the current stage of operation will allow for a real assessment of the effectiveness of the options for the prescribed measures to extend the service life of road structures.

***Keywords:*** highway, traffic safety, defect, road surface, operational maintenance, levels of requirements for operational condition, technical means of traffic management.

https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.092

**УДК 625.168**

**Каськів В. І.**, *канд. техн. наук, доц., https://orcid.org/0000-0002-8074-6798*
**Соколов О. В.**, *https://orcid.org/0000-0002-4694-9647*

*Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»), м. Київ, Україна*

# ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ЗОЛИ-ВИНЕСЕННЯ ЯК НАПОВНЮВАЧА В АСФАЛЬТОБЕТОНІ

***Анотація***

Вступ. Одним з найбільш поширених матеріалів під час будівництва автомобільних доріг є асфальтобетонні суміші. Для виробництва даних сумішей використовують переважно кондиційні мінеральні матеріали – крупний заповнювач, дрібний заповнювач та наповнювач, а як в'яжуче використовують бітум.

Мінеральний порошок є важливим складником асфальтобетонної суміші, що виконує велику роль в забезпеченні якості асфальтобетонних сумішей. Питома поверхня мінерального порошку становить близько 90 % питомої поверхні мінеральних матеріалів у складі асфальтобетонної суміші. У складі асфальтобетонної суміші мінеральний порошок виконує дві ролі – заповнює пори між дрібним та крупним заповнювачем і структурує бітум.

Проблематика. На електрогенеруючих підприємствах України, у результаті спалювання вугілля, утворюються мільйони тонн пилоподібних відходів – золи-винесення. Даний матеріал за зерновим складом наближається до вимог до наповнювача згідно з ДСТУ Б В.2.7-121 та ймовірно може бути використаний для виробництва асфальтобетонних сумішей.

Мета. Встановлення можливості використання золи-винесення для виробництва асфальтобетонних сумішей шляхом аналізування хімічних властивостей.

Матеріали та методи. Під час досліджень використовували наповнювач виробництва ТОВ «СКАЛА-ПОДІЛЬСЬКИЙ СПЕЦКАР'ЄР» та золу-винесення Бурштинської ТЕС.

Результати. Результати випробування показали, що досліджену золу-винесення можна використовувати для виробництва асфальтобетонних сумішей при повній заміні нею вапнякового мінерального порошку.

Висновки. Дослідження фізико-механічних характеристик, застосовуючи стандартні і альтернативні методи, дозволило провести аналіз найважливіших властивостей (питома поверхня, пористість, бітумоємність) досліджуваної в цій роботі відходів паливно-енергетичної промисловості у вигляді золи-винесення. Це дозволило визначити можливість їх використання як наповнювача в асфальтобетоні.

Комплексний аналіз складу та кислотно-основних властивостей алюмосилікатної техногенної сировини з відходів паливно-енергетичних підприємств у вигляді золи-винесення ТЕС різного походження дозволяє стверджувати, що всі досліджувані зразки мають достатньо високий потенціал для використання їх як наповнювач.

Використання золи-винесення для виробництва асфальтобетонних сумішей дозволить значно зменшити кількість відходів та поліпшити екологічний стан довкілля.

***Ключові слова:*** автомобільна дорога, асфальтобетон, асфальтобетонна суміш, густина, екологія, зола-винесення, мінеральний порошок, мінералогічний склад, рентгенофазовий аналіз.

## Вступ

Утилізація вторинних матеріалів виробництва призначена для збереження природних ресурсів і скорочення обсягу відходів, які необхідно утилізувати в спеціальних місцях поховання.

Утилізація заохочується багатьма країнами Європейського Союзу, де є відповідні положення у всіх директивах, що стосуються управління відходами. Ключовим елементом у заохоченні до перероблення відходів є принцип «забруднювач платить», який був включений до всіх директив Співтовариства щодо поводження з безпечними та небезпечними відходами. Багато держав-членів прийняли специфічне екологічне законодавство, зокрема, сплату податку за утилізацію відходів [1].

## Основна частина

Для вивчення можливості використання техногенної сировини як мінерального порошку, який використовується у виробництві асфальтобетонної суміші, проведено дослідження відходів паливно-енергетичної промисловості у вигляді золи-винесення теплових електростанцій. У рамках цих досліджень було взято золу-винесення Бурштинської ТЕС. З метою порівняння якості досліджуваних відходів паливно-енергетичної промисловості було використано вапняковий мінеральний порошок виробництва ТОВ «СКАЛА-ПОДІЛЬСЬКИЙ СПЕЦКАР'ЄР».

Один з важливих аспектів при використанні золи-винесення – її радіоактивність. У зв'язку з цим на початковому етапі досліджень, відходи паливно-енергетичної промисловості були досліджені на предмет їхньої безпеки. Вміст природних радіонуклідів у досліджуваних зразках золи-винесення знаходився у встановлених межах та належать до І класу і зразки можна використовувати у будівництві всіх видів.

Для визначення фізико-механічних характеристик золи-винесення були використані вимоги ДСТУ Б В.2.7-121 [2]. Цей документ був обраний як норматив для вимірювання фізико-механічних властивостей золи-винесення як мінеральний порошок для асфальтобетонної суміші, оскільки процеси формування структури мінеральних наповнювачів з бітумом ідентичні за своєю природою на механізм взаємодії у бінарній системі «бітум – мінеральний порошок».

Аналізуючи отримані дані (**табл. 1**), можна зробити висновок, що всі показники золи-винесення відповідають дійсним нормам і наближаються до показників вапнякового мінерального порошку.

***Таблиця 1***

***Порівняння вапнякового наповнювача із золою-винесення***

| Ч. ч. | Найменування показників, одиниця вимірювання | Вимоги ДСТУ Б В.2.7-121 | Результати випробування наповнювача | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Скала-Подільський СК | Зола-винесення Бурштинської ТЕС |
| 1 | Зерновий склад – вміст частинок, відсоток за масою: | | | |
| | – дрібніше ніж 0,071 мм | 80, не менше | 91,9 | |
| | – дрібніше ніж 0,315 мм | 90, не менше | 99,6 | |
| | – дрібніше ніж 1,25 мм | 100, не менше | 100 | |
| 2 | Дійсна густина, г/см$^3$ | - | 2,88 | 2,65 |
| 3 | Середня густина, г/см$^3$ | - | 1,94 | 1,78 |
| 4 | Структуруюча здатність, °С | від 10 до 20 включно | 12 | 14 |
| 5 | Пористість, % | 35, не більше | 33,0 | 31 |
| 6 | Вологість, % | | 0,3 | 0,2 |
| 7 | Набрякання зразків | 2,5, не більше | 1,2 | 1,3 |
| 8 | Показник бітумоємності, г/100 см$^3$ | - | 40 | 42 |
| 9 | Питома поверхня, м$^2$/кг | - | 420 | 438 |

Отримані результати аналізу фізико-механічних властивостей відходів паливно-енергетичної промисловості у вигляді золи-винесення дають змогу робити висновок щодо можливостей використання цієї сировини для виготовлення асфальтобетонної суміші для дорожнього будівництва. Проте важливу роль у формуванні структури композиту з такою специфічною сировиною можуть відігравати хімічний та мінералогічний склад, які залежать від виду палива, технології спалювання, методу уловлення та видалення.

Під час спалювання палива досягається висока температура (1 100 – 1 600) °С, що є причиною складних фізико-хімічних процесів, під час яких мінеральні домішки зазнають змін. Це приводить до складності хімічного і мінералогічного складу золи. Крім того, золи містять значну кількість неспалених часток органічного палива, кількість яких визначається втратами під час оброблення, згідно з ДСТУ Б В.2.7-121 [2], ця кількість не повинна перевищувати 20 % від загальної маси.

Загалом, зола-винесення є складною сировиною, яка включає в себе органічні та неорганічні компоненти. Неорганічна складова включає аморфну і кристалічну фазу. Аморфна фаза містить алюмосилікатне скло, тоді як кристалічна містить зерна мінералів вихідного палива (кварц, польові шпати і інші) і кристалічні новоутворення, такі як муліт, гематит і інші.

Хімічний аналіз техногенної сировини з відходів паливно-енергетичних підприємств у вигляді золи-винесення проводили за допомогою спектральних методів, і при цьому враховували втрати під час прокалювання (0,70 – 4,95) %. Отримані дані подано у відсотках відносно загальної маси. Аналіз результатів свідчить про те, що дослідна техногенна сировина характеризується високим вмістом оксиду кремнію $SiO_2$ (50,78 %) і оксиду алюмінію $Al_2O_3$ (30,48 %).

***Таблиця 2***

***Оксидний та елементний склад золи-винесення***

| Оксид | Інтенсивність | Концентрація | Елемент | Інтенсивність | Концентрація |
|---|---|---|---|---|---|
| $Al_2O_3$ | 139 443 | 30,48 ± 0,11 % | Al | 138 880 | 15,75 ± 0,11 % |
| $SiO_2$ | 405 794 | 50,78 ± 0,14 % | Si | 421 642 | 24,01 ± 0,13 % |
| S | 32 826 | 0,31 ± 0,01 % | S | 34 128 | 0,31 ± 0,01 % |
| $K_2O$ | 4 860 | 3,35 ± 0,18 % | K | 5 126 | 2,89 ± 0,17 % |
| CaO | 6 558 | 3,07 ± 0,10 % | Ca | 6 652 | 2,20 ± 0,10 % |
| $TiO_2$ | 6 156 | 1,24 ± 0,03 % | Ti | 6 251 | 0,74 ± 0,03 % |
| $Cr_2O_3$ | 573 | 0,04 ± 0,01 % | Cr | 625 | 0,03 ± 0,01 % |
| MnO | 1 768 | 0,07 ± 0,01 % | Mn | 1 902 | 0,06 ± 0,01 % |
| $Fe_2O_3$ | 371 406 | 10,43 ± 0,03 % | Fe | 376 099 | 7,28 ± 0,03 % |
| NiO | 1 534 | 0,02 ± 0,00 % | Ni | 1 585 | 0,02 ± 0,00 % |
| CuO | 1 484 | 0,02 ± 0,00 % | Cu | 1 483 | 0,01 ± 0,00 % |
| ZnO | 2 918 | 0,02 ± 0,00 % | Zn | 2 898 | 0,02 ± 0,00 % |
| $As_2O_3$ | 5 512 | 0,02 ± 0,00 % | As | 5 543 | 0,02 ± 0,00 % |
| $Rb_2O$ | 15 375 | 0,02 ± 0,00 % | Rb | 15 631 | 0,02 ± 0,00 % |
| SrO | 41 198 | 0,06 ± 0,00 % | Sr | 42 226 | 0,05 ± 0,00 % |
| $ZrO_2$ | 38 640 | 0,05 ± 0,00 % | Zr | 36 192 | 0,03 ± 0,00 % |
| PbO | 3 643 | 0,02 ± 0,00 % | Pb | 3 691 | 0,01 ± 0,00 % |

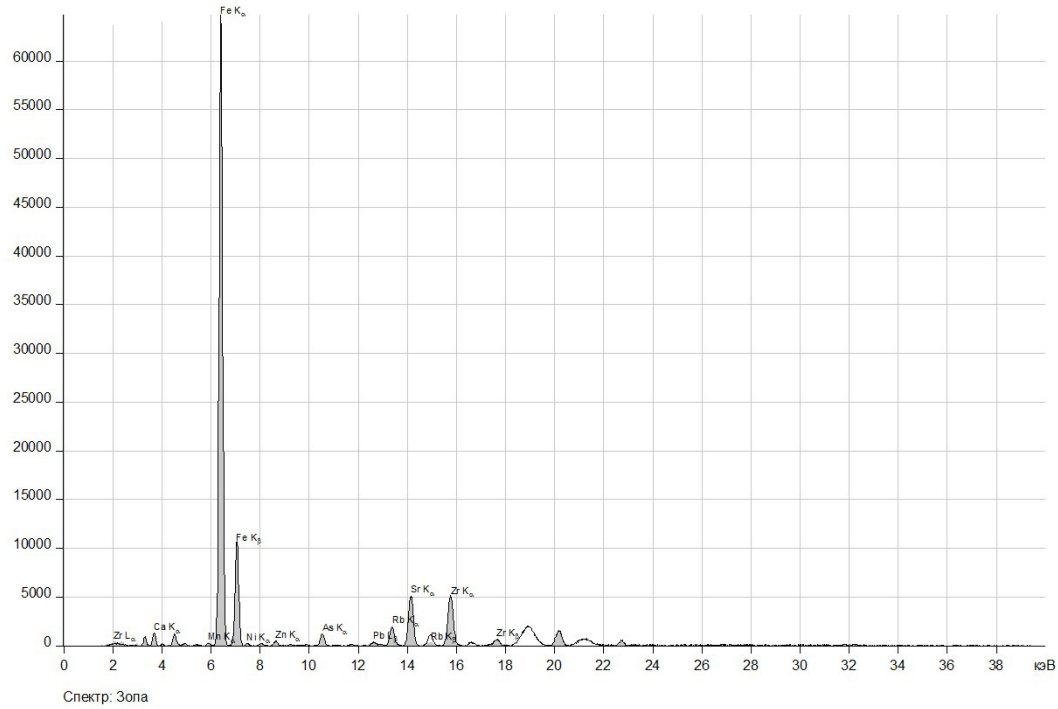



***Рисунок 1*** – Спектр важких елементів

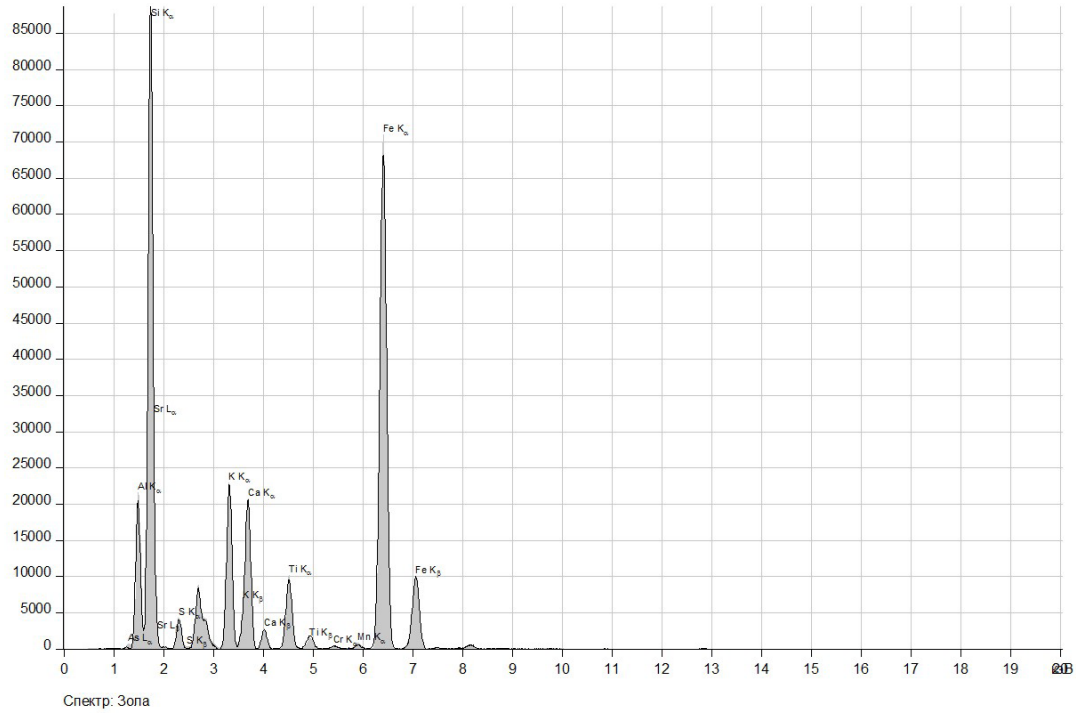



***Рисунок 2*** – Спектр легких елементів

За допомогою рентгенофазового аналізу був визначений фазовий і мінералогічний склад тзоли-винесення. Досліджуваний зразок техногенної сировини характеризувався високим вмістом рентгеноаморфної фази, що призводить до появи складної фонової лінії на рентгенограмах (**рис. 3**).

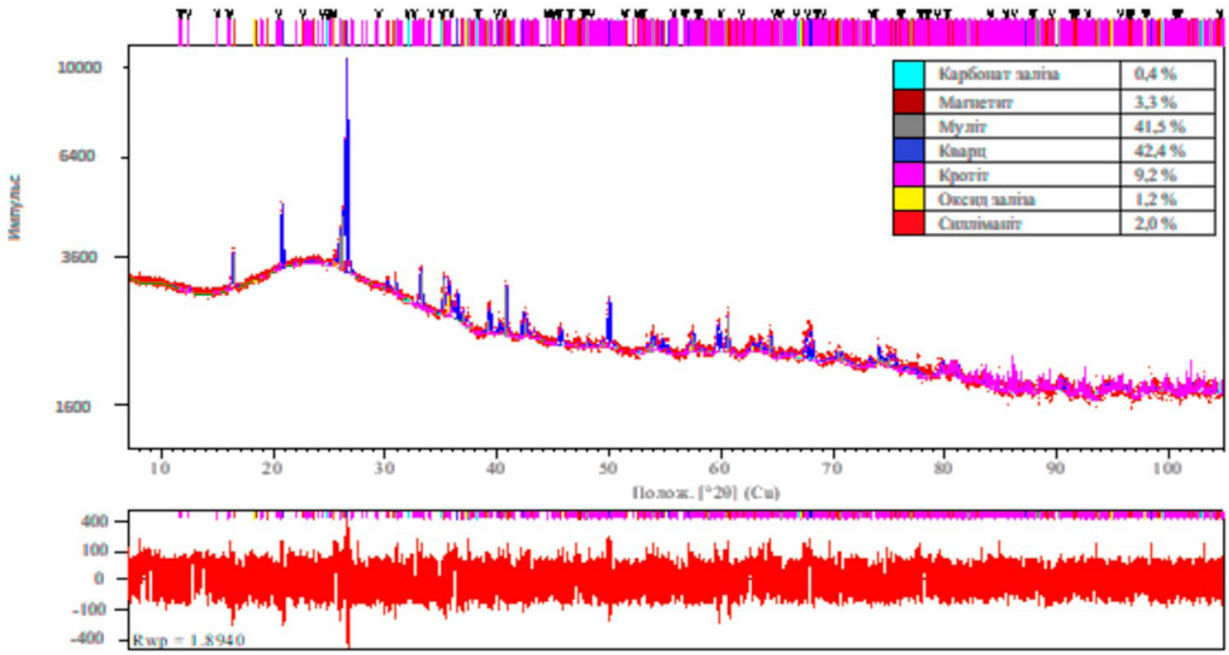



***Рисунок 3*** **–** Результати повнопрофільного розрахунку рентгенограм, досліджуваної золи-винесення

***Таблиця 3***

***Мінералогічний склад золи-винесення з Бурштинської ТЕС***

| Найменування | РФС | Карбонат заліза | Магнетит | Муліт | Кварц | Кротіт | Оксид заліза | Силіманіт |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Значення, % | 49,69 | 0,4 | 3,3 | 41,5 | 42,4 | 9,2 | 1,2 | 2,0 |

На основі отриманих даних про мінеральний склад досліджуваної золи-винесення можемо зробити висновок, що рентгеноаморфна фаза складає 49,69 % (**табл. 3**). Оскільки рентгеноаморфна скляна фаза утворена оксидами кремнію і алюмінію, комплекс яких при однаковій координації збільшує «мінусовий» заряд і створює значний негативний потенціал на поверхні матеріалу, можна припустити, що зола-винесення буде активно взаємодіяти з позитивно зарядженими молекулами бітуму. Крім того, активність взаємодії в бінарній системі «бітум – зола-винесення» буде безпосередньо залежати від вмісту скляної фази, і чим більше її у складі золи, тим активніше буде взаємодія. Тому доцільно разом із золою-винесення використовувати модифікований бітум з ПАВ.

## Висновки

Дослідження фізико-механічних характеристик золи-винесення, застосовуючи стандартні й альтернативні методи, дозволило провести аналіз найважливіших властивостей (питома

поверхня, пористість, бітумоємність) та встановити можливість її використання як наповнювача в асфальтобетоні.

Комплексний аналіз складу та кислотно-основних властивостей алюмосилікатної техногенної сировини з відходів паливно-енергетичних підприємств у вигляді золи-винесення ТЕС різного походження дозволяє стверджувати, що всі досліджувані зразки мають достатньо високий потенціал для використання їх як наповнювач в асфальтобетонній суміші.

Подальші дослідження спрямовані на встановлення фізико-механічних властивостей асфальтобетонних сумішей з використанням модифікованого бітуму поверхнево-активними речовинами і повною заміною мінерального порошку золою-винесення.

## Список літератури

1. Концепція Державної цільової економічної програми розвитку автомобільних доріг загального користування державного значення на 2018-2022 роки : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 11.01.2018 N 34-р // База даних Законодавство України / Верховна рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/34-2018-%D1%80 (дата звернення: 20.01.2021).

2. ДСТУ Б В.2.7-121:2014 Порошок мінеральний для асфальтобетонних сумішей. Технічні умови. Київ, 2015. 42 с. (Інформація та документація).

## References

1. Kontseptsiya Derzhavnoyi tsilovoyie ekonomichnoyi prohramy rozvytku avtomobilnykh dorih zahalnoho korystuvannya derzhavnoho znachennyana 2018-2022 roky : Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 11.01.2018 N 34-p Database of Legislation of Ukraine / Verkhovna Rada of Ukraine. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/34-2018-%D1%80 (Last accessed: 20.01.2021) [in Ukrainian].

2. DSTU B V.2.7-121:2014 Poroshok mineralnyi dlia asfaltobetonnykh sumishei. Tekhnichni umovy [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-121:2014) Mineral powder for asphalt concrete mixtures. Specifications]. Kyiv, 2015. 42 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

**Volodymyr Kaskiv**, *Ph.D., Associate Prof., https://orcid.org/0000-0002-8074-6798*
**Oleksii Sokolov**, *https://orcid.org/0000-0002-4694-9647*
*M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, Kyiv, Ukraine*

## THEORETICAL SUBSTANTIATION OF THE USE OF FLY ASH AS A FILLER IN ASPHALT

***Abstract***

Introduction. Asphalt mixtures are one of the most widely used materials in road construction. For the production of these mixtures, mainly conditioned mineral materials are used – coarse aggregate, fine aggregate and filler, and bitumen is used as a binder.

Mineral filer is an important component of the asphalt mixture, which plays a major role in ensuring the quality of asphalt mixtures. The specific surface area of mineral filler is about 90 % of the specific surface area of mineral materials in the asphalt mix. Mineral filler plays two roles in the asphalt mixture: it fills the pores between fine and coarse aggregates and structures the bitumen.

Problem Statement. Ukrainian power generating enterprises generate millions of tons of dusty waste – fly ash - as a result of coal combustion. This material is close in grading the requirements for aggregate according to DSTU B V.2.7-121 and can probably be used for the production of asphalt mixtures.

Purpose. To determine the possibility of using fly ash for the production of asphalt mixtures by analyzing its chemical properties.

Materials and methods. During the research, we used aggregate produced by SKALA-PODILSKYI SPECIAL QUARRY LLC and fly ash from Burshtyn TPP.

Results. The test results showed that the studied fly ash can be used for the production of asphalt mixtures with a complete replacement of limestone mineral filler.

Conclusions. The study of physical and mechanical characteristics, using standard and alternative methods, made it possible to analyze the most important properties (specific surface area, porosity, bitumen capacity) of the fuel and energy industry waste in the form of fly ash studied in this work. This made it possible to determine the possibility of their use as a filler in asphalt concrete.

A comprehensive analysis of the composition and acid-base properties of anthropogenic aluminosilicate raw materials from fuel and energy enterprises in the form of fly ash from thermal power plants of various origins suggests that all the studied samples have a sufficiently high potential for use as filler.

The use of fly ash for the production of asphalt mixtures will significantly reduce the amount of waste and improve the ecological state of the environment.

***Keywords:*** road, asphalt, asphalt mixture, density, ecology, fly ash, mineral filler, mineralogical composition, X-ray phase analysis.

https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.099

**УДК 691.16**

**Копинець І. В.**, *канд. техн. наук, https://orcid.org/0000-0002-0908-4795*
**Головченко В. С.**, *https://orcid.org/0000-0001-5078-8682*
**Желтобрюх А. Д.**, *https://orcid.org/0000-0003-0764-8793*
**Соколов О. В.**, *https://orcid.org/0000-0002-4694-9647*

*Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М. П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»), м. Київ, Україна*

# УСТАНОВЛЕННЯ НАЦІОНАЛЬНИХ ВИМОГ ДО ЗЕРНОВОГО СКЛАДУ АСФАЛЬТОБЕТОННИХ СУМІШЕЙ ЗГІДНО З ДСТУ EN 13108-1

Вступ. ДСТУ EN 13108-1 установлює вимоги до асфальтобетонних сумішей, що використовують для влаштування шарів дорожнього одягу автомобільних доріг, аеродромів тощо. Дані асфальтобетонні суміші використовують для влаштування шару основи, зв'язуючого шару та шару покриву.

Проблематика. Особливістю ДСТУ EN 13108-1 є те, що у ньому установлені загальні вимоги до всіх показників, зокрема до зернового складу. Тобто відсутні конкретні вимоги до зернового складу асфальтобетонних сумішей залежно від категорії дороги, транспортного навантаження та розташування шару асфальтобетону в конструкції дорожнього одягу. Тому доцільно детально розглянути вимоги до зернового складу асфальтобетонних сумішей, порівняти їх з вимогами національних стандартів та запропонувати відповідні національні вимоги.

Мета. Установлення національних вимог до зернового складу асфальтобетонних сумішей згідно з ДСТУ EN 13108-1.

Матеріали і методи. Аналіз літературних джерел, порівняння вимог нормативних документів до зернового складу асфальтобетонних сумішей.

Результати. Вимоги до вмісту зерен певної фракції вказують у вигляді обраних мінімальних і максимальних значень проходу через сита з розміром отворів 1,4 *D*, *D*, 2 мм і 0,063 мм у відсотках, вимоги до зернового складу додатково може бути зазначено в документах, пов'язаних із застосуванням асфальтобетонних сумішей. Також може бути встановлено додаткові вимоги до зернового складу щодо вмісту зерен, які проходять через сито з певним розміром отворів. У той же час може бути обрано не більше ніж два сита відповідного розміру між 2 мм та *D* і два сита відповідного розміру між 2 мм та 0,063 мм. Вимоги ДСТУ EN 13108-1 до зернового складу мають широкий діапазон значень, що ймовірно пов'язано з різною можливою областю застосування асфальтобетонних сумішей.

Висновки. У зв'язку з тим, що стандарт ДСТУ EN 13108-1 установлює загальні вимоги до зернового складу, відповідні вимоги має бути встановлено в національному стандарті залежно від області застосування асфальтобетонних сумішей.

Під час встановлення вимог до зернового складу, за основу взято вимоги ДСТУ Б В.2.7-119 щодо вмісту зерен розміром більше ніж 5 мм з відповідним приведенням до вимог ДСТУ EN 13108-1, та надано пропозиції до зернового складу асфальтобетонних сумішей з урахуванням найбільшого номінального розміру заповнювача у складі асфальтобетонних сумішей та можливої області їх застосування.

***Ключові слова:*** асфальтобетон, бітум, верхній шар основи, експлуатаційні властивості, зв'язуючий шар, конструкція дорожнього одягу, шар покриву.

## Вступ

ДСТУ EN 13108-1 [1] установлює вимоги до асфальтобетонних сумішей, що використовують для влаштування шарів дорожнього одягу автомобільних доріг, аеродромів тощо. Дані асфальтобетонні суміші використовують для влаштування шару основи, зв'язуючого шару та шару покриву.

Особливістю ДСТУ EN 13108-1 [1] є те, що у ньому установлені загальні вимоги до всіх показників, зокрема до зернового складу. Тобто відсутні конкретні вимоги до зернового складу асфальтобетонних сумішей залежно від категорії дороги, транспортного навантаження та розташування шару асфальтобетону в конструкції дорожнього одягу. Тому доцільно детально розглянути вимоги до зернового складу асфальтобетонних сумішей, порівняти їх з вимогами національних стандартів та запропонувати відповідні національні вимоги.

## Основна частина

Вимоги, які пред'являють до зернового складу асфальтобетонних сумішей відповідно до ДСТУ EN 13108-1 [1] наведено в **табл. 1** і **табл. 2**. Зерновий склад описують за кількістю заповнювача з розміром зерен менше ніж 1,4 *D*, *D*, 2 мм і 0,063 мм. Підібраний склад асфальтобетонної суміші повинен знаходитися в межах даного зернового складу.

***Таблиця 1***

***Вимоги до зернового складу асфальтобетонних сумішей – основний комплект сит та комплект сит 1***

| *D* | 4 | 5 (5,6) | 8 | 11 (11,2) | 16 | 22 (22,4) | 32 (31,5) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Розмір отворів сита, мм | Вміст зерен, % за масою, менших даного розміру | | | | | | |
| 1,4 *D* | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| *D* | 90-100 | 90-100 | 90-100 | 90-100 | 90-100 | 90-100 | 90-100 |
| 2 | 50-85 | 15-72 | 10-72 | 10-60 | 10-50 | 10-50 | 10-50 |
| 0,063 | 5,0-17,0 | 2,0-15,0 | 2,0-13,0 | 2,0-13,0 | 0-12,0 | 0-11,0 | 0-11,0 |

***Таблиця 2***

***Вимоги до зернового складу асфальтобетонних сумішей – основний комплект сит та комплект сит 2***

| *D* | 4 | 6 (6,3) | 8 | 10 | 12 (12,5) | 14 | 16 | 20 | 32 (31,5) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Розмір отворів сита, мм | Вміст зерен, % за масою, менших даного розміру | | | | | | | | |
| 1,4 *D* | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| *D* | 90-100 | 90-100 | 90-100 | 90-100 | 90-100 | 90-100 | 90-100 | 90-100 | 90-100 |
| 2 | 50-85 | 15-72 | 10-72 | 10-60 | 10-55 | 10-50 | 10-50 | 10-50 | 10-50 |
| 0,063 | 5,0-17,0 | 2,0-17,0 | 2,0-13,0 | 2,0-12,0 | 2,0-12,0 | 2,0-12,0 | 0-12,0 | 0-11,0 | 0-11,0 |

Вимоги до вмісту зерен певної фракції вказують у вигляді обраних мінімальних і максимальних значень проходу через сита з розміром отворів 1,4 *D*, *D*, 2 мм і 0,063 мм у відсотках. Поєднання сит з комплектів 1 і 2 не допустимо.

Якщо сито, розраховане як 1,4 *D*, не відповідає ситу основного або додаткового комплекту сит, необхідно вибрати сито, яке найбільш близьке за розміром до необхідного.

При цьому зазначено, що вимоги до зернового складу додатково може бути зазначено в документах, пов'язаних із застосуванням асфальтобетонних сумішей. Також може бути встановлено додаткові вимоги до зернового складу щодо вмісту зерен, які проходять через сито з певним розміром отворів. У той же час може бути обрано не більше ніж два сита відповідного розміру між 2 мм та *D* і два сита відповідного розміру між 2 мм та 0,063 мм.

У випадку використання основного комплекту сит та додаткового комплекту сит 1 розмір отворів додаткових сит може становити: 4 мм, 5,6 мм, 8 мм, 11,2 мм, 16 мм, 22,4 мм та 31,5 мм – для додаткових сит між 2 мм та *D*; 1 мм, 0,5 мм, 0,25 мм та 0,125 мм – для додаткових сит між 2 мм та 0,063 мм.

У випадку використання основного комплекту сит та додаткового комплекту сит 2 розмір отворів додаткових сит може становити: 4 мм, 6,3 мм, 8 мм, 10 мм, 12,5 мм, 14 мм, 16 мм, 20 мм та 31,5 мм – для додаткових сит між 2 мм та *D*; 1 мм, 0,5 мм, 0,25 мм та 0,125 мм – для додаткових сит між 2 мм та 0,063 мм.

Заданий склад асфальтобетонної суміші повинен перебувати в межах зернового складу відповідно до **табл. 1** та **табл. 2**.

Як видно з даних **табл. 1** та **табл. 2**, установлені в ДСТУ EN 13108-1 [1] вимоги до зернового складу мають широкий діапазон значень, що ймовірно пов'язано з різною можливою областю застосування асфальтобетонних сумішей. Наприклад, асфальтобетонні суміші зерновий склад яких наближається до верхньої межі значень доцільно використовувати в конструкції дорожнього одягу з незначним транспортним навантаженням і навпаки, асфальтобетонні суміші зерновий склад яких наближається до нижньої межі значень доцільно використовувати в конструкції дорожнього одягу зі значним транспортним навантаженням. Такий підхід є аналогічним підходу, що застосований в ДСТУ Б В.2.7-119 [2], де виконано поділ асфальтобетонних сумішей на типи за вмістом щебеню і, відповідно, встановлено різну область використання цих асфальтобетонних сумішей.

Тому, доцільно порівняти вимоги до зернового складу асфальтобетонних сумішей згідно з ДСТУ EN 13108-1 [1] та ДСТУ Б В.2.7-119 [2]. Найбільш використовуваними в Україні є дрібнозернисті та крупнозернисті асфальтобетонні суміші з найбільшим номінальним розміром зерен відповідно 20 мм та 40 мм. Враховуючи коефіцієнт приведення 0,8 даним асфальтобетонним сумішам буде відповідати асфальтобетонна суміш з максимальним номінальним розміром зерен відповідно 16 мм та 32 мм. Графічне порівняння вимог зображено на **рис. 1 – 5**.

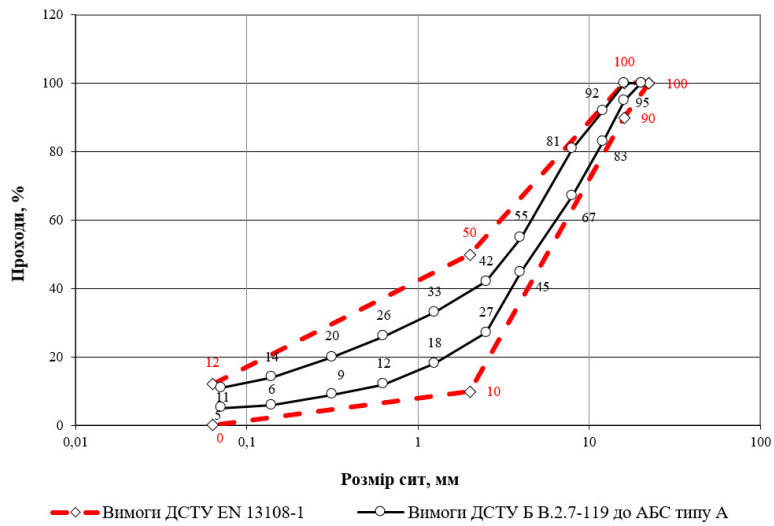



***Рисунок 1*** – Порівняння вимог ДСТУ EN 13108-1 та ДСТУ Б В.2.7-119 (тип А)

Як видно з **рис. 1** зерновий склад асфальтобетонної суміші типу А згідно з ДСТУ Б В.2.7-119 [2] орієнтовно відповідає середнім значенням вимог ДСТУ EN 13108-1 [1] з наближенням до нижньої межі, тобто містить значну кількість крупного заповнювача.

У випадку асфальтобетонної суміші типу Б згідно з ДСТУ Б В.2.7-119 [2] має місце наближення зернового складу до верхньої межі вимог ДСТУ EN 13108-1 [1] (див. **рис. 2**) і, відповідно, зменшення вмісту крупного заповнювача.

Для асфальтобетонної суміші типу В згідно з ДСТУ Б В.2.7-119 [2] установлено невідповідність вимогам до зернового складу ДСТУ EN 13108-1 [1] (див. **рис. 3**), що проявляється у низькому вмісті зерен крупного заповнювача.

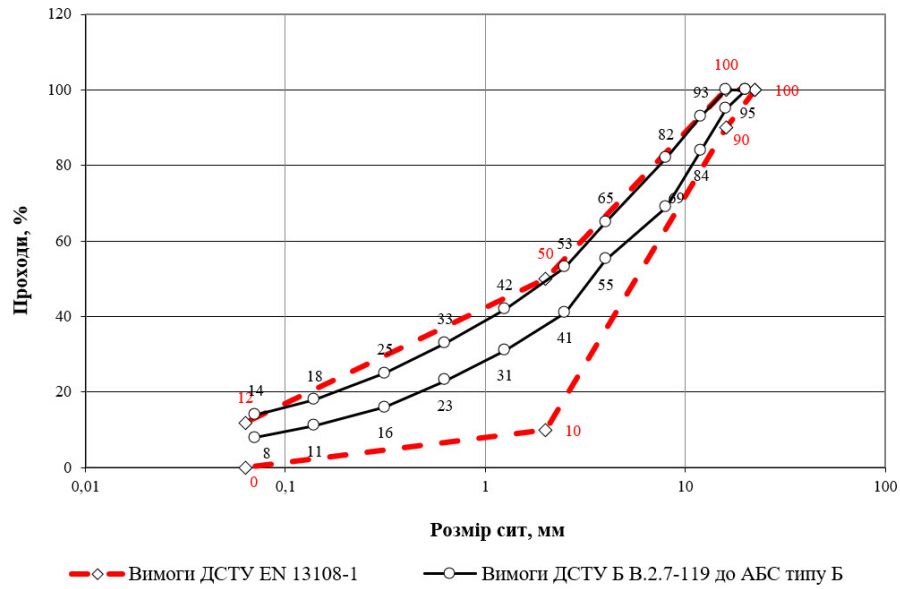



***Рисунок 2*** – Порівняння вимог ДСТУ EN 13108-1 та ДСТУ Б В.2.7-119 (тип Б)

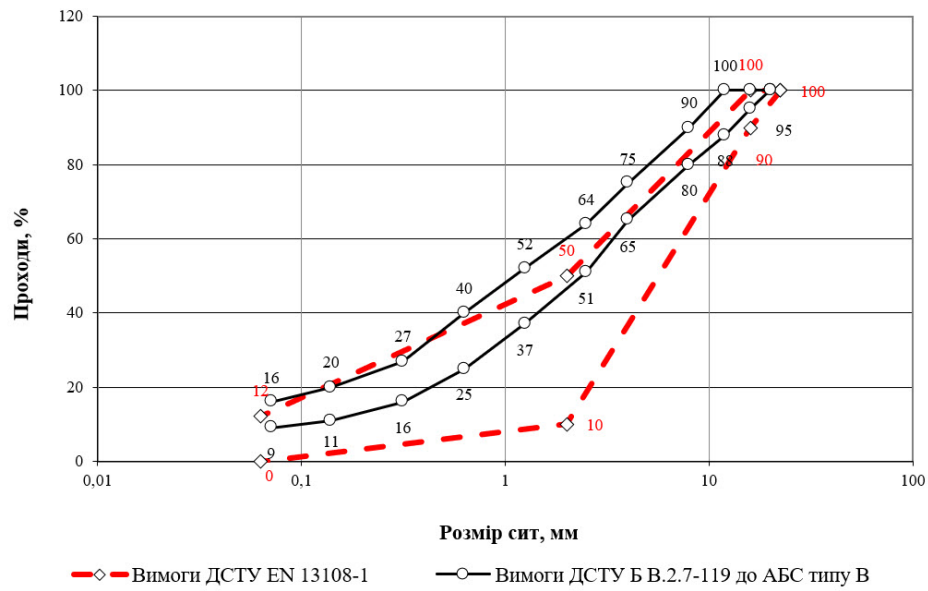



***Рисунок 3*** – Порівняння вимог ДСТУ EN 13108-1 та ДСТУ Б В.2.7-119 (тип В)

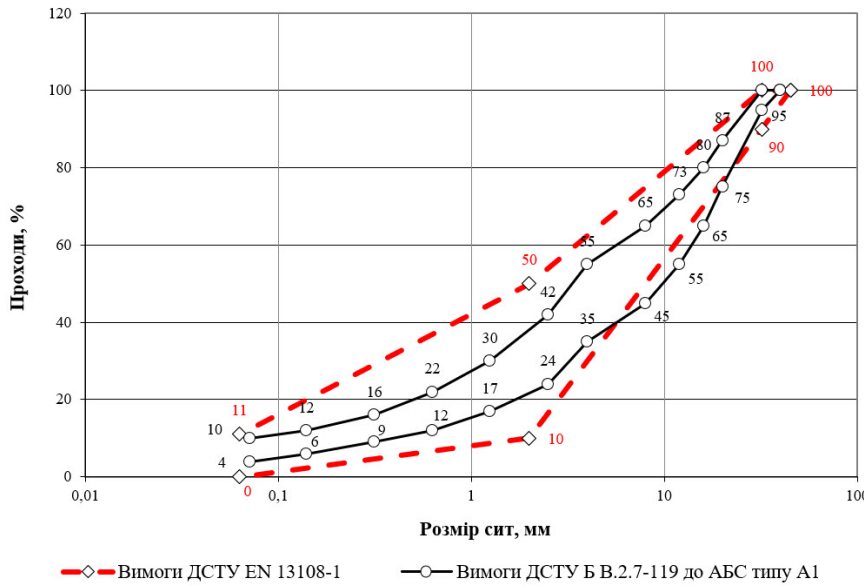



***Рисунок 4*** – Порівняння вимог ДСТУ EN 13108-1 та ДСТУ Б В.2.7-119 (тип А1)

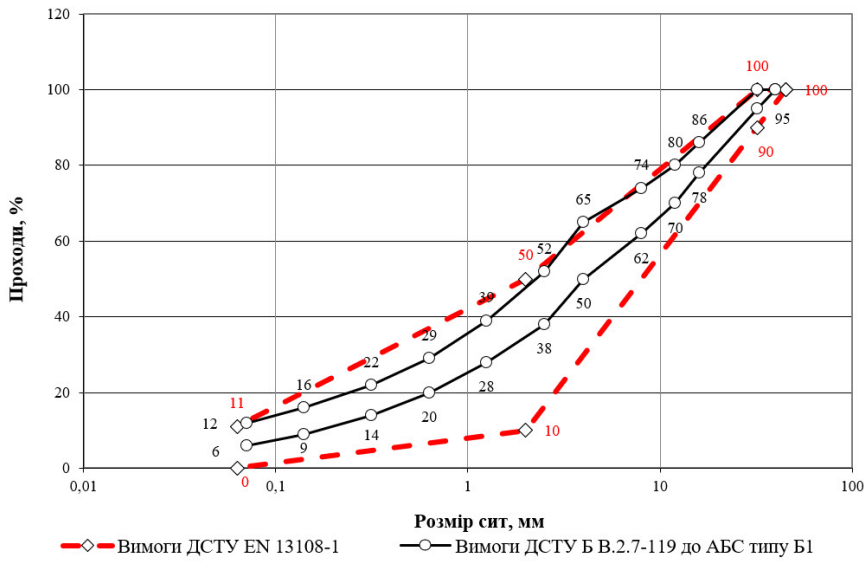



***Рисунок 5*** – Порівняння вимог ДСТУ EN 13108-1 та ДСТУ Б В.2.7-119 (тип Б1)

Аналогічні дані отримуємо під час порівняння зернового складу асфальтобетонних сумішей типу А1 та Б1 згідно з ДСТУ Б В.2.7-119 [2] із вимогами до зернового складу ДСТУ EN 13108-1 [1] (див. **рис. 4** та **рис. 5**).

Варто також зазначити, що допустимий найбільший залишок на ситі з розміром отворів, що відповідає найбільшому номінальному розміру зерен заповнювача у складі асфальтобетонної суміші, відповідно до вимог ДСТУ EN 13108-1 [1] є більшим за вимоги ДСТУ Б В.2.7-119 [2], а також те, що абсолютний найбільший розмір заповнювача визначають як 1,4 *D*, тобто відхил є змінним і залежить від найбільшого номінального розміру заповнювача у складі асфальтобетонної суміші, у той час як відповідно до ДСТУ Б В.2.7-119 [2] дане значення є постійним і становить 5 мм.

Виходячи з отриманих результатів, вважаємо за доцільне також порівняти вимоги до зернового складу дрібнозернистих асфальтобетонних сумішей з найбільшим номінальним розміром зерен 10 мм згідно з ДСТУ Б В.2.7-119 [2] та асфальтобетонних сумішей з найбільшим номінальним розміром зерен 8 мм згідно з ДСТУ EN 13108-1 [1], а також піщаних асфальтобетонних сумішей.

У результаті даного порівняння можемо бачити, що зерновий склад асфальтобетонної суміші типу А згідно з ДСТУ Б В.2.7-119 [2] наближається до нижньої межі вимог ДСТУ EN 13108-1 [1], зерновий склад асфальтобетонної суміші типу Б – до середніх значень вимог ДСТУ EN 13108-1 [1], а зерновий склад асфальтобетонної суміші типу В – до верхніх значень вимог ДСТУ EN 13108-1. Тобто, на відміну від асфальтобетонних сумішей з найбільшим розміром зерен 20 мм, всі типи асфальтобетонних сумішей згідно з ДСТУ Б В.2.7-119 [2] відповідають установленому діапазону вимог згідно з ДСТУ EN 13108-1 [1].

Асфальтобетонна суміш типу Г згідно з ДСТУ Б В.2.7-119 [2] за зерновим складом повністю відповідає вимогам ДСТУ EN 13108-1 [2]. При цьому діапазон вимог згідно з ДСТУ Б В.2.7-119 [2] є меншим за відповідний діапазон згідно з ДСТУ EN 13108-1 [1].

У всіх випадках можемо спостерігати те, що допустимий залишок на ситі з розміром отворів, що відповідає найбільшому номінальному розміру заповнювача у складі асфальтобетонної суміші, відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.7-119 [2] є меншим ніж відповідно до вимог ДСТУ EN 13108-1 [1].

Варто звернути увагу на кількість контрольних сит відповідно до ДСТУ EN 13108-1 [1] та ДСТУ Б В.2.7-119 [2]. Так, відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.7-119 [2] щодо крупнозернистої асфальтобетонної суміші, кількість контрольних сит становить 12, а відповідно до вимог ДСТУ EN 13108-1 [1] для аналогічної асфальтобетонної суміші кількість контрольних сит становить 4. Навіть з чотирма додатковими ситами загальна кількість контрольних сит буде становити 8.

Очевидно кількість контрольних сит та розмір їх отворів необхідно встановлювати залежно від найбільшого номінального розміру зерен заповнювача у складі асфальтобетонної суміші та використовуваних фракцій заповнювача.

Наприклад, одним з сит між ситом з розміром отворів 2 мм та *D* може бути сито з розміром отворів 4 мм, що відповідає нашому ситу з розміром отворів 5 мм. Таким чином буде збережено наші напрацювання щодо коліестійкості асфальтобетонів залежно від вмісту щебеню.

Для другого контрольного сита може бути прийнято сито, що йде наступним за ситом з розміром отворів, який відповідає найбільшому номінальному розміру заповнювача в складі асфальтобетонної суміші. Це необхідно для забезпечення достатньої кількості заповнювача крупнішої фракції у складі асфальтобетонної суміші.

У якості контрольного сита між 2 мм та 0,063 мм доцільно обрати сито з розміром отворів 0,125 мм, оскільки саме це сито найбільш повно характеризує розділ між наповнювачем та дрібним заповнювачем.

Зведені пропозиції щодо контрольних сит залежно від максимального номінального розміру заповнювача у складі асфальтобетонної суміші наведено в **табл. 3**.

Щодо використовуваних фракцій заповнювача, то для крупнозернистої асфальтобетонної суміші можна виконувати більш грубе дозування мінеральних матеріалів, однак при цьому відношення *D* до *d* не повинно бути більшим ніж 2, що відповідає установленому в Україні фракціонуванню матеріалів.

Таким чином, для виробництва крупнозернистої асфальтобетонної суміші може бути використано наступні фракції заповнювача: 16/32, 8/16, 4/8, 2/4 та 0/2.

У випадку дрібнозернистої асфальтобетонної суміші доцільно використовувати більш вузькі фракції щебеню: 11/16, 8/11, 4/8, 2/4 та 0/2.

З урахуванням вищенаведеного пропонується встановити наступні національні вимоги до зернового складу асфальтобетонних сумішей залежно від найбільшого номінального розміру зерен та області їх застосування (**табл. 4 – 6**).

***Таблиця 3***

***Зведені пропозиції щодо отворів контрольних сит***

| Пропоновані розміри отворів контрольних сит, мм, залежно від максимального номінального розміру заповнювача у складі асфальтобетонної суміші, мм | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 5 (5,6) | 8 | 11 (11,2) | 16 | 22 (22,4) | 32 (31,5) |
| 5 (5,6) | 8 | 11 (11,2) | 16 | 22 (22,4) | 32 (31,5) | 45 |
| 4 | 5 (5,6) | 8 | 11 (11,2) | 16 | 22 (22,4) | 32 (31,5) |
| – | – | 5 (5,6) | 8 | 11 (11,2) | 16 | 22 (22,4) |
| – | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 |
| 0,063 | 0,063 | 0,063 | 0,063 | 0,063 | 0,063 | 0,063 |

***Таблиця 4***

***Пропозиції до зернового складу АБС для верхнього шару основи***

| Найбільший номінальний розмір зерен заповнювача, мм | Вміст зерен мінерального матеріалу, % за масою, менших даного розміру, мм | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 45 | 32 | 22 | 16 | 11 | 4 | 2 | 0,125 | 0,063 |
| 32 | 100 | 90-100 | 70-90 | – | – | 35-55 | 20-40 | 4-14 | 2-9 |
| 22 | | 100 | 90-100 | 70-90 | – | 35-55 | 20-40 | 4-14 | 2-9 |
| 16 | | | 100 | 90-100 | 70-90 | 35-55 | 20-40 | 5-15 | 3-10 |

***Таблиця 5***

***Пропозиції до зернового складу АБС для зв'язуючого шару***

| Найбільший номінальний розмір зерен заповнювача, мм | Вміст зерен мінерального матеріалу, % за масою, менших даного розміру, мм | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 32 | 22 | 16 | 11 | 8 | 4 | 2 | 0,125 | 0,063 |
| 22 | 100 | 90-100 | 65-80 | – | – | 45-55 | 25-40 | 5-11 | 3-9 |
| 16 | | 100 | 90-100 | 65-80 | – | 45-55 | 25-40 | 5-15 | 4-10 |
| 11 | | | 100 | 90-100 | 65-80 | 45-55 | 25-40 | 5-12 | 4-10 |

***Таблиця 6***

***Пропозиції до зернового складу АБС для шару покриву***

| Найбільший номінальний розмір зерен заповнювача, мм | Вміст зерен мінерального матеріалу, % за масою, менших даного розміру, мм | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 22 | 16 | 11 | 8 | 4 | 2 | 0,125 | 0,063 |
| 16 | 100 | 90-100 | 70-85 | – | 45-55 | 25-40 | 5-15 | 4-10 |
| 11 | | 100 | 90-100 | 70-85 | 55-65 | 35-50 | 6-16 | 5-11 |
| 8 | | | 100 | 90-100 | 65-75 | 45-60 | 9-19 | 7-14 |
| 4 | | | | 100 | 90-100 | 55-80 | 9-23 | 7-14 |

## Висновки

Гармонізований стандарт ДСТУ EN 13108-1 установлює загальні вимоги до зернового складу асфальтобетонних сумішей. У зв'язку з цим відповідні вимоги має бути встановлено в національному стандарті залежно від області застосування асфальтобетонних сумішей.

Під час встановлення вимог до зернового складу, за основу взято вимоги ДСТУ Б В.2.7-119 щодо вмісту зерен розміром більше ніж 5 мм, з відповідним приведенням до вимог ДСТУ EN 13108-1, та надано пропозиції до зернового складу асфальтобетонних сумішей з урахуванням найбільшого номінального розміру заповнювача у складі асфальтобетонних сумішей та можливої області їх застосування.

## Список літератури

1. ДСТУ EN 13108-1:2019 Бітумомінеральні суміші. Технічні вимоги до матеріалів. Частина 1. Асфальтобетон. Київ, 2019. 52 с. (Інформація та документація).

2. ДСТУ Б В.2.7-119:2011 Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови. Київ, 2012. 49 с. (Інформація та документація).

## References

1. DSTU EN 13108-1:2019 Bitumomineralni sumishi. Tekhnichni vymohy do materialiv. Chastyna 1. Asfaltobeton [State Standard of Ukaraine (DSTU EN 13108-1:2019) Bituminous-mineral mixtures. Technical requirements for materials. Part 1. Asphalt concrete]. Kyiv, 2019. 52 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

2. DSTU B V.2.7-119:2011 Sumishi asfaltobetonni i asfaltobeton dorozhniy ta aerodromnyy. Tekhnichni umovy [State Standard of Ukaraine (DSTU B V.2.7-119:2011) Asphalt concrete mixtures and road and airfield asphalt concrete. Specifications]. Kyiv, 2011. 49 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

**Ivan Kopynets**, *Ph.D., https://orcid.org/0000-0002-0908-4795*
**Vasyl Holovchenko**, *https://orcid.org/0000-0001-5078-8682*
**Anton Zheltobriukh**, *https://orcid.org/0000-0003-0764-8793*
**Oleksii Sokolov**, *https://orcid.org/0000-0002-4694-9647*

*M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, Kyiv, Ukraine*

## ESTABLISHMENT OF NATIONAL REQUIREMENTS FOR GRADING OF ASPHALT MIXTURES ACCORDING TO DSTU EN 13108-1

***Abstract***

Introduction. DSTU EN 13108-1 establishes requirements for asphalt mixtures used for the arrangement of pavement layers of roads, airfields, etc. These asphalt mixtures are used for arranging the base layer, binding layer, and a surface layer.

Problem Statement. A special feature of DSTU EN 13108-1 is that it establishes general requirements for all indicators, in particular for grading. That is there are no specific requirements for the grading of asphalt mixtures depending on the road category, traffic loading and the location of the asphalt concrete layer in the road pavement structure. Therefore, it is advisable to consider in detail

the requirements for the grading of asphalt mixtures, compare them with the requirements of national standards and propose appropriate national requirements.

Purpose. Establishment of national requirements for the grading of asphalt mixtures according to DSTU EN 13108-1.

Materials and methods. Analysis of literary sources, comparison of the requirements of regulatory documents for the grading of asphalt concrete mixtures.

Results. The requirements for the content of grading of a certain fraction are indicated in the form of selected minimum and maximum values of passes through sieves with the size of meshes 1.4 *D*, *D*, 2 mm and 0.063 mm in percentage, the requirements for the grading can additionally be indicated in the documents related to using asphalt mixtures. Additional requirements for grading may also be established regarding the content of grains that pass through a sieve with a certain mesh size. At the same time, no more than two sieves of a suitable mesh size between 2 mm and *D*, and two sieves of a suitable mesh size between 2 mm and 0.063 mm can be selected. The requirements of DSTU EN 13108-1 for grading have a wide range of values, which is probably related to the different possible areas of application of asphalt mitures.

Conclusions. As the DSTU EN 13108-1 standard establishes general requirements for grain composition, the corresponding requirements should be established in the national standard depending on the area of application of asphalt concrete mixtures.

When establishing the requirements for the grading, the requirements of DSTU B V.2.7-119 regarding the content of grains bigger than 5 mm were taken as a basis, with the corresponding adjustment to the requirements of DSTU EN 13108-1, and proposals were made for the grading of asphalt mixtures and the possible area of their application.

***Keywords***: asphalt, bitumen, binding layer, operational properties, pavement structure, surface course, top layer of the base.

https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.108

**УДК 691.16**

**Копинець І. В.**, *канд. техн. наук, https://orcid.org/0000-0002-0908-4795*
**Соколова О. Б.**, *https://orcid.org/0000-0003-4202-8661*
**Юнак А. Л.**, *https://orcid.org/0000-0002-5294-5554*

*Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М. П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»), м. Київ, Україна*

# ЩЕБЕНЕВО-МАСТИКОВІ АСФАЛЬТОБЕТОННІ СУМІШІ – СКЛАДНИКИ, СКЛАД, ПРОЄКТУВАННЯ ТА ВИМОГИ

***Анотація***

Вступ. Щебенево-мастикові асфальтобетонні суміші ймовірно є найбільш популярним дорожньо-будівельним матеріалом для влаштування покриву автомобільних доріг не тільки в Україні, але й в усьому світі. Державними будівельними нормами передбачено обов'язкове використання ЩМАС для влаштування покриву автомобільних доріг І категорії, також можливим є використання ЩМАС для влаштування покриву автомобільних доріг ІІ – ІІІ категорії.

Проблематика. Уперше властивості ЩМАС, а також щебенево-мастикових асфальтобетонів було унормовано в ДСТУ Б В.2.7-127 у 2016 році. З того часу до даного стандарту було розроблено дві зміни (2012 рік та 2014 рік), виконано його перегляд (2015 рік), розроблено зміну до переглянутого стандарту (2019 рік) і наразі триває черговий перегляд. Тобто можна зробити висновок про значний інтерес до цих дорожньо-будівельних матеріалів. На виконання завдань з євроінтеграції у 2018 році в Україні було прийнято ДСТУ EN 13108-5, у якому встановлено гармонізовані вимоги до ЩМАС та ЩМА, які застосовують в країнах Європейського Союзу. Однак наразі даний стандарт не впроваджено в Україні, що пов'язано із відсутністю конкретних вимог до ЩМАС, ЩМА, а також їх складників залежно від області застосування. У літературі практично неможливо знайти інформацію щодо установлення вимог до ЩМАС, ЩМА, а також їх складників під час розроблення ДСТУ Б В.2.7-127 залежно від кліматичних умов та транспортного навантаження, що, очевидно, пов'язано зі значною спорідненістю даного стандарту із радянським ГОСТ. Тому для можливості установлення національних вимог до ЩМАС та ЩМА згідно з ДСТУ EN 13108-5 доцільно виконати детальний аналіз літературних джерел з даного питання.

Мета. Установлення національних вимог до щебенево-мастикових сумішей згідно з ДСТУ EN 13108-5.

Матеріали і методи. Аналіз літературних джерел щодо складу, складників, проєктування та властивостей ЩМАС та ЩМА.

Результати. Виконано аналіз літературних джерел щодо складу, складників, проєктування та властивостей ЩМАС та ЩМА. Виконано порівняння європейських підходів щодо складу, складників, проєктування та властивостей ЩМАС та ЩМА з відповідними українськими підходами.

Висновки. Важливу роль в експлуатаційній надійності та довговічності щебенево-мастикового асфальтобетону відіграють властивості складників, а також співвідношення між мінеральними матеріалами та бітумним в'яжучим. Найбільшу увагу в європейських країнах приділяють зерновому складу сумішей, створенню каркаса з крупних заповнювачів, співвідношенню між мінеральними заповнювачами та бітумним в'яжучим, а також визначенню фізичних властивостей асфальтобетонів. Додатково, для доріг вищих категорій з вантажонапруженим транспортним потоком склад щебенево-мастикової асфальтобетонної суміші

може бути уточнено за результатами визначення колієстійкості, тріщиностійкості та динамічних випробувань.

***Ключові слова***: бітум, дрібний заповнювач, крупний заповнювач, наповнювач, стабілізувальна добавка, щебенево-мастикова асфальтобетонна суміш, щебенево-мастиковий асфальтобетон.

## Вступ

Щебенево-мастикові асфальтобетонні суміші (далі – ЩМАС) ймовірно є найбільш популярним дорожньо-будівельним матеріалом для влаштування покриву автомобільних доріг не тільки в Україні, але й в усьому світі. Вимогами розділу 8 ДБН В.2.3-4 [1] передбачено обов'язкове використання ЩМАС для влаштування покриву автомобільних доріг І категорії, також можливим є використання ЩМАС для влаштування покриву автомобільних доріг ІІ – ІІІ категорії. Уперше властивості ЩМАС, а також щебенево-мастикових асфальтобетонів (далі – ЩМА) було унормовано в ДСТУ Б В.2.7-127:2006 [2]. З того часу до даного стандарту було розроблено дві зміни (2012 рік та 2014 рік), виконано його перегляд (2015 рік), розроблено зміну до переглянутого стандарту (2019 рік) і наразі триває черговий перегляд. Тобто можна зробити висновок про значний інтерес до цих дорожньо-будівельних матеріалів. На виконання завдань з євроінтеграції у 2018 році в Україні було прийнято EN 13108-5:2018 [3], у якому встановлено гармонізовані вимоги до ЩМАС та ЩМА, які застосовують в країнах Європейського Союзу. Однак наразі даний стандарт не впроваджено в Україні, що пов'язано з відсутністю конкретних вимог до ЩМАС, ЩМА, а також їх складників залежно від області застосування. У літературі практично неможливо знайти інформацію щодо установлення вимог до ЩМАС, ЩМА, а також їх складників під час розроблення ДСТУ Б В.2.7-127:2015 [4] залежно від кліматичних умов та транспортного навантаження, що, очевидно, пов'язано з значною спорідненістю даного стандарту з совітським гостом. Тому для можливості установлення національних вимог до ЩМАС та ЩМА згідно з ДСТУ EN 13108-5:2018 [5] доцільно виконати детальний аналіз літературних джерел з даного питання.

## Основна частина

За основу було взято велику роботу польського ученого Krzysztof Blazejowski [6], у якій детально описано історію розроблення ЩМАС, вимоги до складників ЩМАС, вимоги до показників властивостей ЩМА, а також методи проєктування складу ЩМАС. У подальшому було виконано порівняння відповідних даних з вимогами ДСТУ Б В.2.7-127 [4].

### *Історія розроблення ЩМАС*

ЩМАС відома з середини 60-х років минулого сторіччя. Її винахідником був Zichner, німецький інженер і керівник Центральної лабораторії будівництва доріг компанії Strabag Bau AG. У цей час в Німеччині існувала тенденція використання в шарі покриву мастикового асфальтобетону або гусасфальту з низьким вмістом крупного заповнювача. Такий асфальтобетон піддавався швидкому зношуванню колесами транспортних засобів. Обидва складники асфальтобетону (мастика та дрібний заповнювач) були занадто слабкими, щоб забезпечити його належну міцність [6].

Через високу вартість відновлення дорожнього покриву виникло питання щодо розроблення іншого складу асфальтобетону, який міг би запобігати зношуванню. Це стало поштовхом до подальшої роботи. Основне завдання полягало в створенні асфальтобетону стійкого до зношування та з тривалим строком служби. Zichner вважав, що належну зносостійкість може бути забезпечено використанням крупного заповнювача з високою стійкістю до подрібнення, тобто з такого заповнювача має бути створено каркас асфальтобетону, а пори між ним має бути

заповнено сумішшю дрібного заповнювача, наповнювача та бітумного в'яжучого. Фактично розглядався переривчастий зерновий склад асфальтобетонної суміші [6].

Перші кроки з підвищення зносостійкості мастикового асфальтобетону полягали у нанесенні крупного заповнювача на шар мастикової суміші з наступним ущільненням котками. Співвідношення між мастикою та крупним заповнювачем становило 30:70. Сама мастика складалася з 25 % бітумного в'яжучого марки В80 або В65, 35 % наповнювача та 40 % подрібненого піску. За результатами досліджень було підібрано виробничий склад суміші, а саме: крупний заповнювач фракції 5/8 мм – 70 %, дрібний заповнювач у вигляді подрібненого піску фракції 0/2 мм – 12 %, наповнювач – 10,5 % та бітумне в'яжуче – 7,5 %. Тобто у підібраному складі суміші не було крупного заповнювача проміжної фракції 2/5 мм. Для такого складу суміші виникла проблема, пов'язана з стіканням в'яжучого через недостатню кількість структурувальних мінеральних матеріалів відносно великої кількості в'яжучого. За результатами досліджень дану проблему було вирішено додаванням азбестових волокон [6].

Розроблені суміші отримали назву MASTIMAC та MASTIPHALT. Першу суміш використовували для шарів товщиною (2 – 3) см, а другу – більше ніж 3 см. Перші суміші MASTIMAC було використано для влаштування покриву на внутрішніх дорогах асфальтобетонних заводів, що належали консорціуму Strabag. Першу ділянку дороги загального користування з суміші MASTIMAC було влаштовано в 1968 році. Результати експлуатування були настільки задовільними, що невдовзі було побудовано ряд інших ділянок. Склади нових сумішей було запатентовано в Німеччині, США, Швеції, Франції та Люксембурзі. У даних патентах орієнтовний відсотковий склад суміші був таким: 70 % крупних заповнювачів, 12 % наповнювача, 8 % в'яжучого і 10 % подрібненого піску. Також було зазначено, що можуть знадобитися стабілізувальні добавки [6].

З того часу поняття про ЩМАС практично не змінилося. На сьогодні відповідно до ДСТУ Б В.2.7-127 [4] ЩМАС є сумішшю з високим вмістом крупного заповнювача, з низьким вмістом дрібного наповнювача, наповнювача та в'яжучого до якої додають стабілізувальну добавку для запобігання стіканню в'яжучого. ЩМАС переважно застосовують для влаштування шару покриву, однак в певних країнах існує досвід її застосування у зв'язуючому шарі дорожнього одягу [6].

Незважаючи на те, що початково у складі ЩМАС використовували відносно м'який бітум, влаштований з неї покрив показало високу міцність та стійкість до пластичних деформацій і навіть після заборони використання шипованих шин, що вважались основною причиною швидкого зносу мастикового асфальтобетону, ЩМАС не були забуті та, на сьогодні, їх вважають найкращою сумішшю для влаштування високоміцних, зносостійких та довговічних покривів [6].

Впродовж багатьох років ЩМАС були відомі переважно в Німеччині, а їх застосування в інших країнах Європи та світу було обмеженим. Спочатку використання ЩМАС розповсюдилося в скандинавських країнах, а після розроблення в Німеччині першого стандарту в 1984 році ЩМАС почала набувати популярності і її дослідженнями почали займатися в різних країнах. На сьогодні практично всі європейські країни використовують ЩМАС або ж їх модифікації [6]. До модифікації ЩМАС можна віднести і ЩМАС, що використовують в Україні. Насамперед це пов'язано з відмінностями класифікації заповнювачів та наявністю значною кількістю додаткових достатньо необґрунтованих показників.

За межами Європи використання ЩМАС розпочалося на початку 90-х років. Популяризація ЩМАС в Північній Америці стала поштовхом до їх застосування в Австралії, Новій Зеландії та Китаї. За останні 20 років ЩМАС стали всесвітньо визнаною сумішшю і, мабуть, наразі нема жодної розвиненої країни в якій не застосовують ЩМАС [6]. До таких країн належить і Україна.

Такої популярності ЩМАС набули завдяки своїй довговічності (тривалий строк служби), високій стійкості до деформацій у зв'язку з високим вмістом крупного заповнювача,

підвищеній втомній довговічності у зв'язку з високим вмістом бітумного в'яжучого, підвищеній зносостійкості, меншому розбризкуванню води та хорошим шумопоглинальним властивостям [6].

Однак ЩМАС мають і ряд недоліків. Насамперед це низьке початкове зчеплення з колесами транспорту, вища вартість суміші порівняно зі звичайними сумішами та небезпека появи бітумних плям в результаті помилок під час підбирання складу, виробництва або укладання та ущільнення [6].

У загальному вигляді ущільнену ЩМАС може бути представлено як каркас з крупного заповнювача, мастики (яка складається з бітумного в'яжучого, наповнювача та дрібного наповнювача і стабілізатора) та повітряних пор (**рис. 1**) [6].

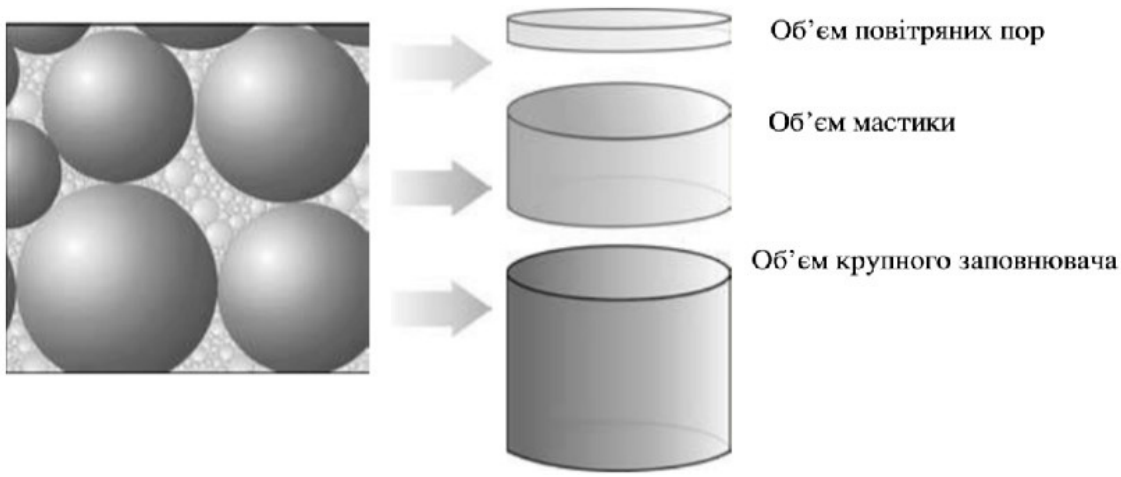



***Рисунок 1*** – Поділ ЩМА на основні складники

Такий поділ ЩМА на частини (з переважанням двох основних складників – каркаса і мастики) було прийнято для кращого пояснення ролі кожного складника ЩМАС. Подібний поділ може бути використаний як безпосередній підхід у деяких методах проєктування (наприклад, методи США та Нідерландів).

***Склад ЩМАС (ЩМА)***

Поняття каркаса із заповнювача має досить широкий зміст. Типи асфальтобетонних сумішей з різною взаємодією зерен варіюються від піщаної суміші до суміші, де зерна крупного заповнювача займають все більш значущу частину об'єму, і до суміші, що повністю складається з крупних заповнювачів. Типи заповнювачів, що складають безперервну матрицю і утворюють несний каркас, визначають конкретне групове розташування. Каркас з крупного заповнювача являє собою структуру з зерен відповідного розміру, які контактують один з одним і з'єднані між собою [6]. У Європейському Союзі крупним заповнювачем зазвичай вважають заповнювачі розміром більше ніж 2 мм, у той час як в Україні під крупним заповнювачем розуміють матеріал з розміром зерен більше ніж 5 мм. Саме розмір зерен 5 мм є базовим в Україні для класифікації асфальтобетонних сумішей.

Необхідність використання міцних матеріалів обумовлена постійним зростанням інтенсивності руху транспортних засобів та зростанням допустимого навантаження на вісь. Завдяки каркасу з крупного заповнювача відбувається передавання навантаження сусідніми зернами через точки контакту. Якщо цих точок контакту між зернами крупного заповнювача нема, більш дрібні зерна повинні допомагати передавати навантаження, що призводить до розвитку переривчастої передачі навантаження крупними активними зернами і потенційно послаблює всю структуру [6].

Під час процесу ущільнення на об'єкті зерна заповнювача в каркасі ЩМАС вступають у прямий контакт. Крупні зерна контактують один з одним, утворюючи необхідний каркас. Після такого контакту подальше ущільнення може бути небезпечним, тому що воно може призвести до подрібнення зерен. Іншими словами, суміш ЩМАС має бути ущільнено так, щоб крупні зерна були належним чином розміщені, забезпечуючи контакт щебінок між собою. Цей принцип поширюється на ущільнення як на будівельному майданчику, так і в лабораторії. Очевидно, що чим стійкіший мінеральний каркас, тим менше він буде схильний до деформацій. Навіть коли в'яжуче розм'якшується через підвищення температури покриву, шар не обов'язково деформується, якщо суміш заповнювачів підібрано правильно. Чим слабший каркас і вища температура, тим більшу роль відіграє міцність мастики на зсув і більше причин для армування мастики полімерами або спеціальними волокнами [6].

Під час проєктування структури ЩМА мета використання міцного крупного заповнювача вже визначена — створення міцного каркаса з крупних зерен. Тому доцільно розглянути, яким міцністним характеристикам повинен відповідати крупний заповнювач для ЩМАС в Україні. Відповідно до вимог пункту 5.8.1.4 ДСТУ Б В.2.7-127 [4] для виробництва ЩМАС треба використовувати щебінь з виверженых та метаморфічних гірських порід марки за дробильністю не нижче ніж 1200, а також з осадових гірських порід, гравію та металургійних шлаків марки за дробильністю не нижче ніж 1000. Тобто, на перший погляд, встановлюються достатньо високі вимоги до міцності за дробильністю. Однак доцільно розглянути самі показники дробильності, а не тільки фактичні марки.

Так, відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.7-75 [7] щебінь з виверженых гірських порід належить до марки 1200, якщо втрата маси під час випробування становить від 12 % за масою до 16 % за масою для щебеню з інтрузивних гірських порід та від 9 % за масою до 11 % за масою для щебеню з ефузивних гірських порід. Щебінь з метаморфічних гірських порід належить до марки 1200, якщо втрата маси під час випробування становить до 11 % включно. Щебінь з осадових гірських порід належить до марки 1000, якщо втрата маси під час випробування становить від 11 % за масою до 13 % за масою. Щебінь з гравію належить до марки 1000, якщо втрата маси під час випробування становить до 10 % за масою. Відповідно до вимог ДСТУ 9043 [8] щебінь з металургійних шлаків належить до марки 1000, якщо втрата маси під час випробування становить від 15 % за масою до 25 % за масою з шлаків чорної металургії та від 10 % за масою до 15 % за масою з шлаків кольорової металургії. Відповідно до приведених даних можна сказати, що найменшою міцністю відзначається щебінь з шлаків чорної металургії, що викликає сумніви щодо його використання, оскільки, ймовірно, каркас з такого щебеню не буде мати потрібної міцності. Відповідно до європейських норм категорія заповнювача за дробильністю не залежить від його походження, тому подібних нюансів не може виникати.

З моменту появи поняття ЩМАС коефіцієнти, встановлені Zichner, були змінені незначним чином. Сучасні вагові співвідношення фракцій крупного заповнювача, яким віддають перевагу в Німеччині наведено в **табл. 1** (за даними Drüschner та Schäfer) [9].

***Таблиця 1***

***Вагові коефіцієнти фракцій крупного заповнювача в ЩМАС***

| Вид ЩМАС | 2/5 мм | 5/8 мм | 8/11 мм |
|---|---|---|---|
| ЩМАС 0/8 | 2,5 частини | 4,5 частини | – |
| ЩМАС 0/8S | 2 частини | 5,5 частини | – |
| ЩМАС 0/11S | 1 частина | 2 частини | 4 частини |

У Німеччині при проєктуванні каркаса з крупного заповнювача ЩМА використовують всі фракції заповнювача розміром більше ніж 2 мм. Наприклад, для ЩМА 0/11 беруть не тільки заповнювачі розміром 8/11 мм і 5/8 мм, а й 2/5 мм. Маніпулювання співвідношеннями цих

різних розмірів необхідне, щоб отримати бажаний каркас шляхом мінімізації зерен заповнювача розміром 2/5 мм до однієї частини з семи (15 %) масової частки крупних заповнювачів. Отже, німецькі криві зернового складу ЩМА не мають різких розривів, пов'язаних із відсутністю послідовних фракцій заповнювача, і не виключають певні фракції (тобто використовують всі фракції крупних заповнювачів). У певному сенсі більшість оригінальних німецьких зернових складів є квазібезперервними (усі фракції присутні в суміші) з мінімальною часткою певних фракцій крупного заповнювача. Успіх ЩМА, запроєктованих відповідно до співвідношення розмірів заповнювача згідно з таблицею 1, було доведено довгостроковим оцінюванням дорожнього покриву, хоча ці співвідношення час від часу уточнювали (в обмеженому обсязі). Отже, особливістю німецького методу є спроєктована структура каркаса ЩМА, заснована на тривалому спостереженні та експериментуванні [6].

У деяких країнах (наприклад, Сполучені Штати Америки та Нідерланди) розроблено метод побудови каркаса ЩМА, заснований на контролюванні контакту щебінка до щебінки або реального переривчастого зернового складу. На основі цих методів визначення ЩМА розширено до асфальтобетонної суміші, що містить мастичну суміш з переривчастим зерновим складом заповнювачів та дуже високим вмістом крупних заповнювачів, у яких менші зерна розміщені серед більших, заповнюючи пори між ними, але не відтісняючи їх. Виходячи з цього визначення ЩМА, необхідно визначити рівень переривчастості зернового складу, за якого активні зерна не відтісняються пасивними [6].

Доцільно розглянути ідеалізоване розташування зерен заповнювача через гладкі сфери (**рис. 2** та **рис. 3**). Дані рисунки показують співвідношення між радіусами *R* активних крупних зерен, які утворюють каркас і радіусами *r* пасивних дрібних зерен. Співвідношення різних розмірів зерен було підібрано так, щоб менші зерна не відтісняли більші.

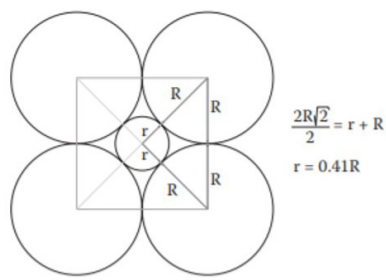



***Рисунок 2*** – Залежність між розташуванням зерен та їх радіусом

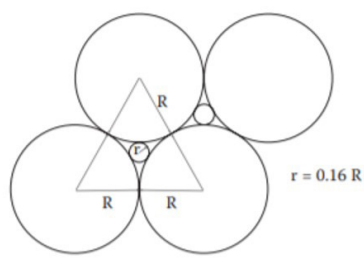



***Рисунок 3*** – Залежність між розташуванням зерен та їх радіусом

За розташування зерен відповідно до **рис. 2**, пасивні зерна не можуть бути більшими ніж 0,41 R. Тобто у ЩМАС 0/11 активні зерна будуть мати розмір 8/11 мм, наступна фракція меншого розміру має становити всього 2/5 мм, щоб запобігти розсуванню активних зерен. Бажаний переривчастий зерновий склад розвивається за відсутності фракції 5/8 мм. Таке розташування

зерен є неприродним і малоймовірним. Варіант, наведений на рисунку 3 є більш імовірним. Але легко помітити, що одним із наслідків кращого розподілу крупних зерен є зменшення вільного простору між ними, доступного для заповнення пасивним заповнювачем. Простий геометричний аналіз дозволяє розрахувати найбільший розмір дрібних зерен, що дорівнює 0,16 R, щоб уникнути розсування крупних зерен. У даному випадку в ЩМАС 0/11 окрім активної фракції 8/11 мм буде пасивна фракція 0/2 мм, тобто необхідний переривчастий зерновий склад буде складатися за відсутності фракції 2/8 мм. Однак такі припущення актуальні тільки, якщо вважати єдиною активною фракцією заповнювача фракцію 8/11 мм. Цілком можливо, що в суміші ЩМАС 0/11 активними можуть бути і зерна заповнювача іншої фракції, що додатково сприятиме підвищенню стійкості каркаса [6].

У випадку України регулювання каркаса ЩМА є більш складним, оскільки ми використовуємо більш широкі фракції щебеневих матеріалів. Якщо розглядати вимоги ДСТУ Б В.2.7-127 [4], то відповідно до пункту 5.8.1.3 для виробництва ЩМАС може бути використано щебінь фракції понад 5 мм до 15 мм включно, тобто співвідношення розміру зерен становить 3. Для виробництва цієї ж суміші може бути використано пісок фракції від 0 мм до 5 мм включно. Таким чином, для виробництва ЩМАС-15 може бути використано аж дві фракції мінерального матеріалу, що аж ніяк не дозволяє регулювати каркас ЩМА. Якщо розглядати європейські вимоги, то для виробництва подібної суміші ЩМАС 0/11 має бути використано заповнювач фракції 8/11, 5/8, 2/5 та 0/2 або ж 4 фракції.

Сформувавши відповідний каркас з крупних зерен, потрібно ввести мастику між активними зернами. Введення необхідного об'єму мастики має вирішальне значення. Мастика повинна бути в кількості, яка покриває крупні зерна, але при цьому має залишитись вільний, незайнятий простір (повітряні пори). Об'єм пор серед крупних заповнювачів має бути належним чином визначений на етапі проєктування каркаса із заповнювача. Ідеальним методом проєктування в лабораторії є той метод, що точно визначає об'єм вільного простору між крупними заповнювачами, який утвориться після ущільнення в польових умовах. Метод лабораторного проєктування може неточно відображати об'єм суміші після ущільнення в польових умовах, особливо якщо ущільнення в польових умовах є більш ефективним ніж передбачалося на етапі проєктування ЩМАС. Це призведе до того, що об'єм мастики буде занадто великим відносно вільного простору серед крупних заповнювачів, і, як наслідок, мастика може видавлюватись на поверхню, що призведе до появи бітумних плям [6].

Застосовуваний в Україні лабораторний метод проєктування складу ЩМАС, а саме метод її ущільнення, суттєво відрізняється від застосовуваного в більшості європейських країн. Наразі, невідомо чи проводились відповідні дослідження, принаймні порівняльні. Часто на українських дорогах з щебенево-мастиковим покривом можемо спостерігати бітумні плями, причиною яких, як виявляється, може бути навіть неоптимальний метод ущільнення ЩМАС в лабораторних умовах.

Другим за величиною складником ЩМАС є мастика. Вона займає близько 25 % за масою та близько 35 % за об'ємом. У каркасі заповнювача міститься близько 40 % за об'ємом повітряних пор, а після покриття заповнювача мастикою кількість пор становить менше ніж 5 % за об'ємом. Мастика складається з дрібного заповнювача (відповідно до європейських норм розмір зерен дрібного заповнювача становить менше ніж 2,0 мм), наповнювача (відповідно до європейських норм розмір часток наповнювача переважно становить менше ніж 0,063 мм), стабілізатора (волокна або інші добавки) та бітумного в'яжучого [6].

У ЩМА мастика виконує функції склеювання каркаса з крупного заповнювача, змащування зерен крупного заповнювача під час ущільнення, герметизації шару, заповнення пор в щебеневому каркасі, забезпечення міцності та атмосферостійкості, а також витримування навантажень від транспортних засобів [6].

Завдання дрібного заповнювача полягає в тому, щоб заповнити пори між зернами крупного заповнювача та сприяти їх зчепленню. Дрібний заповнювач не повинен порушувати зчеплення між крупними заповнювачами. Таке порушення можна показати на прикладі округленого, неподрібненого заповнювача (наприклад, природного піску або недробленого гравію) з гладкими поверхнями, які дозволяють крупним заповнювачам легко ковзати. Введення таких «твердих кульок» у суміш ЩМА викликає проблеми зі стабілізацією (блокуванням) каркаса із заповнювача. Ось чому в багатьох країнах можливість включення неподрібненого заповнювача в ЩМА дозволено лише на дорогах з низькою інтенсивністю руху або його використання взагалі заборонено [6]. Тут виникає питання, а чи не є ця вимога щодо подрібненого заповнювача нашим коефіцієнтом кубовидності (зерна з околотою поверхнею)? У Німеччині (батьківщині ЩМАС) широко застосовують гравійні заповнювачі до яких, за певних умов, встановлюють вимогу щодо наявності не менше ніж двох подрібнених (околотих) поверхонь.

Однією з основних характеристик дрібного заповнювача для ЩМАС є показник текучості згідно з EN 933-6 [10], що характеризує його форму (гострокутність). Даний показник визначають як час, необхідний для висипання стандартної кількості заповнювача з посудини відповідної форми через отвір. Чим більший вміст подрібненого дрібного заповнювача з кращою мікротекстурою, тим довший час висипання. Тобто крупніші або гострокутні заповнювачі мають тенденцію до блокування і не текти так швидко, як більш гладкі зерна. Також важливим параметром є вміст пор в ущільненому дрібному заповнювачі, що впливає на об'ємні властивості ЩМА [6]. В Україні вимоги до властивостей дрібного заповнювача жодним чином не адаптовані під виробництво ЩМАС. Так, відповідно до пункту 5.8.2.1 ДСТУ Б В.2.7-127 [4] для виробництва ЩМАС необхідно використовувати лише пісок із відсівів подрібнення щільних гірських порід, який повинен відповідати вимогам ДСТУ Б В.2.7-76 [11]. Даний стандарт розроблений задовго до впровадження в Україні ЩМАС. Крім того, даний стандарт розповсюджується на пісок з відсіву подрібнення скельних гірських порід гірничо-збагачувальних комбінатів України з середньою густиною від 2,8 г/см$^3$ до 3,2 г/см$^3$. При цьому в пункті 4.1 вказано конкретні гірничо-збагачувальні комбінати. Невже для виробництва ЩМАС не може бути використано інший пісок та з меншою середньою густиною. Очевидно, що вже давно назріла потреба в розробленні стандарту на пісок для дорожнього будівництва.

Під наповнювачем в більшості європейських країн розуміють заповнювач, основна частина якого проходить через сито з розміром отворів 0,063 мм, в Сполучених Штатах — через сито з розміром отворів 0,075 мм, а в Україні — через сито з розміром отворів 0,071 мм.

У ЩМАС під наповнювачем, як складником, треба розуміти весь матеріал певного розміру, що надходить із самого наповнювача та крупного і дрібного заповнювача у вигляді пилуватих часток. Таким чином, якщо ми хочемо знати поведінку фракції наповнювача в даній суміші, то всі зерна, дрібніші вказаного розміру отворів сита в кінцевій мінеральній суміші, повинні бути відокремлені, незалежно від їх походження. Всі ці матеріали треба перевірити. Якщо ми випробовуємо тільки доданий наповнювач, результати не засвідчать вплив всієї фракції наповнювача на властивості суміші. Відповідно до даних Anderson [12], Kandhal [13], Drüschner [14] та їх колег, вплив наповнювача на властивості сумішей можна оцінити так. Частки наповнювача менші за плівку бітуму на заповнювачах можуть виконувати роль наповнювача в'яжучого. Дуже дрібний наповнювач змушує суміш вести себе так, ніби в ній ще більше в'яжучого, що може призвести до таких проблем, як втрата стабільності шару покриву, колійності, просочування в'яжучого та утворення бітумних плям. Частки наповнювача, більші за плівку бітуму на заповнювачах, поводять себе як заповнювач, утворюючи мастику, і беруть участь у заповненні пор у каркасі. Надлишок наповнювача призводить до підвищення в'язкості мастики та підвищення схильності до тріщиноутворення. Сумісність між наповнювачем і в'яжучим впливає на довговічність суміші (тобто на її чутливість до води). Відповідні співвідношення в'яжучого

та наповнювача, у поєднанні з їх властивостями, впливають на укладальність ЩМАС та на її ущільнення, а також на кінцеву щільність ЩМА [6].

Важливими показниками наповнювача є його питома поверхня та вміст пор в ущільненому наповнювачі. Питому поверхню наповнювача визначають як площу поверхні часток, що відноситься до одиниці маси, зазвичай виражають в квадратних сантиметрах на грам ($см^2/г$). У більшості європейських країн питому поверхню наповнювача визначають за методом Блейна згідно з EN 196-6 [15]. Визначена питома поверхня залежить від того, наскільки зменшився в розмірах вихідний матеріал (подрібнення). Чим більше матеріал був подрібнений, тим дрібніший наповнювач і більша його питома поверхня. Два однакові наповнювачі, що повністю проходять через сито з розміром отворів 0,063 мм, можуть суттєво відрізнятися за значенням питомої поверхні. Якщо наповнювач становить 10 % від маси ЩМАС, то його питома поверхня в середньому становить близько 350 млн $см^2$ або 3 500 $м^2$, що дорівнює площі ділянки завдовжки 100 м і завширшки 35 м. Зменшення розміру часток наповнювача призведе до зростання його питомої поверхні та необхідності збільшення бітуму для повного покриття наповнювача. Збільшення питомої поверхні наповнювача вимагає збільшення кількості в'яжучого для збереження відповідної консистенції розчину. Під час збільшення вмісту наповнювача за постійного вмісту в'яжучого відбувається зменшення товщини плівки бітуму, що покриває частки наповнювача, через що суміш виглядає більш сухою. Значне збільшення відношення наповнювач-в'яжуче (F:B) збільшує ризик утворення тріщин. Е результаті ущільнення наповнювача отримаємо матеріал, що складається з часток наповнювача та повітряних пор між ними (вільні пори). У суміші наповнювача та в'яжучого ці вільні пори в ущільненому наповнювачі будуть заповненні частиною в'яжучого. Інша частина в'яжучого буде надлишковою. Таким чином, в'яжуче, що міститься в розчині, можна розділити на фіксоване, яке міститься в середі пор між частками наповнювача, та залишкове, яке залишається після заповнення пор [6].

За аналогією до питомої поверхні, для двох наповнювачів одного об'єму з різною кількістю пор, кількість фіксованого та залишкового в'яжучого буде різною. За постійного вмісту в'яжучого в суміші кількість залишкового в'яжучого залежить від кількості пор в ущільненому наповнювачі. За фіксованого відношення складників в суміші кількість залишкового в'яжучого можна збільшити, замінивши наповнювач з меншим вмістом пор. Очевидно, що вміст пор в наповнювачі не може бути занадто великим, оскільки це призведе до поглинання значної кількості в'яжучого, відповідно кількість залишкового в'яжучого буде зменшеною, що призведе до сухості суміші, її жорсткості та можливого швидкого утворення тріщин. У разі занадто малого вмісту пор, буде мати місце велика кількість залишкового в'яжучого, що може стати причиною передчасного утворення пластичних деформацій та бітумних плям [6]. Відповідно до європейських норм вміст пор у наповнювачі повинен становити від 28 % до 45 %, відповідно до норм США – до 50 %, відповідно до вітчизняних норм – не більше ніж 30 (40) %, що залежить від марки наповнювача. Тобто установлена в Україні верхня гранична кількість пор у активованому наповнювачі марки I (30 %) наближається до нижньої граничної межі європейських норм (28 %), верхня гранична кількість пор у неактивованому наповнювачі марки II (40 %) наближається до верхньої граничної межі європейських норм та норм США. Очевидно відмінності у вимогах можуть бути пов'язані як з наявністю активатора, так і з відмінностями у методі визначення кількості пор у наповнювачі. Відмінності у значеннях питомої поверхні та вмісту пор для наповнювачів різного походження за даними Schellenberger показано в **табл. 2**.

Як видно з даних **табл. 2** чіткої залежності між кількістю пор та питомою поверхнею наповнювача нема. При цьому у комерційних наповнювачів кількість пор є меншою, однак також треба враховувати і походження некомерційного наповнювача. Іншими словами, відмінностей у кількості пор комерційного та некомерційного наповнювача з вапняку не спостерігається, однак питома поверхня цих матеріалів відрізняється практично в два рази, що є свідченням різної форми часток [6].

*Таблиця 2*

***Залежність кількості пор та питомої поверхні від типу наповнювача***

| Ч. ч. | Тип наповнювача | Кількість пор, % | Питома поверхня, $см^2/г$ |
|---|---|---|---|
| 1 | Вапняк (комерційний наповнювач) | 27,7 – 31,6 | 4 750 |
| 2 | Діабаз (пил) | 30,4 – 34,2 | 3 600 |
| 3 | Вапняк (пил) | 28,3 – 32,1 | 2 280 |
| 4 | Доломіт (комерційний наповнювач) | 27,1 – 28,1 | 2 068 |
| 5 | Долерит (пил) | 32,4 – 36,4 | 2 658 |

Відповідно до європейської термінології додані наповнювачі виробляють дробленням каменю. Впродовж тривалого часу найпопулярнішим з них був і, ймовірно, залишиться ще надовго, вапняковий наповнювач. Вапняковий наповнювач є сумісним із в'яжучим, що є однією з його сильних сторін. Тому в європейських країнах для ЩМАС найчастіше використовують саме вапняковий наповнювач. Іншою важливою особливістю наповнювачів промислового виробництва є їх збіжність і однорідність властивостей. Використання золи виносу в якості наповнювачів для ЩМАС є рідкістю. До її недоліків можна віднести велику питому поверхню (зола виносу дуже дрібна) і сферичну форму часток. Тому золу виносу використовують лише в обмеженій кількості та за наявності відповідного інженерного оцінювання перед використанням. Щільність золи виносу нижча ніж щільність подрібненого каменю і знаходиться в межах від 2,0 $г/см^3$ до 2,6 $г/см^3$. Щоб отримати подібну об'ємну частку в мінеральній суміші, золу дозують в меншій кількості, ніж стандартний наповнювач. Ще одним можливим наповнювачем може бути гашене вапно. Даний наповнювач сприяє істотному підвищенню водостійкості та морозостійкості ЩМА внаслідок поліпшення адгезії в'яжучого до заповнювача. Гашене вапно значно підвищує жорсткість суміші за високих температур. Кількість пор у гашеному вапні може бути дуже великою, тому його не рекомендують додавати в кількості, більшій ніж 1,5 %. Відповідно до EN 13043 [16], вироблений наповнювач, що містить гашене вапно, називають змішаним наповнювачем. У деяких країнах значну кількість досліджень було присвячено пилу з крупного та дрібного наповнювача, розглядаючи його як потенційний матеріал для використання в сумішах. Його використання має економічний аспект, оскільки висока ефективність пилозбірників на сучасних асфальтобетонних заводах збирає значні обсяги пилу, які потім доступні для використання практично безкоштовно. Використання пилу є повсякденною практикою в багатьох країнах. Пил може бути використаний для ЩМАС разом з іншими типами наповнювачів [6].

Результати досліджень щодо практичності використання пилу сильно відрізняються. Можна зробити висновок, що доцільність його використання не може бути узагальнено. Властивості отриманого пилу можуть сильно відрізнятися залежно від його походження (тобто типу вихідної гірської породи). Варто відзначити ще один аспект застосування пилу. Під час використання пилу в якості наповнювача, він повинен відповідати стандартним вимогам до наповнювачів, у тому числі щодо збіжності та однорідності отриманих результатів. Часта зміна типу заповнювача може призвести до коливань мінералогічного складу зібраного пилу та його властивостей. Європейський стандарт EN 13043 [16] приймає в якості наповнювача дрібний пил, якщо він відповідає стандартним вимогам до наповнювачів [6].

Третім складником мастики є бітумне в'яжуче. Відповідно до практики багатьох країн для виробництва ЩМАС можливе використання бітумів дорожніх (немодифікованих), бітумів, модифікованих полімерами, та інших спеціальних в'яжучих. У США використовують як модифіковані, так і не модифіковані бітуми, що залежить від кліматичних умов експлуатування та очікуваної інтенсивності руху. У європейських країнах найчастіше використовують бітум марки 50/70, рідше – бітум марки 70/100. Однак все частіше знаходить застосування бітум,

модифікований полімером. Правильно підібрані та перевірені модифіковані в'яжучі можуть підвищити колієстійкість, зменшити схильність до низькотемпературного розтріскування покриву ЩМА та підвищити його атмосферостійкість. Використання в ЩМАС немодифікованого бітуму зазвичай обумовлене недоцільністю використання жорсткого бітуму. У таких випадках колієстійкість забезпечують створенням правильного мінерального каркаса. Наприклад, у скандинавських країнах можливе навіть використання бітуму марки 160/220, що обумовлено кліматичними умовами. Можна чітко простежити перехід від звичайного бітуму до бітуму, модифікованого полімером, що залежить від клімату та транспортних навантажень. Одні країни використовують модифікований бітум для підвищення колієстійкості ЩМА, інші – підвищення низькотемпературної тріщиностійкості. Незважаючи на те, що особливий акцент роблять на забезпеченні колієстійкості в основному за рахунок каркаса ЩМА, безсумнівно, що правильний вибір в'яжучого є додатковим елементом, який забезпечує ефективність каркаса [6].

Останнім складником ЩМАС є стабілізувальна добавка. ЩМАС вміщують велику кількість бітуму, який розподіляється на поверхні заповнювача товстою плівкою і для його утримання та запобігання стіканню переважно застосовують стабілізувальні добавки. Відсутність стабілізувальної добавки може стати причиною утворення на покриві бітумних плям. ЩМАС розроблена таким чином, щоб вона містила певну кількість надлишкового в'яжучого. Питома поверхня мінеральної суміші занадто мала відносно до проєктного об'єму в'яжучого. За звичайних умов це в'яжуче не зв'язується з зернами мінеральної суміші, не залишається на їх поверхні та стікає. Дренажний ефект виникає в результаті відділення частини (в'яжучого або мастики) ЩМАС. У багатьох країнах на перших етапах застосування ЩМАС були випадки, коли гаряче в'яжуче витікало із бункеру зберігання ЩМАС. Подібні випадки мали місце в кузовах транспортних засобів, які перевозили ЩМАС на будівельні майданчики або ж дренування проявлялось на влаштованому покриві у вигляді бітумних плям [6].

У цілому можливі два варіанти стабілізувальних добавок. Перший – добавки, що поглинають надлишок бітуму, другий – добавки, що підвищують в'язкість бітуму за високих температур. Найбільш популярними є стабілізувальні добавки, що поглинають бітум. Стабілізувальні добавки повинні мати адекватну поглинальну здатність, яка б не призводила до надмірної жорсткості суміші, та не повинні призводити до погіршення властивостей ЩМА, зокрема не створювати площини ковзання між зернами мінерального матеріалу та зменшувати міцність зчеплення між ними. Поглинальні стабілізувальні добавки може бути вироблено з целюлози, псевдоцелюлози (подрібненої макулатури), мінерального волокна, текстилю, пластмаси, скла, або сумішей целюлози з іншими матеріалами. На сьогодні найефективнішими з поглинальних стабілізаторів в'яжучого є целюлозні волокна. Вони мають дуже високу абсорбцію в'яжучого, що призводить до його надійного утримування. Стабілізувальні добавки, що не містять волокон, мають широкий діапазон поглинання в'яжучого, тому будь-яку нову продукцію треба щоразу випробовувати в лабораторії. На вміст стабілізувальних добавок впливає їх абсорбційна здатність та щільність [6].

Процедура кількісного підбирання стабілізувальної добавки в суміші проста, хоча може бути дещо трудомісткою. Необхідно виробити серію проб ЩМАС одного складу, але з різними кількостями добавки. Зазвичай випробування проводять з 0,2 %, 0,3 % і 0,4 % добавки. Для кожного вмісту добавки визначають показник стікання, а результати фіксують на графіку. За результатами випробування встановлюють мінімальний вміст добавки за якого показник стікання відповідає установленим вимогам. Під час проведення випробування температура повинна бути якомога ближчою до реальної температури виробництва суміші на асфальтобетонному заводі. Незважаючи на великий вплив стабілізатора на якість ЩМА, лише декілька країн розробили методи випробування та критерії практичності стабілізувальних добавок. Практика показує, що надійне оцінювання ефективності добавки можна виконати, коли одну й ту саму ЩМАС випробовують з

різними добавками [6]. Саме такий підхід застосовують фахівці ДП «ДерждорНДІ» не тільки під час дослідження стабілізувальних добавок, але й добавок для модифікування бітумів. Порівняння результатів випробувань на різних ЩМАС є ненадійним. Результати одного випробування не можна порівняти з результатами інших, оскільки результати кожної суміші залежать від складу ЩМАС, наприклад від типу заповнювача та кількості в'яжучого.

***Вимоги до складників ЩМАС***

Незалежно від області застосування складники ЩМАС мають бути високої якості. Вимоги до заповнювачів є досить різноманітними і вони, в основному, стосуються основних властивостей, які впливають на характеристики ЩМА і пов'язані з розміром зерен. Це призвело до появи багатьох вимог до окремих фракцій – одні до крупних (активних) заповнювачів, інші – до дрібних. Вимоги до крупного заповнювача насамперед представлені його міцністю (стійкість до дроблення або роздавлювання), відсотком подрібненості, вмістом пилуватих часток, формою зерен, стійкістю до полірування та стійкістю до зовнішніх факторів. Вимоги до дрібного заповнювача представлені гострокутністю (показником текучості), вмістом пилуватих часток та відсутністю в них часток, що набрякають. До наповнювачів встановлюють вимоги щодо структурувальної здатності, відсутності часток, що набрякають, та кількості пор в ущільненому наповнювачі [6].

Виходячи з типу каркаса із крупного заповнювача основною його властивістю є стійкість до дроблення. Цю стійкість в більшості європейських країн оцінюють з використання методу Los Angeles (індекс LA). Діапазон допустимого індексу LA в національних специфікаціях зазвичай становить від 20 % до 30 %. Загалом, стійкість до дроблення має вирішальне значення, і її необхідно перевіряти, оскільки використання слабких заповнювачів може призвести до незадовільної роботи всього шару [6]. В Україні додатково оцінюють міцність крупного заповнювача за дробильністю при стисненні, тобто ми використовуємо додаткові показники для оцінювання міцності крупного заповнювача.

У Європейському комітеті стандартизації (CEN), вимоги держав-членів до заповнювачів, призначених для виробництва асфальтобетонних сумішей, встановлено в EN 13043 [16]. У цьому стандарті наведено властивості заповнювачів і ряд вимог для кожної властивості. Кожна країна-член CEN, яка приймає цей стандарт, встановлює власні національні вимоги, враховуючи місцеві кліматичні умови та досвід проєктування, серед альтернативних властивостей та категорій, наданих у стандарті. Вимоги до властивостей заповнювачів залежать в тому числі від доступності матеріалів, наявного досвіду використання матеріалів та інтенсивності руху. Вибірку вимог певних країн наведено в **табл. 3 – 5** [6].

***Таблиця 3***

***Вимоги до крупного заповнювача згідно з EN 13043 [16] для виробництва ЩМАС у різних країнах***

| Властивість | Категорія залежно від країни | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Німеччина | Словаччина | Австрія | Швейцарія | Польща |
| Зерновий склад | $G_C90/10$ для (2/5 мм) $G_C90/15$ для (2/5, 5/8, 8/11 мм) | $G_C90/10$ | $G_C90/15$ | $G_C85/15$ | $G_C90/15$ |
| Відхили від типового зернового складу | – | Задекларовано | – | $G_{20/15}$ | $G_{25/15}$ |
| Вміст пилуватих часток | $f_2$ | $f_1$ | $f_1$ | $f_1$ | $f_2$ |
| Форма крупного заповнювача | $SI_{20}$ або $FI_{20}$ | $SI_{20}$ або $FI_{20}$ | $SI_{15}$ | $FI_{25}$ | $SI_{20}$ або $FI_{20}$ |

***Кінець таблиці 3***

| Властивість | Категорія залежно від країни | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Німеччина | Словаччина | Австрія | Швейцарія | Польща |
| Відсоток зерен з подрібненою поверхнею згідно з EN 933-5 | $C_{100/0}$, $C_{95/1}$, $C_{90/1}$ | $C_{100/0}$ | $C_{100/0}$ | $C_{95/1}$ | $C_{100/0}$ |
| Стійкість до подрібнення (метод LA) | $LA_{20}$ | $LA_{25}$ | $LA_{20}$ | 4/8 мм – $LA_{25}$<br>8/11 мм – $LA_{20}$<br>11/16 мм – $LA_{25}$ | $LA_{20}$ або $LA_{25}$ |
| Стійкість до подрібнення | $SZ_{18}$ | – | – | – | – |
| Стійкість до полірування | $PSV_{51}$ | $PSV_{56}$ | $PSV_{50}$ | $PSV_{50}$ | $PSV_{50}$ |
| Стійкість до стирання поверхні згідно з Додатком А EN 1097-8 | – | – | – | – | – |
| Зносостійкість (Micro-Deval) | – | $M_{DE}20$ | – | – | – |
| Стійкість до стирання шипованими шинами | – | – | – | – | – |
| Водопоглинання | $W_{cm}0{,}5$ | $WA_{24}1$<br>$W_{cm}0{,}5$ | $WA_{24}1$ | Задекларовано | $WA_{24}1$<br>$W_{cm}0{,}5$ |
| Стійкість до заморожування та відтавання | $F_1$ | $F_2$ | $F_1$ | – | $F_{NaCl}7$ |
| Стійкість до заморожування та відтавання | – | $MS_{18}$ | – | – | – |
| Стійкість до високих температур | Задекларовано | – | – | – | – |
| Зчеплюваність крупних заповнювачів з бітумним в'яжучим | Задекларовано | – | не менше ніж 85 %, метод В | Задекларовано | – |
| Сонячний опік | $SB_{SZ}$ ($SB_{LA}$) | – | $SB_{LA}$ | – | $SB_{LA}$ |
| Легкі крупнозернисті домішки | $m_{LPC}0.1$ | $m_{LPC}0.1$ | – | $m_{LPC}0.1$ | $m_{LPC}0.1$ |

ЩМАС в основному укладають в якості шару покриву. Тому в'яжучі для них повинні мати відповідні властивості, що відповідають цьому шару. У багатьох європейських країнах для виробництва ЩМАС використовують дорожні бітуми згідно з EN 12591 [17] та модифіковані бітуми згідно з EN 14023 [17]. Стандарт EN 14023 [17] є подібним до EN 13043 [15] щодо заповнювачів. Він містить дві таблиці з властивостями модифікованих бітумів, які вибирає кожна країна CEN залежно від кліматичних умов та інтенсивності руху. Таким чином, модифікований бітум з однаковим позначенням може суттєво відрізнятися за властивостями в різних країнах. Останнім часом великої популярності набуває технологія комплексної модифікації бітуму полімерними та енергозберігаючими добавками [6]. Відповідна тенденція наявна і в Україні.

*Таблиця 4*

***Вимоги до дрібного заповнювача згідно з EN 13043 [16] для виробництва ЩМАС у різних країнах***

| Властивість | Категорія залежно від країни | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Німеччина | Словаччина | Австрія | Швейцарія | Польща |
| Зерновий склад | $G_F85$ | $G_F85$ | $G_F85$ | $G_F85$ | $G_F85$ |
| Відхили від типового зернового складу | $G_{TC}NR$ | $G_{TC}20$ | $G_{TC}20$ | $G_{TC}10$ | $G_{TC}20$ |
| Вміст пилуватих часток | Задекларовано | $f_{10}$ | $f_{16}$ | $f_{16}$ | $f_{16}$ |
| Якість дрібнозернистої фракції | Задекларовано | $MB_F10$ | – | – | $MB_F10$ |
| Показник текучості | $E_{cs}35$ | – | $E_{cs}35$ | Задекларовано | $E_{cs}30$ |
| Легкі крупнозернисті домішки | $m_{LPC}0.1$ | – | – | – | $m_{LPC}0.1$ |

*Таблиця 5*

***Вимоги до наповнювача згідно з EN 13043 [16] для виробництва ЩМАС у різних країнах***

| Властивість | Категорія залежно від країни | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Німеччина | Словаччина | Австрія | Швейцарія | Польща |
| Зерновий склад | Сито 2,0 мм = проходження 100 %<br>Сито 0,125 мм = проходження 85 – 100 %<br>Сито 0,063 мм = проходження 70 – 100 % | | | | |
| Шкідливі дрібні фракції (якість дрібних фракції) | Задекларовано | – | – | – | $MB_F10$ |
| Вміст води (доданий наповнювач) | ≤ 1 % | ≤ 1 % | ≤ 1 % | ≤ 1 % | ≤ 1 % |
| Властивості жорсткості: пори в сухому ущільненому наповнювачі | $V_{28/45}$ | – | $V_{28/38}$ | $V_{28/45}$ | $V_{28/45}$ |
| Властивості жорсткості: «Дельта кільце і куля» | $\Delta_{R\&B}8/25$ | $\Delta_{R\&B}8/16$ | – | $\Delta_{R\&B}8/25$ | $\Delta_{R\&B}8/25$ |
| Розчинність у воді | $WS_{10}$ | $WS_{10}$ | – | Задекларовано | $WS_{10}$ |
| Чутливість до води | Задекларовано | – | – | Задекларовано | — |
| Вміст карбонату кальцію у вапняковому наповнювачі | $CC_{70}$ | $CC_{90}$ | $CC_{80}$ | Задекларовано | $CC_{70}$ |
| Вміст гідроксиду кальцію в суміші наповнювачів | Задекларовано | – | $K_a20$ | Встановлюється в договорі | Задекларовано |
| Показник бітумоємності | – | – | BN28/39 | – | Задекларовано |

Вимог до стабілізувальних добавок практично не існує. Тим паче, перевірити їх у виробничій лабораторії проблематично. В основному для підтвердження якості стабілізувальної добавки використовують показник стікання. В окремих країнах встановлено вимоги до її вологості та термостабільності [6]. За відповідними показниками стабілізувальні добавки також оцінюють в Україні.

***Проєктування складу ЩМАС***

ЩМАС та влаштовані з них шари дорожнього одягу мають багато переваг. Звичайно, ЩМАС повинні бути якісно запроєктовані. Ознайомлення з різними методами проєктування

складу ЩМАС не дозволяє однозначно встановити найкращий. Існує стільки ж різноманітних методів проєктування складу ЩМАС, як і підходів до визначення ролі окремих його складників. Використання такого матеріалу супроводжується проблемами як під час проєктування складу, так і під час влаштування шару дорожнього одягу. Однак найперше та найважливіше завдання, це якісно підібрати склад ЩМАС, оскільки це в подальшому може сприяти уникненню ряду проблем [6]. Цікаво, що в Україні в національних стандартах не надано жодних рекомендацій щодо проєктування складу ЩМАС чи рекомендацій щодо поліпшення властивостей чи усунення недоліків.

Незалежно від методу, що використовують під час проєктування складу ЩМАС, перший крок, який необхідно зробити – це встановити найбільший номінальний розмір зерен заповнювача у суміші. Під час розгляду цього питання треба враховувати розташування шару ЩМА у конструкції дорожнього одягу, розрахункову товщину шару після ущільнення, транспортне навантаження, розташування ділянки дороги. Завдяки значній довговічності ЩМА в шарі дорожнього покриву, вони знаходять використання у зв'язуючому шарі, зокрема в таких країнах як США, Австралія, Німеччина тощо. При цьому застосовують ЩМАС з більшим номінальним розміром зерен, а саме 19 мм або 22 мм [6]. Подібна практика, принаймні в документації, існує і в Україні. У ДСТУ Б В.2.7-127 [4] встановлено вимоги до ЩМАС (ЩМА) з найбільшим номінальним розміром зерен 40 мм (32 мм згідно європейських норм), а застосування такої ЩМАС передбачено у верхньому шарі основи. Поки що такі кроки обмежуються виключно здорожчанням будівництва автомобільної дороги.

У багатьох стандартах установлено мінімальну товщину ущільненого шару. У деяких країнах замість рекомендованої товщини шару вказується критерій маси на 1 м$^2$ площі шару. Знаючи об'ємну густину ЩМАС, можна розрахувати товщину шару цієї суміші. Чим тонше шар ЩМАС, тим швидше відбувається його охолодження, що значно впливає на якість її ущільнення, особливо в прохолодні пори року [6].

Суміші з більшим номінальним розміром зерен сприяють зростанню міцності каркаса. Саме цьому із збільшенням транспортного навантаження зазвичай рекомендують збільшити розмір зерен в суміші. Також треба враховувати, що збільшення розміру зерен в ЩМАС призводить до підвищення колієстійкості, але при цьому зростає шумове навантаження. Тому, в більшості країн за можливості ЩМАС 0/11 замінюють на ЩМАС 0/8 [6]. В Україні існує відповідна тенденція, коли в межах населених пунктів замінюють ЩМАС-20 на ЩМАС-15.

Вимоги до зернового складу ЩМАС установлено в стандарті EN 13108-5 [18]. Цей стандарт не встановлює критерії та умови вибору конкретного зернового складу суміші. Наразі переважно використовують метод граничних кривих зернового складу. Цей метод включає аналізування зернового складу всіх заповнювачів, в тому числі наповнювача, з подальшим підбиранням співвідношень між ними так, щоб крива зернового складу була розташована між прийнятими граничними кривими. До переваг методу граничних кривих можна віднести простоту та швидкість отримання потрібного результату, а з використанням комп'ютерного забезпечення можна швидко змінити відношення між складниками та відкоригувати криву зернового складу. Безперечно, даний метод ефективний за близької середньої густини всіх заповнювачів. Однак, якщо заповнювачі мають різну середню густину, то це може призвести до значних помилок у об'ємному співвідношенні. Тому можна зробити висновок, що використання тільки граничних кривих зернового складу може призвести до проєктування ЩМАС з низьким ступенем надійності. Вважають, що найкраща крива зернового складу відповідає середній кривій між нижніми та верхніми граничними значеннями. Це є цілком можливим, якщо враховувати середню густину заповнювачів. Важливою є форма кривої зернового складу, за якою можна оцінити крупність зерен каркаса та достатність мастики [6].

Табл. 1 ДСТУ Б В.2.7-127 [4] під час приймально-здавальних випробувань допустимо не визначати загальний вміст зерен розміром менше ніж 2,5 мм, однак за одним з принципів ЩМАС, саме цей розмір можна було б використовувати для оцінювання вмісту мастики. Натомість обов'язковим до визначення є загальний вміст зерен розміром менше ніж 0,63 мм. Не зрозуміло, чим обумовлений такий вибір. Цікаво, що аналогічні вимоги встановлені в пострадянський країнах. Відповідно до більшості вимог вміст в ЩМАС крупного заповнювача повинен становити від 70 % до 80 %. В принципі це стосується і вітчизняних вимог, згідно з якими залишок на ситі з розміром отворів 2,5 мм може становити від 57 % до 85 %. Відомо, що в Україні використовують сита з круглими отворами для встановлення розміру зерен крупного заповнювача, а для визначення зернового складу дрібного заповнювача згідно з ДСТУ Б В.2.7-232 [19] використовують сита з круглими та квадратними отворами. У випадку зернового складу сумішей можна було б скористатися вимогами пункту 31.3 ДСТУ Б В.2.7-319 [20], однак у ньому не зазначено жодних вимог щодо форми отворів розміром більше ніж 2,5 мм. Тому, враховуючи положення ДСТУ Б В.2.7-232 [19], будемо вважати, що вимоги до зернового складу ЩМАС у випадку зерен розміром менше ніж 2,5 мм установлено для сита з круглими отворами. Знаючи, що коефіцієнт переходу від сит з круглими отворами до сит з квадратними отворами становить 0,8, встановимо, що сито з круглими отворами розміром 2,5 мм відповідає ситу з квадратними отворами розміром 2,0 мм. Таким чином, зерна розміром більше ніж 2,5 мм формують каркас ЩМА відповідно до базової концепції. Проблемою ЩМАС згідно з ДСТУ Б В.2.7-127 [4] є неможливість регулювання вмісту окремих фракцій крупного заповнювача у зв'язку з можливістю використання суміші фракцій крупного заповнювача та нефракціонованого дрібного заповнювача, тому доцільно передбачати використання вузьких фракцій крупного заповнювача та фракціонований дрібний заповнювач фракції з розміром зерен від 2,5 мм до 5,0 мм.

Певний вплив на ЩМАС має форма зерен заповнювача. Високий вміст зерен лещадної та голчастої форми збільшує вміст пор в ущільненій суміші крупного заповнювача, зменшує технологічність суміші, підвищує ризик появи бітумних плям. Тому, зазвичай, до даного показника установлюють високі вимоги. Поява значних відмінностей у густині окремих фракцій суміші заповнювача змушує обговорювати співвідношення об'ємів та необхідні коригування вмісту в'яжучого. У зв'язку з цим в стандартах багатьох країн установлено рекомендований або мінімальний вміст в'яжучого, базуючись на еталонній густині заповнювача [6].

У класичному складі ЩМАС та в ряді нормативних документів, загальний вміст зерен розміром менше ніж 2 мм, як правило, знаходиться в діапазоні 15 % до 30 %. З цієї кількості близько 10 % можна віднести до наповнювача, решту – до дрібного заповнювача. Відповідні значення маємо також в українському стандарті. Згідно з яким вміст зерен розміром менше ніж 2,5 мм може становити від 15 % до 43 %. Під час проєктування вмісту дрібного заповнювача в ЩМА слід пам'ятати про можливе збільшення вмісту дрібних зерен під час ущільнення за рахунок дроблення та зношування крупних зерен.

У більшості світових вимог щодо ЩМАС вміст часток, що проходять через сито з найменшим розміром отворів (0,075 мм або 0,063 мм), зазвичай становить від 8 % до 13 %. Однак використання граничного вмісту може негативно вплинути на властивості ЩМАС, тобто 8 % можуть призвести до створення занадто малої кількості мастики. З іншого боку, велика кількість наповнювача може призвести до занадто високого вмісту мастики, а також робить її жорсткою або збільшує ризик утворення бітумних плям [6].

Вибір вмісту в'яжучого в ЩМАС є відносно простим. Відповідно до світової практики, за правильно запроєктованої суміші заповнювачів достатньо визначити відповідний вміст пустот в ущільнених зразках за різного вмісту бітуму [6]. Зовсім інший підхід застосовують в Україні, де під час підбирання складу ЩМАС треба визначити ще ряд додаткових показників (можливо

потрібних, а можливо і не потрібних). Більшістю стандартів встановлено мінімальний вміст в'яжучого для певного виду ЩМАС або ж можливого діапазону вмісту в'яжучого. Однак завжди треба враховувати, що ці вимоги встановлено для певної густини суміші заповнювачів [6].

Суттєво на визначення оптимального вмісту в'яжучого впливає метод виготовлення лабораторних зразків (метод ущільнення ЩМАС). Наприклад, відповідно до європейської практики кількість ударів за Маршалом повинна становити 2 × 50. У США кількість обертів гіратора залежить від транспортного навантаження. В Україні застосовують комбінований метод, що передбачає вібрування з наступним ущільненням стисненням. Очевидно, результати лабораторного ущільнення повинні максимально наближатися до результатів ущільнення на об'єкті, а також попереджати руйнування крупного заповнювача. Мабуть достатнім можна вважати ущільнення, яке призводить до зближення зерен крупного заповнювача та створення каркаса [6].

Мабуть найбільш використовуваними та перевіреними у всьому світі є об'ємні властивості ЩМА. Відповідно до об'ємних підходів основною вимогою є забезпечення потрібного вмісту пустот в ущільнених зразках. Механічні вимоги визначають рідко, тоді як властивості, пов'язані з експлуатаційною надійністю, переважно застосовують до ЩМА для автомобільних доріг із значним транспортним навантаженням. У **табл. 6** наведено вибірку вимог різних країн до властивостей ЩМА.

***Таблиця 6***

***Типові вимоги до властивостей ЩМА***

| Властивість | Вимога | Країна |
|---|---|---|
| Вміст повітряних пор в ущільнених зразках ЩМА, % за об'ємом | від 2,0 до 4,0<br>від 3,0 до 4,5 (для інтенсивного руху) | Більшість країн |
| | менше ніж 5,0 | Нова Зеландія |
| | близько 5,0 | Нідерланди |
| Вміст повітряних пор у суміші заповнювача (кістяку), % за об'ємом | більше ніж 17 | США |
| | більше ніж 20 | Південна Корея |
| Кількість пор, заповнених в'яжучим, % за об'ємом | від 70 до 85 | Словенія |
| | від 80 до 90 | Фінляндія |
| Стабільність за Маршалом, кН | більше ніж 6,0 | Чехія |
| Вміст повітряних пор в ущільнених зразках ЩМА за максимальної енергії ущільнення, % за об'ємом | більше ніж 2,0 | Нова Зеландія |
| | більше ніж 2,5 | Чехія |
| Одновісний модуль жорсткості за повзності (статичний режим), МПа | більше ніж 6,0 | Польща |
| Приріст колії, % | менше ніж 5,0 | Польща,<br>Австрія |
| Водостійкість (ITSR) | більше ніж 70 | США |
| | більше ніж 80 | Австрія |
| | більше ніж 90 | Польща |
| Показник стікання, % за масою | менше ніж 0,3 | Більшість країн |

В Україні установлено подібні вимоги. Залишкова пористість (відповідник вмісту повітряних пор) у нас повинна становити від 1,5 % до 4,5 %, що залежить від кліматичних умов роботи ЩМА. Натомість в більшості країн даний показник установлюють залежно від

інтенсивності руху, а сам діапазон є дещо вужчим та становить від 2,0 % до 4,0 % для звичайної інтенсивності та від 3,0 % до 4,5 % для підвищеної інтенсивності. Це пов'язано з тим, що у світі пористість розглядають як характеристику теплостійкості. У цілому вважають, що за залишкової пористості менше ніж 2,0 % асфальтобетон стає занадто пластичним, що призводить до зменшення його коліестійкості. Очевидно з цим пов'язане нормування вмісту повітряних пор в ущільнених зразках ЩМА за максимальної енергії ущільнення, що нормують в Новій Зеландії, Чехії, США тощо. Суть даного показника полягає в тому, щоб у процесі експлуатування залишкова пористість не становила нижче певного рівня, що є характеристикою теплостійкості. Можемо бачити, що нормована в Україні нижня межа залишкової пористості є нижчою за умовне граничне значення залишкової пористості за теплостійкістю асфальтобетону. Як зазначалося, зменшення залишкової пористості досягається шляхом збільшення кількості в'яжучого або ж мастики, а надлишок мастики може стати причиною появи бітумних плям навіть за відповідності ЩМАС вимогам до показника стікання. Очевидно в Україні доцільно виконувати нормування залишкової пористості за областю застосування ЩМА або ж видом за найбільшим номінальним розміром зерен від якого і залежить область застосування. У такому випадку для ЩМА-5 та ЩМА-10 може бути встановлено нижню межу залишкової пористості на рівні 2,0 %, а для ЩМА-15 та ЩМА-20 – принаймні на рівні 2,5 %. Додатково доцільно установлювати вимоги до залишкової пористості ущільненого шару ЩМАС.

Нормовані показники пористості мінеральної частини приблизно є такими як в Україні, хоча й нормується нижня границя, а не діапазон можливих значень. Однак, загальновідомо, що зменшення найбільшого номінального розміру зерен суміші призводить до збільшення пористості мінеральної частини, але цілком можливо, що вірогідні значення будуть знаходитися в межах установленого діапазону.

Ще одним показником, який також нормовано в Україні, є водостійкість ЩМА. Зазвичай установлюють нижню границю водостійкості. При цьому методи її визначення можуть суттєво відрізнятися. Наприклад, в США водостійкість визначають за найбільшої допустимої кількості пор в ущільненому шарі ЩМА, в Україні – за щільності лабораторних зразків та не зазначається метод оцінювання водостійкості.

Щодо показника стікання, то в Україні вимоги до нього є більш жорсткими (0,2 % проти 0,3 %). Можливо, з метою запобігання отримання занадто структурованої мастики, доцільно нормувати і нижню границю показника стікання.

Доцільно розглянути різні методи проєктування складу ЩМАС. Тим паче, що в Україні відсутні відповідні рекомендації.

Мабуть базовим методом проєктування складу ЩМАС є метод, що використовують в Німеччині та більшості європейських країн. Він заснований практично на 50 річній історії використання ЩМАС [6].

У даному методі можна виділити наступні етапи:

– проєктування зернового складу суміші на основі визначеного зернового складу заповнювачів та граничних кривих зернового складу;

– встановлення потрібного мінімального вмісту в'яжучого та виробництво проб ЩМАС з різним вмістом в'яжучого;

– виготовлення зразків ударним ущільнювачем Маршала за 2 × 50 ударів (50 ударів з кожного боку);

– визначення об'ємних властивостей виготовлених зразків ЩМА;

– встановлення вмісту в'яжучого за якого кількість повітряних пор становить від 2,5 % до 3,0 %, а також визначення кількості пор, заповнених в'яжучим;

– перевіряння показника стікання;

– визначення коліестійкості (для окремих видів ЩМА).

Об'єм в'яжучого визначають за формулою:

$$B_v = \frac{\rho_A \cdot B}{\rho_B}, \quad (1)$$

де $B$ – вміст в'яжучого, % за масою;
$\rho_A$ – об'ємна густина зразка, г/см$^3$;
$\rho_B$ – густина в'яжучого за температури 25 ºС, г/см$^3$.

Об'єм заповнювача визначають за формулою:

$$M_v = \frac{\rho_A \cdot (100 - B)}{\rho_{R,M}}, \quad (2)$$

де $B$ – вміст в'яжучого, % за масою;
$\rho_A$ – об'ємна густина зразка, г/см$^3$;
$\rho_{R,M}$ – густина суміші заповнювачів, г/см$^3$.

Кількість повітряних пор визначають за формулою:

$$H_{bit} = \frac{\rho_{R,bit} - \rho_A}{\rho_{R,bit}} \cdot 100\ \%, \quad (3)$$

де $\rho_A$ – об'ємна густина зразка, г/см$^3$;
$\rho_{R,bit}$ – максимальна густина суміші.

Кількість повітряних пор у мінеральному заповнювачі визначають за формулою:

$$H_{m,bit} = H_{bit} + B_v, \quad (4)$$

де $B_v$ – об'єм в'яжучого, % за об'ємом;
$H_{bit}$ – кількість повітряних пор.

Кількість пор, заповнених в'яжучим, визначають за формулою:

$$HFB = \frac{B_v}{H_{M,bit}} \cdot 100\ \%, \quad (5)$$

де $B_v$ – об'єм в'яжучого, % за об'ємом;
$H_{M,\,bit}$ – кількість повітряних пор у мінеральному заповнювачі.

У більшості випадків цього достатньо для підбирання складу ЩМАС. Додатково може бути оцінено кількість пор після ущільнення за Маршалом за 2 × 75 ударів з метою встановлення ущільнюваності ЩМАС.

Також можна розглянути чеський метод проєктування складу ЩМАС. Особливістю цього методу є врахування впливу вмісту крупного заповнювача на властивості ЩМАС. Відповідно до чеського методу зерна розміром більше ніж 4 мм відносять до крупного заповнювача, вони мають назву HDK.

Процедура проєктування ЩМАС складається з таких етапів:

– підбір проєктного зернового складу суміші з використанням аналізу впливу вмісту крупного заповнювача на властивості ЩМАС;

– визначення оптимального вмісту в'яжучого для установленого зернового складу.

Розглянемо даний метод на прикладі ЩМАС-11.

Спочатку установлюють властивості вихідних матеріалів (зерновий склад заповнювачів, пенетрацію та температуру розм'якшеності в'яжучого, а також температурні режими виробництва ЩМАС).

Встановлюють співвідношення між заповнювачами з урахуванням вимог до граничних кривих зернового складу та розробляють суміш № 3.

На основі досвіду приймають вміст в'яжучого та стабілізувальної добавки для суміші № 3 та вважають їх тимчасово оптимальними і розробляють нові зернові склади суміші. При цьому, вміст в'яжучого та наповнювача залишають незмінним.

Для суміші № 1 вміст HDK зменшують на (5–7) % і збільшують вміст дрібного заповнювача на ті ж (5–7) %.

Для суміші № 2 вміст HDK зменшують на (2,5–3,5) % і збільшують вміст дрібного заповнювача на ті ж (2,5–3,5) %.

Для суміші № 4 вміст HDK збільшують на (2,5–3,5) % і зменшують вміст дрібного заповнювача на ті ж (2,5–3,5) %.

Для суміші № 5 вміст HDK збільшують на (5–7) % і зменшують вміст дрібного заповнювача на ті ж (5–7) %.

З кожної суміші виготовляють по чотири зразки Маршала за 2 × 50 ударів, кожен з яких містить однакову кількість в'яжучого, яку було прийнято для суміші № 3 як оптимальну.

Для кожного запроєктованого складу визначають стійкість за Маршалом, об'єм в'яжучого, кількість повітряних пор в ущільнених зразках, кількість повітряних пор в суміші заповнювачів, кількість пор, заповнених в'яжучим, та будують графіки залежності цих показників від вмісту HDK.

Виконують аналіз отриманих результатів та обирають оптимальний склад на основі перегину на залежності кількості повітряних пор від вмісту HDK та досвіду проєктанта або ж розробляють новий склад № 6.

Уточнюють оптимальний вміст в'яжучого збільшуючи або зменшуючи оптимальний вміст для суміші № 3 на 0,3 % та аналізуючи результати випробування зразків з цих сумішей. За оптимальний вибирають вміст в'яжучого, за якого стійкість за Маршалом становить не менше ніж 6,0 кН, об'єм в'яжучого становить більше ніж 14,5 %, кількість повітряних пор знаходиться в межах від 3,0 % до 4,5 %

Перевіряють характеристики ущільнюваності виготовленням з оптимальної суміші зразків Маршала за 2 × 100 ударів. Кількість повітряних пор у зразках повинна становити не менше ніж 2,5 %.

Встановлюють показник стікання, який не повинен перевищувати 0,3 % за масою. За потреби коригують кількість стабілізувальної добавки. Встановлюють колієстійкість за 10 000 циклів за температури 50 ºС. Глибина колії повинна становити не більше ніж 1,6 мм. Якщо досягнуто відповідності всім вимогам, то проєктування складу ЩМАС завершують. У разі невідповідностей – вносять корективи на основі досвіду проєктувальника.

Також доцільно розглянути нідерландський метод проєктування складу ЩМАС. В основі цього методу закладено принцип проєктування складу ЩМАС за об'ємом.

Каркас з крупного заповнювача містить певний об'єм пор, який заповнюють дрібним заповнювачем і, тим самим, збільшують загальну кількість пор, зменшують їх обсяг та зменшують фактичний розмір пор. В подальшому утворений об'єм пор заповнюють наповнювачем, що призводить до подальшого зростання кількості пор, зменшення їх обсягу та зменшення їх розміру.

На останньому етапі утворений обсяг пор заповнюють в'яжучим, а вільний простір, що не заповнився в'яжучим – є кількістю повітряних пор. Певна кількість повітряних пор є доступною для води або ж є відкритою, інша не доступна для води – закрита.

Оскільки нідерландський метод є об'ємним, то в основі його принципу є визначення об'ємних властивостей всіх складників ЩМАС.

Першим кроком проєктування складу ЩМАС відповідно до нідерландського методу є визначення об'єму каркаса крупного заповнювача і пор між ним, доступних для решти складників ЩМАС. Визначення об'єму, який займає каркас крупного заповнювача, полягає у визначенні його густини та перевірянні ущільнення крупного заповнювача (а саме, кількості повітряних пустот, що залишаються серед крупних зерен після ущільнення). Кількість повітряних пор в ущільненому крупному заповнювачі можна визначити «сухим методом» з використанням гіраторного ущільнювача, ударного ущільнювача Маршала або вібраційного ущільнювача, а також «мокрим методом» з використанням спеціального мастила та відповідних методів ущільнення.

Ймовірно за «мокрим методом» пористість каркаса заповнювача буде меншою ніж за «сухим методом». Це пов'язано з тим, що мастило сприяє зміщенню зерен заповнювача відносно один одного. Цю функцію також виконує бітум у ЩМАС. Наявність мастила також сприятиме меншому подрібненню зерен під час ущільнення. Для моделювання ущільнення доцільно використовувати мастило, що за температури довкілля має в'язкість, близьку до в'язкості в'яжучого за технологічних температур. У Нідерландах з цією метою використовують медичну оливу в кількості 1,5 % за масою.

Крупний заповнювач масою 4 кг ущільнюють у формі для зразків діаметром 150 мм за 300 обертів у гіраторному ущільнювачі та зовнішнього кута 1°. Після визначення густини зерен крупного заповнювача (більше 2 мм) і повітряних пор в ущільненому заповнювачі, із заповнювача видаляють мастило та визначають зміну зернового складу. Таким чином, також отримують результати щодо дроблення заповнювача у процесі ущільнення. Вважають, що після 300 обертів має місце переущільнення суміші та певне руйнування зерен відповідно до процесу укладання та ущільнення, а також після кількох років експлуатації.

Іншим важливим фактором, який треба враховувати під час аналізу повітряних пор між зернами крупного заповнювача, є їх подрібнення та зношування, що відбувається на стадії виробництва суміші, під час її укладання та під час наступної експлуатації. Подрібнення зерен викликає їх зміщення, а отже зменшення повітряних пор у каркасі крупного заповнювача (після ущільнення). Поєднуючи це зі знанням про стійкість заповнювача до подрібнення та зношування, необхідно до певної міри збільшити повітряні пори в проєктованій ЩМАС (наприклад, до 5 % замість 4 %). Це повинно гарантувати, що навіть після тривалої служби під великими навантаженнями не будуть утворюватися бітумні плями. Такі вимоги були прийняті в Нідерландах, де вміст повітряних пор в ущільнених лабораторних зразках для важкого транспорту було збільшено до 5 % за об'ємом. Відповідно до наших вимог вміст повітряних пор в лабораторних зразках (залишкова пористість) може становити 1,5 %. Якщо врахувати нідерландські твердження, то в процесі експлуатації пористість буде знижуватися, а це може стати причиною утворення бітумних плям уже в процесі експлуатації, що не буде пов'язано з показником стікання.

Використання заповнювачів, схильних до подрібнення, змінює співвідношення об'єму у суміші заповнювачів, а саме: зменшується об'єм каркаса з крупного заповнювача в результаті подрібнення зерен заповнювача та зменшення їх розміру; збільшується обсяг дрібних зерен, що не беруть участь у формуванні каркаса крупного заповнювача; зменшується вміст повітряних пор у суміші заповнювачів.

З використанням даного методу враховують ефект збільшення повітряних пор у каркасі крупного заповнювача. У ЩМАС зерна крупного заповнювача покрито мастикою, тому, природно, що серед крупних зерен є частинки наповнювача або дрібного заповнювача. Ці частки збільшують

вміст повітряних пор між зернами крупного заповнювача. У Нідерландах ефект додаткового збільшення повітряних пор серед зерен крупного заповнювача називають ефектом збільшення. З плином часу зменшення повітряних пор між зернами крупного заповнювача відбувається в результаті доущільнення, переорієнтації зерен, зношування і переміщення дрібних зерен.

Відповідно до нідерландської концепції одразу після влаштування ЩМАС, ЩМА не має реального каркаса з крупного заповнювача. Справжній каркас у ЩМА створюється під час експлуатації під впливом транспортних та кліматичних навантажень, коли зерна дрібного заповнювача та частки наповнювача між зернами крупного заповнювача можуть подрібнюватися чи переміщуватися.

У зв'язку з цим на етапі проєктування складу ЩМАС треба визначити потрібний вміст дрібного заповнювача і наповнювача.

Рекомендоване співвідношення між кількістю дрібного заповнювача та кількістю наповнювача становить 65:35 за масою. Якщо густина наповнювача становить близько 2,700 г/см$^3$, а густина подрібненого піску близько 2,650 г/см$^3$, то це відношення можна використовувати без перерахунку. У випадках значних відхилень від цих значень густини масові пропорції треба перевести в об'ємні.

На наступному етапі встановлюють загальний об'єм мастики в ЩМАС за формулою:

$$V_m = \frac{m_b}{\rho_b} + \frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_s}{\rho_s} + \frac{m_a}{\rho_a}, \quad (6)$$

де $m_b$ – маса в'яжучого, % за масою;
$\rho_b$ – густина в'яжучого, г/см$^3$;
$m_f$ – маса наповнювача, % за масою;
$\rho_f$ – густина наповнювача, г/см$^3$;
$m_s$ – маса дрібного заповнювача, % за масою;
$\rho_s$ – густина дрібного заповнювача, г/см$^3$;
$m_a$ – маса стабілізатора, % за масою;
$\rho_a$ – густина стабілізатора, % за масою.

У Нідерландах використовують коефіцієнт заповнення каркаса (FRs) з метою визначення теоретичного ступеня заповнення мастикою повітряних пустот у каркасі з крупного заповнювача (тобто для дослідження того, чи є проєктний об'єм мастики оптимальним). FRs визначають за формулою:

$$\text{FRs} = \frac{V_m - V_s}{V_s} \cdot 100, \quad (7)$$

де FRs – відсоткове заповнення каркаса з крупного заповнювача мастикою, % за об'ємом;
$V_m$ – об'єм мастики, % за об'ємом;
$V_s$ – повітряні пори в ущільненому каркасі з крупного заповнювача, % за об'ємом:

$$V_s = \frac{\rho_g - \rho_g^b}{\rho_g} \cdot 100, \quad (8)$$

де $\rho_g$ – густина суміші крупного заповнювача, г/см$^3$;
$\rho^b_g$ – об'ємна густина фракції крупного заповнювача, ущільненого в гіраторному ущільнювачі з мастилом, г/см$^3$.

FRs < 0 означає, що повітряні пустоти не заповнені достатньою кількістю мастики.

FRs = 0 означає, що повітряні пустоти заповнені мастикою.

FRs > 0 означає, що повітряні пустоти переповнені мастикою.

Для кожного складу ЩМАС коефіцієнт FRs не повинен перевищувати 0.

Постійний фіксований вміст в'яжучого, що залежить виключно від найбільшого номінального розміру зерен заповнювача в суміші заповнювачів є найбільш незвичайною особливістю нідерландського методу. Під час проєктування складу ЩМАС вміст в'яжучого для певної суміші приймають відповідно до нормативних документів. Наприклад, в ЩМАС 0/11 для інтенсивного руху вміст в'яжучого повинен становити 6,5 % за масою. Кількість в'яжучого залишається незмінною та повинна відповідати відповідному зерновому складу суміші. Тобто склад ЩМАС 0/11 треба підібрати таким чином, щоб вона містила 6,5 % в'яжучого, а ЩМА мав 5,0 % за об'ємом пор.

У багатьох країнах, як і в Україні, у практиці проєктування складу всіх асфальтобетонних сумішей прийнято вважати, що оптимальну кількість в'яжучого підбирають на основі заданого зернового складу суміші. Нідерландський метод рекомендує навпаки, тобто підбирати зерновий склад суміші відповідно до заданого вмісту в'яжучого.

## Висновки

Важливу роль в експлуатаційній надійності та довговічності щебенево-мастикового асфальтобетону відіграють властивості складників, а також співвідношення між мінеральними матеріалами та бітумним в'яжучим.

Найбільшу увагу в європейських країнах приділяють зерновому складу сумішей, створенню каркаса з крупних заповнювачів, співвідношенню між мінеральними заповнювачами та бітумним в'яжучим, а також визначенню фізичних властивостей асфальтобетонів. Додатково, для доріг вищих категорій з вантажонапруженим транспортним потоком склад щебенево-мастикової асфальтобетонної суміші може бути уточнено за результатами визначення колієстійкості, тріщиностійкості та динамічних випробувань.

Вимоги до складників щебенево-мастикових асфальтобетонних сумішей та властивостей щебенево-мастикових асфальтобетонів встановлюють залежно від області їх використання, інтенсивності та складу транспортного потоку.

Для виробництва щебенево-мастикових асфальтобетонних сумішей використовують заповнювачі вузьких фракцій з високими показниками опору до подрібнення та морозостійкості, з низьким вмістом зерен лещадної та голчастої форми, а також пилуватих часток. Колієстійкість щебенево-мастикового асфальтобетону переважно забезпечується каркасом з крупного заповнювача, однак підвищити колієстійкість також можна завдяки використанню модифікованого бітуму.

Проведення лабораторних досліджень з встановлення вимог до проєктування складу асфальтобетонних сумішей та їх застосування дозволить впровадити в Україні сучасні європейські стандарти і, тим самим, сприятиме підвищенню довговічності щебенево-мастикового покриву.

## Список літератури

1. ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. Київ, 2016. 91 с. (Інформація та документація).

2. ДСТУ Б В.2.7-127:2006 Будівельні матеріали. Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон щебенево-мастиковий. Технічні умови. Київ, 2007. 28 с. (Інформація та документація).

3. EN 13108-5:2018 Bituminous mixtures – Material specifications – Part 5: Stone Mastic Asphalt (Інформація та документація).

4. ДСТУ Б В.2.7-127:2015 Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон щебенево-мастикові. Технічні умови. Київ, 2016. 29 с. (Інформація та документація).

5. ДСТУ EN 13108-5:2018 Бітумомінеральні суміші. Технічні умови. Частина 5. Щебенево-мастиковий асфальтобетон (EN 13108-5:2016, IDT). Київ, 2019. 32 с. (Інформація та документація).

6. Blazejowski K. (2011) *Stone matrix asphalt. Theory and Practice.* Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group.

7. ДСТУ Б В.2.7-75-98 Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови. Київ, 1999. 16 с. (Інформація та документація).

8. ДСТУ 9043:2020 Матеріали щебеневі зі шлаків металургійних для дорожнього будівництва. Технічні умови. Київ, 2020. 26 с. (Інформація та документація).

9. Drüschner L., Schäfer V. (2000). Splittmastixasphalt. DAV Leitfaden. Deutscher Asphaltverband. EAPA. Airfild uses of asphalt. *European Asphalt Pavement Association*. Ref: (3)2-03-00.015.May 2003, Breukelen (The Netherlands).

10. EN 933-6:2014 Tests for geometrical properties of aggregates – Part 6: Assessment of surface characteristics – Flow coeffi cient of aggregates. (Інформація та документація).

11. ДСТУ Б В.2.7-76-98 Пісок для будівельних порід із відсівів подроблення скельних гірських порід гірничо-збагачувальних комбінатів України. Технічні умови. Київ, 1999. 9 с. (Інформація та документація).

12. Anderson D.A., Tarris J.P., Brock J.D. 1982. Dust collector fies and their inflence on mixture design. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 51: 363–397.

13. Kandhal P.S., Lynn C.Y., Parker, Jr. F. 1998. Characterization tests for mineral filers related to performance of asphalt paving mixtures. National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Auburn, AL, NCAT Report No. 98-2.

14. Drüschner L. 2006. The German origin of SMA. *Asphalt Review* 25(1): March 2006.

15. EN 196-6:2010 Methods of testing cement – Part 6: Determination of fineness. (Інформація та документація).

16. EN 13043:2002/AC:2004 Aggregates for bituminous mixtures and surface treatments for roads, airfields and other trafficked areas. (Інформація та документація).

17. EN 14023:2010 Bitumen and bituminous binders – Specification framework for polymer modified bitumens. (Інформація та документація).

18. *EN 13108-5*:2006. English Version. Bituminous mixtures – Material specifications – Part 5: Stone Mastic Asphalt.

19. ДСТУ Б В.2.7-232:2010 Будівельні матеріали. Пісок для будівельних робіт. Методи випробувань. Київ, 2011. 47 с. (Інформація та документація).

20. ДСТУ Б В.2.7-319:2016 Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Методи випробувань. Київ, 2017. 75 с. (Інформація та документація).

**References**

1. ДБН В.2.3-4:2015 Avtomobilni dorohy. Chastyna I. Proektuvannya. Chastyna II. Budivnytstvo. (Automobile roads. Part I. Design. Part II. Construction). Kyiv, 2016. 91 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

2. DSTU B V.2.7-127:2006 Budivelni materialy. Sumishi asfaltobetonni i asfaltobeton shchebenevo-mastykovyy. Tekhnichni umovy [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-127:2006) Building materials. Asphalt-concrete mixtures and crushed-mastic asphalt concrete. Specifications]. Kyiv, 2007. 28 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

3. EN 13108-5:2018 Bituminous mixtures – Material specifications – Part 5: Stone Mastic Asphalt (Information and documentation) [in English].

4. DSTU B V.2.7-127:2015 Sumishi asfaltobetonni i asfaltobeton shchebenevo-mastykovi.

Tekhnichni umovy [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-127:2015)Asphalt-concrete mixtures and crushed-mastic asphalt concrete. Specifications]. Kyiv, 2016. 29 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

5. DSTU EN 13108-5:2018 Bitumomineralni sumishi. Tekhnichni umovy. Chastyna 5. Shchebenevo-mastykovyy asfaltobeton [State Standard of Ukraine (DSTU EN 13108-5:2018) Bituminous-mineral mixtures. Specifications. Part 5. Crushed-mastic asphalt concrete]. Kyiv, 2019. 32 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

6. Blazejowski K. (2011) *Stone matrix asphalt. Theory and Practice.* Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group [in English].

7. DSTU B V.2.7-75-98 Shchebin i hraviy shchil′ni pryrodni dlya budivelnykh materialiv, vyrobiv, konstruktsiy i robit. Tekhnichni umovy [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-75-98) Crushed stone and gravel are natural dense for building materials, products, constructions and works. Specifications]. Kyiv, 1999. 16 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

8. DSTU 9043:2020 Materialy shchebenevi zi shlakiv metalurhiynykh dlya dorozhn′oho budivnytstva. Tekhnichni umovy [State Standard of Ukraine (DSTU 9043:2020) Crushed materials from metallurgical slag for road construction. Specifications]. Kyiv, 2020. 26 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

9. Drüschner L., Schäfer V. (2000). Splittmastixasphalt. DAV Leitfaden. Deutscher Asphaltverband. EAPA. Airfild uses of asphalt. *European Asphalt Pavement Association*. Ref: (3)2-03-00.015.May 2003, Breukelen (The Netherlands) [in English].

10. EN 933-6:2014 Tests for geometrical properties of aggregates – Part 6: Assessment of surface characteristics – Flow coeffi cient of aggregates. (Information and documentation) [in English].

11. DSTU B V.2.7-76-98 Pisok dlya budivel′nykh porid iz vidsiviv podroblennya skelnykh hirskykh porid hirnycho-zbahachuvalnykh kombinativ Ukrayiny. Tekhnichni umovy [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-76-98) Sand for construction rocks from screenings of rock crushing of mining and beneficiation plants of Ukraine. Specifications]. Kyiv, 1999. 9 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

12. Anderson D.A., Tarris J.P., Brock J.D. 1982. Dust collector fies and their inflence on mixture design. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 51: 363–397 [in English].

13. Kandhal P.S., Lynn C.Y., Parker, Jr. F. 1998. Characterization tests for mineral filers related to performance of asphalt paving mixtures. National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Auburn, AL, NCAT Report No. 98-2 [in English].

14. Drüschner L. 2006. The German origin of SMA. *Asphalt Review* 25(1): March 2006 [in English].

15. EN 196-6:2010 Methods of testing cement – Part 6: Determination of fineness. (Information and documentation) [in English].

16. EN 13043:2002/AC:2004 Aggregates for bituminous mixtures and surface treatments for roads, airfields and other trafficked areas. (Information and documentation) [in English].

17. EN 14023:2010 Bitumen and bituminous binders – Specification framework for polymer modified bitumens. (Information and documentation) [in English].

18. *EN 13108-5*:2006. English Version. Bituminous mixtures – Material specifications – Part 5: Stone Mastic Asphalt (Information and documentation) [in English].

19. DSTU B V.2.7-232:2010 Budivelni materialy. Pisok dlya budivelnykh robit. Metody vyprobuvan [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-232:2010) Building materials. Sand for construction works. Test methods]. Kyiv, 2011. 47 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

20. DSTU B V.2.7-319:2016 Sumishi asfaltobetonni i asfaltobeton dorozhniy ta aerodromnyy. Metody vyprobuvan [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-319:2016) Asphalt concrete mixtures and road and airfield asphalt concrete. Test methods]. Kyiv, 2017. 75 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

**Ivan Kopynets**, *Ph.D., https://orcid.org/0000-0002-0908-4795*
**Oksana Sokolova**, *https://orcid.org/0000-0003-4202-8661*
**Alina Yunak**, *https://orcid.org/0000-0002-5294-5554*
*M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, Kyiv, Ukraine*

# STONE MASTIC ASPHALT MIXTURES - COMPONENTS, COMPOSITION, DESIGN AND REQUIREMENTS

***Abstract***

Introduction. Stone mastic asphalt mixtures are probably the most popular road construction material for paving roads not only in Ukraine but also around the world. State construction standards provide for the mandatory use of SMA mixtures for paving roads of category I, and it is also possible to use SMA mixtures for paving roads of II – III categories.

Problem Statement. For the first time, the properties of SMA mixtures, as well as stone mastic asphalt concrete, were standardized in DSTU B V.2.7-127 in 2016. Since then, two amendments to this standard have been developed (2012 and 2014), its revision has been carried out (2015), an amendment to the revised standard has been developed (2019) and another revision is currently underway. Thus, we can conclude that there is a significant interest in these road construction materials. In 2018, as part of its European integration efforts, Ukraine adopted DSTU EN 13108-5 which sets harmonized requirements for SMA mixtures and SMA used in the European Union. However, this standard has not yet been implemented in Ukraine, which is due to the lack of specific requirements for SMA mixtures, SMA, as well as their components depending on the field of application. In the literature sources, it is almost impossible to find information on the establishment of requirements for SMA mixtures and SMA, as well as their components during the development of DSTU B V.2.7-127 with regard to climatic conditions and traffic load, which is obviously due to the significant affinity of this standard with the Soviet one. Therefore, to be able to establish national requirements for SMA mixtures and SMA in accordance with DSTU EN 13108-5, it is advisable to perform a detailed analysis of the literature sources on this issue.

Purpose. To establish national requirements for stone mastic mixtures in accordance with DSTU EN 13108-5.

Materials and methods. Analysis of literature sources on the composition, components, design, and properties of SMA mixtures and SMA.

Results. The literature sources on the composition, components, design, and properties of SMA mixtures and SMA were analyzed. The European approaches to the composition, components, design, and properties of SMA mixtures and SMA were compared with the relevant Ukrainian approaches.

Conclusions. An important role in the operational reliability and durability of stone mastic asphalt concrete is played by the properties of the components, as well as the ratio between aggregate and bituminous binder. In European countries, the greatest attention is paid to the grading of mixtures, the creation of a framework of coarse aggregates, the ratio between mineral aggregates and bituminous binder, as well as the determination of the physical properties of asphalt concrete. Additionally, for roads of higher categories with heavy traffic flow, the design of the stone mastic asphalt mixture can be specified based on the results of determining rutting resistance, crack resistance, and dynamic tests.

***Keywords:*** bitumen, fine aggregate, stone mastic asphalt mixture, stone mastic asphalt concrete, coarse aggregate, filler, stabilizing additive.

https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.134

**УДК 625.07**

**Кривобок О. В.**, *https://orcid.org/0000-0002-5424-8664*
**Биковець М. М.**, *https://orcid.org/0000-0002-7490-7479*

*Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»), м. Київ, Україна*

# АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ ЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ ПІД ЧАС ВІДНОВЛЕННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ В УКРАЇНІ

***Анотація***

Вступ. Дорожня інфраструктура є однією з ключових складових економічного та соціального розвитку будь-якої країни. Її відновлення є одним із важливих завдань післявоєнного періоду, коли автомобільні дороги можуть бути пошкоджені або зруйновані. У статті проводиться порівняльний аналіз використання жорсткого дорожнього одягу під час відновлення доріг в Україні в післявоєнний час.

Проблематика. Забезпечення надійності дорожнього одягу.

Мета. Дослідити доцільність застосування конструкцій жорсткого дорожнього одягу в післявоєнний період.

Результати. Проведено аналіз доцільності використання жорсткого дорожнього одягу, наведено конструкції дорожнього. Проаналізовано вартість будівельних матеріалів.

Висновки. Проведено дослідження переваг і недоліків використання цементобетону в дорожньому будівництві, виконано розрахунок жорсткого дорожнього одягу, підібраний орієнтовний склад та проведено лабораторні випробування фізико-механічних показників цементобетону.

Економічна складова при будівництві та ремонті автомобільних доріг є одним із ключових критеріїв при виборі типу дорожнього одягу, враховуючи, вартість бітуму в Україні, яка склалась на теперішній час, вважаємо улаштування жорсткого дорожнього одягу є економічно доцільним і в післявоєнний період.

***Ключові слова:*** автомобільна дорога, жорсткий дорожній одяг, міцність, покрив, цементобетон.

## Вступ

Дорожня інфраструктура є однією з ключових складових економічного та соціального розвитку будь-якої країни. Тому основним завданням в післявоєнний період є відновлення та покращення дорожньої мережі. Один із ключових аспектів цього процесу є вибір матеріалів для дорожнього будівництва. У цій статті розглядається порівняння доцільності використання жорсткого і нежорсткого дорожнього одягу під час відновлення доріг в Україні в післявоєнний період.

## Основна частина

В автомобільних дорогах використовують: нежорсткий (асфальтобетон) або жорсткий (цементобетон) тип дорожнього одягу.

В Україні на теперішній час автомобільні дороги з цементобетонним покривом складають лише 1,4 %, всі інші – мають асфальтобетонний покрив. У Європі лідером з кількості автомобільних доріг з цементобетонним покривом є Німеччина, де їх частка становить близько 40 % від усієї дорожньої мережі.

У першу чергу потрібно розуміти з чого складається жорсткий (цементобетон) та нежорсткий (асфальтобетон) дорожній одяг.

Асфальтобетон являє собою суміш кам'яних заповнювачів, в'яжучого – бітуму та добавок-модифікаторів.

Цементобетон являє собою суміш крупного та дрібного заповнювача, в'яжучих матеріалів, води, хімічних і мінеральних добавок (за потреби).

Порівнюючи складові, з яких складаються автомобільні дороги з цементобетонним або асфальтобетонним покривом, основною перевагою використання цементобетонного покриву є мінімальний відсоток імпортної складової. Адже при будівництві використовують в основному українські матеріали порівняно з асфальтобетонним, де використовують імпортний бітум.

На даний момент основним імпортером бітуму є Польща, Азербайджан та Греція. Вартість кожної тони асфальтобетону складається на (52–56) % з вартості бітуму. Це ті гроші, які йдуть за межі України, а могли б залишитися всередині країни.

Порівняно із цементобетоном понад 90 % якого це матеріали, вироблені в Україні. Крім того, на ціну цементу не впливає коливання курсу валют [1].

Виконавши аналіз українських та літературних джерел, зокрема [9-11] можна навести такі переваги та недоліки використання цементобетону під час будівництва автомобільних доріг.

Переваги:

1. Міцність. За цим показником автомобільні дороги з цементобетонним покривом в рази і навіть десятки разів перевищують автомобільні дороги з асфальтобетонним покривом. А це дозволяє уникнути проблем, які з року в рік виникають в Україні. У самий пік високої температури, коли асфальтобетонний покрив стає пластичним, автомобільними дорогами йде важка техніка: вантажівки з урожаєм сільськогосподарських культур, продуктами його переробки, важка сільськогосподарська та будівельна техніка. Від цього автомобільні дороги руйнуються і на них утворюються дефекти. Наразі з цим планують боротися шляхом зважування вантажів і забороною переміщення важких вантажів у жарку погоду. Максимальна температура плавлення бетону становить більше ніж 1 000 °С, тому літня спека на його жорсткість не впливає.

2. Зносостійкість і стійкість до впливу низьких температур. За цими показниками цементобетон теж значно краще асфальтобетону. Його, як і асфальтобетон, не змивають осінні та весняні ливні, паводки. Тому капітальний ремонт цементобетонної дороги виконують через 25–30 років.

3. Екологічна складова. Для виготовлення асфальтобетону в якості в'яжучого застосовуються досить шкідливі нафтопродукти, а для цементобетону – вапняк і гіпс. Крім цього, цементобетонний покрив стійкий до стирання, тому практично не утворює пилу [2].

Недоліки:

1. Строк будівництва. Автомобільна дорога з цементобетонним покривом складніша за технологією будівництва. Що в свою чергу сповільнює процес порівняно з будівництвом автомобільної дороги з асфальтобетонним покривом.

2. Автомобільні дороги з цементобетонним покривом більш шумні, особливо ті, що побудовані за старими технологіями, тоді як пористий і пластичний асфальтобетон краще поглинає шуми.

3. Автомобільні дороги з цементобетонним покривом дуже чутливі до опадів, ґрунтових вод, циклічного заморожування-відтавання, протиожеледних розчинів. Такій дорозі потрібний особливий протикорозійний захист. Його забезпечують високою якістю кам'яних матеріалів, застосуванням спеціальних цементів, улаштуванням конструкцій, що дренують, ізоляцією швів.

Улаштування дороги з цементобетону передбачає такі етапи:

– підготовчі роботи;

– підсипання й ущільнення;
– улаштування опалубки;
– армування;
– заливання цементобетону;
– нарізання деформаційних швів;
– доглядання за цементобетоном.

Перед улаштуванням дорожнього одягу виконують розрахунок конструкції згідно з ГБН В.2.3-37641918-557:2016. Для прикладу наведено розрахунок конструкції жорсткого дорожнього одягу для ІІ категорії автомобільної дороги, яка відповідає дійсним нормативним документам [3].

1. Цементобетон дорожній $B_{tb}$4,0, В30, F200, W8 згідно з ДСТУ 8858:2019 – 26 см;
*ГТ.Н.ГП.-8 згідно з табл. А.4 ГБН В.2.3-37641918-544:2014;*
2. ЩПС.Кр.Ц.М75.ДСТУ 9177-3:2022 – 15 см;
*Підґрунтовка – ЕКШ-50 згідно з ДСТУ Б В.2.7-129:2013 – 1,00 л/м²*;
3. ЩПС.С5.ДСТУ 9177-2:2022 – 21 см;
*ГТ.Н.Т-1 згідно з табл. А.3 ГБН В.2.3-37641918-544:2014;*
4. Пісок середньої крупності з вмістом пиловидних і глинистих часток не більше ніж 2 % та коефіцієнтом фільтрації не менше ніж 5 м/добу згідно з ДСТУ Б В.2.7-32-95 – 20 см;
*ГТ.Н.Т-1 згідно з табл. А.3 ГБН В.2.3-37641918-544:2014;*
Ґрунт земляного полотна – суглинок важкий пилуватий.

**Перевіряння конструкції на морозостійкість**

Глибину промерзання дорожньої конструкції $Z_р$ визначають:

$$Z_р = Z_{max}^{Н} + D = 70 + 10 = 80 \text{ см}.$$

Визначаємо розрахункову глибину залягання рівня ґрунтових вод $H$:

$$H = H_{угв} + H_{нас} = 350 + 150 = 500 \text{ см}.$$

Визначаємо відношення розрахункової глибини промерзання $Z_р$ до розрахункової глибині залягання рівня ґрунтових вод $H$:

$$\frac{Z_р}{H} = \frac{80}{500} = 0,16 \Rightarrow \frac{Z_р}{H} < 1.$$

Визначаємо еквівалентну (по відношенню до щебеню з гранітних порід) товщину дорожнього одягу $h_{заг}$:

$$h_{заг} = h_1\sqrt{\frac{\lambda_{щ}}{\lambda_1}} + h_2\sqrt{\frac{\lambda_{щ}}{\lambda_2}} + h_3\sqrt{\frac{\lambda_{щ}}{\lambda_3}} + h_4\sqrt{\frac{\lambda_{щ}}{\lambda_4}};$$

$$h_{заг} = 26\sqrt{\frac{1,86}{1,74}} + 15\sqrt{\frac{1,86}{2,02}} + 21\sqrt{\frac{1,86}{2,10}} + 21\sqrt{\frac{1,86}{2,17}} = 74,83 \text{ см}.$$

Визначаємо значення по осі $Y$:

$$Y = \frac{l_{здим} \cdot a_0}{B \cdot zp} = \frac{4 \cdot 1,16}{4,5 \cdot 80} = 0,01.$$

За номограмою визначаємо середню величину дорожнього одягу $z_1$:

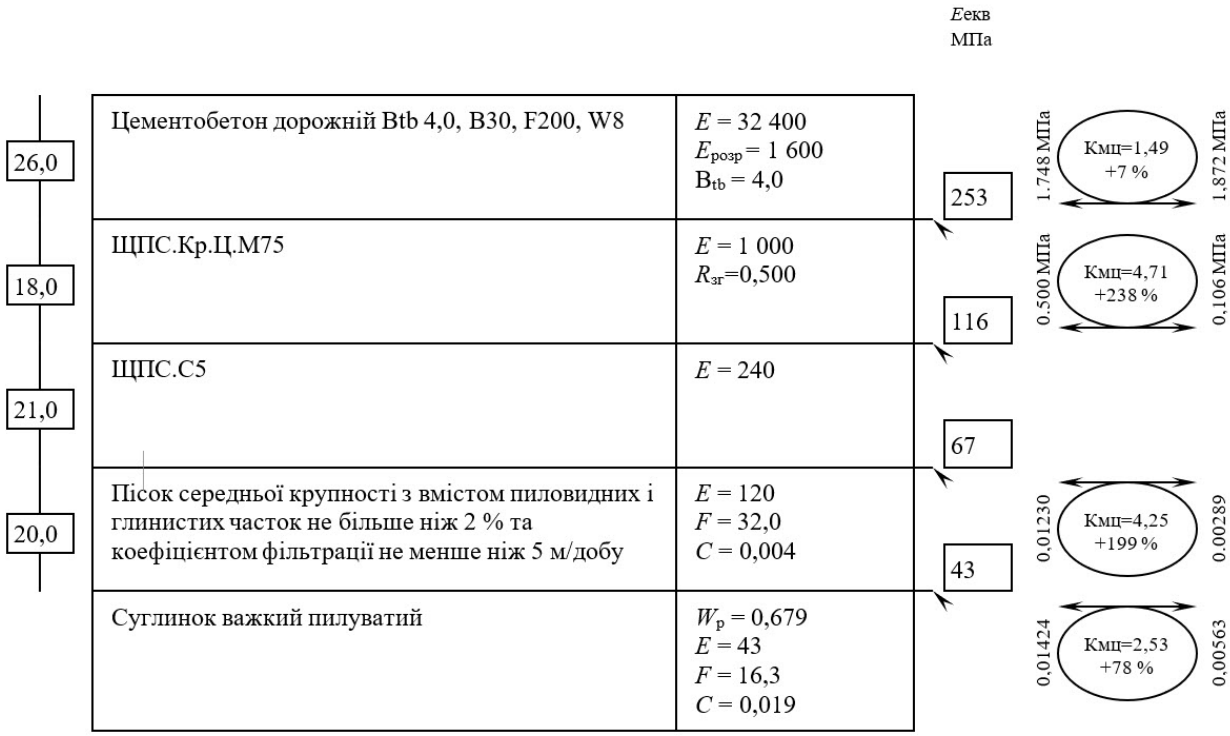
$$X = 0{,}425;$$

$$X = \frac{Z_1}{Z_р} \Rightarrow Z_1 = 0{,}425 \cdot 80 = 34{,}03 \text{ см};$$

$$\frac{h_{заг}}{Z_1} = \frac{74{,}83}{34{,}03} = 2{,}19 > 1.$$

Морозостійкість дорожнього одягу забезпечена.

Характеристики та результати обчислення конструкції дорожнього одягу наведені на **рис. 1** [4].




*E*, *C*, *R* - МПа; *F* - град.

***Рисунок 1 –*** Результати розрахунку конструкції дорожнього одягу

Після обчислення кконструкції жорсткого дорожнього одягу, було проведено лабораторні випробування із визначення орієнтовного складу цементобетонної суміші та вартості її складу.

Витрати сухих матеріалів на 1 м$^3$ $B_{tb}$4.0, B30, F200,W8:

- портландцемент ПЦ І-500-Р-Н – 380 кг (виробництво ПрАТ «Івано-Франківськ цемент»);
- пісок – 610 кг (виробництво ТОВ «Юнігран»);
- щебінь фракції (5-10) – 420 кг (виробництво ТОВ «Юнігран»);
- щебінь фракції (10-20) – 780 кг (виробництво ТОВ «Юнігран»);
- вода – 160 кг;
- суперпласифікульвана добавка Muraplast FK 59 – 2,4 кг (виробництво ТОВ «МЦ БАУХЕМІ»);
- повітровтягувальна добавка Centrament Air 202 – 1,0 кг (виробництво ТОВ «МЦ БАУХЕМІ»).

Орієнтовна вартість складу цементобетонної суміші на 1м$^3$ наведена в **табл. 1**.

***Таблиця 1***

***Орієнтовна вартість складу цементобетонної суміші***

| Ч.ч. | Сировинний компонент | Одиниця вимірювання | Витрата | Орієнтовна вартість одиниці вимірювання, грн | Сума, грн | %, від загальної вартості |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Цемент | т | 0,380 | 5 204,41 | 1 978 | 62,5 |
| 2 | Щебінь за фракціями:<br>- (5-10) мм<br>- (10-20) мм | <br>т<br>т | <br>0,420<br>0,780 | <br>651,69<br>589,21 | <br>274<br>460 | <br>8,7<br>14,5 |
| 3 | Пісок природній | т | 0,610 | 300,04 | 183 | 5,8 |
| 4 | Добавки:<br>- пластифікувальна<br>- повітровтягувальна | <br>т<br>т | <br>0,0024<br>0,0010 | <br>80 000<br>50 000 | <br>192<br>50 | <br>6,1<br>1,6 |
| 5 | Вода | т | 0,160 | 161,60 | 26 | 0,8 |
| | | | | Всього вартість: | 3 163 | 100 |
| **Примітка 1.** Ціни прийняті як усереднені значення по Україні, липень 2023 р. | | | | | | |

За результатами обчислення конструкції жорсткого дорожнього одягу та підбору орієнтовного складу цементобетоннної суміші $B_{tb}$4.0, B30, F200, W8 було проведено випробування на визначення фізико-механічних характеристик цементобетону дорожнього [5]:

1. Визначення міцності цементобетону на стиск

Зразки-куби 100 мм × 100 мм × 100 мм виготовлені з цементобетонної суміші. Випробування проведено згідно з ДСТУ Б В.2.7-170 [6] і ДСТУ Б В.2.7-214 [7]. Фактичні значення визначених показників наведено у **табл. 2**.

***Таблиця 2***

***Міцність на стиск зразків у віці 28 діб***

| Марку-вання | Маса, г | Параметри зразка | | | $S$, см$^2$ | $V$, см$^3$ | $\rho$, г/см$^3$ | $R_{ст}$, МПа | $R_{ст}^{сер}$, МПа | $\sigma$ | ДСТУ Б В.2.7-43-96, МПа |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $d$, см | $b$, см | $h$, см | | | | | | | |
| 1 | 2 345 | 10,02 | 10,02 | 10,02 | 100,4 | 1 006 | 2,331 | 41,51 (B30) | 43,25 (B30) | 1,71 | 38,52 (B30) |
| 2 | 2 367 | 10,02 | 10,02 | 10,04 | 100,4 | 1 008 | 2,348 | 42,22 (B30) | | | |
| 3 | 2 311 | 10,04 | 10,02 | 10,02 | 100,6 | 1 008 | 2,293 | 40,02 (B30) | | | |
| 4 | 2 383 | 10,02 | 10,02 | 10,04 | 100,4 | 1 008 | 2,364 | 42,11 (B30) | | | |
| 5 | 2 343 | 10,04 | 10,02 | 10,02 | 100,6 | 1 008 | 2,324 | 44,86 (B35) | | | |
| 6 | 2 394 | 10,02 | 10,04 | 10,04 | 100,6 | 1010 | 2,370 | 43,82 (B30) | | | |

Зразки цементобетону у віці 28 діб відповідають вимогам за міцністю на стиск B30.

2. Визначення міцності цементобетону на розтяг за згину.

Зразки-балки 100 мм × 100 мм × 400 мм виготовлені з цементобетонної суміші. Випробування проведені згідно з ДСТУ Б В.2.7-214 [7]. Фактичні значення визначених показників наведено в **табл. 3**.

***Таблиця 3***

***Міцність на розтяг за згину зразків у віці 28 діб***

| Маркування | Маса, г | $R_{р.з.}$, МПа | $R^{сер}_{р.з.}$, МПа | $\sigma$ | ДСТУ Б В.2.7-43-96, МПа |
|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 9 611 | 5,31 ($B_{tb}$4,0) | 5,54 ($B_{tb}$4,0) | 0,31 | 5,14 ($B_{tb}$4,0) |
| 8 | 9 682 | 5,48 ($B_{tb}$4,0) | | | |
| 9 | 9 657 | 5,62 ($B_{tb}$4,0) | | | |
| 10 | 9 662 | 5,25 ($B_{tb}$4,0) | | | |
| 11 | 9 723 | 5,75 ($B_{tb}$4,4) | | | |
| 12 | 9 644 | 4,87 ($B_{tb}$3,6) | | | |

Зразки цементобетону у віці 28 діб відповідають за міцністю на розтяг за згину $B_{tb}$4,0.

3. Визначення водопоглинання цементобетону

Зразки-куби 100 мм × 100 мм × 100 мм виготовлені з цементобетонної суміші. Випробування проведені згідно з ДСТУ Б В.2.7-170 [6]. Фактичні значення визначених показників наведено в **табл. 4**.

***Таблиця 4***

***Водопоглинання зразків у віці 28 діб***

| Маркування | Маса сухого зразка, г | Маса водонасиченого зразка, г | Фактичне значення водопоглинання | | Середнє значення водопоглинання | ДСТУ 8858, не більше ніж |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | г | % | % | % |
| 13 | 2 342 | 2 371 | 29 | 1,22 | 1,46 | 4 |
| 14 | 2 351 | 2 385 | 34 | 1,43 | | |
| 15 | 2 320 | 2 361 | 41 | 1,74 | | |

Водопоглинання зразків цементобетону у віці 28 діб складає 1,46 %. Результати випробувань відповідають вимогам ДСТУ 8858.

4. Визначення морозостійкості цементобетону.

Зразки-куби 100 мм × 100 мм × 100 мм виготовлені з цементобетонної суміші. Випробування проведені згідно з ДСТУ Б В.2.7-47 [8], ДСТУ Б В.2.7-49 [9] і ДСТУ Б В.2.7-214 [7]. Фактичні значення визначених показників наведено в **табл. 5**.

*Таблиця 5*

***Морозостійкість зразків***

| Назва складу | Ч. ч. | Міцність на стиск контрольних зразків, МПа | Середня міцність, МПа | Маса насичених зразків перед випробуванням, г | Середня маса, г | Маса зразків після випробування, г | Середня маса, г | Міцність на стиск, МПа | | Зміна міцності після 20 циклів, не більше ніж, % | | Зміна маси після 20 циклів, не більше ніж, % | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | Після 20 циклів | Середня міцність | ДСТУ Б В.2.7-49 | фактична | ДСТУ Б В.2.7-49 | фактична |
| Контрольні зразки | 16 | 42,12 | 42,71 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| | 17 | 43,06 | | – | – | – | | | | | | | |
| | 18 | 41,54 | | – | – | – | | | | | | | |
| | 19 | 44,13 | | – | – | – | | | | | | | |
| | 20 | 39,20 | | – | – | – | | | | | | | |
| | 21 | 37,21 | | – | – | – | | | | | | | |
| Основні зразки | 22 | – | – | 2 384 | 2 368 | 2 355 | 2 347 | 42,02 | 41,14 | -5,0 | -3,82 | -3,0 | -0,89 |
| | 23 | | | 2 391 | | 2 366 | | 41,45 | | | | | |
| | 24 | | | 2 345 | | 2 318 | | 39,13 | | | | | |
| | 25 | | | 2 336 | | 2 321 | | 40,64 | | | | | |
| | 26 | | | 2 401 | | 2 385 | | 40,45 | | | | | |
| | 27 | | | 2 350 | | 2 334 | | 36,33 | | | | | |

Зразки цементобетону за морозостійкістю відповідають марці F200.

5. Визначення водонепроникності цементобетону.

Зразки-циліндри діаметром 150 мм, висотою 150 мм виготовлені з цементобетонної суміші. Випробування проведені згідно з ДСТУ Б В.2.7-170 [6]. Фактичні значення визначених показників наведено в **табл. 6**.

*Таблиця 6*

***Водонепроникність зразків***

| Найменування матеріалу | Маркування | Водонепроникність зразків цементобетону, МПа | Фактична марка цементобетону за водонепроникністю |
|---|---|---|---|
| Зразки-циліндри ⌀ = 150 мм, *h* = 150 мм. | 28 | 0,8 | W8 |
| | 29 | 0,8 | W8 |
| | 30 | 0,8 | W8 |
| | 31 | 0,8 | W8 |
| | 32 | 0,8 | W8 |
| | 32 | 0,8 | W8 |

Зразки цементобетону відповідають вимогам і марці W8 за водонепроникністю [6].

## Висновок

Зростання інтенсивності руху на автомобільних дорогах загального користування та навантаження на вісь транспортних засобів, що спостерігається в Україні протягом останнього десятиліття, вимагає безперервного розвитку дорожньої мережі, удосконалення конструкцій дорожніх одягів. Невідповідність стану автомобільних доріг вимогам транспортного потоку знижує швидкість руху, збільшує зношування автомобілів і витрати на їх ремонт, підвищує витрати палива, спричиняє зниження рівня безпеки руху та зростанню кількості дорожньо-транспортних пригод [5].

Обираючи між жорстким і нежорстким дорожнім одягом для відновлення доріг в Україні, необхідно враховувати багато чинників, таких як фінансові можливості, склад розрахункового транспортного потоку, регіональні особливості тощо.

Економічна складова при будівництві та ремонті автомобільних доріг є одним з ключових критеріїв при обрані типу дорожнього одягу, враховуючи вартість бітуму в Україні на теперішній час і прогнозуючи її на майбутнє, вважаємо, що, використання цементобетону є більш доцільним варіантом при відновленні автомобільних доріг.

## Список літератури

1. ГБН В.2.3-37641918-557:2016 Автомобільні дороги. Дорожній одяг жорсткий. Проектування. Київ, 2016. 48 с. (Інформація та документація).

2. ДСТУ 8858:2019 Суміші цементобетонні дорожні та цементобетон дорожній. Технічні умови. Київ, 2019. 68 с. (Інформація та документація).

3. ГБН В.2.3-37641918-544:2014 Автомобільні дороги. Застосування геосинтетичних матеріалів у дорожніх конструкціях. Основні вимоги. Київ, 2014. 65 с. (Інформація та документація).

4. ДСТУ 9177-2:2022 Матеріали щебеневі та гравійні для дорожнього будівництва. Технічні умови. Частина 2. Матеріали неукріплені. Київ, 2022. 54 с. (Інформація та документація).

5. ДСТУ Б В.2.7-170:2008 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності. Київ, 2008. 38 с. (Інформація та документація).

6. ДСТУ Б В.2.7-214:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. Київ, 2019. 76 с. (Інформація та документація).

7. ДСТУ Б В.2.7-47-96 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення морозостійкості. Загальні вимоги (ГОСТ 10060.0-95). Київ, 1996. 76 с. (Інформація та документація).

8. ДСТУ Б В.2.7-49-96 Будівельні матеріали. Бетони. Прискорені методи визначення морозостійкості при багаторазовому заморожуванні та відтаванні (ГОСТ 10060.2-95). Київ, 1996. 89 с. (Інформація та документація).

9. Гамеляк І. П., Шургая А. Г., Дмитриченко А. М. Дорожній цементобетон для будівництва місцевих доріг. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Київ, 2019. Вип. 106. С. 12–23.

10. Корецький А. С., Корецький С.С. Про необхідність будівництва в Україні автомобільних доріг із цементобетонним покриттям. *Автошляховик України*. Вип. 2. Київ. 2013. С. 24–31.

11. CONCRETE ROADS: A SMART AND SUSTAINABLE CHOICE. Brussels, 2009. URL: https://www.oficemen.com/wpcontent/uploads/2017/05/Sustainable-Concrete-Roads-EUPAVE.pdf (дата звернення: 11.09.2023).

**References**

1. HBN V.2.3-37641918-557:2016 Avtomobilni dorohy. Dorozhnii odiah zhorstkyi. Proektuvannia [Departmental Building Norms (HBN V.2.3-37641918-557:2016) Roads. Rigid pavements. Design]. Kyiv, 2016. 48 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

2. DSTU 8858:2019 Sumishi tsementobetonni dorozhni ta tsementobeton dorozhnii. Tekhnichni umovy [State Standard of Ukraine (DSTU 8858:2019) Concrete. Mix and road concrete. Technical specification]. Kyiv, 2019. 68 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

3. HBN V.2.3-37641918-544:2014 Avtomobilni dorohy. Zastosuvannia heosyntetychnykh materialiv u dorozhnikh konstruktsiiakh. Osnovni vymohy [Departmental Building Norms (HBN V.2.3-37641918-544:2014) Automobile roads. Application of geosynthetic materials in road structures. Basic requirement]. Kyiv, 2014. 65 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].

4. DSTU 9177-2:2022 Materialy shchebenevi ta hraviini dlia dorozhnoho budivnytstva. Tekhnichni umovy. Chastyna 2. Materialy neukripleni [State Standard of Ukraine (DSTU 9177-2:2022) Crushed stone materials and gravel materials for the road building industry. Specifications. Part 2. Unbound materials]. Kyiv, 2022. 54 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

5. DSTU B V.2.7-170:2008 Budivelni materialy. Betony. Metody vyznachennya serednoyi hustyny, volohosti, vodopohlynannya, porystosti i vodonepronyknosti [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-170:2008) Building materials. Concretes. Methods of determination of middle density, moisture content, water absorptions porosity and watertightness]. Kyiv, 2008. 38 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

6. DSTU B V.2.7-214:2009 Budivelni materialy. Betony. Metody vyznachennya mitsnosti za kontrolnymy zrazkamy [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-214:2009) Building materials. Concretes. Methods for strength determination using reference specimens]. Kyiv, 2010. 76 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

7. DSTU B V.2.7-47-96 Budivelni materialy. Betony. Metody vyznachennia morozostiikosti. Zahalni vymohy [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-47-96) Building materials. Concretes. Methods for determination of frost resistance. General requirements) (HOST 10060.0-95)]. Kyiv, 1996. 76 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

8. DSTU B V.2.7-49-96 Budivelni materialy. Betony. Pryskoreni metody vyznachennia morozostiikosti pry bahatorazovomu zamorozhuvanni ta vidtavanni [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-49-96) Building materials. Concretes. Rapid methods for determination of frost resistance by repeated alterneted freezing and thawing (HOST 10060.2-95)]. Kyiv, 1996. 89 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].

9. Hameliak I. P., Shurhaia A. H., Dmytrychenko A. M. Dorozhnii tsementobeton dlia budivnytstva mistsevykh dorih [Road cement concrete for the construction of local roads]. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo*. Kyiv, 2019. Iss. 106. P. 12–23 [in Ukrainian].

10. Koretskyi A. S., Koretskyi S.S. Pro neobkhidnist budivnytstva v Ukraini avtomobilnykh dorih iz tsementobetonnym pokryttiam [About the need to build cement concrete roads in Ukraine]. *Avtoshliakhovyk Ukrainy*. Iss. 2. Kyiv. 2013. P. 24–31 [in Ukrainian].

11. CONCRETE ROADS: A SMART AND SUSTAINABLE CHOICE. Brussels, 2009. URL: https://www.oficemen.com/wpcontent/uploads/2017/05/Sustainable-Concrete-Roads-EUPAVE.pdf (Last accessed: 11.09.2023) [in English].

**Oleksandr Kryvobok**, *https://orcid.org/0000-0002-5424-8664*
**Mykola Bykovets**, *https://orcid.org/0000-0002-7490-7479*
*M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, Kyiv, Ukraine*

# ANALYSIS OF THE FEASIBILITY OF USING RIGID PAVEMENT STRUCTURES DURING THE REHABILITATION OF ROADS IN UKRAINE

***Abstract***

Introduction. Road infrastructure is one of the key components of economic and social development of any country. Its rehabilitation is one of the important tasks of the post-war period, when roads can be damaged or destroyed. The article provides a comparative analysis of the use of rigid pavement during the restoration of roads in Ukraine in the postwar period.

Problem Statement. Ensuring the reliability of road pavement.

Purpose. To investigate the feasibility of using rigid pavement structures.

Results. The feasibility of using rigid pavement is analyzed, the pavement designs are presented. The cost of materials is analyzed.

Conclusions. A study of the advantages and disadvantages of using cement concrete in road construction was carried out, the calculation of rigid pavement was performed, the tentative mix design was selected, and laboratory tests of the physical and mechanical properties of cement concrete were carried out.

The economic component in the construction and repair of highways is one of the key criteria for choosing the type of pavement, so given the current cost of bitumen in Ukraine, the use of cement concrete is a more profitable option for construction in the post-war period.

***Keywords:*** highway, rigid pavement, strength, pavement, cement concrete.

https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.144

**УДК 691.32**

**Кровяков С. О.**, *д-р техн. наук, проф., http://orcid.org/0000-0002-0800-0123*
**Шестакова Л. Є.**, *https://orcid.org/0000-0002-3449-8498*
*Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса, Україна*

# МІЦНІСТЬ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ І МОРОЗОСТІЙКІСТЬ ФІБРОБЕТОНІВ ЖОРСТКИХ ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ ІЗ БАЗАЛЬТОВОЮ ФІБРОЮ ТА ПОВІТРОВТЯГУЮЧОЮ ДОБАВКОЮ

***Анотація***

Вступ. Підвищення довговічності жорстких дорожніх покриттів дозволяє знизити витрати на утримання доріг за рахунок подовження міжремонтних інтервалів. Дисперсне армування є відомим методом підвищення морозостійкості та зносостійкості бетону, що позитивно впливає на довговічність дорожніх покриттів в типових для України кліматичних умовах. Базальтова фібра є стійкою до корозії та відносно недорогою, що робить її перспективною для використання у дорожній галузі. Також при приготуванні бетонів жорстких покриттів необхідно використовувати пластифікуючі та повітровтягуючі добавки.

Проблематика. В сучасних економічних умовах та з врахуванням технологічних особливостей приготування сумішей актуальним є порівняння ефективності застосування відомих методів покращення властивостей бетонів жорстких дорожніх покриттів: дисперсного армування і використання повітровтягуючої добавки. Також важливою з науковою та практичної точок зору є задача вивчення доцільності одночасного використання даних методів модифікування бетонної суміші.

Мета. Визначення впливу базальтової фібри і повітровтягуючої добавки на міцність, морозостійкість і стиранність бетонів жорстких дорожніх покриттів.

Результати. Досліджено вплив базальтової фібри довжиною 12 мм і діаметром 18 мкм та повітровтягуючої добавки MICROPORAN на властивості бетонів жорстких дорожніх покриттів. Досліджувалися бетони без фібри, а також з фіброю у кількості 0,50 кг/м$^3$, 0,75 кг/м$^3$ і 1,0 кг/м$^3$. Всі суміші мали рухомість S1 і модифікувалися суперпластифікатором STACHEMENT 2570/5/G у кількості 0,6 % від маси цементу. При використанні 0,05 % MICROPORAN кількість залученого до суміші повітря зростає до (4,8–5,4) % а середня густина бетонів знижується на до (2 401–2 430) кг/м$^3$. При використанні MICROPORAN у кількості 0,15 % до суміші залучається (10,2–11) % повітря, а середня густина бетону знижується приблизно до (2 320–2 351) кг/м$^3$. Міцність бетонів на стиск знаходилася в діапазоні від 46,3 МПа до 63,2 МПа, міцність на розтяг при згині – в діапазоні від 5,83 МПа до 7,63 МПа. За рахунок дисперсного армування міцність бетонів на стиск зростає на 13–24 %, міцність на розтяг при згині – на (21–29) %. Повітровтягуюча добавка практично не впливає на міцність на розтяг при згині бетону, але викликає зниження міцності на стиск на (2–16) % при використанні 0,05 % MICROPORAN і на (9–21) % при використанні 0,15 % MICROPORAN. Стиранність бетону при використанні повітровтягуючої добавки практично не змінюється, а за рахунок введення базальтової фібри знижується на (14–15) %, що сприяє підвищенню довговічності матеріалу. Бетон без дисперсного армування і MICROPORAN мав морозостійкість F200. За рахунок дисперсного армування морозостійкість бетону досягає F300. При застосуванні 0,05 % повітровтягуючої добавки морозостійкість не змінюється або навіть дещо знижується, а при застосуванні 0,15 % для бетону без фібри зростає з F200 до F300 при фактичному зниженні витрати цементу.

Висновки. Завдяки використанню базальтової фібри а також комплексній модифікації суперпластифікатором полікарбоксилатного типу та повітровтягувальною добавкою

MICROPORAN отримано бетон для жорстких дорожніх покриттів з високою довговічністю та необхідною міцністю.

***Ключові слова:*** базальтова фібра, повітровтягуюча добавка, жорстке дорожнє покриття, міцність, морозостійкість, стиранність.

## Вступ

Дороги з жорсткими цементобетонними покриттями мають низку переваг перед дорогами з асфальтобетонними покриттями. Основними серед таких переваг є стійкість до утворення колії та висока довговічність при близький собівартості будівництва. Це обумовлює поступове збільшення частки цементобетонних доріг у розвинутих країнах, включаючи Україну [1]. При цьому задача підвищення якості та довговічності жорстких дорожніх покриттів залишається актуальною, тому що її вирішення дозволяє подовжити міжремонтні інтервали і відповідно знизити витрати на утримання доріг.

Внаслідок повномасштабної агресії проти нашої країни постраждала велика кількість об'єктів інфраструктури, зокрема доріг. При відновленні даних об'єктів важливо максимально використовувати матеріали на основі вітчизняних компонентів. Широке використання місцевих і нових сучасних дорожньо-будівельних матеріалів при конструюванні жорсткого дорожнього одягу передбачено також згідно ГБН В.2.3-37641918-557:2016 [2].

В кліматичних умовах України найбільш розповсюдженою причиною руйнування бетону дорожніх покриттів є дія заморожування і відтавання, насамперед у період коли бетон знаходиться у вологому стані [3]. Іншими причинами руйнувань є циклічні механічні впливи динамічного характеру, втомні пластичні деформації та деформації повзучості, дія рідких корозійних середовищ, насамперед сольових розчинів.

Для підвищення морозостійкості бетонів широко застосовується метод введення у його склад повітровтягуючої добавки одночасно з суперпластифікатором [4-6]. Аналогічна рекомендація щодо використання пластифікуючої та повітровтягуючої добавки при приготуванні бетонів жорстких покриттів міститься у ДБН В.2.3-4:2015 [7]. Згідно цього стандарту для забезпечення морозостійкості вміст втягнутого повітря бетонної суміші має складати від 5 % до 6 %. У дослідженнях С.М. Толмачева раціональнім називається діапазон вмісту повітря від 5 % до 7 % [8]. Важливим є не лише вміст повітря, а і розподілення пор за розмірами [9]. Наприклад у [10] за рахунок введення повітровтягуючої добавки у бетон аеродромного покриття отримано капілярно-порову структуру з більш рівномірним розподілом пор при зменшенні їх середнього діаметру. Це дозволило покращити морозостійкість одночасно зі стійкістю до дії речовин, що використовуються для запобігання обледенінню літаків.

Слід зауважити, що об'єм втягнутого до суміші повітря фактично може змінюватися в процесі транспортування та ущільнення бетону і відповідно суттєво відрізнятися від визначеного у лабораторних умовах [10, 11]. На цю різницю також впливає тип повітровтягуючої добавки [11]. Така технологічна особливість має враховуватися при проєктуванні складів сумішей з повітровтягуючою добавкою.

Дисперсне армування є ще одним відомим методом покращення тих властивостей бетону, які важливі для жорстких дорожніх покриттів та впливають на довговічність даних покриттів. У якості дисперсної арматури використовується фібра різних типів, але найбільш розповсюдженими є поліпропіленові, сталеві та базальтові волокна [6, 12-14]. При цьому базальтове волокно має ряд переваг, що робить його ефективним саме у дорожньому будівництві. До таких переваг можна віднести порівняно низьку вартість, високу технологічність за рахунок відносно легкого розподілу волокон у суміші та високу корозійну стійкість, що важливо з врахування умов експлуатації жорстких покриттів [15, 16].

Як показано у [6, 15, 17] та багатьох інших роботах, дисперсне армування базальтовою фіброю підвищує морозостійкості бетонів дорожніх покриттів. Також фібра знижує аутогенну усадку бетонів, підвищує їх тріщиностійкість та міцність [12, 16, 18-20]. Наприклад у роботі [12] за рахунок застосування базальтової фібри у кількості 0,25 % від об'єму бетону досягнуто 4,5 % приросту міцності на стиск і 13,8 % зростання динамічного модуля пружності. У [19] дисперсне армування підвищило міцність на згин бетонів дорожніх покриттів майже на 20 % і міцність на стиск на 9,4 %. При цьому суттєве значення мала довжина волокон. У [20] найбільше зростання міцності було відмічено при застосуванні базальтової фібри довжиною 36 мм у кількості 8 кг/м$^3$.

Таким чином серед інших існують два практично опрацьовані технологічні методи підвищення довговічності бетонів жорстких дорожніх покриттів: застосування базальтової фібри і застосування повітровтягуючої добавки. Дисперсне армування фіброю при цьому також позитивно впливає на міцність та тріщиностійкість бетонів. Тобто з наукової і економічної точок зору актуальною є задача порівняння ефективності застосування цих двох технологічних методів в бетонах дорожніх покриттів. Також актуальною є задача дослідження ефективності використання дисперсного армування одночасно з введенням повітровтягуючої добавки. При вирішенні даної задачі необхідно враховувати наявну в Україні сировинну базу, зокрема доступні на ринку типи цементів, добавок і фібри. Також слід враховувати особливості вимог до бетонних суміші для цементобетонних покриттів і вплив технології їх влаштування.

## Матеріали та методика дослідження

Для приготування бетонних сумішей використовували наступні матеріали:

– портландцемент ПЦ І-500Р-Н виробництва філії «Волинь-Цемент» ПРАТ «Дікергофф Цемент Україна» [21];

– кварцовий пісок з модулем крупності 2,2, митий. Походження піску – Вознесенський район Миколаївської області;

– гранітний щебінь фракції 5-20 мм. Походження щебеню – Новобузькій район Миколаївської області;

– добавка суперпластифікатор STACHEMENT 2570/5/G виробництва ТОВ «Стахема Львів-сервіс». Виробляється на основі полікарбоксилатів [22];

– повітровтягуюча добавка MICROPORAN виробництва ТОВ «Стахема Львів-сервіс» [22];

– базальтової фібри BAUCON®-bazalt з довжиною волокон 12 мм і діаметр 18 мкм; Виробник фібри – ТОВ «Баутех-Україна» [23].

Було досліджено властивості 12 складів бетонів, які були поділені на 3 серії (**табл. 1**). У кожній серії виготовлялися 4 склади з різною кількістю дисперсної арматури: без фібри, а також з базальтовою фіброю у кількості 0,50 кг/м$^3$, 0,75 кг/м$^3$ і 1,0 кг/м$^3$. В першій серії (№ 1 – № 4) виготовлялися склади без повітровтягуючої добавки. В другій серії (№ 5 – № 8) виготовлялися бетони і фібробетони з повітровтягуючою добавкою MICROPORAN у кількості 0,05 % від маси цементу. У третій серії (№ 9 – № 12) кількість добавки MICROPORAN складала 0,15 % від маси цементу. Такі дозування повітровтягуючої добавки були обрані за результатами попередніх експериментів та з врахуванням рекомендації виробника. Проміжне дозування добавки у 0,10 % не було доцільним, тому що не дало суттєвої різниці у кількості залученого до суміші повітря порівняно з дозуванням добавки 0,05 %. Крім того при такому дозуванні MICROPORAN кількість залученого повітря та рухомість суміші були більш залежні від часу перемішування, що ускладнювало порівняння.

Під час усіх досліджень у бетонну суміш вводився суперпластифікатор STACHEMENT 2570/5/G у кількості 0,6 % від маси цементу. Рухомість всіх бетонних сумішей була рівною S1 (ОК від 2,0 см до 4,0 см). Таку рухомість було прийнято відповідно до вимог ДБН В.2.3-4 [7], згідно з

якими при використанні бетоноукладача із ковзною опалубкою ОК суміші має бути від 1,0 см до 5,0 см залежно від швидкості руху бетоноукладача. Склади досліджених бетонів і фібробетонів наведені у **табл. 1**.

Кількість цементу та щебеню на кубічний метр бетону коригувалися при використанні добавки MICROPORAN, що пов'язано із залученням повітря до суміші. Тобто склади бетонів були пропорційно перераховані з врахуванням зростання їх пористості та зниження середньої густини. Кількість піску визначалася також з врахуванням об'єму залученого повітря, а також в врахуванням наявності дисперсної арматури у складі.

Для досліджених бетонних сумішей згідно з методикою ДСТУ Б В.2.7-114 [24] з використанням пороміру UTC-0650 визначалася кількість залученого повітря (**рис. 1**).

Для досліджених бетонів і фібробетонів визначалася їх середня густина (згідно з ДСТУ Б В.2.7-170:2008 [25]), міцність на стиск і на розтяг при згині (згідно з ДСТУ Б В.2.7-214:2009 [26]), стиранність (згідно з ДСТУ Б В.2.7-212:2009) і морозостійкість (за прискореною методикою згідно з ДСТУ Б В.2.7-49-96 [27]).

***Рисунок 1*** – Визначення кількість залученого повітря з використанням пороміру UTC-0650

***Таблиця 1***

***Склади досліджених бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів***

| Серія складів | № складу | Цемент, кг/м³ | Щебінь, кг/м³ | Пісок, кг/м³ | STACHEMENT 2570/5/G, кг/м³ | BAUCON®-bazalt, кг/м³ | MICRO-PORAN, кг/м³ | Вода, л/м³ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| без повітро-втягуючої добавки | 1 | 350 | 1 205 | 775 | 2,10 | 0 | 0 | 135 |
| | 2 | | | 774 | | 0,50 | | 136 |
| | 3 | | | 774 | | 0,75 | | 136 |
| | 4 | | | 774 | | 1,00 | | 136 |

***Кінець таблиці 1***

| Серія складів | № складу | Цемент, кг/м³ | Щебінь, кг/м³ | Пісок, кг/м³ | STACHEMENT 2570/5/G, кг/м³ | BAUCON®-bazalt, кг/м³ | MICRO-PORAN, кг/м³ | Вода, л/м³ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,05% повітровтягуючої добавки | 5 | 343 | 1 185 | 764 | 2,05 | 0 | 0,171 | 127 |
| | 6 | | | 763 | | 0,50 | | 128 |
| | 7 | | | 763 | | 0,75 | | 128 |
| | 8 | | | 763 | | 1,00 | | 128 |
| 0,15% повітровтягуючої добавки | 9 | 336 | 1 160 | 740 | 2,02 | 0 | 0,505 | 125 |
| | 10 | | | 739 | | 0,50 | | 126 |
| | 11 | | | 739 | | 0,75 | | 126 |
| | 12 | | | 739 | | 1,00 | | 126 |

## Результати досліджень

Виходячи з мети роботи, повітровтягуюча добавка застосовувалася для залучення до суміші додаткового повітря, що має утворити систему замкнутих пор та відповідно підвищити довговічність матеріалу в умовах заморожування і відтавання [3, 5, 6]. На **рис. 2** наведено діаграму, яка відображає експериментально визначений об'єм залученого до бетонних сумішей повітря для досліджених бетонів і фібробетонів.

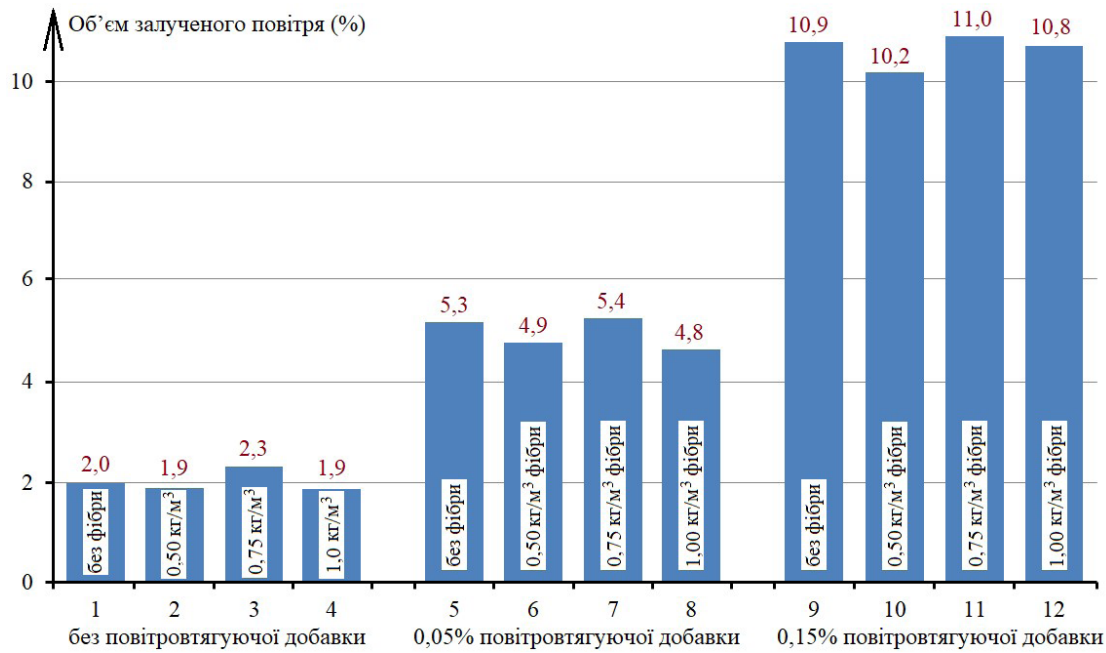



***Рисунок 2*** – Об'єм залученого до бетонних сумішей повітря

Аналіз діаграми показує, що дисперсне армування базальтовою фіброю майже не впливає на кількість залученого до суміші повітря, але цей показник очікувано змінюється при

використанні повітровтягуючої добавки. В партії бетонів без повітровтягуючої добавки (склади № 1 – № 4) залучення повітря було в межах (1,9 – 2,3) %. При використанні 0,05 % добавки MICROPORAN (склади №5 – №8) – від 4,8 % до 5,4 %. При використанні 0,15 % добавки (склади № 9 – № 12) – від 10,2 % до 11,0 %.

Вміст повітря у бетонній суміші впливав на всі властивості бетону, при цьому найбільш виражено на середню густину матеріалу [6]. Відповідно середня густина досліджених бетонів і фібробетонів залежала переважно від кількості повітровтягуючої добавки, що відображено на наведеній на **рис. 2** діаграмі. Аналіз діаграми показує, що при використанні добавки MICROPORAN у кількості 0,05% від маси цементу середня густина бетонів знижується приблизно на 1,5 % порівняно з бетонами без повітровтягуючої добавки. При використанні MICROPORAN у кількості 0,15 % середня густина бетонів знижується до (2 320 – 2 351) кг/м$^3$, що приблизно на 4,8 % менше ніж середня густина бетонів без повітровтягуючої добавки.

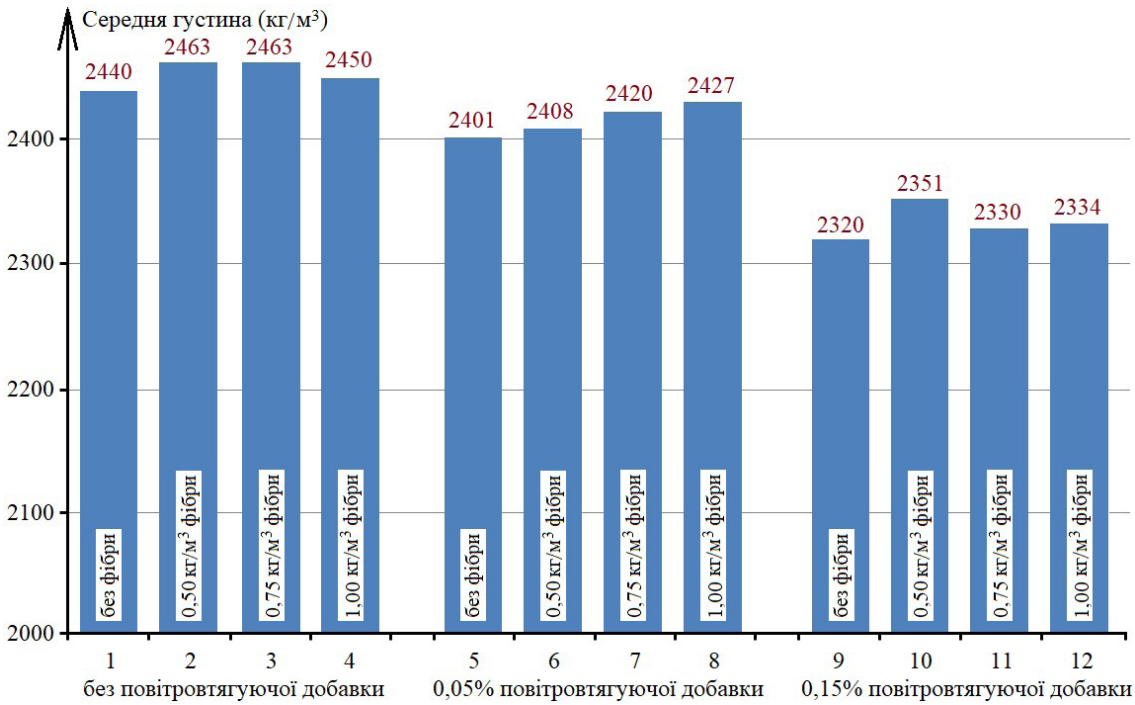
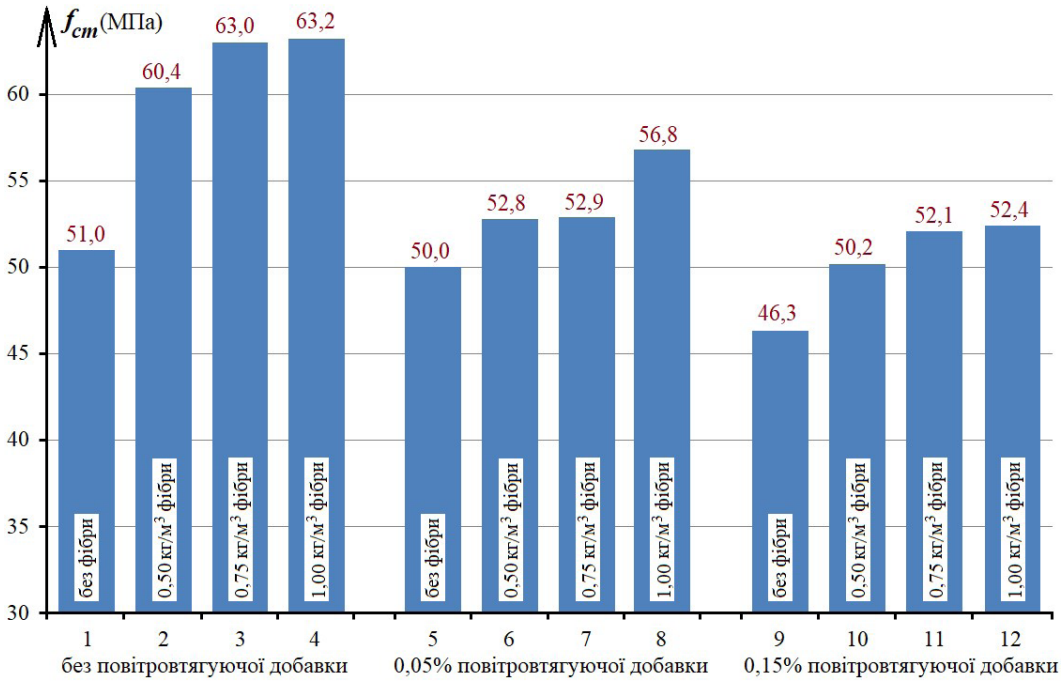



***Рисунок 3*** – Середня густина досліджених бетонів і фібробетонів

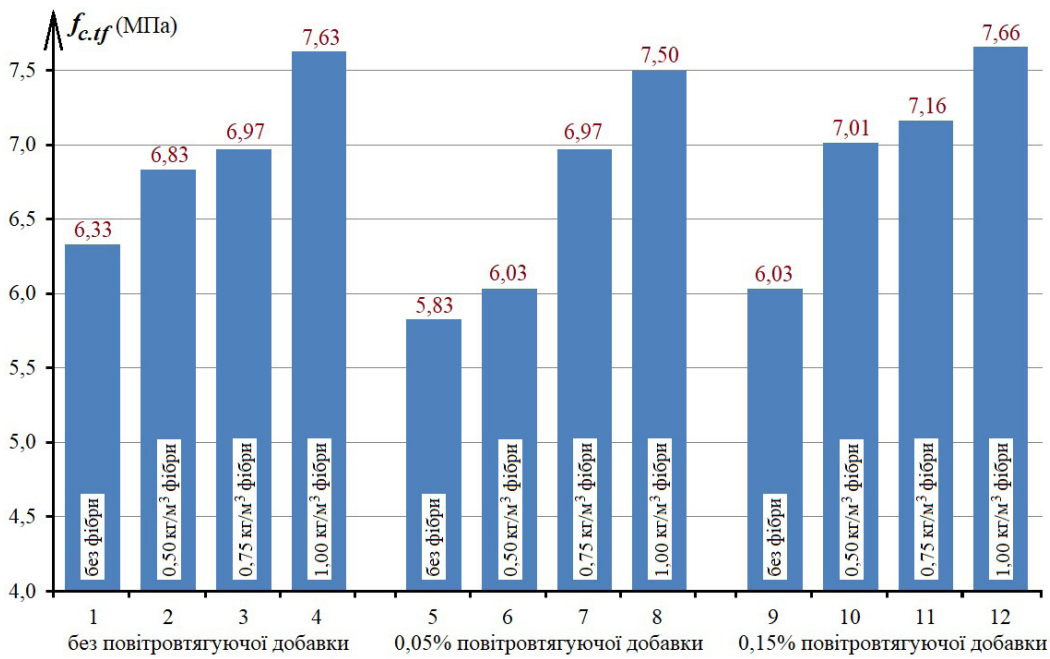
Відомо, що значення об'єму залученого повітря в суміші після приготування і після ущільнення може суттєво відрізнятися [10, 11, 28]. З врахуванням цього можна зробити припущення, що зміна середньої густини бетону відображає зміну фактичної кількості залученого до бетонної суміші повітря. Тобто того повітря, що залишилося в матеріалі після ущільнення суміші. В такому разі при використанні добавки MICROPORAN у кількості 0,15 % фактично до складу бетону залучено додатково об'єм повітря, який є близьким до значення зниження середньої густини матеріалу у відсотках, тобто приблизно 5 %.

Бетони жорстких покриттів автомобільних доріг мають забезпечувати необхідний для заданої категорії рівень міцності [7]. В експерименті контролювалися міцність бетону при стику (**рис. 4**, *а*) та міцність на розтяг при згині (**рис. 4,** *б*).

*а*




*б*




*а)* на стиск;
*б)* на розтяг при згині.

***Рисунок 4*** – Міцність досліджених бетонів і фібробетонів

Аналіз наведених діаграм показує, що на міцність бетону суттєво впливає як введення базальтової фібри так застосування повітровтягуючої добавки. За рахунок дисперсного армування


*Збірник наукових праць* «ДОРОГИ І МОСТИ» www.dorogimosti.org.ua
ISSN 2524-0994 (Print), ISSN 2786-488X (Online). Dorogi i mosti, 2023. Issue 28

у кількості (0,75 – 1,00) кг/м$^3$ міцність на стиск бетонів без добавки MICROPORAN зростає на величину до 12,2 МПа, що дорівнює 24 % (**рис. 4**, *а*). Введення аналогічної кількості фібри у бетони з вмістом добавки MICROPORAN 0,05 % підвищує міцність на стиск на величину до 6,8 МПа (на 14 %). Для бетонів з 0,15 % добавки MICROPORAN дисперсне армування підвищує міцність на стиск на величину до 6,1 МПа (на 13 %).

Проте як відомо, для дорожніх покриттів міцність на розтяг при згині є більш важливим показником, ніж міцність на стиск. На цей показник одночасно з модулем пружності бетону спирається розрахунок конструкції доріг з жорстким покриттям [2, 29].

Як видно з діаграми на **рис. 4**, *б*, дисперсне армування оказує на міцність на розтяг при згині більш відчутний позитивний вплив, ніж на міцність на стиск. При введенні базальтового волокна у кількості 1 кг/м$^3$ для бетонів без добавки MICROPORAN величина $f_{c.tf}$ зростає на 1,3 МПа, тобто на 21 %. Для бетонів з 0,05 % MICROPORAN введення аналогічної кількості фібри підвищує міцність на розтяг при згині на 1,7 МПа (29 %), для бетонів з 0,15 % MICROPORAN – на 1,6 МПа, що дорівнює 27 %.

Введення повітровтягуючої добавки викликає зниження міцності бетону на стиск (**рис. 4**, *а*). При використанні MICROPORAN у кількості 0,05 % від маси цементу міцність знижується на (2 – 16) %. При використанні 0,15 % MICROPORAN зниження міцності на стиск складає від 9 % до 21 %. Даний ефект є очікуваним і широко відомим та пояснюється насамперед зниженням середньої густини бетону [4, 6, 11, 30]. Залучене повітря утворює додаткові пори, які впливають на побудову матриці композиційного матеріалу. Також залежно від методу розрахунку складу це може викликати фактичне зменшення витрати цементу на 1 м$^3$ бетону, яке відбувається виходячи з витрати компонентів на однаковий об'єм бетону.

Проте введення добавки MICROPORAN майже не впливає на міцність на розтяг бетону незважаючи на зміну його середньої густину та деяке фактичне зменшення кількості в'яжучого в складі. Як видно з діаграми на **рис. 4**, *б*, при однаковій кількості фібри міцність на розтяг при згині бетонів без повітровтягуючої добавки та з 0,05 % або 0,15 % добавки MICROPORAN є приблизно рівною. Тобто використання повітровтягуючої добавки дозволяє отримати бетон з необхідним рівнем міцність на розтяг при забезпеченій довговічності та фактично меншій витраті в'яжучого. При цьому як показано вище дисперсне армування дозволяє додатково підвищити міцність бетону дорожнього покриття на розтяг при згині та на стиск.

Відомо, що для дорожніх покриттів важливим показником якості є зносостійкість. Вона визначається за рівнем стиранності матеріалу і в значній мірі обумовлює довговічність бетону в умовах динамічних впливів [8, 13]. На **рис. 5** наведено діаграму, що відображає вплив кількості фібри і повітровтягуючої добавки на стиранність досліджених бетонів і фібробетонів.

Аналіз діаграми дозволяє відзначити, що при застосуванні добавки MICROPORAN стиранність бетону підвищується на (2 – 7) %, тобто зносостійкість матеріалу несуттєво зніжується. Цей ефект пояснюється зменшенням середньої густини та відповідно міцності бетону, що впливає на стійкість до руйнування окремих блоків структури при стиранні поверхні зразків.

При цьому дисперсне армування позитивно впливає на зносостійкість бетону. За рахунок введення базальтової фібри стиранність бетону знижується на (14 – 15) %, що відповідно сприяє підвищенню довговічності жорсткого дорожнього покриття. Даний ефект пояснюється здатністю дисперсної арматуру утримувати окремі блоки композиційного матеріалу при динамічних впливах, що широко описано в багатьох дослідженнях [3, 12, 31].

Як показано вище, морозостійкість бетону є одним з основних фізико-механічних показників, обумовлюючих довговічність жорстких дорожніх покриттів в типових для України кліматичних умовах. Визначені показники морозостійкості досліджених бетонів і фібробетонів наведені у **табл. 2**.

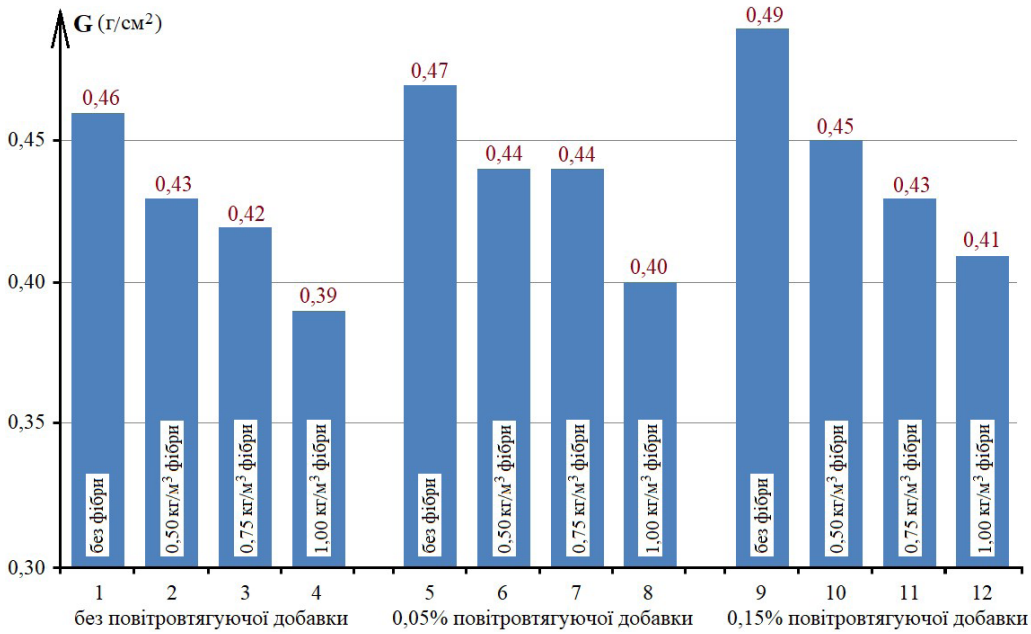



***Рисунок 5*** – Стиранність досліджених бетонів і фібробетонів

***Таблиця 2***

***Морозостійкість досліджених бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів***

| Серія складів | без повітровтягуючої добавки | | | | 0,05 % повітровтягуючої добавки | | | | 0,15 % повітровтягуючої добавки | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| № складу | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| морозостійкість | F200 | F300 | F300 | F300 | F200 | F200 | F200 | F300 | F300 | F300 | F300 | F300 |

Аналіз наведених у **табл. 2** даних показує, що морозостійкість всіх складів була забезпечена на високому рівні – від F200 до F300. Досягти цього рівня морозостійкості дозволило використання портландцементу ПЦ І-500Р-Н, ефективного суперпластифікатора STACHEMENT 2570/5/G та якісних митих заповнювачів. За рахунок використання таких компонентів В/Ц сумішей було в діапазоні від 0,37 до 0,39.

Необхідно зауважити, що точність визначення фактичного рівня морозостійкості бетонів і фібробетонів дорожніх покриттів була суттєво обмеженою. Це пов'язано з тим, що найбільш точні методи визначення морозостійкості бетонів вимагають надто багато часу для проведення експериментального дослідження та є трудомісткими. Відповідно в даній роботі як і в більшості практичних випадків використовувався прискорений (третій) метод визначення рівня F згідно з ДСТУ Б В.2.7-49, а саме метод при заморожуванні та відтаванні у соленій воді при температури заморожування мінус 50 °С [27]. Проте даний прискорений метод визначення морозостійкості розрізняє для бетонів дорожніх і аеродромних покриттів тільки марки F100, F150, F200, F300 і так далі. Ця дискретність не заважає оцінити загальний вплив від застосування дисперсної арматури і повітровтягуючої добавки на морозостійкість бетону, але не дозволяє визначити марку за морозостійкістю в діапазоні між F200 і F300.

Відповідно за даними **табл. 2** можна зробити висновок, що застосування базальтової фібри позитивно впливає на морозостійкість бетону. Склад №1 без дисперсного армування мав морозостійкість F200, а при застосуванні фібри незалежно від її кількості (склади № 2-4) рівень морозостійкості фібробетонів складав F300.

При використанні фібри одночасно з повітровтягуючої добавкою ефективність дисперсного армування в підвищенні рівня F є меншою. Позитивний вплив фібри при її одночасному використанні з MICROPORAN виявлено тільки для складу № 8. У даному складі фібробетону за рахунок використання 1 кг/м$^3$ дисперсної арматури морозостійкість зростає в порівнянні з бетонами складу № 5 і фібробетонами складів № 6 і № 7. Це можна пояснити тим, що капілярно-порова структура має більший вплив на стійкість бетону до заморожування та відтавання, ніж дисперсне армування [9].

Відповідно до цього вплив повітровтягуючої добавки на морозостійкість бетону суттєво змінюється залежно від її кількості у складі. При використанні добавки MICROPORAN у кількості 0,05 % від маси цементу морозостійкість бетонів і фібробетонів знижується до F200 при кількості фібри до 0,75 кг/м$^3$ (склади № 5-7). Але при підвищенні кількості добавки MICROPORAN до 0,15 % морозостійкість бетону зростає до рівня F300, при цьому важлива відзначити, бетон без фібри, тобто склад № 9, також має морозостійкість F300. Це свідчить про те, що бетони з раціональною кількістю добавки MICROPORAN забезпечують високу морозостійкість за фактично меншій кількості цементу на 1 м$^3$ бетону. Ефект позитивного впливу саме такої кількості повітровтягуючої добавки (0,15 % від маси цементу) можна пояснити тим, що фактичний об’єм залученого до бетону повітря безпосередньо після приготування суміші та після її ущільнення суттєво відрізняється, при цьому цю різницю важко прорахувати [8, 10, 11, 28]. Відповідно як обґрунтовано вище, для складів № 9-12 фактичний об’єм залученого повітря у даному випадку становив (5 – 7) %, що є близьким до раціонального [3, 4, 7, 11] та позитивно вливає на морозостійкість досліджених бетонів і фібробетонів.

## Висновки

У результаті виконаних досліджень встановлено, що дисперсне армування базальтовою фіброю оказує комплексний позитивний вплив на міцність і довговічність бетону дорожнього покриття. При використанні волокна BAUCON®-bazalt у кількості до 1 кг/м$^3$ міцність бетону на стиск підвищується на (13 – 24) %, міцність на розтяг при згині зростає на (21 – 29) %, морозостійкість підвищується на рівень до 100 циклів. Одночасно з цім стиранність бетону знижується на (14 – 15) %, тобто зростає його зносостійкість.

За рахунок введення повітровтягуючої добавки MICROPORAN середня густина досліджених бетонів і фібробетонів зменшується на (1,9 – 5,4) %. За рахунок цього міцність на стиск бетонів знижується на (2 – 21) %, також несуттєво знижується їх зносостійкість (підвищується стиранність). При використанні повітровтягуючої добавки у кількості 0,05 % від маси цементу морозостійкість бетону не змінюється або навіть дещо знижується. При використанні добавки MICROPORAN у кількості 0,15 % для бетону без дисперсного армування марка за морозостійкістю підвищується від F200 до F300.

В цілому можна констатувати, що за рахунок використання дисперсного армування базальтовим волокном з довжиною волокон 12 мм і діаметром 18 мкм, а також комплексного модифікування бетону ефективним суперпластифікатором полікарбоксилатного типу STACHEMENT 2570/5/G та повітровтягуючою добавкою MICROPORAN отримано фібробетон жорсткого дорожнього покриття з підвищеною довговічністю при збереженні необхідного рівня міцності. Застосування такого модифікованого фібробетону можна визнати економічно вигідним, тому що при незначному збільшенні собівартості матеріалу підвищується його довговічність і відповідно знижуються витрати на утримання та проведення ремонтів жорстких дорожніх покриттів. Окрема слід наголосити, що в даному дослідженні при розробці складів бетонів і фібробетонів використовувалися лише вітчизняні компоненти (в’яжуче, заповнювачі, модифікатори і фібра). Це важливо з економічної точки зору, особливо з врахуванням значних обсягів дорожніх робіт у процесі післявоєнного відновлення нашої країни.

**Список літератури**


1. Hoxha E., Vignisdottir H.R., Barbieri D.M., Wang F., Bohne R.A., Kristensen T., Passer A. Life cycle assessment of roads: Exploring research trends and harmonization challenges. *Science of the total environment.* 2021, 759, 143506. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143506.
2. ГБН В.2.3-37641918-557:2016. Автомобільні дороги. Дорожній одяг жорсткий. Проектування. Київ, 2017. 75 с. (Інформація та документація).
3. Толмачев С.Н., Солодкий С.Й. Факторы обеспечения долговечности дорожного цементного бетона. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2013. 52. С. 275–280.
4. Толмачев С.Н., Беличенко Е.А., Бражник А.В. Способы защиты дорожных бетонов при действии агрессивных факторов. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2016. 62. С. 176–181.
5. Ziari H., Hayati P., Sobhani J. Air-entrained air field self-consolidating concrete pavements: strength and durability. *International Journal of Civil Engineering*. 2017. 15. P. 21–33 DOI: https://doi.org/10.1007/s40999-016-0104-4.
6. Толмачов С.М. Особливості повітроутягнення у дорожні бетони та фібробетони. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2017. Вип. 99. С. 67–76. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/99/067-076.pdf (дата звернення: 13.09.2023).
7. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. Київ, 2016. 104 с. (Інформація та документація).
8. Толмачев С.Н., Беличенко Е.А. Влияние вовлеченного воздуха на свойства дорожных бетонов и фибробетонов. *Строительные материалы*. 2017. № 1-2. С. 68–72.
9. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л. Проектування складів бетонів. Рівне: НУВГП, 2015. 353 с. URL: https://ep3.nuwm.edu.ua/3150/1/Документ5.pdf (дата звернення: 13.09.2023).
10. Lai Y., Liu Y., Wang P., Ma D.X., Guo B., Sun K., Hou S. Effect of aircraft deicer on deicer-scaling resistance and frost resistance of airport pavement concrete. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. 1605, 012178. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1605/1/012178.
11. Pham L.T., Cramer S.M. Effects of air-entraining admixtures on stability of air bubbles in concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2021. Vol. 33, Issue 4. 04021018. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003628.
12. Wu H., Qin X., Huang X., Kaewunruen S. Engineering, mechanical and dynamic properties of basalt fiber reinforced concrete. *Materials*. 2023. 16, 623. DOI: https://doi.org/10.3390/ma16020623.
13. Kos Z., Kroviakov S., Kryzhanovskyi V., Hedulian D. Strength, frost resistance, and resistance to acid attacks on fiber-reinforced concrete for industrial floors and road pavements with steel and polypropylene fibers. *Materials*. 2022. 15 (23), 8339. DOI: https://doi.org/10.3390/ma15238339.
14. Vaitkus A., Gražulytė J., Šernas O., Karbočius M., Mickevič R. Concrete modular pavement structures with optimized thickness based on characteristics of high performance concrete mixtures with fibers and silica fume. *Materials*. 2021. 14 (12), 3423. DOI: https://doi.org/10.3390/ma14123423.
15. Jin Sj., Yang Yh., Sun Ym, Li X., Xu Jy. Experimental research on anti-freezing and thawing performance of basalt fiber reinforced fly ash concrete in the corrosive conditions. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2023. 27. P. 3455–3470. DOI: https://doi.org/10.1007/s12205-023-1969-9.
16. Марущак У.Д., Саницький М.А., Королько С.В. Наномодифіковані швидкотверднучі бетони, армовані дисперсними волокнами. *Вісник НУ «Львівська політехніка». Серія: Теорія і практика будівництва.* 2017. 877. С. 137–143.
17. Kaya Y., Biricik Ö., Bayqra S.H., Mardani A. Effect of fibre type and utilisation rate on dimensional stability and frost resistance of pavement mortar mixture. *International Journal of Pavement Engineering*. 2023. 24 (1), 2154351. DOI: https://doi.org/10.1080/10298436.2022.2154351.

18. Lyu Z., Shen A., Meng W. Properties, mechanism, and optimization of superabsorbent polymers and basalt fibers modified cementitious composite. *Construction and Building Materials*, 2021. 276, 122212. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122212.

19. Sarkar A., Hajihosseini M. The effect of basalt fibre on the mechanical performance of concrete pavement. *Road Materials and Pavement Design*. 2018. 21 (6). P. 1726–1737. DOI: https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1561379.

20. Iyer P., Kenno S.Y., Das S. Mechanical properties of fiber-reinforced concrete made with basalt filament fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015. 27 (11), 04015015. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001272.

21. ПРАТ «Дікергофф Цемент Україна». Портландцемент ПЦ І-500Р-Н. URL: https://www.dyckerhoff.com.ua/pc-i-500 (дата звернення 11.08.2023).

22. ТОВ «Стахема ЛЬВІВ-СЕРВІС». URL: https://stachema.ua (дата звернення 11.08.2023).

23. ТОВ «Баутех-Україна». BAUCON® Basalt. URL: https://bautech.com.ua/product/baucon-basalt (дата звернення 11.08.2023).

24. ДСТУ Б В.2.7-114-2002 Будівельні матеріали. Суміші бетонні. Методи випробувань. Київ, 2002. 32 с. (Інформація та документація).

25. ДСТУ Б В.2.7-170:2008 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності. Київ, 2008. 38 с. (Інформація та документація).

26. ДСТУ Б В.2.7-214:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. Київ, 2010. 43 с. (Інформація та документація).

27. ДСТУ Б В.2.7-49-96 Будівельні матеріали. Бетони. Прискорені методи визначення морозостійкості при багаторазовому заморожуванні та відтаванні. Київ, 1996. 9 с. (Інформація та документація).

28. Du L., Folliard K.J. Mechanisms of air entrainment in concrete. *Cement and Concrete Research*, 2005. 35 (8). P. 1463–1471. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.026.

29. Hussain I., Ali B., Akhtar T., Jameel M.S., Raza S.S. Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass, and polypropylene). *Case Studies in Construction Materials,* 2020. 13, e00429. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00429.

30. Tolegenova A., Skripkiunas G., Rishko L., Akmalaiuly K. Both plasticizing and air-entraining effect on cement-based material porosity and durability. *Materials*, 2022. 15, 4382. DOI: https://doi.org/10.3390/ma15134382.

31. Kos Ž., Kroviakov S., Kryzhanovskyi V., Grynyova I. Research of strength, frost resistance, abrasion resistance and shrinkage of steel fiber concrete for rigid highways and airfields pavement repair. *Applied Sciences*. 12(3), 1174. DOI: https://doi.org/10.3390/app12031174.

**References**

1. Hoxha E., Vignisdottir H.R., Barbieri D.M., Wang F., Bohne R.A., Kristensen T., Passer A. Life cycle assessment of roads: Exploring research trends and harmonization challenges. *Science of the total environment.* 2021, 759, 143506. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143506 [in English].

2. HBN V.2.3-37641918-557:2016. Avtomobilni dorohy. Dorozhniy odyah zhorstkyy. Proektuvannya [Automobile roads. Hard pavement. Designing]. Kyiv, 2016. 75 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

3. Tolmachev S.N., Solodkyy S.Y. Faktory obespechenyya dolhovechnosty dorozhnoho tsementnoho betona [Factors to ensure the durability of road cement concrete]. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2013. 52. P. 275–280 [in Russian].

4. Tolmachev S.N., Belichenko E.A., Brazhnik A.V. Sposoby zashchyty dorozhnykh betonov pry deystvyy ahressyvnykh faktorov [Ways to protect road concrete under the action of aggressive factors]. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2016. 62. P. 176–181 [in Russian].

5. Ziari H., Hayati P., Sobhani J. Air-entrained air field self-consolidating concrete pavements: strength and durability. *International Journal of Civil Engineering*. 2017. 15. P. 21–33 DOI: https://doi.org/10.1007/s40999-016-0104-4 [in English].

6. Tolmachov S.M. Osoblyvosti povitroutyahnennya u dorozhni betony ta fibrobetony. [Features of air entrainment in road concrete and fiber concrete]. *Avtomobil'ni dorohy i dorozhnye budivnytstvo*. 2017. 99. P. 67–76 http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/99/067-076.pdf [in Ukrainian].

7. DBN V.2.3-4:2015 Avtomobilni dorohy. Chastyna I. Proektuvannia. Chastyna II. Budivnytstvo [State Building Norms (DBN V.2.3-4:2015) Highways. Part I. Design. Part II. Building]. Kyiv, 2016. 104 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

8. Tolmachev S.N., Belichenko Ye.A. Vliyaniye vovlechennogo vozdukha na svoystva dorozhnykh betonov i fibrobetonov (The effect of entrained air on the properties of road concrete and fiber-reinforced concrete). *Stroitel'nyye materialy*. 2017. № 1-2. P. 68–72 [in Russian].

9. Dvorkin L.Y., Dvorkin O.L. Proektuvannya skladiv betoniv [Design of concrete compositions]. Rivne: NUVHP, 2015. 353 p. URL: https://ep3.nuwm.edu.ua/3150/1/Документ5.pdf (Last accessed: 13.09.2023) [in Ukrainian].

10. Lai Y., Liu Y., Wang P., Ma D.X., Guo B., Sun K., Hou S. Effect of aircraft deicer on deicer-scaling resistance and frost resistance of airport pavement concrete. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. 1605, 012178. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1605/1/012178 [in English].

11. Pham L.T., Cramer S.M. Effects of air-entraining admixtures on stability of air bubbles in concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2021. Vol. 33, Issue 4. 04021018. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003628 [in English].

12. Wu H., Qin X., Huang X., Kaewunruen S. Engineering, mechanical and dynamic properties of basalt fiber reinforced concrete. *Materials*. 2023. 16, 623. DOI: https://doi.org/10.3390/ma16020623 [in English].

13. Kos Z., Kroviakov S., Kryzhanovskyi V., Hedulian D. Strength, frost resistance, and resistance to acid attacks on fiber-reinforced concrete for industrial floors and road pavements with steel and polypropylene fibers. *Materials*. 2022. 15 (23), 8339. DOI: https://doi.org/10.3390/ma15238339 [in English].

14. Vaitkus A., Gražulytė J., Šernas O., Karbočius M., Mickevič R. Concrete modular pavement structures with optimized thickness based on characteristics of high performance concrete mixtures with fibers and silica fume. *Materials*. 2021. 14 (12), 3423. DOI: https://doi.org/10.3390/ma14123423 [in English].

15. Jin Sj., Yang Yh., Sun Ym, Li X., Xu Jy. Experimental research on anti-freezing and thawing performance of basalt fiber reinforced fly ash concrete in the corrosive conditions. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2023. 27. P. 3455–3470. DOI: https://doi.org/10.1007/s12205-023-1969-9 [in English].

16. Marushchak U.D., Sanytskyy M.A., Korolko S.V. Nanomodyfikovani shvydkotverdnuchi betony, armovani dyspersnymy voloknamy [Nanomodified quick-hardening concrete reinforced with dispersed fibers]. *Visnyk NU "Lvivs'ka politekhnika". Seriya: Teoriya i praktyka budivnytstva*. 2017. 877. P. 137–143 [in Ukrainian].

17. Kaya Y., Biricik Ö., Bayqra S.H., Mardani A. Effect of fibre type and utilisation rate on dimensional stability and frost resistance of pavement mortar mixture. *International Journal of Pavement Engineering*. 2023. 24 (1), 2154351. DOI: https://doi.org/10.1080/10298436.2022.2154351 [in English].

18. Lyu Z., Shen A., Meng W. Properties, mechanism, and optimization of superabsorbent polymers and basalt fibers modified cementitious composite. *Construction and Building Materials*, 2021. 276, 122212. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122212 [in English].

19. Sarkar A., Hajihosseini M. The effect of basalt fibre on the mechanical performance of concrete pavement. *Road Materials and Pavement Design*. 2018. 21 (6). P. 1726–1737. DOI: https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1561379 [in English].

20. Iyer P., Kenno S.Y., Das S. Mechanical properties of fiber-reinforced concrete made with basalt filament fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015. 27 (11), 04015015. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001272 [in English].

21. PJSC Dickerhoff Cement Ukraine. Portland cement PC I-500R-N. URL: https://www.dyckerhoff.com.ua/pc-i-500 (Last accessed: 11.08.2023) [in Ukrainian].

22. Stachema LVIV-SERVICE LLC. URL: https://stachema.ua (Last accessed: 11.08.2023) [in English].

23. Bautech-Ukraine LLC. BAUCON® Basalt. URL: https://bautech.com.ua/product/baucon-basalt (Last accessed: 11.08.2023) [in English].

24. DSTU B V.2.7-114-2002 Budivelni materialy. Sumishi betonni. Metody vyprobuvan [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-114-2002) Building materials. Concrete mixes. Test methods]. Kyiv, 2002. 32 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

25. DSTU B V.2.7-170:2008 Budivelni materialy. Betony. Metody vyznachennya serednoyi hustyny, volohosti, vodopohlynannya, porystosti i vodonepronyknosti [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-170:2008) Building materials. Concretes. Methods of determination of middle density, moisture content, water absorptions porosity and watertightness]. Kyiv, 2008. 38 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

26. DSTU B V.2.7-214:2009 Budivelni materialy. Betony. Metody vyznachennya mitsnosti za kontrolnymy zrazkamy [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-214:2009) Building materials. Concretes. Methods for strength determination using reference specimens]. Kyiv, 2010. 43 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

27. DSTU B V.2.7-49-96. Budivelni materialy. Betony. Pryskoreni metody vyznachennya morozostiykosti pry bahatorazovomu zamorozhuvanni ta vidtavanni [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-49-96) Building materials. Concretes. Rapid methods for determination of frost resistance by repeated alterneted freezing and thawing]. Kyiv, 1996. 9 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

28. Du L., Folliard K.J. Mechanisms of air entrainment in concrete. *Cement and Concrete Research*, 2005. 35 (8). P. 1463–1471. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.026 [in English].

29. Hussain I., Ali B., Akhtar T., Jameel M.S., Raza S.S. Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass, and polypropylene). *Case Studies in Construction Materials,* 2020. 13, e00429. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00429 [in English].

30. Tolegenova A., Skripkiunas G., Rishko L., Akmalaiuly K. Both plasticizing and air-entraining effect on cement-based material porosity and durability. *Materials*, 2022. 15, 4382. DOI: https://doi.org/10.3390/ma15134382 [in English].

31. Kos Ž., Kroviakov S., Kryzhanovskyi V., Grynyova I. Research of strength, frost resistance, abrasion resistance and shrinkage of steel fiber concrete for rigid highways and airfields pavement repair. *Applied Sciences*. 12(3), 1174. DOI: https://doi.org/10.3390/app12031174 [in English].

**Sergii Kroviakov**, *D.Sc., Prof., http://orcid.org/0000-0002-0800-0123*
**Lyubov Shestakova**, *https://orcid.org/0000-0002-3449-8498*
*Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine*

# STRENGTH, ABRASION RESISTANCE AND FROST RESISTANCE OF FIBER CONCRETE OF HARD PAVEMENT WITH BASALT FIBER AND AIR-ENTRAINING ADMIXTURE

***Abstract***

Introduction. Increasing the durability of hard pavements allows you to reduce road maintenance costs by extending the intervals between repairs. Dispersed reinforcement is a well-known method of increasing the frost resistance and abrasion resistance of concrete, which has a positive effect on the durability of pavements in typical for Ukraine climatic conditions. Basalt fiber is resistant to corrosion and relatively inexpensive, which makes it promising for use in the road industry. Also, plasticizing and air-entraining admixtures must be used for concrete of hard pavement.

Problem Statement. In modern economic conditions and taking into account the technological features of the preparation of mixtures, it is relevant to compare the effectiveness of the use of known methods of improving the properties of concrete for hard pavements: dispersed reinforcement and the use of air-entraining admixtures. Studying the expediency of the simultaneous use of these two methods of modifying the concrete mixture is also an important task from a scientific and practical point of view.

Purpose. Determination of the influence of basalt fiber and air-entraining admixture on the strength, frost resistance and abrasion resistance of concrete of hard pavements.

Results. The effect of basalt fiber with a length of 12 mm and a diameter of 18 μm and air-entraining admixture MICROPORAN on the properties of concretes of hard pavements was investigated. Concretes without fiber and with fiber in the amount of 0.50 kg/m$^3$, 0.75 kg/m$^3$ and 1.0 kg/m$^3$ were investigated. All mixtures had S1 mobility and were modified with superplasticizer STACHEMENT 2570/5/G in the amount of 0.6 % of the cement mass. Using 0.05% MICROPORAN the amount of air entrained in the mixture increases to (4.8–5.4) %, and the average density of concrete decreases by up to (2 401–2 430) kg/m$^3$. Using 0.15 % MICROPORAN 10.2-11% of air is entrained in the mixture and the average density of concrete is reduced to approximately (2 320–2 351) kg/m$^3$. The compressive strength of concrete was in the range from 46.3 MPa to 63.2 MPa, the flexural strength was in the range from 5.83 MPa to 7.63 MPa. Due to the dispersed reinforcement, the compressive strength of concrete increases by 13-24 %, the flexural strength increases by (21–29) %. The air-entraining admixture has practically no effect on the flexural strength of concrete, but reduces the compressive strength by (2–16) % using 0.05 % MICROPORAN and by (9–21) % using 0.15 % MICROPORAN. The abrasion of concrete practically does not change using an air-entraining admixture. Due to the introduction of basalt fiber, abrasion is reduced by (14–15) %, which helps to increase the durability of the material. Concrete without dispersed reinforcement and MICROPORAN had frost resistance F200. Dispersed reinforcement increases the frost resistance of concrete up to F300. Using 0.05 % air-entraining admixture, the frost resistance of concrete does not change or even slightly decreases. Using 0.15 % additive in concrete without fibers, frost resistance increases from F200 to F300 with an actual decrease in cement consumption.

Conclusions. Concrete for hard pavements with high durability and required strength was obtained due to the use of basalt fiber and complex modification with polycarboxylate superplasticizer and air-entraining admixture MICROPORAN.

***Keywords:*** basalt fiber, air-entraining admixture, hard pavement, strength, frost resistance, abrasion resistance.

https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.159

**УДК 625.8**

**Соколов О. В.**, *https://orcid.org/0000-0002-4694-9647*

*Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М. П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»), м. Київ, Україна*

# ПІДБІР ОПТИМАЛЬНИХ ЗЕРНОВИХ СКЛАДІВ АСФАЛЬТОБЕТОННИХ СУМІШЕЙ У СЕРЕДОВИЩІ MS EXCEL

***Анотація***

Вступ. Композиція зернового складу мінеральної частини асфальтобетонної суміші суттєво впливає на властивості дорожнього асфальтобетону, а саме на його міцність, шорсткість, довговічність, стійкість, надійність, якість тощо, особливо при застосуванні вторинних відходів промисловості. Підбір зернового складу асфальтобетонної суміші (далі – АС) передбачає розрахунок таких його параметрів, які, у тому числі, задовольняють вимогам табл. 6 і табл. 7 ДСТУ Б В.2.7-119 [1].

Вибір складу заповнювача та вмісту в'яжучого АС, яка відповідає вимогам специфікації, є тривалою процедурою спроб і помилок, а успіх у проєктуванні АС значною мірою залежить від досвіду проєктувальника. Подоланню цього утруднення може сприяти розроблення та впровадження комп'ютерних програм проєктування оптимальних параметрів АС для отримання бажаних їх властивостей та управління ними.

Найбільш розповсюдженими у будівельній індустрії світу є електронні таблиці Excel. Їх пропонують на ринку програмних продуктів або розробляють власними зусиллями окремі спеціалісти. У складі Microsoft Excel є так званий розв'язувач (Solver), у якому використаний ГА, за допомогою якого можна знайти оптимальні значення кількості компонентів мінеральної частини АС. Крім того, наявніть у середовищі Excel мови програмування Vasual Basic for Application (VBA) дає можливість створювати програми, що відповідають складності задачі оптимізації параметрів АС, та мають зручний інтерфейс користувача.

Сучасним є підхід до оптимізації процесу проєктування АС на базі моделей ШНМ різних видів, наприклад, запропонований в роботі [4]. В останні роки інструменти штучного інтелекту набули популярності. В інженерії проєктування дорожнього покриву ШНМ можна використовувати для інтерпретації складних даних, отриманих у результаті польових і лабораторних досліджень чи навіть отриманих комп'ютерним імітаційним моделюванням. ШНМ в основному застосовують в трьох основних сферах будівництва та ремонту дорожнього покриву, а саме в оцінюванні структурного стану дорожнього покриву, прогнозуванні аварійного стану дорожнього покриву та оцінюванні властивостей АС.

На нашу думку, можна зробити висновок про доцільність розв'язання задачі пошуку оптимальної композиції зернового складу мінеральної частини асфальтобетонної суміші в табличному процесорі Microsoft Excel, як найбільш поширеному в будівельній індустрії і доступному для більшості користувачів.

Проблематика. Композиція зернового складу мінеральної частини асфальтобетонної суміші суттєво впливає на властивості дорожнього асфальтобетону, а саме на його міцність, шорсткість, довговічність, стійкість, надійність, якість тощо, особливо при застосуванні вторинних відходів промисловості. Приймаючи до уваги значну трудомісткість оптимізації зернового складу АС, її доцільно здійснювати за допомогою комп'ютерного забезпечення, спираючись на найбільш поширені і добре відомі спеціалістам програмні засоби, а саме на табличний процесор Microsoft

Excel. Розроблення і впровадження такого програмного забезпечення сприятиме розвитку теорії проєктування зернового складу АС і полегшить її практичне застосування.

Мета. Метою статті є розв'язання задачі пошуку оптимальної композиції зернового складу мінеральної частини асфальтобетонної суміші, що задовольняє вимогам державних стандартів [1, 7–9], із застосуванням табличного процесора Microsoft Excel без застосування макросів і VBA.

Матеріали і методи. Для оптимізації підбору зернового складу АС було прийнято табличний процесор Microsoft Excel.

Результати. Розроблена нелінійна математична модель задачі оптимізації зернового складу мінеральної частини АС з цілочисловими змінними та обмеженнями, яку слід розв'язувати розвиваним методом, проте, якщо шукати наближення до кривої з максимальною градацією щільності, то стає можливим застосування методу зведеного градієнта.

Висновки. Аналіз доступних джерел інформації показав, що вирішення проблеми вибору оптимального зернового складу мінеральної частини асфальтобетону потребує застосування сучасних пакетів прикладних комп'ютерних програм для зменшення витрат часу на обробку і аналіз результатів лабораторних досліджень.

Найбільш поширеними програмними засобами у будівельній індустрії, зокрема в лабораторному забезпеченні виготовлення асфальтобетонної суміші, є табличний процесор Microsoft Excel. У статті продемонстрована методика розв'язання задачі оптимізації зернового складу мінеральної частини АС в середовищі Microsoft Excel без застосування макросів мови програмування VBA, що дає змогу обробляти та аналізувати результати лабораторних досліджень спеціалістам, які не знайомі з програмуванням.

***Ключові слова:*** асфальтобетон, зерновий склад, оптимізація, Microsoft Excel.

## Вступ

Композиція зернового складу мінеральної частини асфальтобетонної суміші суттєво впливає на властивості дорожнього асфальтобетону, а саме на його міцність, шорсткість, довговічність, стійкість, надійність, якість тощо, особливо при застосуванні вторинних відходів промисловості. Підбір зернового складу асфальтобетонної суміші (далі – АС) передбачає розрахунок таких його параметрів, які, у тому числі, задовольняють вимогам табл. 6 і табл. 7 ДСТУ Б В.2.7-119:2011 [1].

Вибір складу заповнювача та вмісту в'яжучого АС, яка відповідає вимогам специфікації, є тривалою процедурою спроб і помилок, а успіх у проєктуванні АС значною мірою залежить від досвіду проєктувальника. Подоланню цього утруднення може сприяти розроблення та впровадження комп'ютерних програм проєктування оптимальних параметрів АС для отримання бажаних їх властивостей та управління ними.

Взагалі були запропоновані три основних підходи до комп'ютеризації обчислень обробки результатів лабораторних досліджень та оптимізації параметрів АС:

1) електронні таблиці Excel для виконання об'ємного аналізу АС (Asphalt Mix Design Tools), наприклад, за методикою частини 5 посібника [3];

2) оптимізація процесу проєктування оптимальної АС з використанням штучних нейронних мереж (далі – ШНМ) та генетичного алгоритму (далі – ГА), наприклад, [4];

3) покращення проєктування та управління виробництвом АС за допомогою комп'ютерного імітаційного моделювання та оптимізації параметрів АС в реальному часі [5].

Найбільш розповсюдженими у будівельній індустрії світу є електронні таблиці Excel. Їх пропонують на ринку програмних продуктів або розробляють власними зусиллями окремі спеціалісти. У складі Microsoft Excel є так званий розв'язувач (Solver), у якому використаний ГА, за допомогою якого можна знайти оптимальні значення кількості компонентів мінеральної частини.

АС. Крім того, наявніть у середовищі Excel мови програмування Vasual Basic for Application (VBA) дає можливість створювати програми, що відповідні складності задачі оптимізації параметрів АС, та мають зручний інтерфейс користувача.

Сучасним є підхід до оптимізації процесу проєктування АС на базі моделей ШНМ різних видів, наприклад, запропонований у роботі [4]. В останні роки інструменти штучного інтелекту набули популярності. В інженерії проєктування дорожнього покриву ШНМ можна використовувати для інтерпретації складних даних, отриманих у результаті польових і лабораторних досліджень чи навіть отриманих комп'ютерним імітаційним моделюванням. ШНМ в основному застосовують в трьох основних сферах будівництва та ремонту дорожнього покриву, а саме в оцінюванні структурного стану дорожнього покриву, прогнозуванні аварійного стану дорожнього покриву та оцінюванні властивостей АС.

Теоретичні та практичні питання побудови і застосування ШНМ викладені [6]. У ньому також розглянуті програмні засоби для моделювання нейронних мереж, а саме:

– моделювання нейронних мереж у пакеті Matlab;
– моделювання нейронних мереж у пакеті Statistica Neural Networks;
– моделювання нейронних мереж засобами бібліотек мови Python.

Matlab – це платформа програмування та числових обчислень, яка використовується для аналізу даних, розроблення алгоритмів і створення моделей. Matlab розроблена спеціально для інженерів і вчених для аналізу та проєктування систем і продуктів. Для моделювання ШНМ за допомогою пакета Matlab необхідно встановити і використовувати бібліотеку Deep Learning Toolbox. Бібліотека містить функції для моделювання неглибоких (shallow networks) і глибоких (deep networks) нейронних мереж.

Statistica Neural Networks – це універсальний пакет нейромережевого аналізу від фірми StatSoft, який може працювати як самостійний додаток, а також у рамках системи Statistica. Він містить методи навчання мережі, має можливість створювати складні комбінації з мереж різних архітектур, дозволяє вибіркове навчання фрагментів нейронної мережі, забезпечує повний контроль над вибором функцій активації; містить систему Network Wizard (Нейро-Майстер), що допомагає користувачу приймати рішення і вибирати параметри. Пакет Statistica Neural Networks підтримує інтерфейс прикладного програмування, завдяки якому досвідчені користувачі можуть використовувати обчислювальні можливості модуля Statistica Neural Networks у своїх власних додатках.

Мова Python є однією з найбільш популярних мов програмування в останнє десятиріччя. Завдяки безкоштовним засобам розроблення та потужним бібліотекам Python знаходить широке використання при розробленні прикладного програмного забезпечення та вирішенні наукових задач. Зокрема велика кількість потужних бібліотек Python для моделювання нейронних мереж та розпізнавання образів дозволяє вирішувати задачі штучного інтелекту та інтелектуального аналізу даних.

Третій підхід (за допомогою комп'ютерного імітаційного моделювання та оптимізації параметрів АС в реальному часі) також потребує застосування пакету прикладних програм для імітаційного моделювання – створення цифрового двійника на основі історичних даних і порівняння з фактичними результатами досліджуваної системи. У програмному забезпеченні Arena™ Simulation використовується метод дискретних подій (особливих станів АС у ході її виробництва), але програмний комплекс також охоплює області потокового та агентного моделювання [5].

Зауважимо, що використання цих пакетів потребує значних зусиль користувача для їх засвоєння і для подальшого практичного застосування відповідно сучасній парадигмі проєктування АС.

На нашу думку, можна зробити висновок про доцільність розв'язання задачі пошуку

оптимальної композиції зернового складу мінеральної частини асфальтобетонної суміші в табличному процесорі Microsoft Excel, як найбільш поширеному в будівельній індустрії і доступному для більшості користувачів.

У статті наведено розв'язання задачі пошуку оптимальної композиції зернового складу мінеральної частини гарячих АС за допомогою розв'язувача (Solver) Excel (на прикладі АСГ. Кр.Щ.Б1.НП). Результати лабораторних досліджень звичайно оформлюють у таблицях Excel, наведених на **рис. 1** та позначених номерами ①, ②, ③, ④ і ⑤. Клітини, які можна редагувати залиті зеленим кольором. При введені даних аркуш повинен бути захищеним. Нижче на **рис. 1** і **рис. 2** наведено аркуш із таблицями та графіками підбору зернового складу мінеральної частини АС. Таблиці, позначені на аркуші номерами ②, ③, ④ і ⑤, розраховують із використанням формул (на прикладі сита 20 мм і щебня фракції 20-40):

② – «=(E3/$P$3)*100», ③ – «=C17+E10», ④ – «=100-E17», ⑤ – «=($B$31*E24)/100» Суміш – «=SUM(E31:E35)»; середня суміш – «=AVERAGE (E37:E38)»; відхилення – «=(E36-E39)^2». Інші клітини розраховують із використанням аналогічних формул із відповідною адресацією.

З метою контролю даних застосоване умовне форматування. Так, на **рис. 1** світло-червоною заливкою відмічений випадок перевищення верхньої границі, а жовтою – значення менші від нижньої границі допустимої області.

Для побудови математичної моделі задачі оптимізації композиції зернового складу мінеральної частини гарячих АС позначимо:

$x_1$ – щебінь фракції 20-40, відсотків за масою;
$x_2$ – щебінь фракції 10-20, відсотків за масою;
$x_3$ – щебінь фракції 5-10, відсотків за масою;
$x_4$ – пісок, відсотків за масою;
$x_5$ – порошок мінеральний, відсотків за масою.

Приймемо, що $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$ приймають цілі значення при обмеженнях:
Цільова функція:

$$\sum_{i=1}^{i=5} x_i = 100\ \%; \tag{1}$$

$$x_i \geq x_i^{\min}, i = \overline{1,..,5}; \tag{2}$$

$$x_i \leq x_i^{\max}, i = \overline{1,..,5}. \tag{3}$$

$$F(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = \sqrt[2]{\sum_{j=1}^{j=N} (\sum_{i=1}^{i=5} s_{ji} - (u_j - l_j)/2)^2} \Rightarrow \min; \tag{4}$$

$$u_j > l_j, j = \overline{1,..,N}, \tag{5}$$

де $N$ — кількість сит (дорівнює 11);
$s_{ji}$ — відсоток проходження $i$-го компонента через $j$-те сито;
$u_j$ — верхня границя % проходження допустимої області суміші на $j$-му ситі;
$l_j$ — нижня границя % проходження допустимої області суміші на $j$-му ситі.

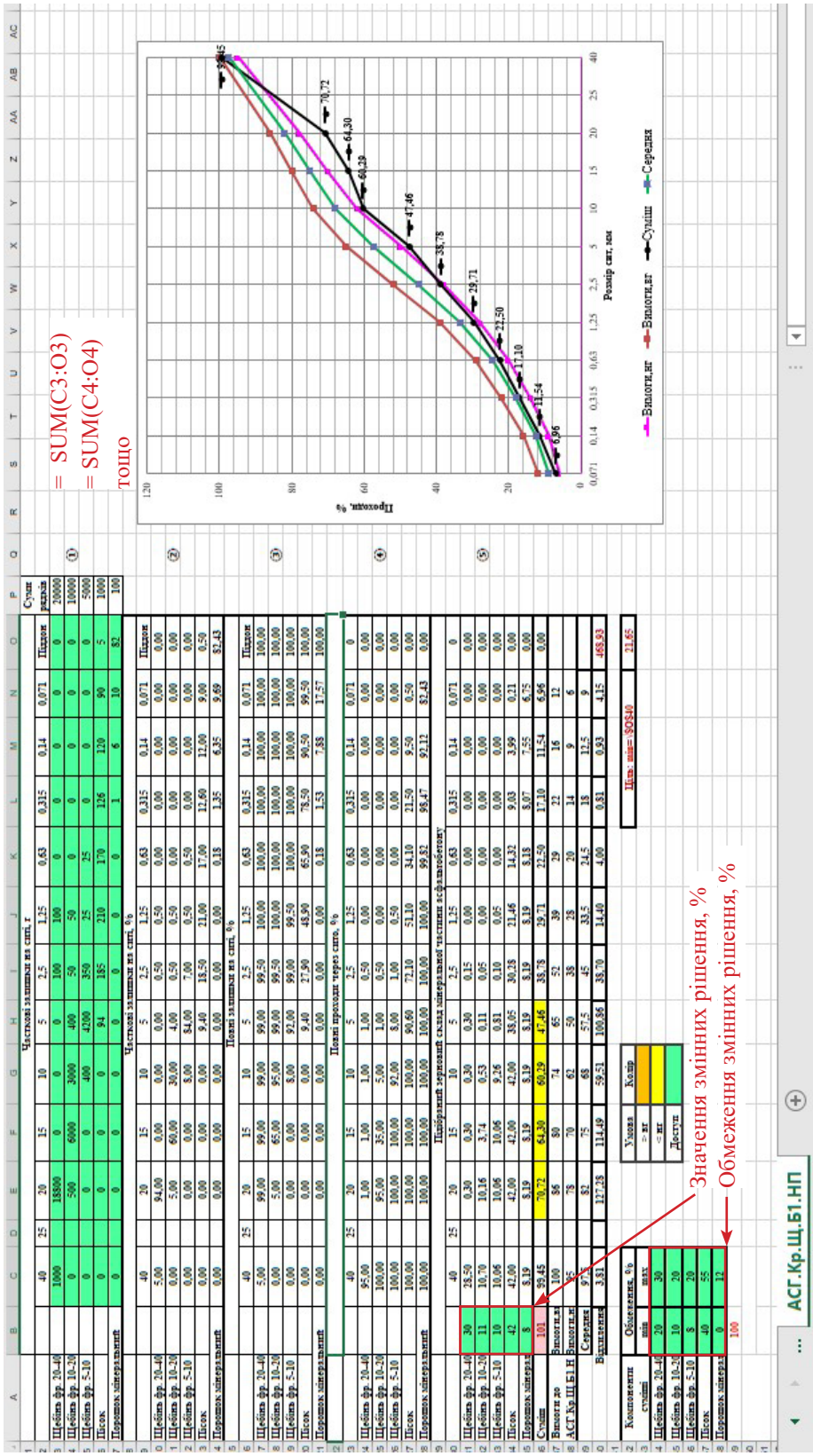



***Рисунок 1*** – Електронні таблиці та графіки Excel результатів підбору композиції зернового складу мінеральної частини гарячої АС (АСГ.Кр.Щ.Б1.НП) з навмисно зробленими помилками до оптимізації з умовним форматуванням

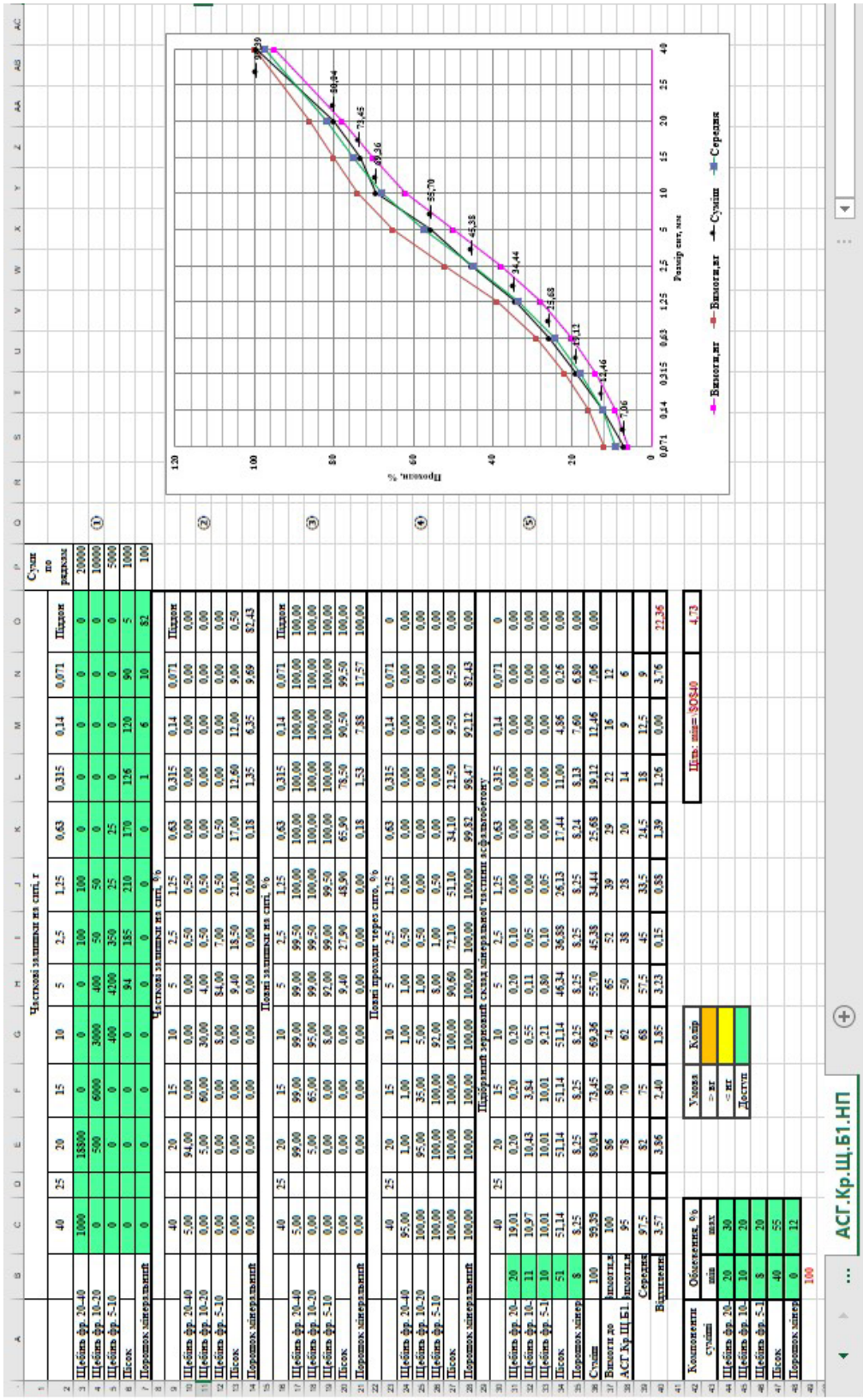


***Рисунок 2*** – Електронні таблиці та графіки Excel результатів розв'язання задачі пошуку оптимальної композиції зернового складу мінеральної частини гарячих АС (АСГ.Кр.Щ.Б1.НП) після оптимізації


*Збірник наукових праць* «ДОРОГИ І МОСТИ» www.dorogimosti.org.ua
ISSN 2524-0994 (Print), ISSN 2786-488X (Online). Dorogi i mosti, 2023. Issue 28

Таким чином, значенням цільової функції є корінь квадратний із суми квадратів відхилень графіка лінії шуканої суміші від графіка лінії середньої суміші $(u_j - l_j)/2$. Критерієм оптимальності є мінімальне значення цільової функції.

У розв'язувачі (Solver) Excel передбачені три методи вирішення задач оптимізації:

– симплекс-метод для лінійних задач;

– метод зведеного градієнта (Generalized Reduced Gradient – GRG) для нелінійних задач із гладкою функцією [10];

– розвиваний (еволюційний) метод розв'язувача для нелінійних задач із негладкою функцією.

Графіки верхньої та нижньої границь нормативних вимог, середньої суміші та оцінюваної суміші являють собою ламані лінії при логарифмічній шкалі розміру сит, отже задача є нелінійною і має негладку функцію.

Проте, найщільнішу можливу градацію зернового складу мінеральної частини АС, яка називається максимальною градацією щільності або іноді кривою максимальної щільності Фуллера (W.B. Fuller), можна приблизно розрахувати за такою формулою [3, с. 32]:

$$\%PMD = \left(\frac{d}{D}\right)^{0.45} \cdot 100 \ \%, \tag{6}$$

де $\%PMD$ — відсоток проходження, градація максимальної щільності;

$d$ — розмір сита, про який йдеться, мм;

$D$ — максимальний розмір сита, мм.

Функція (6) є гладкою нелінійною, отже, на нашу думку, для оптимізації можна застосувати також метод зведеного градієнта розв'язувача MS Excel.

Порядок застосування розв'язувача MS Excel наведений на **рис. 3 – 9**.

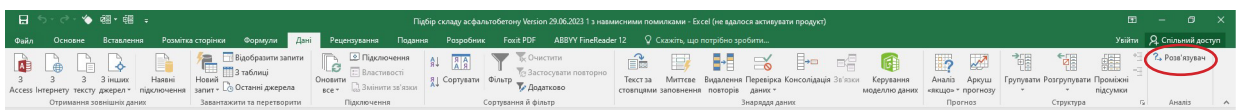



***Рисунок 3*** – Звернення до розв'язувача в Excel

Для практичного використання запропонованого підходу, поданому у статті для прикладу, слід створити певну кількість так званих шаблонів, які будуть відрізнятись значеннями верхньої і нижньої границь відсотків проходів через сита різних розмірів, які встановлені стандартами [1, 7, 8], прийнявши за основу викладений у статті і включивши в нього сита 25 мм. Це дасть користувачеві можливість зекономити витрати часу на формування правил умовного форматування, зменшить ймовірність внесення помилок.

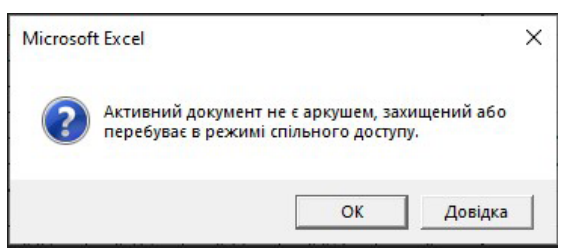



***Рисунок 4*** – Заборона виклику розв'язувача при захищеному аркуші

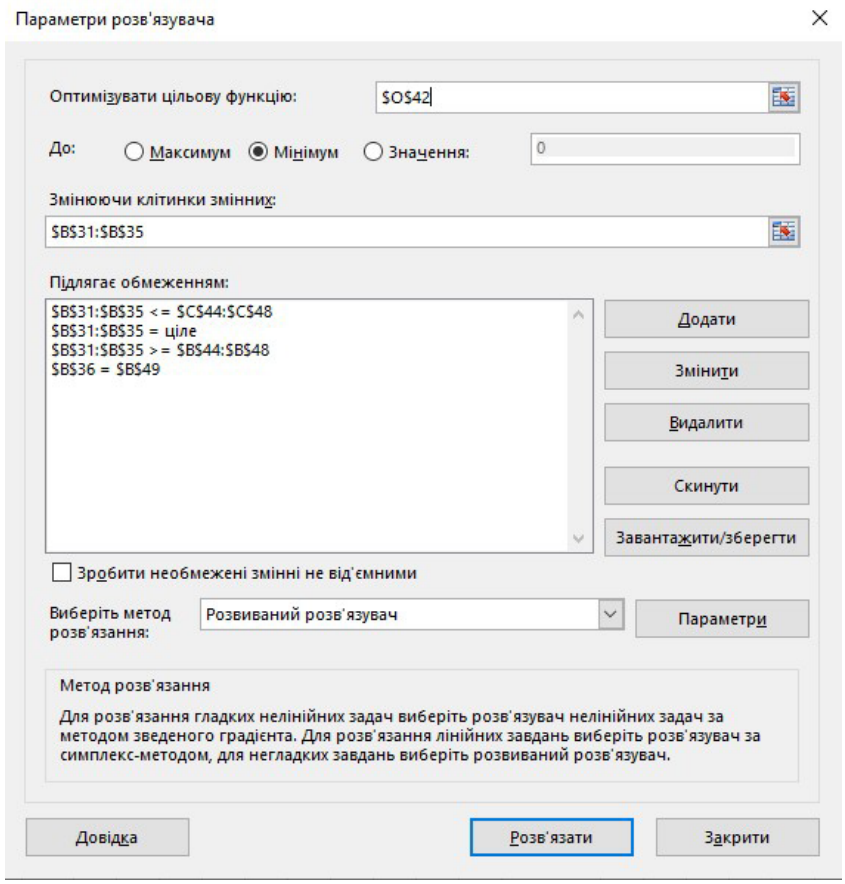



***Рисунок 5*** –Формування параметрів розвиваного розв’язувача

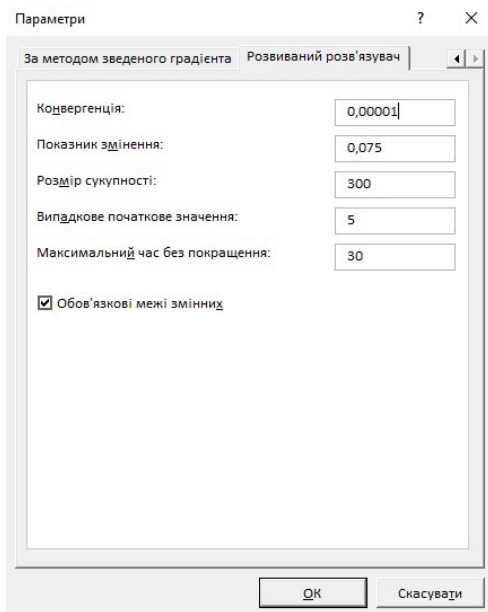



***Рисунок 6*** – Формування параметрів розвиваного розв’язувача


*Збірник наукових праць* «ДОРОГИ І МОСТИ» www.dorogimosti.org.ua
ISSN 2524-0994 (Print), ISSN 2786-488X (Online). Dorogi i mosti, 2023. Issue 28

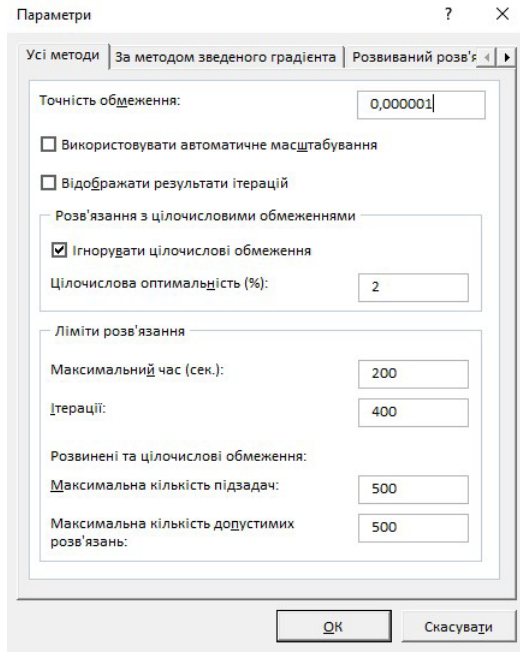



***Рисунок 7*** – Формування параметрів усіх параметрів розв’язувача

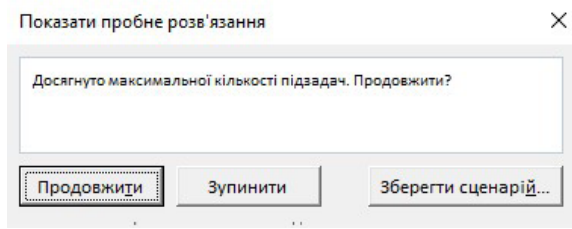



***Рисунок 8*** – Управління режимом розв’язання розв’язувача

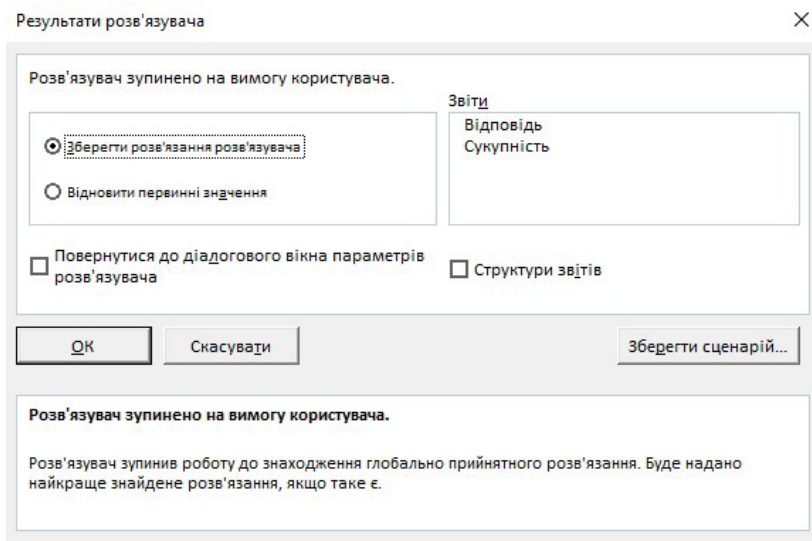



***Рисунок 9*** – Режими після розв’язання задачі оптимізації

## Висновки

Аналіз доступних джерел інформації показав, що вирішення проблеми вибору оптимального зернового складу мінеральної частини асфальтобетону потребує застосування сучасних пакетів прикладних комп'ютерних програм для зменшення витрат часу на обробку і аналіз результатів лабораторних досліджень.

Найбільш поширеними програмними засобами у будівельній індустрії, зокрема в лабораторному забезпеченні виготовлення асфальтобетонної суміші, є табличний процесор Microsoft Excel. У статті продемонстрована методика розв'язання задачі оптимізації зернового складу мінеральної частини АС в середовищі Microsoft Excel без застосування макросів мови програмування VBA, що дає змогу обробляти та аналізувати результати лабораторних досліджень спеціалістам, які не знайомі з програмуванням.

Розроблена нелінійна математична модель задачі оптимізації зернового складу мінеральної частини АС з цілочисловими змінними та обмеженнями, яку слід розв'язувати розвиваним методом, проте, якщо шукати наближення до кривої з максимальною градацією щільності, то стає можливим застосування методу зведеного градієнта.

Подальші дослідження у даному напрямі, на нашу думку, зв'язані із стратегічною перспективою створення на основі сучасної парадигми наукових досліджень життєвого циклу матеріалів для будівництва, ремонту та утримання автомобільних доріг Аналітичної експертної системи управління лабораторними дослідженнями та лабораторним бізнесом. У найближчий перспективі доцільне удосконалення методик розв'язання задачі оптимізації зернового складу мінеральної частини АС в середовищі Microsoft Excel із застосуванням макросів та VBA з розробленням відповідних шаблонів та і зрозумілого зручного інтерфейсу користувача.

## Список літератури

1. ДСТУ Б В.2.7–119:2011 Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови. Київ, 2011. 37 с. (Інформація та документація).

2. Alshamsi K.S. Development of a mix design methodology for asphalt mixtures with analytically formulated aggregate structures (2006). *LSU Doctoral Dissertations*. 3811. URL: https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_dissertations/3811 (дата звернення: 01.08.2023).

3. NCHRP Report 673 A Manual for Design of Hot-Mix Asphalt with Commentary (2011). *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine*. *Washington, DC: The National Academies Press*. 273 pp. DOI: https://doi.org/10.17226/14524.

4. Sebaaly H., Varma S., Maina J. W. Optimizing asphalt mix design process using artificial neural network and genetic algorithm. URL: https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/67040/Sebaaly_Optimizing_2018.pdf?sequence=1 (дата звернення: 01.08.2023).

5. Zhang M., Heitzman M., Smith A.E. Improving Hot Mix Asphalt Production Using Computer Simulation and Real Time Optimization. *J. Comput. Civ. Eng.* 2014. 28(3): 04014011. URL: https://www.eng.auburn.edu/~aesmith/files/asce.pdf (дата звернення: 01.08.2023).

6. Субботін С.О. Нейронні мережі: теорія та практика: навч. посіб. Житомир, 2020. 184 с. URL: http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/6800/1/Subbotin_Neural.pdf (дата звернення: 01.08.2023).

7. ДСТУ Б В.2.7–119:2011 Зміна № 1. Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови. Київ. 2014. 7 с. (Інформація та документація).

8. ДСТУ Б В.2.7-127:2015 Будівельні матеріали. Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон щебенево-мастикові. Технічні умови. Київ. 2015. 29 с. (Інформація та документація).

9. ДСТУ Б В.2.7-319:2016 Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та

аеродромний. Методи випробувань. Київ. 2016. 71 с. (Інформація та документація).

10. Lasdon Leon S., Fox Richard L., Ratner Margery W. Nonlinear optimization using the generalized reduced gradient method. *Revue française d'automatique, informatique, recherche opérationnelle. Recherche opérationnelle.* Tome 8, no V3 (1974). P. 73–103. URL: http://www.numdam.org/article/RO_1974__8_3_73_0.pdf (дата звернення: 01.08.2023).

**References**

1. DSTU B V.2.7–119:2011 Sumishi asfaltobetonni i asfaltobeton dorozhnii ta aerodromnyi. Tekhnichni umovy [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7–119:2011) Asphalt concrete mixtures and road and airfield asphalt concrete. Specifications]. Kyiv, 2011. 37 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

2. Alshamsi K.S. Development of a mix design methodology for asphalt mixtures with analytically formulated aggregate structures (2006). *LSU Doctoral Dissertations*. 3811. URL: https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_dissertations/3811 (Last accessed: 01.08.2023) [in English].

3. NCHRP Report 673 A Manual for Design of Hot-Mix Asphalt with Commentary (2011). *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine*. *Washington, DC: The National Academies Press*. 273 pp. DOI: https://doi.org/10.17226/14524 [in English].

4. Sebaaly H., Varma S., Maina J. W. Optimizing asphalt mix design process using artificial neural network and genetic algorithm. URL: https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/67040/Sebaaly_Optimizing_2018.pdf?sequence=1 (Last accessed: 01.08.2023) [in English].

5. Zhang M., Heitzman M., Smith A.E. Improving Hot Mix Asphalt Production Using Computer Simulation and Real Time Optimization. *J. Comput. Civ. Eng.* 2014. 28(3): 04014011. URL: https://www.eng.auburn.edu/~aesmith/files/asce.pdf (Last accessed: 01.08.2023) [in English].

6. Subbotin S.O. Neironni merezhi : teoriia ta praktyka [Neural networks: theory and practice: teaching]. Manual. Zhytomyr, 2020. 184 p. URL:http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/6800/1/Subbotin_Neural.pdf (Last accessed: 01.08.2023) [in Ukrainian].

7. DSTU B V.2.7-119:2011. Zmina № 1 Sumishi asfaltobetonni i asfaltobeton dorozhnii ta aerodromnyi. Tekhnichni umovy [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-119:2011) Asphalt concrete mixtures and road and airfield asphalt concrete. Specifications]. Kyiv. 2014. 7 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

8. DSTU B V.2.7-127:2015 Budivelni materialy. Sumishi asfaltobetonni i asfaltobeton shchebenevo-mastykovi. Tekhnichni umovy [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-127:2015) Building materials. Asphalt-concrete mixtures and crushed-mastic asphalt concrete. Specifications]. Kyiv. 2015. 29 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

9. DSTU B V.2.7-319-2016 Sumishi asfaltobetonni i asfaltobeton dorozhnii ta aerodromnyi. Metody vyprobuvan [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-319-2016) Asphalt concrete mixtures and road and airfield asphalt concrete. Test methods]. Kyiv. 2016. 71 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

10. Lasdon Leon S., Fox Richard L., Ratner Margery W. Nonlinear optimization using the generalized reduced gradient method. *Revue française d'automatique, informatique, recherche opérationnelle. Recherche opérationnelle.* Tome 8, no V3 (1974). P. 73–103. URL: http://www.numdam.org/article/RO_1974__8_3_73_0.pdf (Last accessed: 01.08.2023) [in English].

**Oleksii Sokolov**, *https://orcid.org/0000-0002-4694-9647*
*M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, Kyiv, Ukraine*

## DESIGNING OF OPTIMAL GRADING OF ASPHALT MIXTURES IN THE MS EXCEL ENVIRONMENT

***Abstract***

Introduction. The composition of the grading of the mineral part of the asphalt mixture significantly affects the properties of road asphalt, namely its strength, roughness, durability, stability, reliability, quality, etc., especially when using secondary industrial waste. The designing of asphalt mixture grading (hereinafter referred to as AM) involves the calculation of its parameters that, among other things, meet the requirements of Tables 6 and 7 of DSTU B V.2.7-119:2011 [1].

Designing the aggregate composition and binder content of an AM that meets the specification requirements is a lengthy trial-and-error procedure, and success in designing an AM largely depends on the designer's experience. This difficulty can be overcome by the development and implementation of computer software for designing the optimal AM parameters to obtain the desired properties and control them.

In general, three main approaches have been proposed to computerize the computations for processing laboratory test results and optimizing the parameters of the AM:

1) Excel spreadsheets for performing a volumetric analysis of AM (Asphalt Mix Design Tools), for example, according to the methodology of Part 5 of the manual [3];

2) optimization of the process of designing the optimal AM using artificial neural networks (hereinafter referred to as ANN) and genetic algorithm (hereinafter referred to as GA), for example, [4];

3) improving the design and management of AM production by means of computer simulation modeling and optimization of AM parameters in real-time [5].

Excel spreadsheets are the most common in the construction industry worldwide. They are offered on the software market or developed on their own by individual specialists who are familiar with Excel. Microsoft Excel includes a so-called Solver, which uses a GA to find the optimal number of components of the mineral part of the AM. In addition, the Visual Basic for Application (VBA) programming language available in Excel makes it possible to create programs that correspond to the complexity of the problem of optimizing the parameters of the AM and have a convenient user interface.

A modern approach to optimizing the process of AM designing based on ANN models of various types, for example, is proposed in [4]. Artificial intelligence tools have gained popularity in recent years.

In pavement design engineering, ANN can be used to interpret complex data obtained from field and laboratory tests or even computer simulation modeling. ANN is mainly used in three main areas of pavement construction and repair, namely, in assessing the structural condition of the pavement, predicting the emergency condition of the pavement, and evaluating the properties of asphalt concrete.

In our opinion, we can conclude that it is expedient to solve the problem of finding the optimal composition of grading of the mineral part of the asphalt mixture in the Microsoft Excel spreadsheet processor, as it is the most common in the construction industry and accessible to most users.

Problem Statement. The composition of grading of the mineral part of the asphalt mixture significantly affects the properties of road asphalt concrete, namely its strength, roughness, durability, stability, reliability, quality, etc., especially when using secondary industrial waste. The designing of asphalt mixture grading (hereinafter referred to as AM) involves the calculation of its parameters that, among other things, meet the requirements of Tables 6 and 7 of DSTU B V.2.7-119:2011 [1]. Taking into account the considerable labor intensity of optimizing the grading of AM, it is advisable to carry it out using computer software, relying on the most common and well-known software tools, namely

the Microsoft Excel spreadsheet processor. The development and implementation of such software will contribute to the development of the theory of designing the grading of AM and facilitate its practical application.

Purpose. The objective of the article is to solve the problem of finding the optimal composition of grading of the mineral part of the asphalt mixture that meets the requirements of state standards [1, 7, 8, 9] using the Microsoft Excel spreadsheet processor without the use of macros and VBA.

Materials and methods. The Microsoft Excel spreadsheet processor was used to optimize the designing of grading of the AM.

Results. A nonlinear mathematical model of the problem of optimizing the grading of the mineral part of the AM with integer variables and constraints has been developed, which should be solved by the developed method. However, if we look for an approximation to the curve with the maximum density gradation, then it becomes possible to use the method of the reduced gradient.

Conclusions. The analysis of available sources of information has shown that solving the problem of designing the optimal grading of the mineral part of AM requires the use of modern computer software packages to reduce the time spent on processing and analyzing the results of laboratory tests.

The most common software in the construction industry, in particular in the laboratory support for the production of asphalt mixtures, is the Microsoft Excel spreadsheet processor. The article demonstrates a methodology for solving the problem of optimizing the grading of the mineral part of the AM in Microsoft Excel without the use of VBA macros, which allows processing and analyzing the results of laboratory studies by specialists who are not familiar with programming.

***Keywords***: asphalt concrete, grading, optimization, Microsoft Excel.

https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.172

**УДК 625.7/.8**

**Терещенко Т. А.**, *канд. хім. наук, https://orcid.org/0000-0001-5206-9921*

*Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М. П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»), м. Київ, Україна*

# ЗАСТОСУВАННЯ «КОНЦЕПЦІЇ ФУНДАМЕНТУ» В ПРОЄКТУВАННІ ТА ВЛАШТУВАННІ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ

***Анотація***

Вступ. У вступі до статті висвітлено переваги «концепції фундаменту», що ґрунтується на інтерпретації дорожнього одягу як конструкції, що складається з двох основних елементів, які проєктуються та влаштовуються послідовно: несної основи дорожнього одягу – «*pavement foundation*» та власне конструкції дорожнього одягу – «*pavement construction*». Реалізація цієї концепції уможливлює проєктування й влаштування т. зв. «*long-life pavement*» – дорожнього одягу зі строком служби відповідно до 400 млн стандартних навантажень на вісь транспортного засобу [2], з застосуванням сумішей, укріплених гідравлічним в'яжучим, або *HBM*.

Проблематика. Тематика статті стосується проблем імплементації вимог європейських стандартів у вітчизняні системи проєктування дорожнього одягу.

Мета. Метою статті є аналіз основних положень «концепції фундаменту» та її можливостей у застосуванні вимог європейських стандартів стосовно дорожньо-будівельних матеріалів для удосконалення чинних систем проєктування дорожнього одягу.

Результати. Розглянуто класифікацію несних основ дорожнього одягу, яка базується на значеннях *FSM* (*long-term confined foundation surface modulus*) і охоплює чотири класи *FC* (*foundation class*): *FC*1 – *FSM* ≥ 50 МПа; *FC*2 – *FSM* ≥ 100 МПа; *FC*3 – *FSM* ≥ 200 МПа; *FC*4 – *FSM* ≥ 400 МПа. Відповідно до такої класифікації розглянуто та порівняно дві методології проєктування несної основи дорожнього одягу, що базуються на обмежених процедурах проєктування або на паритетних процедурах проєктування.

Розглянуто елементи несної основи дорожнього одягу: ґрунтову основу, перекриваючий шар і несний шар із визначенням їх функціональності й параметрів, які потребують нормування та/або контролювання на етапах проєктування та будування. Викладено особливості проєктування і влаштування кожного з елементів несної основи.

Також розглянуто проєктування конструкції дорожнього одягу на підставі її визначення як такої, що складається з основного шару, зв'язуючого шару та верхнього шару, і яку проєктують за «композитним типом» чи виключно з бітумовмисних матеріалів.

Висновки. Рівень адаптації системи національних стандартів щодо вимог, методів підготовки зразків та випробувань дорожніх матеріалів, зокрема *HBM*, до вимог європейського рівня відповідає поточному рівню готовності до промислового впровадження та ураховує впровадження стандартів *ENTSO-E*, проте виникають питання щодо адаптації вітчизняної системи проєктування дорожнього одягу до таких вимог.

Особливої уваги потребує питання співвіднесення існуючих розрахункових схем проєктування дорожнього одягу з розрахунковими характеристиками дорожньо-будівельних матеріалів, прийнятих європейськими стандартами. Розглянута система проєктування дорожнього одягу, зокрема з можливістю проєктування конструкції «композитного типу», є однією з пропозицій щодо пошуку відповідних конструктивних рішень.

***Ключові слова:*** дорожній одяг, конструкція дорожнього одягу, несна основа дорожнього одягу, обмежена процедура проєктування, паритетна процедура проєктування.

## Вступ

У зв'язку з очікуваним впровадженням в Україні завершеного комплексу регіональних стандартів Європейського Союзу постає актуальність співвіднесення положень системи проєктування дорожнього одягу з вимогами європейських норм щодо дорожньо-будівельних матеріалів та споріднених з ними стандартів. З урахуванням таких вимог може виникнути щонайменше потреба в адаптації систем проєктування дорожнього одягу до стандартної класифікації матеріалів, раніше не застосовуваної у вітчизняній практиці дорожнього будівництва.

Відповідно до цього пропонується загальний аналіз системи проєктування дорожнього одягу, яка передбачає певну послідовність дій з визначання строків служби конструкції, вибору матеріалів, визначання параметрів елементів конструкції, аналізування конструкції та виконання відповідних розрахунків і базується на «концепції фундаменту».

Згідно з концепцією, що розглядається, в складі дорожнього одягу проєктується та влаштовується конструктивний елемент «*pavement foundation*» та власне конструкція дорожнього одягу – «*pavement construction*» [1, 2]. Відповідна система проєктування супроводжується раціональною практикою будівництва з мінімізацією процедур оцінювання відповідності проєктним вимогам у процесі виконання робіт.

Зазначена система проєктування застосовується, зокрема, для реалізації концепції «*long-life pavement*» – дорожнього одягу, проєктний строк служби якого відповідає кількості навантажень, еквівалентної 400 млн стандартних навантажень на вісь транспортного засобу; обов'язковим елементом таких конструкцій є шари, влаштовані з матеріалів, укріплених гідравлічним в'яжучим (*HBM, Hydraulically Bound Mixtures*).

У вітчизняній галузі дорожнього будівництва впроваджено стандарти, ідентичні європейським нормам стосовно вимог до *HBM*; також фахівцями ДП «ДерждорНДІ» завершується розроблення стандартів з ідентичним ступенем відповідності щодо методів виготовлення зразків і випробування *HBM*. Доцільно підкреслити, що за окремими показниками механічних властивостей *HBM* можуть бути прирівняні до бетонів, зокрема до укочених бетонів – так, нормоване мінімально необхідне значення міцності на стиск *HBM* високої марки, не залежно від типу гідравлічного в'яжучого, становить 48 МПа. Поряд з цим на даний час залишаються не вирішеними питання адаптації вимог у частині характеристик *HBM* до прийнятих в Україні систем проєктування дорожнього одягу.

Далі розглянуто засади системи проєктування, яка значною мірою ураховує вимоги європейських норм.

Параметри, терміни та класифікація, застосовувані згідно з «концепцією фундаменту»

Елемент дорожнього одягу «*pavement foundation*», у розглянутій його інтерпретації, складається з ґрунтової основи, улаштованої з ґрунтів природного залягання або привозних ґрунтів, та одного або – переважно – двох послідовно влаштованих на ґрунтовій основі шарів, що виконують різні функції, з урахуванням яких у цій статті запропоновано наступні терміни для англомовних відповідників згідно з [2, 3]: *pavement foundation* – несна основа дорожнього одягу (далі – несна основа); елементи несної основи: *subgrade* – ґрунтова основа; *capping layer* – перекриваючий шар[1]; *subbase* – несний шар. Згідно з [2] приймається, що ґрунтова основа певної товщини міститься на масиві з модулем жорсткості 10 000 МПа.

[1] Застосування «концепції фундаменту» в проєктуванні дорожнього одягу передбачає загальні підходи, прийняті для інших типів споруд, зокрема споруд цивільного будівництва [3]. Термінологічні відповідники та визначення понять у системи національних стандартів для термінів, застосованих у цій статті згідно з [1 – 3], відсутні. Потрібно додати, що в статті розглянуто – з можливістю порівняння – положення щодо проєктування несної основи дорожнього одягу згідно з двома послідовними редакціями одного документа – *Design Manual for Roads and Bridges* авторства британських колег, проте не достатньо інформації, щоб визначити, наскільки повно – беручи до уваги геополітичні зміни (*Brexit*) – у сучасній редакції ураховано вимоги системи стандартів Європейського Союзу.

Згідно з [2] пропонується наступне визначення: «Перекриваючий шар – шар підсилення, який улаштовують на ґрунтовій основі для захисту ґрунтової основи від руйнування та/або підвищення жорсткості розташованих вище несного шару та конструкції дорожнього одягу». Згідно з публікованими раніше даними перекриваючий шар улаштовують переважно в випадках, коли каліфорнійський показник несної здатності (*CBR, California Bearing Ratio*) ґрунтів є нижчим, ніж 5 %. У системі національних стандартів поняття «перекриваючий шар» застосовано в серії ДСТУ EN 14227.

У межах «концепції фундаменту» для елементу *capping layer* виконуються проєктні розрахунки, тому в складі несної основи, відповідно до запропонованої термінології, перекриваючий шар з функціональної точки зору може бути визначений як додатковий несний шар.

Відповідно до кількості шарів, що проєктуються та влаштовуються на ґрунтовій основі, конструкція несної основи розглядається як одно- або двохшарова. Шари несної основи можуть бути влаштовані з неукріплених матеріалів чи з *HBM* – у окремих випадках з застосуванням ґрунтів – залежно від вихідних даних проєктування та класу несної основи.

Несна основа виконує «традиційні» функції перерозподілу навантажень від коліс транспортних засобів і має забезпечувати захист від деформацій і руйнування власне несної основи і розташованих вище шарів конструкції дорожнього одягу під час будування та експлуатування автомобільних доріг. Несна основа розглядається як еквівалентний напівпростір, деформаційні характеристики якого представлені проєктним значенням модуля (*long-term confined foundation surface modulus*, *FSM* – величина (за значенням модуля жорсткості), потрібне значення якої забезпечується на поверхні несної основи «в замкненому просторі», після влаштування конструкції дорожнього одягу).

В [1 – 3] установлено класифікацію несних основ за чотирма класами (*Foundation Class, FC*), які характеризуються певними значеннями *FSM*. *FC*1 (*FSM* ≥ 50 МПа) і *FC*2 (*FSM* ≥ 100 МПа) приймаються для проєктування та будівництва автомобільних доріг з відносно низькою інтенсивністю руху транспортних засобів, за сумарної кількості прикладень еквівалентного навантаження $N \leq 20$ *msa* та $N \leq 80$ *msa* відповідно[2]. *FC*3 (*FSM* ≥ 200 МПа) та *FC*4 (*FSM* ≥ 400 МПа) приймаються для доріг високих категорій, з високою інтенсивністю руху, у тому числі як складова проєктування та влаштування дорожнього одягу за концепцією «*long-life pavement*».

До окремих деформаційних характеристик несної основи чи її елементів, які приймаються до розрахунку і підлягають нормуванню та, в окремих випадках, контролюванню з метою оцінювання відповідності проєктним вимогам, відносяться:

– *design subgrade surface modulus* (проєктний модуль на поверхні ґрунтової основи) – розрахунковий модуль жорсткості, прийнятий у цілях проєктування несної основи;

– *layer stiffness* (жорсткість шару) – модуль жорсткості, прийнятий для виокремленого шару, визначається з урахуванням умов експлуатування, а також деградації матеріалу шару;

– *stiffness modulus* (модуль жорсткості) – відношення напруження до спричиненої цим напруженням деформації[3];

– *surface modulus* (модуль, що визначається на поверхні) – модуль жорсткості, виведений за результатами прикладення відомого навантаження до поверхні шару.

---

[2] *Msa – million single axles*, кількість еквівалентів розрахункового навантаження на вісь транспортного засобу, виражена у мільйонах одиниць ($10^6$), яке, згідно з [2, 3], становить 80 кН.

[3] Варіант перекладу англомовного відповідника «*stiffness modulus*» як «модуль жорсткості», прийнятий у цій статті, за технічним змістом та визначенням поняття не є відповідником цього терміна згідно з [4], проте, якщо урахувати, що поняття «жорсткість» описується критеріями закону Гука в таких видах деформування, як одноосьове стискання – розтягнення та зсув, - є цілком коректним.

Згідно з [3] прийнятими є також величини, значення яких визначають на поверхні несної основи у процесі будування: *target stiffness modulus* – «цільовий» модуль жорсткості, значення якого є оцінним, та *minimum stiffness modulus* – мінімальний модуль жорсткості, значення якого повинне бути перевищеним за результатами кожного окремого вимірювання, – характеризується також як абсолютне мінімальне значення.

У процесі влаштування дорожнього одягу, запроєктованого згідно з «концепцією фундаменту», одним з ключових параметрів є значення модуля на поверхні несної основи, визначене перед улаштуванням шарів конструкції дорожнього одягу; аналогічні випробування можуть виконуватися також на проміжних етапах улаштування елементів несної основи – наприклад, з метою оперативного вирішення питань оцінювання відповідності конструкції проєктним вимогам або визначання потенційного чинника невідповідності.

Вибір методологій проєктування згідно з «концепцією фундаменту»

«Концепція фундаменту» є застосовною у разі проєктування і влаштування несної основи за методологіями, які суттєво різняться за передумовами проєктування та, в сукупності, ураховує потенційно широкий діапазон варіювання вихідних даних. На вибір методології проєктування, поряд з суто технічними вихідними даними, мають вплив економічні чинники – наявність дорожньо-будівельних матеріалів та відповідні цінові аспекти; в окремих випадках має значення масштабність проєкту.

До методологій проєктування, що базуються на «концепції фундаменту», віднесено процедури «*performance foundation design*» та «*restricted foundation design*» [2].

Застосування методології «*restricted foundation design*», або обмеженої процедури проєктування несної основи, ґрунтується на обмеженій кількості схем та передбачає обмеженість даних щодо характеристик застосовуваних матеріалів і, певною мірою, даних щодо конструкції, тобто базується на певних прийнятих параметрах без їх верифікації. Така методологія характеризується як консервативна та охоплює *FC*2 і *FC*3, а також *FC*1 – за винятком магістральних доріг; обмежена процедура проєктування не є рекомендованою для масштабних проєктів. Потрібно додати, що згідно з обмеженою процедурою проєктування в окремих випадках не дозволяється застосування, наприклад, регенерованих дорожньо-будівельних матеріалів; також може бути не рекомендованим застосування матеріалів, щодо яких недостатньо досвіду [2, 3].

За обмеженою процедурою проєктування враховують загальні рекомендації щодо вибору матеріалів для влаштування перекриваючих шарів: для *FC*1 це є переважно дисперсні, неукріплені матеріали, для *FC*2 вимоги до перекриваючого шару залежать від того, з яких матеріалів улаштовують несний шар – з неукріплених сумішей чи з *HBM*; останні мають відноситися до класів міцності $C_{3/4}$ або $C_{5/6}$. Проєктування *FC*3 в цілому здійснюють з урахуванням вимог до *HBM* переважно класу міцності не менше ніж $C_{8/10}$, проте, згідно з [2], можуть застосовуватися матеріали нижчих класів міцності у разі влаштування двошарової конструкції з певними вимогами до перекриваючого шару.

Методологія «*performance foundation design*» – проєктування несної основи з верифікацією параметрів конструкції та характеристик матеріалів, що є критичними для забезпечення проєктних показників – може бути охарактеризована як паритетна процедура проєктування. Паритетна процедура проєктування охоплює всі класи несної основи та забезпечує значно більші – порівняно з обмеженою процедурою – можливості вибору матеріалів з метою оптимізації конструкції.

Згідно з [3] для паритетної процедури проєктування були установлені обмеження певних параметрів. Так, для *FC*1 і *FC*2 мінімально допустима товщина шарів, що влаштовуються на ґрунтовій основі – не залежно від матеріалу, що застосовується, та функції шару – становить 150 мм, для *FC*3 – 175 мм (згідно з [2] – 180 мм), для *FC*4 – 200 мм. Зазначалося [3], що чинником такої градації обмежень є застосування в шарах несної основи більш високих

класів матеріалів з більш високими показниками міцності, більш жорстких, з підвищеною здатністю до тріщиноутворення – у випадку застосування укріплених матеріалів, та більш чутливих до варіації товщини шару. Також, з метою запобігання проєктуванню надто тонких і потенційно неоднорідних за міцністю шарів було рекомендовано установлювати обмеження за максимальними значеннями модуля шару залежно від класу основи: *FC*1 – 100 МПа; *FC*2 – 350 МПа; *FC*3 – 1 000 МПа; *FC*4 – 3 500 МПа; важливо, що це правило поширювалося також на проєктування за обмеженою процедурою.

Характеристики матеріалів, залежно від класу й конструкції несної основи, установлені для паритетної процедури проєктування згідно з [2], наведено в **табл. 1**.

***Таблиця 1***

***Розрахункові параметри для проєктування елементів несної основи за паритетною процедурою проєктування***

| Клас несної основи | Конструкція несної основи | Модуль шару, МПа |
|---|---|---|
| 1 | Одношарова | 50; 75 |
| 2 | Одношарова | 120; 150; 350 |
| 3 | Одношарова | 350; 500; 1 000 |
| 4 | Одношарова | 1 000; 2 000; 4 000 |
| 2 | Несний шар, улаштований на перекриваючому шарі | Несний шар – 75<br>Перекриваючий шар – 120; 150; 350 |
| 3 | Несний шар, улаштований на перекриваючому шарі | Несний шар – 75<br>Перекриваючий шар – 350; 500; 1 000 |
| 4 | Несний шар, улаштований на перекриваючому шарі | Несний шар – 75<br>Перекриваючий шар – 1 000; 2 000; 4 000 |

Обмеження за мінімальною товщиною шарів, улаштованих на ґрунтовій основі, за паритетною процедурою проєктування згідно з [2] окремо не наводяться, проте беручи до уваги приклади відповідних графічних схем проєктування, можна дійти висновку, що такі обмеження залежать від класу несної основи, показників міцності матеріалів і від конструкції несної основи – одно- або двохшарова, та в наведених графічних схемах варіюються від 150 мм до 200 мм.

## Особливості проєктування та влаштування елементів несної основи

Нижче проаналізовано окремі особливості проєктування та влаштування ґрунтової основи, перекриваючого й несного шарів із застосуванням різних матеріалів.

Вихідною точкою проєктування є визначання характеристик ґрунтів та підтвердження виконання мінімально необхідних вимог, які, згідно з [3], установлюють відповідно до значення *CBR* – підкреслюється, що *CBR* є опосередкованим критерієм оцінювання міцності ґрунтової основи (модуля жорсткості *E*) й застосовується у зв'язку зі складністю надійного та послідовного визначання фактичного значення модуля на поверхні ґрунтової основи. У [2, 3] наведено рівняння *by Powell*, яке приймають для обчислення значення модуля *E,* у мегапаскалях, ґрунтової основи на підставі результатів визначання *CBR* (1):

$$E = 17{,}6 \cdot CBR^{0{,}64}, \quad (1)$$

де *CBR* – каліфорнійський показник несної здатності, у відсотках.

Розробники [1] зазначають, що рівняння *Powell* виведено для ґрунтів зі значенням *CBR* у межах від 2 % до 15 %; згідно з [2] рівняння (1) є дійсним за значень *CBR* від 2 % до 12 %.

За проєктний модуль на поверхні ґрунтової основи приймається модуль, значення якого є меншим за порівнянням таких двох величин:

– *short-term subgrade surface modulus* («короткостроковий» модуль на поверхні ґрунтової основи) – розрахунковий модуль жорсткості, що приймається для ґрунтової основи в процесі будівництва;

– *long-term subgrade surface modulus* («довгостроковий» модуль на поверхні ґрунтової основи) – розрахунковий модуль жорсткості ґрунтової основи, що приймається за умов досягнення рівноваги, після влаштування дорожнього одягу.

Невірне призначення розрахункового модуля жорсткості на поверхні ґрунтової основи є одним з потенційних чинників невідповідності несної основи проєктним вимогам.

У **табл. 2** наведено окремі значення *CBR* у стані рівноваги – такі, що відповідають високому рівню ґрунтових вод, прийняті згідно з [3].

***Таблиця 2***

***Значення CBR ґрунтової основи в стані рівноваги***

| Тип ґрунту | *PI* (індекс пластичності), % | неглибоке залягання ґрунтової основи | глибоке залягання ґрунтової основи |
|---|---|---|---|
| | | Розрахункові значення *CBR*, % | |
| Важкі глини (*heavy clay*) | 70 | 2 | 2 |
| | 60 | 2 | 2 |
| | 50 | 2 | 2,5 |
| | 40 | 2,5 | 3 |
| Суглинки (*silty clay*) | 30 | 3 | 4 |
| Супіски (*sandy clay*) | 20 | 4 | 5 |
| | 10 | 5 | 6 |
| **Примітка 1.** Глибоке залягання ґрунтової основи передбачає масивну конструкцію, за відстані до поверхні дорожнього одягу 1 200 мм, неглибоке залягання приймається за такої відстані 300 мм. | | | |

Для визначання міцнісних характеристик ґрунтової основи *in-sity* може бути застосований стандартний метод динамічного зондування.

У разі, якщо *CBR* не перевищує 2,5 %, може потребуватися заміна ґрунтів, яку, за відповідної товщини шару «слабкого» ґрунту, виконують на глибину від 0,5 м до 1,0 м, з урахуванням ущільнення. Згідно з [3], у разі заміни слабких ґрунтів – не залежно від характеристик завезених ґрунтів – значення *CBR* приймають як таке, що дорівнює 2,5 % з метою урахування можливого зниження міцності внаслідок впливу розташованого нижче шару більш слабких ґрунтів. Згідно з [2] у разі заміни ґрунтів, механічної стабілізації з застосуванням геграток (геотекстилю), стабілізації ґрунтів приймаються більш високі розрахункові значення міцності (модуля) ґрунтової основи.

У випадках, коли фактичне значення модуля на поверхні влаштованої ґрунтової основи (*construction subgrade surface modulus*) вказує на невідповідність проєктним вимогам, вживають заходів на об’єкті або коригують проєктні розрахунки.

У частині вимог до ґрунтової основи, у разі застосування паритетної процедури проєктування, установлено обмеження за деформаціями на поверхні, які підлягають контролюванню перед улаштуванням шарів несної основи; відповідну залежність наведено на **рис. 1**.

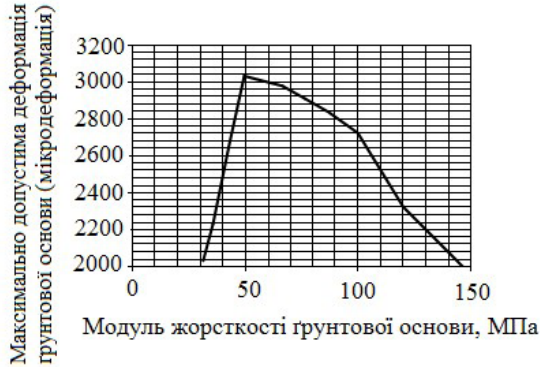



***Рисунок 1*** – Обмеження за деформаціями ґрунтової основи згідно з [2, 3]

У разі застосування паритетної процедури проєктування величиною, значення якої підлягає верифікації, є жорсткість шару неукріпленої суміші – не залежно від функції шару в складі несної основи. Для неукріплених сумішей значення модуля може бути оцінено за результатами вимірювання на пробній ділянці об'єкту, проте такі умови випробування не дозволяють забезпечувати вимірювання за умов всебічного стискання – значення модуля характеризується як отримане за умов «псевдовсебічного» стискання (*partially confined value*) і для неукріплених сумішей становить орієнтовно 60 % від значення, яке забезпечується після завершення влаштування дорожнього одягу. До недоліків відповідних лабораторних методів випробування неукріплених сумішей відносять вплив на результати випробування розміру зразків та вплив субстратів, якими обмежено зразок.

Окремими положеннями регулюється установлення значень модуля жорсткості для матеріалів, укріплених гідравлічним в'яжучим. Згідно з [3] пропонується виходити із значень, отриманих за результатами випробування зразків *HBM* з визначання міцності під час стискання аналогічно до вимог [5].

При цьому доцільно прийняти, що зразки *HBM*, виготовлені в лабораторії, мають суцільну непорушену структуру, проте на об'єкті *HBM*, ущільнені в шарі конструкції, характеризуються певним рівнем дефектності та неоднорідності (неоднорідність за густиною, наявність мікротріщин). Тому для *HBM* на основі в'яжучих швидкого тверднення рекомендоване значення модуля жорсткості має бути не більшим ніж 20 % від визначеного за результатами лабораторних випробувань, а для *HBM* на основі в'яжучих повільного тверднення, згідно з [3] – не більше ніж 10 % від визначеного значення[4], – *HBM* на основі в'яжучих повільного тверднення внаслідок тривалого набирання міцності здатні до утворення дефектів не тільки під час проїзду технологічного транспорту, але й на початкових етапах експлуатації. За наявності задокументованих даних, з відповідним узгодженням, можуть бути прийняті інші значення модулів.

У разі визначання модуля на поверхні несної основи *FC*3, *FC*4 з верхнім шаром *HBM* на основі в'яжучих швидкого тверднення мінімально необхідне значення «цільового» модуля жорсткості доцільно приймати більшим за значення *FSM*, оскільки набирання міцності відбувається швидко, проте обсяг та розмір різних дефектів з початком експлуатації конструкції збільшуються, що призводить до зниження міцнісних характеристик. У разі визначання модуля несної основи на поверхні шару *HBM* з в'яжучими повільного тверднення мінімально необхідне значення «цільового» модуля жорсткості доцільно приймати меншим ніж значення *FSM*. Значення мінімального модуля

[4] У даному випадку до сумішей швидкого тверднення віднесено суміші, укріплені гідравлічним в'яжучим, для яких за умови витримування за температури 20 °С впродовж 28 діб забезпечується міцність понад 50 % від проєктного значення; до сумішей повільного тверднення – суміші, для яких за вказаних умов забезпечується міцність 50 % або менше від проєктного значення.

жорсткості варіюється, згідно з [2], від 25 МПа у разі вимірювання на поверхні шару неукріплених сумішей до 300 МПа у разі вимірювання на поверхні шару *HBM*, укріплених в'яжучим швидкого тверднення.

Значення вказаних величин у разі нормування встановлюють суто емпіричним шляхом на підставі задокументованого досвіду; в процесі удосконалення системи проєктування дорожнього одягу внормовані значення цих величин підлягають коригуванню, або такі величини можуть бути замінені іншими характеристиками [3].

Як зазначено в [2], дотримання нормованих допусків за товщиною несного шару, влаштованого з *HBM*, у випадках, де дозволено від'ємний відхил, може призвести до суттєвого зменшення товщини такого шару відносно проєктного значення, що унеможливить забезпечення потрібних значень модулів на поверхні несної основи; з урахуванням цього в проєктній документації може бути встановлено від'ємні відхили такими, що дорівнюють нулю, або належним чином підвищено товщину шару відносно розрахункової. У разі підвищення товщини шару потрібно враховувати технологічні обмеження.

Також важливо, що елементи (шари) несної основи мають бути запроєктовані та влаштовані таким чином, щоб забезпечувати вимоги щодо здатності витримувати рух технологічного транспорту, яка, наприклад, для шару неукріплених матеріалів може контролюватися за результатами прикладання навантаження, еквівалентного 1 000 стандартних навантажень на вісь [2, 3].

## Застосування графічних схем проєктування дорожнього одягу згідно з «концепцією фундаменту»

Як було зазначено вище, згідно з розглянутою концепцією на несній основі дорожнього одягу («*pavement foundation*») влаштовується власне конструкція дорожнього одягу («*pavement construction*»), для елементів якої в цій статті запропоновано наступні терміни для англомовних відповідників згідно з [6]: *base course* – основний шар; *binder course* – зв'язуючий шар; *surface course* – верхній шар (у окремих випадках несний шар основи може розглядатися як складова конструкції дорожнього одягу).

Згідно з [6] два ключові завдання – проєктування несної основи та проєктування конструкції дорожнього одягу відповідно до проєктного класу несної основи – пропонується вирішувати, зокрема, з використанням графічних схем проєктування.

Графічні схеми проєктування шарів несної основи ґрунтуються на вихідних даних щодо класу несної основи, розрахункових значень модулів ґрунтової основи, характеристик матеріалу шару (дисперсні матеріали або *HBM*), а також залежать від рекомендацій щодо конструкції несної основи – одно- або двохшарова.

На **рис. 2** наведено приклад графічної схеми проєктування несної основи для випадку, що передбачає проєктування одного – несного – шару.

Матеріали для влаштування шарів обираються згідно з положеннями *Specification for Highway Works* (Технічних умов на виконання дорожніх робіт) у складі [7] – для прикладу згідно з **рис. 2** ці матеріали належать до стандартних сумішей (кам'яних матеріалів або ґрунтів), укріплених цементом, у випадку ґрунтів дозволені також інші види гідравлічних в'яжучих.

На **рис. 3** наведено приклад графічної схеми проєктування несної основи двохшарової конструкції.

Матеріали для влаштування шарів несної основи за паритетною процедурою (**рис. 3**) також обираються з урахуванням [7], з верифікацією характеристик матеріалів кожного шару.

На **рис. 4** наведено графічні схеми проєктування конструкції дорожнього одягу за різних класів несної основи, для різних типів конструкції дорожнього одягу з верхнім шаром, улаштованим з бітумовмисних матеріалів: т. зв. «композитного типу», що влаштовується на *HBM*-основі, і конструкції дорожнього одягу, всі шари якої є бітумовмисними.

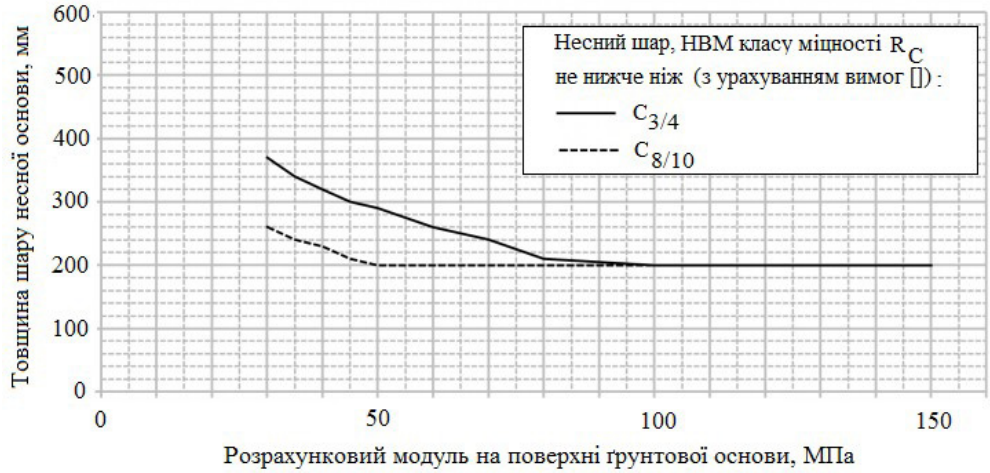



***Рисунок 2*** – Проєктні рішення *FC*3 згідно з обмеженою процедурою проєктування для одношарової конструкції несної основи (несний шар, улаштований на ґрунтовій основі)

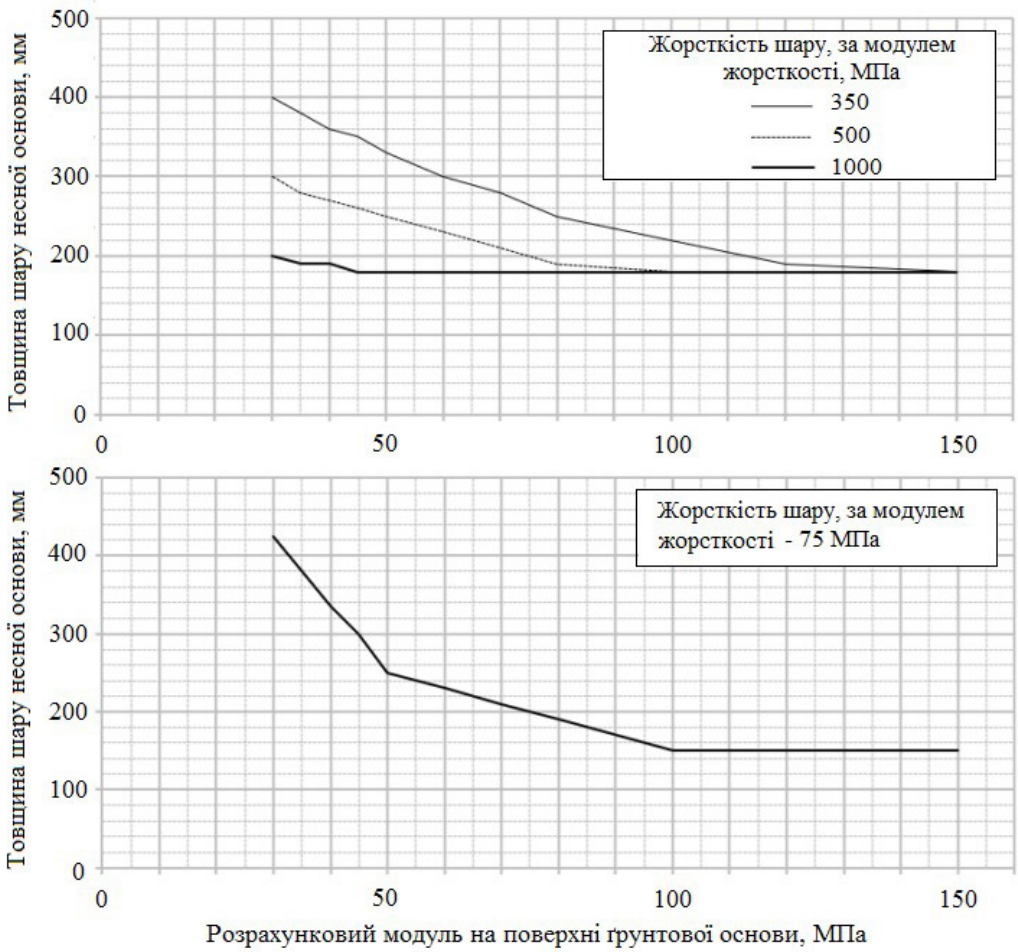



***Рисунок 3*** – Проєктні рішення *FC*3 згідно з паритетною процедурою проєктування для двохшарової конструкції несної основи (перекриваючий шар та несний шар, послідовно влаштовані на ґрунтовій основі)

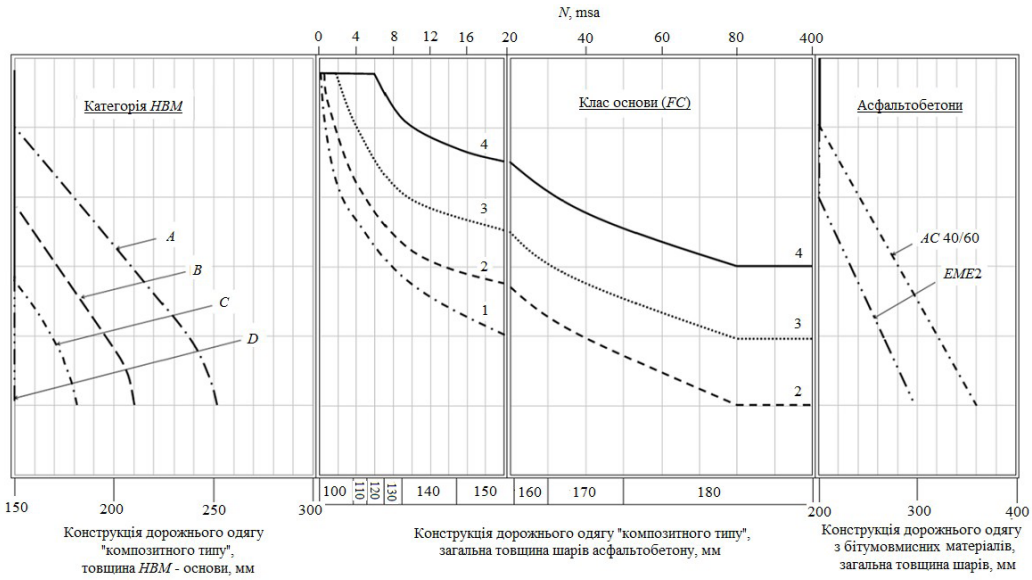



***Рисунок 4*** – Графічна схема (номограма) проєктування конструкцій дорожнього одягу різних типів з верхнім шаром (шарами) з бітумовмисних матеріалів

Середня та ліва частини номограми (**рис. 4**) застосовуються для виведення загальної товщини бітумовмисних шарів конструкції дорожнього одягу за певної товщини *HBM*–основи. Також загальну товщину бітумовмисних шарів *H*, у міліметрах, для цього випадку може бути обчислено за рівнянням (2):

$$H = 16{,}05 \cdot (\log(N))^2 + 101 \cdot \log(N) + 45{,}8, \quad (2)$$

де *N* – кількість еквівалентів розрахункового навантаження на вісь транспортного засобу, виражена у мільйонах одиниць (*msa*).

Проте, оскільки існують певні вимоги щодо округлення розрахункової товщини шарів, зручно користуватися номограмою.

У правій частині **рис. 4** наведено номограму для виведення загальної товщини шарів конструкції дорожнього одягу з бітумовмисних матеріалів (більш детальну інформацію щодо *EME*2 наведено в [8]); поряд із цим, у [6] наведено також інформацію щодо застосування в зв'язуючому шарі щебенево-мастикового асфальтобетону.

Категоризація *HBM* відповідно до лівої частини **рис. 4** здійснюється з урахуванням стандартної класифікації *HBM* за значенням показника $R_tE$, де $R_t$ – міцність на розтяг, *E* – модуль пружності *HBM*; з категоризацією відповідно до **рис. 4** можна ознайомитися в першоджерелі [2].

Поряд з цим, впроваджено графічні схеми проєктування конструкції дорожнього одягу з жорсткими (цементобетонними) шарами, де для випадку нового будівництва застосовують *FC*3 або *FC*4 [6] (не розглядається в зв'язку з обмеженнями щодо обсягу матеріалів).

Окремо потрібно зазначити, що розглянутий підхід до проєктування надає можливість призначати товщину шару, влаштованого з *HBM,* відповідно до розмірів стандартних зразків для випробування і поряд з цим ураховує стандартну класифікацію та характеристики *HBM*, раніше не застосовувані в прийнятих на національних теренах схемах проєктування дорожнього одягу. Згідно з серією EN 14227 та ідентичного ступеня відповідності ДСТУ EN 14227 щодо вимог до *HBM* визначання класу міцності *HBM* з застосуванням зразків-циліндрів (у тому числі підготовлених з

кернів, відібраних з конструкції) передбачає установлення кореляції в разі використання зразків, для яких відношення висоти до діаметра (т.зв. «коефіцієнт гнучкості») відрізняється від стандартної величини 1 або 2. Проте виведення такої кореляції потребує певного досвіду використання *HBM* з певним масивом даних, який уможливлює статистичну обробку. Потрібно визнати, що в Україні на даний час такий досвід, а радше потрібний обсяг бази даних стосовно виготовлення та застосування матеріалів згідно з EN 14227 відсутній, тому доцільно розглядати всі підходи до проєктування та влаштування дорожнього одягу з застосуванням *HBM*, які потенційно спрямовані на вирішення питань підтвердження якості матеріалів та робіт за достатньо складних умов переходу на європейські практики в галузі дорожнього будівництва.

## Висновки

У статті запропоновано інтерпретацію дорожнього одягу як конструкції, що складається з несної основи дорожнього одягу – «*pavement foundation*» та власне конструкції дорожнього одягу – «*pavement construction*» і розглянуто загальні основні положення системи проєктування та влаштування дорожнього одягу на засадах такої концепції.

Згідно з проаналізованими першоджерелами зазначена концепція, або «концепція фундаменту», реалізується в проєктуванні інших видів споруд, зокрема споруд цивільного будівництва, і поряд з цим дозволяє ефективно реалізувати концепцію «*long-life pavement*» – проєктування та будівництва дорожнього одягу зі строком служби відповідно до 400 млн стандартних навантажень на вісь транспортного засобу.

У реалізації концепції «*long-life pavement*» незамінним дорожньо-будівельним матеріалом є суміші, укріплені гідравлічним в'яжучим, або *HBM*. Рівень адаптації системи національних стандартів щодо вимог, методів виготовлення зразків та випробування дорожньо-будівельних матеріалів, зокрема *HBM*, до вимог європейського рівня з урахуванням впровадження в Україні стандартів *ENTSO-E*, забезпечений фахівцями ДП «ДерждорНДІ», не поступається ступеню готовності до впровадження таких матеріалів у промислове виробництво, проте постають питання адаптації вітчизняних систем проєктування дорожнього одягу до цих вимог.

Система проєктування дорожнього одягу, загальні положення якої розглянуто в статті, зокрема з можливістю проєктування та влаштування конструкції дорожнього одягу «композитного типу», є однією з пропозицій пошуку відповідних проєктних рішень.

Особливої уваги потребує питання співвіднесення існуючих розрахункових схем проєктування дорожнього одягу з впроваджуваною стандартною класифікацією та розрахунковими характеристиками дорожньо-будівельних матеріалів, зокрема *HBM* – як це було окреслено в роботі [9].

Не виключено, що економічно доцільним рішенням, зі сприянням швидкому відновленню і розбудові вітчизняної дорожньої інфраструктури, буде імплементація, «імпорт» вибраних систем проєктування дорожнього одягу, особливо для потреб нового будівництва, за інтенсивної співпраці з іноземними колегами на всіх шаблях.

## Список літератури

1. Chaddock, B., Roberts, C. Road foundation design for major UK highways. Version 1.0. Published project report 127 (PPR 127, formally UPR IE 028/06). 2006. 46 p. URL: https://www.trl.co.uk/publications/ppr127 (дата звернення: 05.04.2023).

2. Design Manual for Roads and Bridges. Pavement design. CD 225: Design for new pavement foundation (formerly IAN 73/06, revision 1 (2009), HD 25/94). Revision 1. 2020. 49 p. URL: https://standardsforhighways.co.uk (дата звернення: 25.05.2023).

3. Design Manual for Roads and Bridges. Interim advice note 73/06 Revision 1 (2009) Design guidance for road pavement foundations. 2009. 62 p. URL: http://origin.standardsforhighways.co.uk/ha/standards/ians/pdfs/ian73.pdf (дата звернення: 30.05.2023).

4. ДСТУ ISO 80000-4:2016 Величини та одиниці. Частина 4. Механіка (ISO 80000-4:2006, IDT). Київ, 2016. 26 с. (Інформація та документація).

5. EN 14227-43:2003 Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 43: Test method for the determination of the modulus of elasticity of hydraulically bound mixtures. European Committee for Standardization. Rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels, 2003. 12 p. (Інформація та документація).

6. Design Manual for Roads and Bridges. Pavement design. CD 226, Version 0.1.0: Design for new pavement construction (formerly HD 26/06). 2021. 94 p. URL: https://standardsforhighways.co.uk (дата звернення: 25.05.2023).

7. Manual of contract documents for highway works. Volume 1. Specification for highway works. Series 800 Road pavements – Unbound, cement and other hydraulically bound mixtures. 2021. 42 p. URL: https://standardsforhighways.co.uk (дата звернення: 06.06.2023).

8. Manual of contract documents for highway works. Volume 1. Specification for highway works. Series 900 Road pavements – Bituminous bound materials. 2021. 89 p. URL: https://standardsforhighways.co.uk (дата звернення: 06.06.2023).

9. Терещенко Т.А., Ілляш С.І. Методи випробування сумішей, укріплених гідравлічним в'яжучим, відповідно до вимог європейських стандартів. *Автошляховик України*. 2022, № 3. С. 36–42.

## References

1. Chaddock B., Roberts C. Road foundation design for major UK highways. Version 1.0. Published project report 127 (PPR 127, formally UPR IE 028/06). 2006. 46 p. URL: https://www.trl.co.uk/publications/ppr127 (Last accessed 05.04.2023) [in English].

2. Design Manual for Roads and Bridges. Pavement design. CD 225: Design for new pavement foundation (formerly IAN 73/06, revision 1 (2009), HD 25/94). Revision 1. 2020. 49 p. URL: https://standardsforhighways.co.uk (Last accessed 25.05.2023 p.) [in English].

3. Design Manual for Roads and Bridges. Interim advice note 73/06 Revision 1 (2009) Design guidance for road pavement foundations. 2009. 62 p. URL: http://origin.standardsforhighways.co.uk/ha/standards/ians/pdfs/ian73.pdf (Last accessed 30.05.2023) [in English].

4. DSTU ISO 80000-4:2016 Velychyny ta odynytsi. Chastyna 4. Mekhanika (ISO 80000-4:2006, IDT) [State Standard of Ukraine (DSTU ISO 80000-4:2016) Quantities and units. Part 4 – Mechanics (ISO 80000-4:2006, IDT)]. Kyiv, 2016. 26 p. (Information and documentation) [in Ukrainian]

5. EN 14227-43:2003 Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 43: Test method for the determination of the modulus of elasticity of hydraulically bound mixtures. European Committee for Standardization. Rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels, 2003. 12 p. (Information and documentation) [in English].

6. Design Manual for Roads and Bridges. Pavement design. CD 226, Version 0.1.0: Design for new pavement construction (formerly HD 26/06). 2021. 94 p. URL: https://standardsforhighways.co.uk (Last accessed 25.05.2023) [in English].

7. Manual of contract documents for highway works. Volume 1. Specification for highway works. Series 800 Road pavements – Unbound, cement and other hydraulically bound mixtures. 2021. 42 p. URL: https://standardsforhighways.co.uk (дата останнього звернення 06.06.2023 р.) [in English].

8. Manual of contract documents for highway works. Volume 1. Specification for highway works. Series 900 Road pavements – Bituminous bound materials. 2021. 89 p. URL: https://standardsforhighways.co.uk (Last accessed 06.06.2023) [in English].

9. Tereshchenko T.A., Illiash S.I. Metody vyprobuvannia sumishei, ukriplenykh hidravlichnym

viazhuchym, vidpovidno do vymoh yevropeiskykh standartiv [Methods for testing hydraulically bound mixtures in accordance with the European norms]. *Avtoshliakhovyk Ukrainy*. 2022, № 3. P. 36–42 [in Ukrainian].

**Tetiana Tereshchenko**, *Ph. D., https://orcid.org/0000-0001-5206-9921*
*M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, Kyiv, Ukraine*

## APPLICATION OF THE «FOUNDATION CONCEPT» FOR THE ROAD PAVEMENT DESIGN AND CONSTRUCTION

Introduction. The introduction to the paper highlights the advantages of the «foundation concept» based on the interpretation of a pavement as the construction comprising the two main consecutively designed and constructed elements: the pavement foundation and the pavement construction itself. The realization of that concept allows the design and construction of so-called long-life pavements according up to 400 msa using hydraulically bound mixtures [2], or HBM.

Problem Statement. The issues of the paper concern the problems of implementation of the European standards related requirements into native systems for road pavements designing.

Purpose. The goal of the paper is to analyze the main provisions of the «foundation concept» and its possibilities in the application of the European standards requirements concerning road materials for the improvement of current systems for road pavements design.

Results. The classification of the road pavement foundations was reviewed which is based on the long-term confined foundation surface modulus (FSM) values and comprises four classes (FC): *FC*1 – *FSM* ≥ 50 MPa; *FC*2 – *FSM* ≥ 100 MPa; *FC*3 – *FSM* ≥ 200 MPa; *FC*4 – *FSM* ≥ 400 MPa. According such classification, the two methodologies for the pavement foundation design were briefly reviewed and compared: the restricted foundation design and the performance foundation design.

The elements of a road pavement foundation were considered: subgrade, capping layer and base layer, giving definitions of their functionality and parameters to be approved and/or checked during designing and construction stages. The peculiarities of the designing and construction each of the elements of the pavement foundation were stated.

Further, the pavement construction design was reviewed where this construction has been accepted as comprising the base course, binder course and surface course and is to be designed as a «composite type» or comprehending the bituminous materials only.

Conclusions. The level of adaptation of the system of national standards regarding the technical specifications, methods of specimen preparation and testing of road materials, especially HBM, to the requirements of the European level corresponds to the current degree of readiness for the industrial implementation and takes into consideration the implementation of *ENTSO-E* standards, however, questions arise about the adaptation of the native system of road pavement designing to such requirements.

The peculiar attention should be paid to the correlation of current chart schemes for road pavement construction design with the design characteristics of road materials approved in the European standards. The considered road pavement design system, in particular with the possibility of designing a «composite type» pavement construction, is one of the suggestions for finding appropriate constructive solutions.

***Keywords***: road pavement, road pavement foundation, road pavement construction, restricted foundation design, performance foundation design.

https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.185

**УДК 624.21**

**Редченко В. П.**[1], *д-р. техн. наук, https://orcid.org/ 0000-0001-5938-1467*
**Завгородній С. С.**[2], *https://orcid.org/0000-0003-1928-4544*

[1] *ПРИВАТНЕ СПЕЦІАЛІЗОВАНЕ ПІДПРИЄМСТВО МОСТ-СЕРВІС, м. Дніпро, Україна*
[2] *Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»), м. Київ, Україна*

# ДИНАМІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ МОСТІВ ІМПУЛЬСНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

***Анотація***

Вступ. У статті розглядається практика застосування методу динамічного випробування мостів, а саме модального контролю з використанням імпульсного навантаження. Показано можливості даного методу для визначення технічного стану прогонової будови мосту шляхом визначення її натурних характеристик: фактичної жорсткості та параметрів власних форм коливань.

Проблематика. Стаття присвячена проблемі практичної реалізації новітніх теоретичних напрацювань у сфері діагностики технічного стану автодорожніх мостів шляхом проведення натурних динамічних випробувань.

Мета. Обґрунтування ефективності динамічного імпульсного випробування як методу для оцінки технічного стану мостів.

Матеріали та методи. Матеріалом для написання статті є результати натурних випробувань криволінійної естакади з монолітного залізобетону, розташованої біля Києва. Використано наступні методи дослідження: аналіз інформації, математичне моделювання, а також загальні методи теоретичних досліджень.

Результати. Натурні параметри прогонової будови естакади, які були отримані за результатами динамічних випробувань дозволили оцінити вплив наявних дефектів на її інтегральну жорсткість та визначити її технічний стан.

Висновки. На практиці підтверджено, що застосування імпульсного навантаження при проведенні модального контролювання дозволяє встановити технічний стан прогонової будови складної геометрії та статичної схеми.

***Ключові слова*:** власні форми коливань, динамічне випробування, жорсткість, міст, модальне контролювання, модальні параметри, прогонова будова, технічний стан.

## Вступ

Процедура визначення технічного стану елементів мостів є важливим етапом у ході експлуатування споруди, адже від отриманої інформації буде залежати якість подальших прийнятих управлінських і проєктних рішень щодо призначення ремонтних заходів, рівень безпеки при експлуатуванні, безперебійність транспортного зв'язку та безаварійний строк експлуатації споруди. Найбільш розповсюдженою процедурою з визначення технічного стану елементів мостів є технічне обстеження, яке принципово полягає у проведенні заходів з виявлення наявних дефектів елементів споруди та визначення їх впливу на загальну роботу споруди. У певних випадках інформація отримана за результатами технічного обстеження є недостатньою для коректного призначення технічного стану споруди і в таких випадках виконавцями проводиться комплекс робіт з випробування елементів споруд.

Одним із видів випробування мостів є динамічне випробування прогонових будов в об'ємі модального контролю, яке виконується шляхом збудження та реєстрації вільних

коливань конструкції. Одним із варіантів збудження коливань є дія на конструкцію імпульсного навантаження. Теоретичні основи такого підходу обґрунтовані та викладені в ряді наукових робіт [1 – 4] і пізніше стали основою для ряду положень національного стандарту [6]. Практична сторона проведення випробувань з використанням імпульсного навантаження ще перебуває на стадії свого відпрацювання. Тут є ряд питань, які потребують перевірки практикою, а саме: як створити безпечну імпульсну дію на конструкцію, в яких точках прикладати імпульс, як далеко від точки прикладання навантаження є можливість реєструвати виражені коливання конструкції тощо. Планування та проведення ряду натурних робіт з випробування шляхом прикладання імпульсу і повинно дати відповіді на всі ці питання. У цій статті дається огляд натурних випробувань криволінійної естакади з монолітного залізобетону з використанням імпульсного навантаження.

## Основна частина

Випробування моста – комплекс заходів націлених на отримання кількісних показників дійсної роботи як моста в цілому, так і окремих його частин і елементів під дією навантаження. Випробування є регламентованою науково-технічною процедурою системи експлуатації, метою якої є отримання параметрів напружено-деформованого стану споруди шляхом натурного навантаження тимчасовими пробними силами. У цілому процес проведення випробування моста можна представити, як послідовність наступних дій:

– проведення технічного обстеження споруди з метою визначення фактичних параметрів і наявних дефектів;

– формування розрахункової моделі споруди опираючись на актуальну інформацію отриману в ході технічного обстеження;

– складання програми випробувань;

– проведення випробувань із реєстрацією відгуків елементів споруди на прикладене навантаження;

– виконання порівняльного аналізу отриманих фактичних відгуків елементів споруди з очікуваними (розрахунковими) відгуками;

– формування висновків.

Чинною нормативною документацією України [5 – 7] наразі передбачається два узагальнених види випробування мостів – статичні та динамічні випробування, які принципово відрізняються у способі прикладання навантаження на споруду. У даній статті описується методологія та результати виконання випробування прогонової будови з використанням імпульсного навантаження, що згідно з ДСТУ 8748 [7] відноситься до модального контролювання і є одним із видів динамічного випробування мостів.

Модальне контролювання полягає в оцінюванні технічного стану прогонової будови шляхом її збудження прикладанням навантаження та дослідженням власних форм коливань конструкції (модальні параметри). Значення модальних параметрів та їх зміни залежать від структурних характеристик конструкції та їх змін, тому можуть використовуватися для оцінки та моніторингу технічного стану конструкцій. Збудження коливань при модальному контролюванні досягають шляхом прикладання та зняття навантаження. Це може бути рухоме навантаження (транспорт, пішоходи), імпульсне навантаження чи будь-яке інше динамічне навантаження.

Практичне застосування імпульсного динамічного випробування прогонової будови в об’ємі модального контролювання методом збудження коливань імпульсним навантаженням було виконано співробітниками ДП «ДерждорНДІ» спільно з фахівцями ПРИВАТНОГО СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ПІДПРИЄМСТВА МОСТ-СЕРВІС у 2023 році на об’єкті незавершеного будівництва, а саме криволінійної естакади із монолітного залізобетону, яка розташована на одній із доріг загального користування державного значення біля міста Київ.

Будівництво даної споруди розпочалось ще у 2012 році та зупинилося на стадії спорудження монолітної плити прогонової будови. У 2020 році будівництво було поновлено. На момент проведення обстеження будівельні роботи не виконувались. Вид на споруду та її план-схема представлено на **рис. 1** та **рис. 2**.

***Рисунок 1*** – Фасад естакади

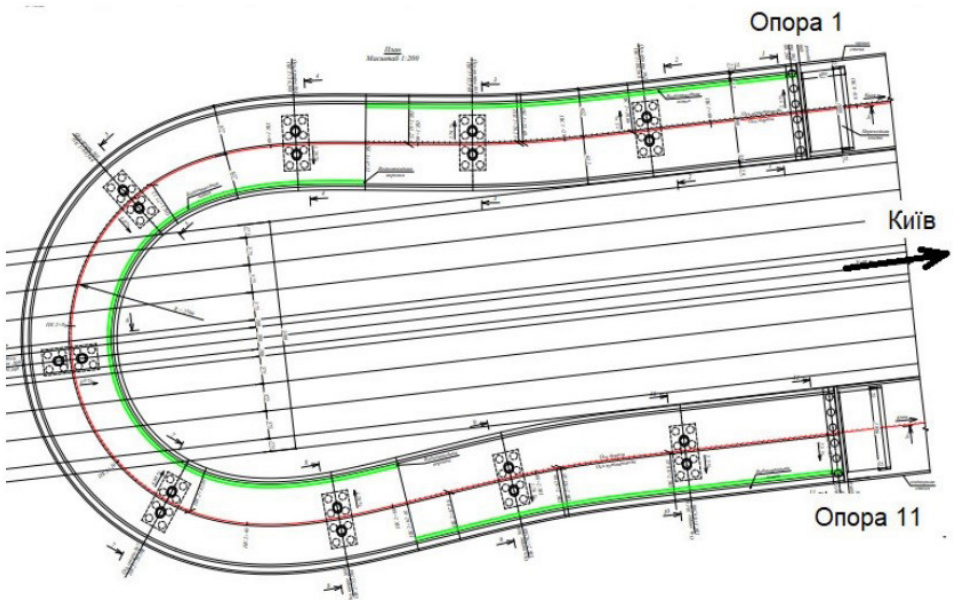



***Рисунок 2*** – План-схема естакади

Перед початком виконання робіт з коригування проєктної документації з продовження будівельних робіт необхідно було провести визначення поточного технічного стану елементів споруди. Дане завдання було виконано шляхом проведення технічного обстеження споруди та імпульсного випробування прогонової будови. Вибір імпульсного випробування був обумовлений ситуацією на об'єкті, яка не давала змоги провести більш розповсюджені статичні та динамічні випробування шляхом завантаження конструкції вантажівками або іншим вантажем через незавершені будівельні роботи на підходах та відсутності виїздів на споруду.

Досліджувана естакада має такі основні технічні параметри:

– довжина естакади – 235,0 м (повна довжина прогонової будови по осі споруди);
– габарит естакади – Г-10,90 + 1 × 0,75 м;
– геометрична схема естакади – 21,0 + 8 × 24,0 + 21,0 м (по осі споруди);
– прогонові будови – плита суцільного перерізу, проєкт індивідуальний;
– опора 1 та 11 – крайні масивні;
– опори 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 – проміжні стовпчасті монолітні.

Прогонова будова нерозрізна плитна суцільного перерізу. Виконана вона із монолітного бетону, який після твердіння обтиснуто натягом пучків напруженого армування. Прогонова будова запроєктована під проєктне тимчасове навантаження – А-15, НК-100.

Імпульсне навантаження на практиці реалізовувалося скиданням мішка з піском вагою 100 кг з висоти 1,0 м на проїзну частину з використанням ручної лебідки (**рис. 3**). За попередніми розрахунками енергії падіння такої маси повинно бути достатньо для збудження вільних коливань потрібної початкової амплітуди. Використання мішка з піском визначалося необхідністю збереження цілісності ділянки конструкції, на яку падає вантаж. Також це забезпечує непружний удар і відсутність відскоку та повторного удару. Залишалися сумніви щодо того, яка частина енергії падіння маси буде передаватися конструкції. Попередніми експериментами було встановлено, що найкращим варіантом є набивка загального мішка окремими меншими торбинками з піском (10 шт.), які міцно стягуються лямками загального мішка. Як показала практика даного випробування, після 40 скидань вантажу в одній точці пошкоджень конструкції (навіть поверхневих) не зафіксовано. Енергії, яка передавалася конструкції було цілком достатньо для збудження вільних коливань, які реєструвалися по всій довжині естакади протягом 20 с, що цілком достатньо для їх коректного аналізування.

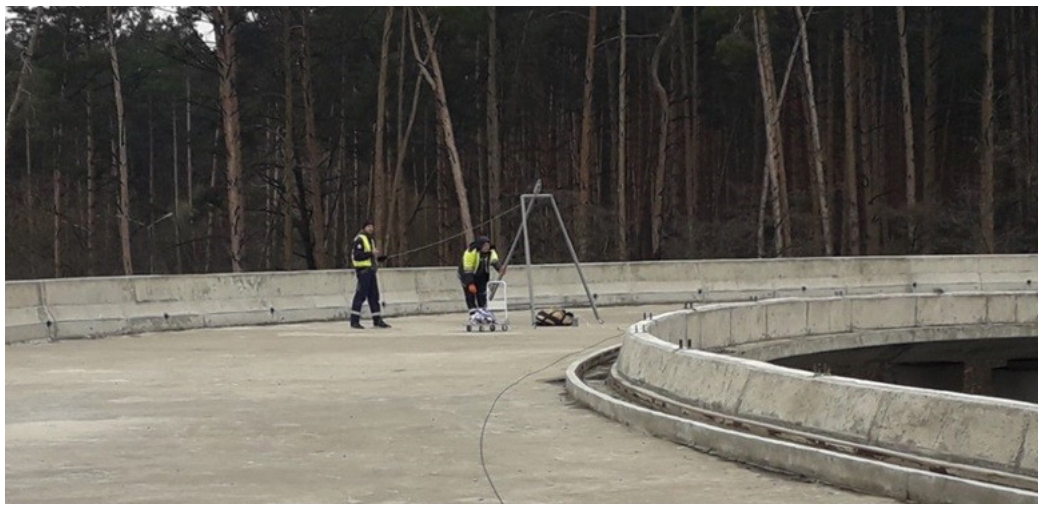


***Рисунок 3*** – Прикладання імпульсного навантаження шляхом скидання на проїзну частину мішка з піском в прогоні 5-6

Імпульсне навантаження прикладалося в прогоні 5-6. Реєстрація коливань прогонової будови (прискорення) виконувалася з використанням двох сейсмоприймачів ОСП-2МВ. Один з датчиків був реперним, а інший (робочий) переставляли в різні прогони (**рис. 4)**. Навантаження та реєстрацію коливань виконували по осі прогонової будови у середині прогонів. Загалом було реалізовано більше 30 експериментів.

***Рисунок 4*** – Сейсмоприймач ОСП-2МВ на проїзній частині у прогоні 6-7

Для виділення крутильних форм коливань навантаження прикладали в прогоні 5-6 біля зовнішнього бордюру, а робочий датчик встановлювали у середині прогону 5-6 біля внутрішнього бордюру.

Аналіз конструкції прогонової будови як динамічної системи виконували шляхом дослідження її розрахункової моделі та порівняння розрахункових і натурних даних. Розрахункова модель була побудована в програмному комплексі, який реалізує метод скінчених елементів. Розглядалося два варіанти розрахункової моделі: як криволінійної балки змодельованої стрижневими елементами та як плитної конструкції змодельованої плитними елементами. Стрижневу модель використовували для розрахунку зусиль від постійних і тимчасових навантажень у перерізах прогонової будови, плитну модель – для уточнення модальних характеристик прогонової будови як просторової системи. Загальний вид просторових моделей наведено на **рис. 5**.

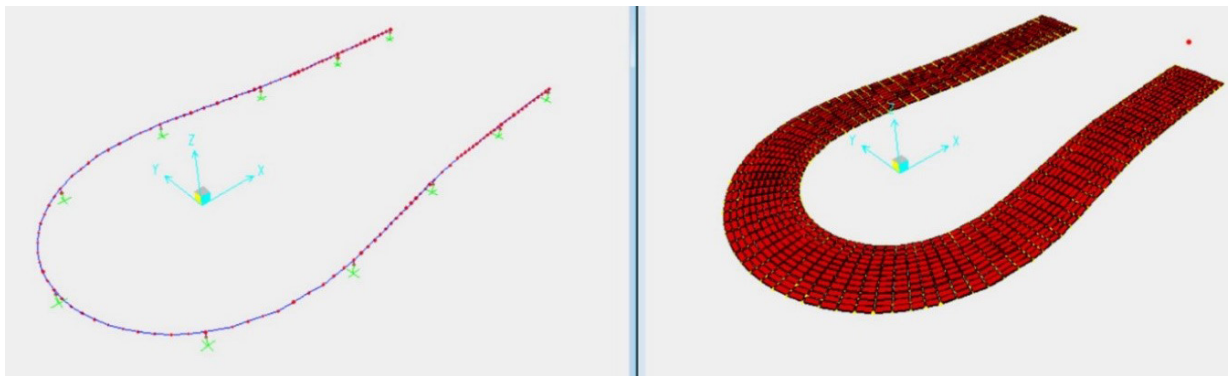


***Рисунок 5*** – Розрахункові моделі прогонової будови: із стрижневих елементів та з плитних елементів

Аналітичні дослідження були обмежені аналізом 3 перших власних форм у вертикальній площині та крутильних коливань. Вказані форми коливань представлені на **рис. 6**. Коливання у горизонтальній площині при випробуваннях не зареєстровані і тому не досліджувалися. Особливості геометрії та значень частот власних форм коливань визначаються конструктивними особливостями прогонової будови, як-то: криволінійність в плані, суцільний жорсткий плитний переріз, обпирання на пружні всебічно рухомі опорні частини на всіх опорах.

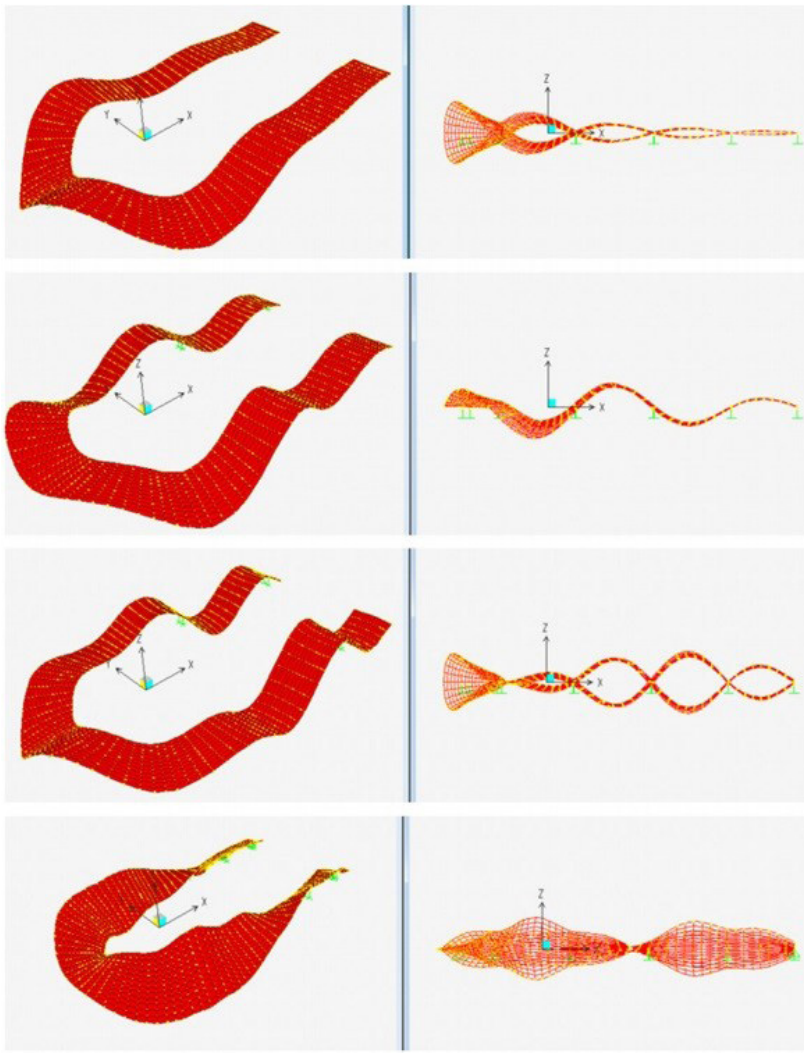


***Рисунок 6*** – Власні форми коливань, зверху вниз: 3 перші у вертикальній площині, перша крутильна

Нижчими власними формами коливань прогонової будови є коливання у горизонтальній площині. При збудженні вертикальним імпульсним навантаженням ці форми не виявлені. При визначенні напружень від постійних навантажень у стійці С1 опори 2 виявлені фонові поперечні коливання з частотою близько 1,6 Гц, які, очевидно, викликані коливанням прогонової будови у горизонтальній площині.

Коливання у вертикальній площині та крутильні коливання при збудженні вертикальним імпульсним навантаженням чітко виражені. Опрацювання зареєстрованих акселерограм виконували з використанням програмного комплексу «СпектрУМ» [4]. Для точного визначення значень частот власних форм коливань застосовані алгоритми складання спектрів та методу зміщення робочого вікна. Значення нормалізованих ординат власних форм коливань визначали за декількома експериментами для кожної точки прогонової будови.

Порівняння нормалізованих ординат власних форм коливань прогонової будови для розрахункової моделі та фактичних за результатами випробувань наведені у графічному вигляді на **рис. 7**. Наведені графіки натурних і розрахункових власних форм коливань досить подібні.

Найменші розбіжності має перша форма, при якій згинальні моменти над опорами мінімальні (сусідні прогони коливаються в протифазі). Для наступних форм коливань збільшується кількість надопорних ділянок прогонової будови, в яких діють згинальні моменти і розбіжності в графіках також збільшуються. Обстеженням були виявлені тріщини волосного розкриття по нижнім граням на приопорних ділянках. Саме ці тріщини є причиною нерівномірної жорсткості натурної прогонової будови – за її довжиною – над опорами вона дещо менша ніж у прогонах. За оцінками відхилення фактичних форм коливань від розрахункових для конструкції з рівномірною жорсткістю, зменшення жорсткості надопорних ділянок (зона тріщин) порівняно з ділянками в серединах прогонів є на рівні (15 – 20) %.

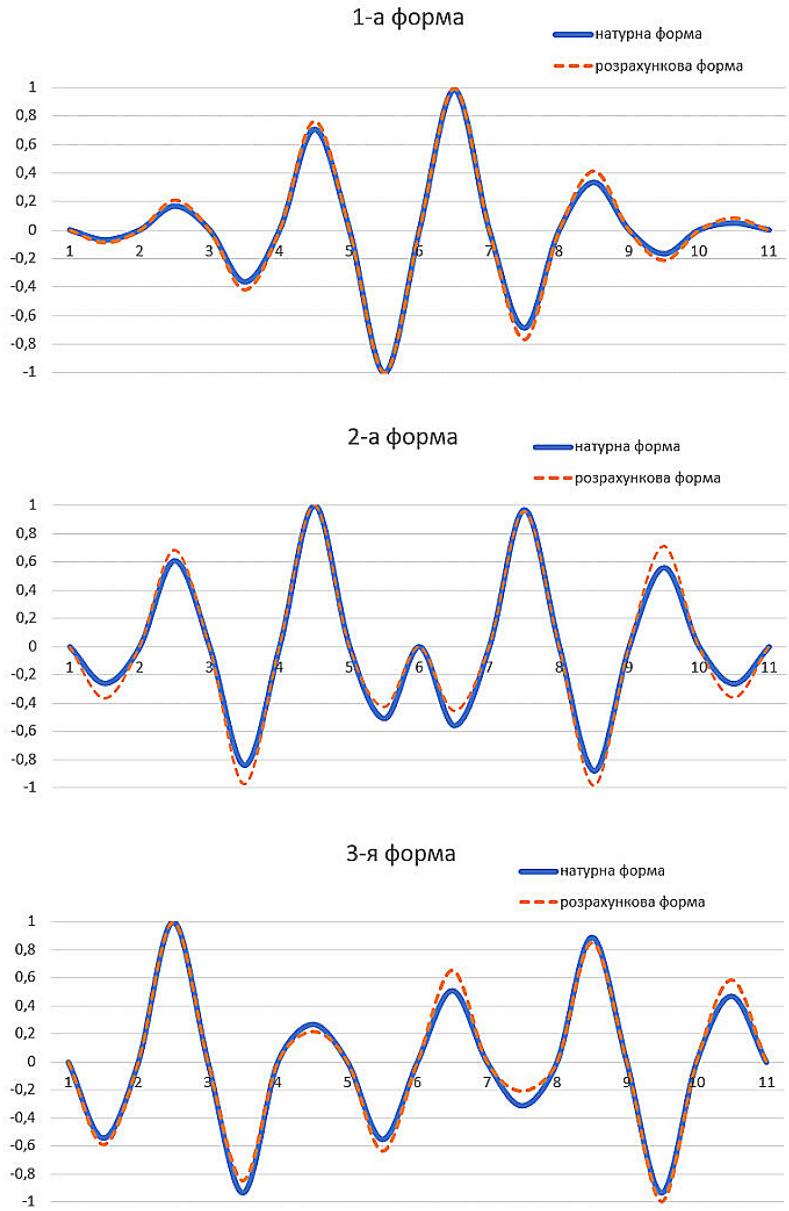



***Рисунок 7*** – Графічне представлення перших трьох власних форм коливань прогонової будови у вертикальній площині за їх нормалізованими ординатами: натурними та розрахунковими

Оцінку технічного стану прогонової будови виконували за двома критеріями: порівнянням фактичних і розрахункових модальних параметрів та порівнянням розрахункової і фактичної жорсткості перерізу прогонової будови.

Розрахункове значення жорсткості перерізу прогонової будови визначали за проєктними значеннями моменту інерції перерізу та фактичним модулем пружності бетону. За даними обстеження фактичний клас бетону В35, розрахункова жорсткість має значення:

– без врахування включення парапетної огорожі EIр = $1{,}60 \cdot 10^{13}$ кг·см$^2$;
– при включенні в роботу парапетної огорожі EIр = $1{,}98 \cdot 10^{13}$ кг·см$^2$.

Фактичне значення інтегральної жорсткості за результатами випробування визначали згідно з ДСТУ 8748 з використанням засобів Mathcad. Залежність між частотою власних коливань і відношенням інтегральних жорсткості та маси, визначали розрахунком балкової моделі прогонової будови. За виконаними розрахунками фактична інтегральна жорсткість прогонової будови має значення EIф = $1{,}935 \cdot 10^{13}$ кг·см$^2$. Якщо розрахунки виконати для моделі, у якої жорсткість надопорних перерізів балки менша на 20 % від жорсткості її перерізів у прогоні (як це є за порівнянням нормалізованих власних форм коливань), то фактична жорсткість перерізів у прогонах має значення EIф = $2{,}03 \cdot 10^{13}$ кг·см$^2$. Це значення перевищує розрахункове значення жорсткості перерізу з урахуванням включення в роботу парапетної огорожі, як це і повинно бути.

Таким чином, за результатами виконаного випробування визначено, що наявні тріщини впливають на жорсткість перерізу прогонової будови – зменшують її на рівні до 20 % порівняно з ділянками без тріщин. Жорсткість перерізу прогонової будови без тріщин перевищує розрахункову на 5 %. З урахуванням отриманих даних та інших результатів обстеження, технічний стан прогонової будови естакади оцінено як працездатний (3-й стан).

## Висновки

Проведення динамічних випробувань естакади з використанням імпульсного навантаження показали наявні можливості та перспективи даного способу прикладання навантаження при виконанні модального контролювання. Отримані за результатами випробувань дані дозволили оцінити вплив наявних дефектів на жорсткість прогонової будови естакади та аргументовано визначити її технічний стан. Під час робіт було відпрацьовано технологію прикладання імпульсного навантаження та перевірено принципові підходи щодо реєстрації вільних коливань прогонової будови складної геометрії та нерозрізної статичної схеми.

## Список літератури

1. Редченко В. П. Оцінка просторової роботи прогонової будови мосту шляхом аналізу її реакції на імпульсне навантаження. *Міжнар. наук.-практ. конф. «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика»: тези доп*. Дніпропетровськ: 2007. С. 59–60.

2. Редченко В. П. Визначення розподілу зусиль між балками прогонової будови за результатами її випробування імпульсним навантаженням. *Зб. наук. пр. Українського наук.-дослідн. та проектного інституту сталевих конструкції імені В. М. Шимановського*. Київ. 2009. Вип. 3. С. 165–171.

3. Редченко В. П. Ідентифікація дефектів споруд методами динамічної діагностики. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. Дн-ск: ПГАСА, 2010. Вып. 52. Ч. 2. С. 100–104.

4. Редченко В. П. Розвиток методів динамічних випробувань автодорожніх. *Вісник національного університету «Львівська політехніка»*. Львів, 2010. № 664. С. 164–171.

5. ДБН В.2.3-6-2009 Споруди транспорту. Мости та труби. Обстеження та випробування. Київ, 2009. 73 с. (Інформація та документація).

6. ДСТУ 9123:2021 Настанова з обстеження та випробування мостів і труб. Київ, 2022. 43 с. (Інформація та документація).

7. ДСТУ 8748:2017 Настанова щодо проведення динамічних випробувань автодорожніх мостів. Київ, 2018. 22 с. (Інформація та документація).

8. Посібник до ДСТУ 8748:2017 Настанова щодо проведення динамічних випробувань автодорожніх мостів. Київ, 2018. 227 с. (Інформація та документація).

## References

1. Redchenko V. P. Otsinka prostorovoi roboty prohonovoi budovy mostu shliakhom analizu yii reaktsii na impulsne navantazhennia [Evaluation of the spatial operation of the span structure of the bridge by analyzing and reacting to the impulse load]. *Mizhnar. nauk.-prakt. konf. «Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka»: tezy dop.* Dnipropetrovsk, 2007. P. 59–60 [in Ukrainian].

2. Redchenko V. P. Vyznachennia rozpodilu zusyl mizh balkamy prohonovoi budovy za rezultatamy yii vyprobuvannia impulsnym navantazhenniam (Determination of the distribution of forces between the beams of the span structure based on the results of impulse load tests). *Zb. nauk. pr. Ukrainskoho nauk.-doslidn. ta proektnoho instytutu stalevykh konstruktsii imeni V. M. Shymanovskoho*. K.: Stal, 2009. Iss. 3. P. 165–171 [in Ukrainian].

3. Redchenko V. P. Identyfikatsiia defektiv sporud metodamy dynamichnoi diahnostyky [Identification of building defects by methods of dynamic diagnostics]. *Stroytelstvo, materyalovedenye, mashynostroenye. Dn-sk*, 2010. Iss. 52. Part 2. P. 100–104 [in Ukrainian].

4. Redchenko V. P. Rozvytok metodiv dynamichnykh vyprobuvan avtodorozhnikh [Development of dynamic road test methods]. *Visnyk natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika».* Lviv, 2010. № 664. P. 164–171. [in Ukrainian].

5. DBN V.2.3-6:2009 Sporudy transportu. Mosty ta truby. Obstezhennia i vyprobuvannia [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].

6. DSTU 9123:2021 Nastanova z obstezhennia ta vyprobuvannia 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].

7. DSTU 8748:2017 Nastanova shchodo provedennia dynamichnykh vyprobuvan avtodorozhnikh mostiv [State Standard of Ukraine (DSTU 8748:2017) Guidelines for dynamic testing of road bridges]. Kyiv, 2018. 22 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

8. Posibnyk do DSTU 8748:2017 Nastanova shchodo provedennia dynamichnykh vyprobuvan avtodorozhnikh mostiv. [State Standard of Ukraine (Manual to DSTU 8748:2017) Manual to DSTU 8748:2017 Guidelines for dynamic testing of road bridges]. Kyiv, 2018. 227 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

**Vasyl Redchenko**[1], *D.Sc., https://orcid.org/ 0000-0001-5938-1467*
**Serhii Zavhorodnii**[2], *https://orcid.org/0000-0003-1928-4544*

[1] *MOST-SERVICE PRIVATE SPECIALIZED ENTERPRISE, Dnipro, Ukraine*
[2] *M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, Kyiv, Ukraine*

## DYNAMIC TESTING OF BRIDGES WITH IMPULSE LOADING

***Abstract***

Introduction. This article deals with the practice of applying the method of dynamic testing of bridges, namely, modal control using impulse loading. The possibilities of this method for determining the technical condition of a bridge span structure by determining its natural characteristics: actual stiffness and parameters of natural vibration forms are shown.

Problem Statement. The article is devoted to the problem of practical implementation of the latest theoretical developments in the field of diagnostics of the technical condition of road bridges by conducting full-scale dynamic tests.

Purpose. The main purpose of the article is to demonstrate the effectiveness of dynamic impulse testing as a method for assessing the technical condition of bridges. The method involves the excitation of vibrations of bridge structures by means of pulse loads, recording the response of the structure and analyzing the data obtained.

Materials and methods. The material for this article is the results of field tests of a curved overpass made of monolithic reinforced concrete located near Kyiv. The following research methods were used: information analysis, mathematical modeling, and general methods of theoretical research.

Results. The full-scale parameters of the overpass span structure obtained from the results of dynamic tests allowed us to assess the impact of existing defects on its integral stiffness and determine its technical condition.

Conclusions. In practice, it has been confirmed that the use of pulse loading allows obtaining good results in the modal control of a span structure of complex geometry and static scheme.

***Keywords*:** natural vibration forms, dynamic testing, stiffness, bridge, modal control, modal parameters, span structure, technical condition.

https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.195

**УДК 624.21**

**Зеленський Б. М.**, *https://orcid.org/0000-0002-9949-3209*

*Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»), м. Київ, Україна*

# ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МОСТІВ: ПЕРЕВАГИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

***Анотація***

Вступ. Ця стаття досліджує використання штучного інтелекту для моніторингу технічного стану мостів та прогнозування строку служби споруд. Вона окреслює актуальність цієї проблеми, проводить аналіз останніх досліджень і публікацій, визначає мету та завдання дослідження, а також описує основний матеріал, отримані результати, висновки та перспективи подальших досліджень.

Проблематика. Моніторинг технічного стану мостів та прогнозування їх строку служби вимагає досить багато часу для обробки отриманих результатів обстеження і визначення реального технічного стану елементів мосту.

Мета. Проаналізувати можливість застосування штучного інтелекту для моніторингу технічного стану мостів та прогнозування строку їх служби. Встановити достовірність отриманих даних порівняно із традиційними методами оцінки технічного стану.

Матеріали та методи. Для проведення аналізу можливості використання штучного інтелекту для моніторингу технічного стану мостів використовуються доступні ресурси та бази даних в мережі Інтернет. У якості початкових даних для проведення оцінки використовуються діючі на території України державні стандарти та нормативні документи.

Результати. Проведено аналіз закордонних джерел щодо наявного програмного забезпечення для впровадження штучного інтелекту в систему моніторингу технічного стану споруд.

Висновки. Впровадження програмного забезпечення на основі штучного інтелекту для моніторингу технічного стану мостів значно покращить і прискорить процес аналізування, оцінювання, підготовки висновків і рекомендацій щодо подальшої експлуатації транспортних споруд.

***Ключові слова:*** аналіз даних, датчики, моніторинг технічного стану, мости, прогнозування, штучний інтелект.

## Вступ

Мости є важливим елементом інфраструктури та вимагають постійного моніторингу для забезпечення безпеки та ефективності транспортних систем. Традиційні методи моніторингу технічного стану мостів мають свої обмеження, тому все більшу популярність набуває використання штучного інтелекту для цієї задачі.

Останні дослідження та публікації в галузі моніторингу мостів показують, що використання штучного інтелекту може значно поліпшити ефективність та точність процесу моніторингу. Дослідники використовують методи машинного навчання для аналізу даних, отриманих з різних датчиків та систем моніторингу. Це дозволяє автоматично виявляти аномалії, проводити класифікацію пошкоджень та передбачати строк служби мостових елементів.

Наукові дослідження та публікації, пов’язані із використанням штучного інтелекту в системі моніторингу технічного стану мостів, активно проводяться у наукових галузях, таких

як цивільна інженерія, комп'ютерна наука та штучний інтелект. Так у дослідженні «Application of Artificial Intelligence Techniques for Bridge Structural Health Monitoring» [1] автор розглядає застосування методів штучного інтелекту, зокрема нейронних мереж, генетичних алгоритмів та глибокого навчання, для моніторингу технічного стану мостів. Результати дослідження показують ефективність використання штучного інтелекту в оцінці стану мостових споруд. У роботі «Artificial intelligence applications in bridge engineering: State-of-the-art and future prospects» [2] досліджуються різні методи та алгоритми штучного інтелекту, які застосовуються для аналізу технічного стану мостів, автори обговорюють переваги та обмеження різних підходів і наголошують на необхідності подальших досліджень для вдосконалення систем моніторингу мостів.

У статті «Deep Learning-Based Crack Damage Detection Using Convolutional Neural Networks» [5] досліджується застосування глибокого навчання та нейронних мереж для виявлення тріщин та пошкоджень в мостових спорудах. Вони пропонують методологію, яка використовує згорткові нейронні мережі для автоматичного виявлення дефектів. У роботі "Bridge Defect Detection Using Unmanned Aerial Vehicles and Deep Learning Techniques» [6] розглядається використання безпілотних літальних апаратів (дронів) та методів глибокого навчання для виявлення дефектів на мостах. Вони досліджують різні архітектури нейронних мереж та алгоритми оброблення зображень для автоматичного виявлення дефектів на основі відеозаписів, зроблених дронами

Ці дослідження та публікації свідчать про активний інтерес до застосування штучного інтелекту в системі моніторингу технічного стану мостів. Вони демонструють потенціал штучного інтелекту для виявлення дефектів, прогнозування строку служби та оптимізації планування ремонтів. Проте, багато з цих досліджень ще потребують додаткових експериментів і практичних випробувань для підтвердження ефективності та надійності систем моніторингу, що використовують штучний інтелект.

Метою ж цього дослідження є визначення переваг і перспектив використання штучного інтелекту в системі моніторингу технічного стану мостів. Завданнями роботи є аналіз літературних джерел та проведення огляду останніх досліджень, опис основного матеріалу дослідження, представлення отриманих результатів, формулювання висновків і визначення перспектив подальших досліджень у цьому напрямку.

Застосування штучного інтелекту (ШІ) в системі моніторингу технічного стану мостів має великий потенціал і відкриває нові перспективи для підвищення ефективності та надійності інфраструктури. Розглянемо детальніше переваги та перспективи використання ШІ у системі моніторингу мостів, а також технічне забезпечення, методи та обладнання, що використовуються для збору даних та аналізу.

До переваг використання штучного інтелекту можна віднести:

– покращену точність і швидкість аналізу даних, так як ШІ може обробляти великі обсяги даних, отриманих з датчиків, відео або зображень, забезпечуючи точні результати. Алгоритми машинного навчання та глибокого навчання дозволяють автоматично виявляти аномалії та пошкодження, що прискорює процес оцінки стану мостів;

– раннє виявлення пошкоджень: ШІ може аналізувати велику кількість параметрів технічного стану мостів та виявляти навіть незначні відхилення, що дозволяє вчасно вживати заходів для запобігання подальшим пошкодженням елементів мостів і забезпечення, відповідно, безпеки;

– прогнозування строку служби, так як ШІ може використовувати історичні дані про мостові споруди, а також враховувати вплив зовнішніх чинників, щоб передбачити строк служби мостів та оптимальний час для ремонту або заміни елементів;

– наявність економічної ефективності використання ШІ через зменшення витрат на

проведення обстежень та оцінку технічного стану мостів. Автоматизований процес збору та аналізу даних дозволяє знизити людський фактор, витрати на робочу силу та час, а також забезпечити ефективніше планування обслуговування та ремонту.

Слід зазначити, що для реалізації системи моніторингу технічного стану мостів з використанням штучного інтелекту необхідне певне технічне забезпечення. Це і датчики різних типів (датчики вібрації, температури, деформації тощо), використання яких дозволяє збирати реальні дані про стан мостових споруд. Ці дані передаються через IoT-мережу для подальшого аналізу та обробки. Це і дрони, з високоякісними камерами та відео, та візуальне обстеження, що забезпечують швидке та детальне обстеження мостів. Візуальні дані, отримані з дронів або за допомогою роботів, можуть бути використані для виявлення пошкоджень, аналізу структурних елементів та оцінки загального стану моста. Це і системи збору та зберігання даних, такі як централізовані сервери або хмарні платформи, які зберігають великий обсягу даних, отриманих з різних джерел. Всі ці перераховані елементи дозволяють зберігати, категоризувати та доступно організовувати дані для подальшого аналізу. Крім того необхідно розробити та впровадити алгоритми машинного навчання, глибокого навчання та аналізу даних є ключовими елементами для використання штучного інтелекту у системі моніторингу технічного стану мостів. Вони дозволяють обробляти, аналізувати та виявляти закономірності в отриманих даних, що забезпечує точність та ефективність аналізу. Не слід забувати, що для передачі даних між датчиками, системами збору даних та аналітичними модулями необхідна надійна і швидка інфраструктура зв'язку, така як бездротові мережі або мережі зв'язку через кабель.

Також для проведення обстеження транспортних споруд із високою точністю отриманих даних можна використовувати 3D-сканери у системі моніторингу (**рис. 1** та **рис. 2**). Це має свої переваги і обмеження, а саме:

1. Точність збору даних: 3D-сканери здатні зібрати детальну і точну інформацію про геометричну форму мостових споруд. Вони здатні виявити навіть незначні зміни у геометрії, що може свідчити про пошкодження або деформації.

2. Висока швидкість сканування: 3D-сканери можуть провести повне сканування моста відносно швидко. Це дозволяє збирати великий обсяг даних у короткі строки, що забезпечує більш оперативний моніторинг технічного стану мостів.

3. Неінвазивний метод: використання 3D-сканерів не потребує фізичного контакту з мостовою спорудою, що дозволяє проводити обстеження без порушення її цілісності. Це важливо для мостів, які знаходяться в експлуатації, оскільки їх можна оглянути без необхідності припинення дорожнього руху або впливу на потік транспорту.

4. Створення точного 3D-моделювання: 3D-сканери дозволяють створювати точні 3D-моделі мостових споруд, що можуть бути використані для подальшого аналізування та визначення технічного стану. Це допомагає виявляти складніші дефекти та структурні проблеми.

До обмежень використання 3D-сканерів слід віднести високі витрати (3D-сканери є дорогими технологічними пристроями і їх використання може вимагати значних фінансових витрат, а це може бути обмеженням для впровадження такої системи моніторингу великої кількості мостів), складність обробки даних через їх великий обсяг та наявності великої кількості точок і залежність від умов сканування (необхідні сприятливі умови освітлення та обмеження відблисків. Використання їх у поганих погодних умовах або на великій відстані від моста може вплинути на якість отриманих даних).

У великій мірі доцільність використання 3D-сканерів залежить від конкретних умов і масштабу проєкту. Якщо у проєкті передбачено обстеження та моніторинг великої кількості мостів з високою точністю та деталізацією, то використання 3D-сканерів може бути ефективним рішенням. Однак, варто враховувати економічні та технічні обмеження, щоб забезпечити оптимальне використання ресурсів.

***Рисунок 1*** – Фото шляхопроводу перед скануванням

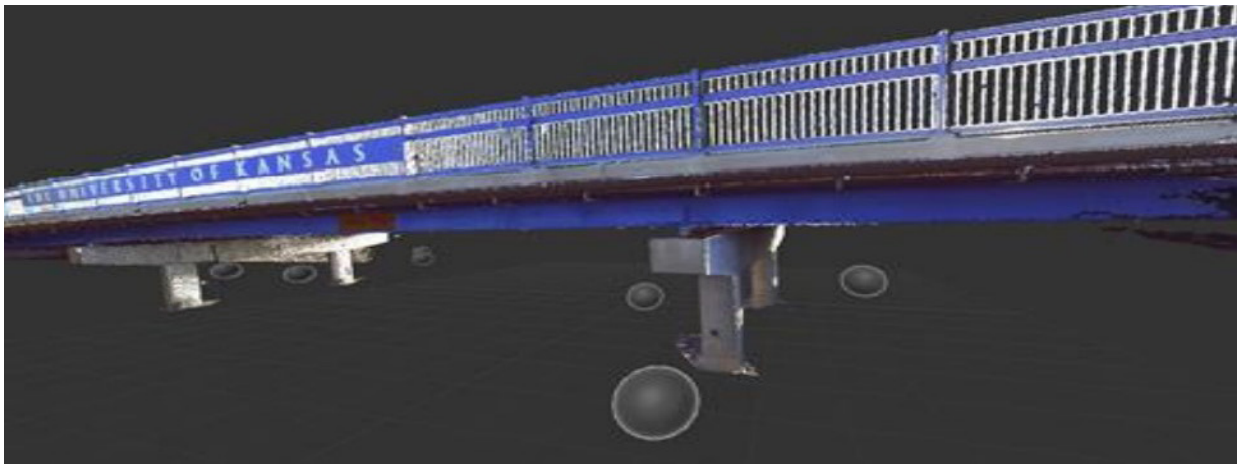



***Рисунок 2*** – 3D модель шляхопроводу після сканування

Для визначення технічного стану мостових елементів існують різні методи та критерії оцінки, які можуть бути використані в системі моніторингу з використанням штучного інтелекту. Ось кілька прикладів:

1. Аналіз вібраційних характеристик: вимірювання вібраційних характеристик, таких як частоти резонансу, амплітуди коливань тощо, може дати інформацію про структурну цілісність мостових елементів. Застосування штучного інтелекту для аналізу цих даних дозволяє виявляти аномальні коливання та зміни в структурі.

2. Моніторинг температурних змін: зміни температури можуть впливати на розширення та скорочення мостових елементів. Збір температурних даних та їх аналіз дозволяють виявляти потенційні пошкодження або деформації, пов'язані з температурними впливами.

3. Візуальний аналіз: використання відеоданних з дронів або інших джерел може допомогти виявити візуальні пошкодження, такі як тріщини, корозія або відсутність арматури. Алгоритми ШІ можуть автоматично аналізувати зображення та виявляти ці пошкодження, допомагаючи вчасно реагувати на них.

4. Аналіз структурних характеристик: вимірювання параметрів, таких як прогин, вигин, кут нахилу тощо, може дати інформацію про структурну цілісність моста. Застосування

ШІ дозволяє виявляти небезпечні або неконсистентні характеристики, що потребують уваги та ремонту.

5. Оцінка навантажень: аналіз навантажень на мостові конструкції, таких як вантажні потоки транспорту тощо, дозволяє визначити межі навантажень, що можуть впливати на структурну цілісність моста. Застосування ШІ допомагає відстежувати та аналізувати ці навантаження в режимі реального часу.

Модель обробки отриманих даних штучним інтелектом для моніторингу технічного стану мостів можна представити за допомогою семи елементів, наведених нижче:

1. Збір даних здійснюється за допомогою різних приладів, таких як сенсори, 3D-сканери, відеокамери тощо. Ці прилади фіксують інформацію про різні аспекти мостів, такі як вібрації, температура, відхилення, тріщини тощо (**рис. 3**).

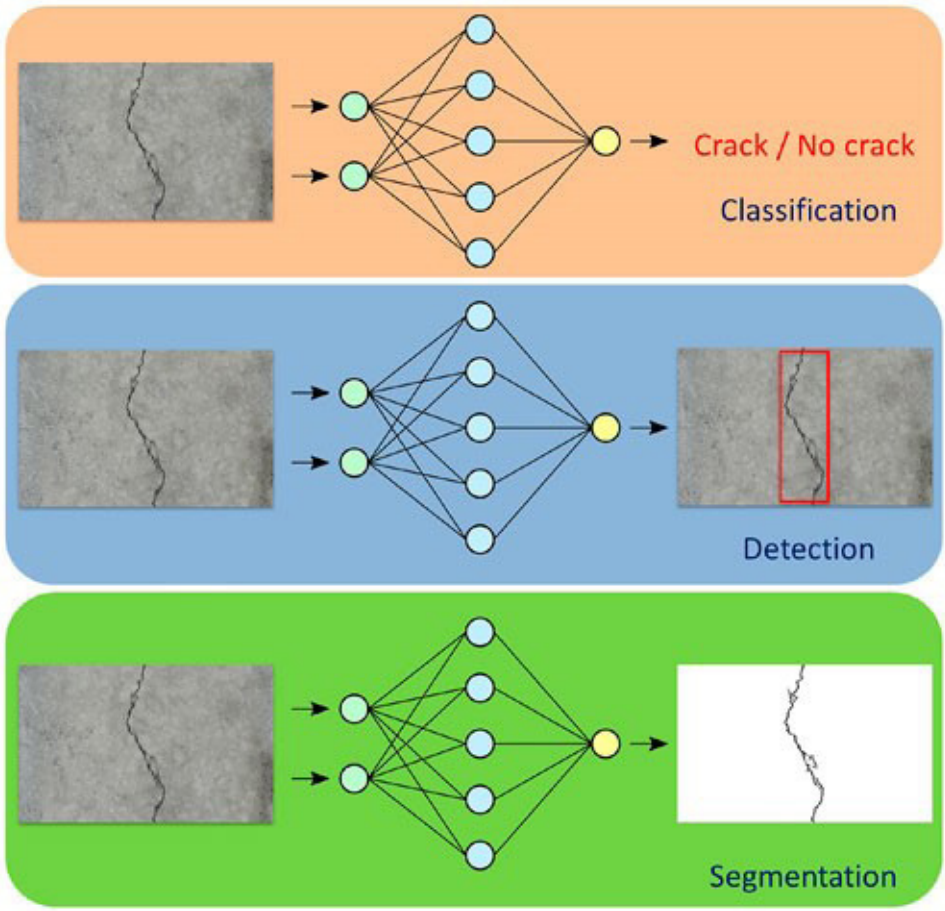



***Рисунок 3*** – Принцип виявлення тріщини на поверхні бетону

2. Попередня обробка даних: отримані дані піддаються попередній обробці, яка включає фільтрацію шуму, видалення артефактів та нормалізацію даних. Це допомагає покращити якість даних і забезпечити їх однорідність.

3. Виділення ознак: застосовуються методи машинного навчання для виділення ознак з отриманих даних. Це можуть бути характеристики, які вказують на можливі проблеми або аномалії, наприклад, амплітуда вібрацій, геометричні параметри, температурні відхилення тощо.

4. Побудова моделі: за допомогою отриманих ознак будується модель штучного інтелекту, така як нейронна мережа або інший алгоритм машинного навчання. Модель навчається на наявних даних, де відомі технічний стан мостів, і використовується для прогнозування стану мостів на основі нових отриманих даних.

5. Визначення стану мостів: модель використовується для визначення технічного стану мостів на основі вхідних даних. Вона може проводити класифікацію, де оцінюються ступінь пошкоджень або прогнозувати строк служби елементів мостів. Результати можуть бути представлені у вигляді числових оцінок, візуалізацій або рекомендацій щодо подальшого обстеження чи ремонту.

6. Моніторинг та аналіз: отримані результати використовуються для моніторингу технічного стану мостів і проведення аналізу. Система може автоматично спостерігати за змінами в стані мостів, виявляти нові проблеми або передбачати необхідність ремонту.

7. Постійне навчання: модель регулярно оновлюється шляхом навчання на нових даних, що дозволяє їй покращувати точність та адаптуватися до змінних умов технічного стану мостів.

Застосування штучного інтелекту в системі моніторингу технічного стану мостів на дорогах України є економічно доцільним і вигідним. Це, перш за все, зниження витрат, оскільки використання штучного інтелекту дозволяє автоматизувати процес збору та аналізу даних про технічний стан мостів, що знижує витрати на людські ресурси та час. Виявлення пошкоджень і встановлення відповідних заходів ремонту може бути зроблено швидше й ефективніше. Крім того відбувається попередження аварійних ситуацій. Вчасне виявлення пошкоджень і посилення моніторингу технічного стану мостів допомагає попереджати аварійні ситуації й уникати непередбачених витрат на ремонт або відновлення мостових споруд.

Штучний інтелект може допомогти прогнозувати строк служби мостів та розробляти оптимальні плани ремонту та заміни елементів, що дозволяє ефективно використовувати ресурси та забезпечувати безпеку дорожнього руху. Як наслідок відбувається оптимізація планування ремонтів. Аналіз даних про технічний стан мостів за допомогою штучного інтелекту дозволяє розробляти стратегії та плани ремонтів, що мінімізують перерви у дорожньому русі та витрати на ремонтні роботи.

Однак, штучний інтелект має певні недоліки, які виникають при використанні в системі моніторингу технічного стану мостів. Розглянемо деякі з них:

1. Залежність від якості та обсягу даних. Штучний інтелект вимагає великої кількості якісних даних для тренування моделей і забезпечення точності результатів. У разі обмежених даних або якщо дані неправильно представлені, можуть виникнути проблеми з точністю та достовірністю оцінок технічного стану мостів.

2. Необхідність постійного навчання. Штучний інтелект потребує постійного навчання та оновлення моделей для підтримки актуальності та адаптації до змінних умов технічного стану мостів. Це може бути затратним процесом з точки зору часу, ресурсів та експертного знання.

3. Обмежена прозорість рішень. Деякі моделі штучного інтелекту, зокрема нейронні мережі, можуть бути складними для інтерпретації та пояснення. Вони діють на основі внутрішніх патернів і залежностей, які можуть бути складними для визначення людиною. Це може створювати певну незрозумілість щодо причин виявлених проблем або оцінок технічного стану.

4. Відсутність контекстуального розуміння. Штучний інтелект може виявляти аномалії та дефекти на основі внутрішніх патернів, але не завжди володіє контекстуальним розумінням. Наприклад, він може виявити тріщину, але не завжди зможе визначити її походження або потенційні наслідки. Це може вимагати людського експертного втручання для повного аналізу та оцінки ситуації.

5. Вплив зовнішніх факторів. Штучний інтелект може бути чутливим до змінних зовнішніх

чинників, таких як погода, освітлення, шум, що може впливати на якість збору даних і точність результатів. Це може вимагати додаткових заходів для компенсації та стабілізації отриманих даних.

Усі ці недоліки варто враховувати при використанні штучного інтелекту в системі моніторингу технічного стану мостів. Важливо забезпечити баланс між автоматизацією та людським експертним втручанням, а також проводити регулярне перевіряння та оцінювання точності й ефективності системи.

## Висновок

Використання штучного інтелекту в системі моніторингу технічного стану мостів є доцільним і має багато переваг. Воно дозволяє покращити ефективність моніторингу, забезпечити точність оцінки стану мостових споруд, передбачити можливі пошкодження та покращити планування обслуговування та ремонту.

Подальші дослідження в цьому напрямку включають розроблення нових алгоритмів для аналізування даних, використання більш розширених технологій збирання даних, розроблення систем прогнозування, а також врахування впливу зовнішніх чинників, зокрема погодно-кліматичних.

## Список літератури

1. Smith, J., & Johnson, A. Artificial Intelligence for Bridge Monitoring: A Review. J*ournal of Bridge Engineering.* 25(2), 2020. URL: https://www.academia.edu/17372527/Artificial_Intelligence_in_Bridge_Engineering (дата звернення: 14.08.2023).

2. Wang, J., Liu, Y., & Zhou, Z. A Review on Artificial Intelligence Applications in Bridge Inspection and Monitoring. *Frontiers in Built Environment*. №7. Japan, 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/363407597_Review_of_artificial_intelligence-based_bridge_damage_detection (дата звернення: 14.08.2023).

3. Li X., Chen G., & Tang W. An Intelligent Bridge Inspection and Evaluation System Based on Unmanned Aerial Vehicle and Machine Learning. *IEEE Access*. №7. Japan, 2021. URL: https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1475921720932384 (дата звернення: 14.08.2023).

4. Wang, Y., Li, Z., & Ou, J. Intelligent Bridge Damage Identification Using Convolutional Neural Networks and Fiber Bragg Grating Sensors. *Sensors*. 20(13). Japan, 2021. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/23/13/6152 (дата звернення: 14.08.2023).

5. Cha, Young-Jin, Wooram Choi, and Oral Büyüköztürk. Deep learning-based crack damage detection using convolutional neural networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 32.5 (2017). P. 361–378. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/mice.12263 (дата звернення: 14.08.2023).

6. Srinivasan R., & Keerthipala W. H. A Comparative Study on Machine Learning Approaches for Structural Damage Detection Using Sensor Data. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 35(1). London, 2021. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/12/21/10754 (дата звернення: 14.08.2023).

## References

1. Smith, J., & Johnson, A. Artificial Intelligence for Bridge Monitoring: A Review. J*ournal of Bridge Engineering.* 25(2), 2020. URL: https://www.academia.edu/17372527/Artificial_Intelligence_in_Bridge_Engineering (Last accessed: 14.08.2023) [in English].

2. Wang, J., Liu, Y., & Zhou, Z. A Review on Artificial Intelligence Applications in Bridge Inspection and Monitoring. *Frontiers in Built Environment*. №7. Japan, 2021. URL: https://www.

researchgate.net/publication/363407597_Review_of_artificial_intelligence-based_bridge_damage_detection (Last accessed: 14.08.2023) [in English].

3. Li X., Chen G., & Tang W. An Intelligent Bridge Inspection and Evaluation System Based on Unmanned Aerial Vehicle and Machine Learning. *IEEE Access*. №7. Japan, 2021. URL: https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1475921720932384 (Last accessed: 14.08.2023) [in English].

4. Wang, Y., Li, Z., & Ou, J. Intelligent Bridge Damage Identification Using Convolutional Neural Networks and Fiber Bragg Grating Sensors. *Sensors*. 20(13). Japan, 2021. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/23/13/6152 (Last accessed: 14.08.2023) [in English].

5. Cha, Young-Jin, Wooram Choi, and Oral Büyüköztürk. Deep learning-based crack damage detection using convolutional neural networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 32.5 (2017). P. 361–378. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/mice.12263 (Last accessed: 14.08.2023) [in English].

6. Srinivasan R., & Keerthipala W. H. A Comparative Study on Machine Learning Approaches for Structural Damage Detection Using Sensor Data. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 35(1). London, 2021. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/12/21/10754 (Last accessed: 14.08.2023) [in English].

**Bohdan Zelenskyi**, *https://orcid.org/0000-0002-9949-3209*

*M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, Kyiv, Ukraine*

## APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF BRIDGES: ADVANTAGES AND PROSPECTS

***Abstract***

Introduction. This article explores the use of artificial intelligence (AI) to monitor the technical condition of bridges and predict the service life of structures. It outlines the relevance of this issue, analyzes recent research and publications, defines the purpose and objectives of the study, and describes the main material, results, conclusions, and prospects for further research.

Problem Statement. Monitoring the technical condition of bridges and predicting their service life requires a lot of time to process the results of the survey and determine the actual technical condition of the bridge elements.

Purpose. To analyze the possibility of using artificial intelligence to monitor the technical condition of bridges and predict their service life. To establish the reliability of the data obtained in comparison with traditional methods of assessing the technical condition.

Materials and methods. To analyze the possibility of using artificial intelligence to monitor the technical condition of bridges, we use available resources and databases on the Internet. State standards and regulations in force in Ukraine are used as initial data for the assessment.

Results. The analysis of foreign sources on the available software for the implementation of artificial intelligence in the system of monitoring the technical condition of structures was carried out.

Conclusions. The introduction of artificial intelligence-based software for monitoring the technical condition of bridges will significantly improve and accelerate the process of analysis, evaluation, preparation of conclusions and recommendations for the further operation of transport facilities.

***Keywords:*** data analysis, sensors, technical condition monitoring, bridges, forecasting, artificial intelligence.

https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.203

**УДК 625.7/8**

**Онищенко А. М.**, *д-р техн. наук, проф., https://orcid.org/0000-0002-1040-4530*
**Гаркуша М. В.**, *канд. техн. наук, https://orcid.org/0000-0002-5388-0561*
**Клименко М. І.**, *канд. техн. наук, https://orcid.org/0000-0002-7967-5881*
**Гаркуша І. Ю.**, *https://orcid.org/0009-0006-9765-3711*
*Національний транспортний університет (НТУ), м. Київ, Україна*

# ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД ТРАНСПОРТНОГО БУДІВНИЦТВА З ДОРОЖНІХ ВОДОПРОПУСКНИХ ТРУБ МЕТОДОМ ГІЛЬЗУВАННЯ

***Анотація***

Вступ. Гідротехнічні споруди транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб використовуються для пропускання води під проїзними частинами та іншими спорудами. Одним з способів збільшення довговічності та надійності дорожніх водопропускних труб є виконання ремонту методом гільзування. Запропонований метод передбачає влаштування нової дорожньої водопропускної труби у середині дефектної дорожньої водопропускної труби, а міжтрубний простір заповнюється будівельним розчином. Від розподілу суміші в подальшому буде визначатися ефективність застосовуваного методу відновлення та надійність відремонтованої споруди. Актуальність роботи полягає у визначенні ефективності заповнення будівельними розчинами міжтрубного простору.

Проблематика. Із літературного аналізу встановлено, що дорожні водопропускні труби перебувають у складних умовах експлуатації, що є причиною їх передчасного руйнування. Існуючі методи ремонту не забезпечують необхідної якості відновленої споруди, а існуючі світові підходи не в повній мірі вивчені.

Мета. Полягає в уточненні технології відновлення гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб методом гільзування, що забезпечує високу надійність та довговічність роботи конструкції у важких експлуатаційних умовах.

Результати. Проведено дослідження та аналіз технології відновлення гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб методом гільзування

Висновки. В роботі проведено аналіз існуючих пошкоджень дорожніх водопропускних труб та запропоновано відновлення за рахунок методом гільзування. Встановлено основні реологічні властивості будівельних розчинів від яких залежать фізико-механічні характеристики відновленої дорожньої водопропускної труби. Проведено аналіз реологічних властивостей будівельних розчинів. Від параметрів структури розчину та геометричних параметрів кільцевого зазору залежить вибір та характеристики робочого обладнання для подачі будівельного розчину. Виконані дослідження дозволяють зробити висновок про необхідність розроблення методики відновлення дорожніх водопропускних труб методом гільзування.

***Ключові слова:*** автомобільні дороги, гідротехнічні споруди, довговічність, дорожні водопропускні труби, надійність, ремонт.

**Актуальність роботи**

Гідротехнічні споруди транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб є наймасовішими штучними спорудами та одними з найважливіших конструктивних елементів автомобільних і залізних доріг. Від їх належного функціонування залежить загальний стан дороги і забезпечення безпечного руху по ній транспорту [1].

В Україні незадовільний або аварійний стан мають понад 40 % всіх дорожніх водопропускних труб. На водотоках експлуатується велика кількість труб, багато з яких через свій фізичний стан, за водопропускної здатності або з інших причин потребують реконструкції (**рис. 1**, *а*) аж до перебудови на нові споруди [1]. Крім того, виникає розмивання нижнього б'єфу водопропускної труби [2] (**рис. 1**, *б*), зміщення секцій, утворення тріщин в конструкції [3], руйнування за рахунок абразивного впливу (**рис. 1**, *в*), окислення металу (корозії) (**рис. 1**, *д*), нанесення ґрунту та каменю, недостатньої міцності гофр дорожніх водопропускальних труб з металевих гофрованих конструкцій [3 – 6].

*а*) конструктивні недоліки водопропускної труби, пропускання води через шви;
*б*) розмивання нижнього б'єфу водопропускної труби;
*в*) руйнування стінок водопропускної труби від абразивного впливу;
*д*) руйнування стінок водопропускної труби від корозії.

***Рисунок 1*** – Типові пошкодження дорожніх водопропускних труб

Переважна більшість водопропускних труб у всьому світі була побудована в 50-х і 60-х роках, тому дорожні організації мають справу з великим запасом старих водопропускних труб [7].

Вивчення питання довговічності гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб наведено в багатьох роботах [8, 9 та інші], в проведених дослідженнях встановлено фактори, що впливають на їх довговічність та запропоновані методики розрахунку довговічності [10 – 12].

Одним з способів збільшення довговічності та надійності дорожніх водопропускних труб є виконання ремонту методом гільзування. Даний метод відновлення дорожніх водопропускних труб є не новим, однак від постійно вдосконалюється та розвивається [2].

Так, наприклад, у 1983-1984 роках Департамент транспорту Оклахоми (США) замінив понад 40 корозійних сталей труби методом гільзування [13]. У 2007 році Міністерство транспорту штату Делавер виявило недоліки залізобетонної труба під великою магістраллю у Вілмінгтоні, штат Делавер, без зупинки руху автомобілів було виконано ремонтні роботи, що дало можливість заощадити майже 1 000 000 доларів США порівняно з виконанням робіт по її заміні [14].

**Відокремлення невирішених раніше частин загальної проблеми**

Ремонт водопропускних труб автомобільних доріг повинен бути проведений у відповідності з проєктом, вимогами технічних регламентів та нормативних документів П-Г.1-218-113 [15], ДБН В.2.3-22 [16], для забезпечення захисту земляного полотна від негативного впливу пропускаючих через труби витрат води. Згідно з П-Г.1-218-113 [15] осідання або зсув ланок труб, дефектні шви зашпаровують, а лоток труби вирівнюють бетоном, що недає ефективної експлуатації гідротехнічної споруди. Варто зазначити, що нормативна база незабезпечує надання існуючих підходів з ремонту дорожніх водопропускних труб.

Навіть в роботі [17] не наведено особливостей проведення ремонтних робіт, запропоновані характеристики ремонтних розчинів мають складність застосування та не мають достатньої обгрунтованості.

Варто зазначити, що найбільш застосовуваним матеріалом, для заповнення міжтрубного простору є розчин сухої будівельної суміші (СБС) або дрібнозерниста самоущільнювальна бетонна суміш (Self-Compacting Concrete – SCC) [18, 19], особливістю яких є здатність ущільнюватися без механічного впливу, заповнювати форми під дією власної ваги без вібрації і сегрегації при самочинному виділенні повітря, що передбачає максимальне уникнення трудомістких, енергозатратних операцій їх вкладання та ущільнення, покращення санітарно-гігієнічних умов праці, а також забезпечення високої якості поверхні конструкції після розпалубки [20].

Від розподілу суміші в подальшому буде визначатися ефективність застосовуваного методу відновлення та надійність відремонтованої споруди.

Регулювання реологічних властивостей досягається за допомогою пластифікаторів та суперпластифікаторів, які розріджують розчинні суміші без підвищення вмісту у них води, що не приводить до зменшення міцності твердого розчину [21].

Кількісна характеристика реологічних властивостей є важливим показником для стійкості розчину [22]:

– працездатність свіжого розчину формує одну з основ проєктування бетонної суміші;
– текучість свіжого розчину впливає на якість затверділих властивостей бетону;
– на влаштування розчину, яке включає транспортування, перекачування, лиття та вібрацію, впливає пластична в’язкість і текучість розчину.

Ці приклади демонструють необхідність розроблення кількісної характеристики реологічних властивостей розчину, які можна вводити при проєктуванні та контролі розчинів.

Результати досліджень [23, 24] підтверджують, що одержання високих реологічних

характеристик розчину та високої міцності затверділого розчину (бетону) можливе при зменшенні розміру крупного заповнювача, що забезпечить найвищу міцність на одиницю маси цементу. Важливим фактором забезпечення стабільних характеристик бетону є щільність упакування заповнювачів.

### Особливості виконання відновлювальних робіт

Виконання ремонтних робіт методом гільзування найчастіше виконують двома способами [25], перший спосіб полягає у монтажі труби, загальна довжина якої відповідає довжині об'єкту, що підлягає ремонту, чи є більшою при необхідності подовження існуючої водопропускної труби, а другий спосіб передбачає послідовне з'єднання ланок труби під час монтажу, у середині дефектної дорожньої водопропускної труби.

На етапі підготовчих робіт повинні бути виконані такі заходи [26]:

– ізолювання зони робіт від протікання води;

– очищення або, при необхідності, промивання ремонтованої труби від сміття і бруду, видалення з неї води, закладення тріщин, відкритих стиків і місць інфільтрації ґрунтових вод;

– створення умов для безперешкодного протягування ланок внутрішньої труби: влаштування настилу, направлення, вирівнювання дна труби відповідно до проєкту.

Монтаж ланок внутрішньої труби може виконуватися в такій технологічній послідовності:

1) встановлення в аварійній трубі напрямні для протягування монтованої труби (мінімальна висота 50 мм) відповідно до проєкту щодо осьової і висотної розбивки. Встановлення проєктного ухилу за допомогою нівеліра і клинів. Напрямні виготовити з дерева, полімерних труб або металопрокату. Закріплення напрямних допускається на ремонтованої трубі або гільзі (**рис. 2**). Забезпечити вільне проходження бетонної суміші через напрямні. При необхідності забезпечити захист покриву при проштовхуванні геотекстилем. У разі рівної лоткової частини труби (відсутні виступи, що перешкоджають просуванню гільзи) напрямні допускається не встановлювати;

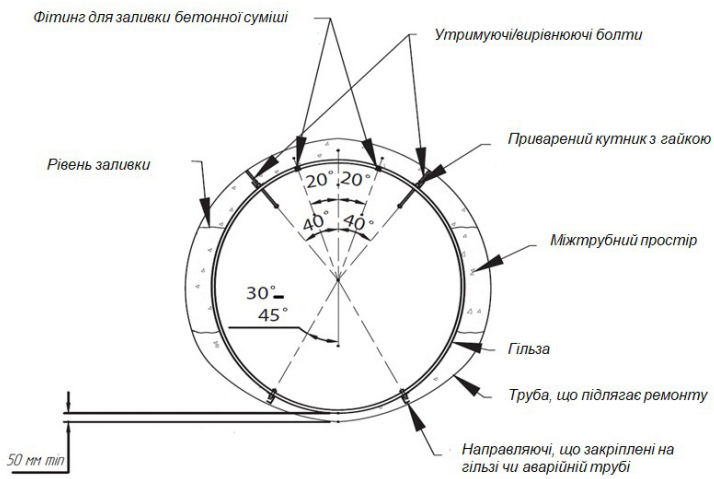



***Рисунок 2*** – Приклад розташування гільзи в ремонтованої трубі

2) протягнути в існуючій трубі трос для протягування ремонтної труби з розривним навантаженням не менше загальної маси ремонтних ланок;

3) протягнути в існуючій трубі канат з натуральних або штучних волокон, з розривним

навантаженням не менше ніж 500 кг, для подальшого протягування шланга для бетонування;

4) укласти першу секцію монтажної труби за допомогою автокрана біля входу існуючої труби;

5) закріпити на торці 1 секції ремонтної труби трос для протягування за допомогою струбцин або заздалегідь підготовлених вушок;

6) другий кінець троса підчепити до лебідки або іншому буксирувального засобу;

7) протягнути секцію залишивши зовні частину розміром не менше ніж 500 мм для установки бандажа;

8) улаштувати наступну секцію труби, яку монтують за допомогою автокрана;

9) з'єднати секції за допомогою бандажа.

Варто зазначити, що при відновленні конструкції гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб методом гільзування зменшується внутрішній діаметр труби. Найпоширенішим матеріалом для відновлення є дорожні водопропускні труби виготовлені з поліетилену та металу, які мають різні гідравлічні показники.

Оскільки гідравлічний опір поліетиленових труб вважається умовно ідентичним опору гідравлічно гладких труб [27, 28], однак беручі до уваги, що поліетиленові та металеві труби виготовляються у вигляді гофри, то при визначенні величини коефіцієнта опору по довжині можна використати залежність:

$$\lambda = \frac{0,01344}{d_p \cdot 0,226 \cdot v \cdot 0,226}, \tag{1}$$

де $\lambda$ – коефіцієнт гідравлічного тертя на довжині;

$d_p$ – розрахунковий діаметр труби, м;

$v$ – середня швидкість води в в дорожній водопропускній трубі, м/с.

Тоді

$$i = 0,000685 \frac{v^{1,774}}{d_p^{1,226}}, \tag{2}$$

де $i$ – гідравлічний похил.

$$1000i = 0,685 \frac{v^{1,774}}{d_p^{1,226}}. \tag{3}$$

Або

$$1000i = 1,052 \frac{Q^{1,774}}{d_p^{4,774}}. \tag{4}$$

Для збереження пропускної здатності $Q$ необхідно визначити діаметр дорожньої водопропускної труби:

$$d_{TP} = 1,01 \frac{Q^{0,372}}{(1000i)^{0,209}}, \tag{5}$$

де $d_{TP}$ – діаметр труби.

Гідравлічний опір поліетиленових гофрованих труб визначають згідно з [29], та становить:

$$i_w = \frac{Q^2}{576d^{5,3333}}, \tag{6}$$

де $Q$ – пропускна здатність, м$^3$/с;
$d$ – діаметр труби, м.

За цих умов пропускну здатність напірної труби визначають як для короткого трубопроводу:

$$Q = \varphi_m \omega_m \sqrt{2g\left(H - h_m\right)}, \tag{7}$$

де $Q$ – пропускна здатність, м$^3$/с;
$\omega_m$, $h_m$ – площа перерізу і висота основної ділянки труби, працюючої повним перерізом, для обтічного оголовка коефіцієнт швидкості $\varphi_н$ =0,95;
g – прискорення вільного падіння, м/с$^2$;
$H$ – напір перед трубою, м.

У той час, витрата води, що пропускається безнапірною «короткою» непідтопленою спорудою із металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах визначається [30]:

$$Q = m \cdot B_K \sqrt{2gH^{\frac{3}{2}}}, \tag{8}$$

де $m$ – коефіцієнт витрати.
$B_K = \frac{W_K}{h_K}$ – середня ширина потоку в перерізу з критичної глибиною $h_K$;
$W_K$ – площа поперечного перерізу потоку при глибині $h_K$;
$h_K$ – критична глибина потоку в споруді.

При заданому типі вхідного оголовка розрахункові витрати круглих, еліптичних і овальних споруд визначають за параметром витрати $П_Q = \frac{Q}{D^2\sqrt{gD}}$.

Пропускну здатність «довгої» споруди визначають за формулою:

$$Q = m \cdot \sigma_n \cdot B_K \sqrt{2gH_0^{\frac{3}{2}}}, \tag{9}$$

де $\sigma_n$ – коефіцієнт підтоплення, що визначається методом послідовного наближення, його значення — менше 1,0.

Для вибору необхідного діаметру дорожньої водопропускної труби потрібно знайти його значення для різних можливих значень $Q$ і вибрати максимальне, що проводиться експериментально, або на основі статистичних даних.

**Уточнення технологічних параметрів процесу заповнення міжтрубного кільцевого зазору**

Для виконання технологічного процесу заповнення міжтрубного зазору розчином однією з найважливіших проблем є вивчення гідравлічного опору руху суміші. Величина гідравлічного

опору в значній мірі залежить від складу розчинів, технологічних факторів заповнення, а також конструктивних параметрів машин та установок [31].

Будівельні розчини представляють собою гетерогенні (складові з різних компонентів), неоднорідні дисперсні системи, в яких дисперсними фазами є активні в'яжучі речовини і інертний заповнювач, а дисперсним середовищем – вода. При цьому активна в'яжуча речовина утворює фізичний зв'язок з інертним заповнювачем за допомогою сольватних оболонок. За своєю фізичною природою будівельні речовини відносяться до неньютонівських рідин, які мають властивості колоїдно-дисперсних систем.

Основні математичні моделі, що показують зв'язок реологічних властивостей розчину із факторами складу та технології, а вирішення системи даних рівнянь дозволить розрахувати попередній склад розчину на повітряних в'яжучих із заданими реологічними показниками (**табл. 1**).

***Таблиця 1***

***Математичні моделі реологічних властивостей розчинів***

| Назва моделі, автор | Математична модель | Параметри |
|---|---|---|
| Відносна в'язкість суміші [21] | $h_r = 1 + \frac{3}{\frac{1}{X^{n+1/0,52}}}$ | $X$ – спостерігаєма об'ємна концентрація молекул |
| Відносна в'язкість суміші [21] | $h_r = 1 + d_{\text{ч}}^{\frac{S_r}{\left(\frac{1}{X_V}-\frac{1}{X_{VC}}\right)/2}}$ | $d_ч$ – середній діаметр частинок наповнювача;<br>$S_r$ – питома поверхня наповнювача;<br>$X_V$ – об'ємна концентрація наповнювача;<br>$X_{VC}$ – максимальна об'ємна концентрація наповнювача |
| Відносна в'язкість суміші [21] | $h_r = \left(1 - \frac{1}{c \cdot V}\right)^{-(A \cdot q + B)}$ | $c$ – фактичний об'єм твердих частинок;<br>$V$ – об'ємна концентрація твердих частинок;<br>$A$, $B$ – емпіричні коефіцієнти;<br>$q$ – модуль крупності твердих частинок |
| Динамічна в'язкість [21] | $\eta = \frac{1}{2} \cdot (W - W_a) \cdot \sqrt[3]{S_M - 1}$ | $W$ – вода / тверде (В/Т відношення);<br>$W_a$ – водопоглинення;<br>$S_M$ – питома поверхня суміші |
| Модель Ейнштейна для в'язкості суспензії [32] | $\eta = \eta_0 \cdot (1 + [\eta] \cdot \phi)$ | $\eta_0$ — в'язкість рідини/середовища;<br>$\phi$ — об'ємна частка твердої речовини;<br>$[\eta]$ — характеристична в'язкість суспензії;<br><br>*Відсутність взаємодії частинок, розбавлена суспензія* |
| Модель Роско для в'язкості суспензії [32] | $\eta = \eta_0 \cdot (1 - 1,35 \cdot \phi)^{-K}$ | $\eta_0$ – в'язкість рідини/середовища;<br>$\phi$ – об'ємна частка твердої речовини;<br>$K$ = constant<br><br>*Розглядає взаємодію частинок* |

***Кінець таблиці 1***

| Назва моделі, автор | Математична модель | Параметри |
|---|---|---|
| Модель Крігера-Догерті для в'язкості суспензії [33] | $\frac{\eta}{\eta_0}=\left(1-\frac{\varphi}{\varphi_{\max}}\right)-[\eta]\cdot\varphi_{\max}$ | $\eta_0$ – в'язкість рідини/середовища;<br>$\varphi$ – об'ємна частка твердої речовини;<br>$\varphi_{max}$ – максимальний коефіцієнт упаковки;<br>$[\eta]$ – характеристична в'язкість суспензії;<br><br>*Зв'язок між в'язкістю та упаковкою частинок. Враховує максимальний коефіцієнт упаковки* |
| Модель Бінгема [22] | $\tau=\tau_0+\eta\cdot\gamma$ | $\tau$ – напруження зсуву, Па;<br>$\tau_0$ – межа текучості, Па;<br>$\eta$ – пластична в'язкість, Па·с;<br>$\gamma$ – швидкість деформації зсуву (1/s). |
| Модель Феррариса і де Ларарда [22] | $\eta=\exp\left\{26,75\cdot\left(\frac{\varphi}{\varphi_{\max}}-0,7448\right)\right\}$ | $\varphi$ – об'ємна частка твердої речовини;<br>$\varphi_{max}$ – максимальний коефіцієнт упаковки; |
| Модель Фаріса [34] | $\eta_r=H(\varphi_1)H(\varphi_2)...H(\varphi_N)$ | $\varphi_i$ – концентрація кожного розміру<br>$H(\varphi_i)$ – пластична в'язкість рідини, що містить частинки класів розміру від 1 до $i$ -1 |
| Модель Муні для в'язкості суспензії [32] | $\eta=\eta_0\cdot\exp\cdot\left(\frac{[\eta]\cdot\phi}{1-\frac{\phi}{\phi_{\max}}}\right)$ | $\eta_0$ – в'язкість рідини/середовища;<br>$\phi$ – об'ємна частка твердої речовини;<br>$\phi_{max}$ – максимальний коефіцієнт упаковки;<br>$[\eta]$ – характеристична в'язкість суспензії;<br><br>*Враховує максимальний коефіцієнт упаковки* |
| Динамічна в'язкість [42] | $\eta=\nu\cdot\rho\cdot10^{-3}$ | $\rho$ – щільність (за температури визначення кінематичної в'язкості), кг/м$^3$;<br>$\nu$ – кінематична в'язкість, мм$^2$/с. |

Розчин у складі частинок цементу, заповнювача, води та повітря, можна охарактеризувати як зважені тверді частинки (заповнювач) у в'язких середовищах (цементна паста) [22]. Було запропоновано численні основні рівняння охарактеризувати реологію свіжого розчину (бетону) як суспензії, але лише модель Бінгема та модель Гершеля і Балклі отримали широке визнання [22].

Для нормального розчину (бетону) експериментальні дані підтвердили, що потік свіжого бетону слідує за моделлю Бінгема (**табл. 1**), $\tau_0$ і $\eta$ називаються властивостями матеріалу Бінгема з першою властивістю забезпечення вимірювання напруження зсуву, необхідного для ініціювання потоку, а другий – міра опору матеріалу течії після того, як матеріал почне текти. Ці дві реологічні властивості необхідні для кількісної характеристики потоку свіжих розчинів [22].

Для моделювання текучості розчинів існує два різних підходи: феноменологічні моделі і фундаментальні моделі. Феноменологічні моделі засновані на спостереженнях. Найбільш

перспективна модель у цій категорії для розчину є запропонованим Феррарісом і де Ларардом [35] і Феррарісом [36] та ін.

Вони стверджували, що пластична в'язкість є лише функцією щільності упаковки до максимальної щільності упаковки цілої суміші ($\varphi_{max}$). Запропонована модель має ряд неточностей та залежить від отриманих експериментальних даних.

Фарріс [34] стверджував, що можна знехтувати взаємодією різних класів розміру частинок у ситуації, коли співвідношення розмірів сфер більше ніж 1/10.

У 1951 році Муні [37] висунув модель, яка дозволяє включення взаємодій частинок за допомогою теорії скупченості. Передбачалося, що взаємодія між частинками може бути охоплена простим геометричним фактором скупчення, але не забезпечувалося методологія розроблення таких функцій взаємодії.

Найбільш поширеним підходом для кількісного визначення реологічних властивостей свіжого бетону є експериментальне вимірювання напруження зсуву проти швидкості деформації зсуву за допомогою бетонного реометра, припускаючи, що потік розчину підкоряється моделі Бінгема.

Інші дослідники намагалися кількісно визначити пластичну в'язкість свіжого бетонного розчину на основі його складу, зокрема роботи Рошавелова [38] і Феррариса і де Ларрара [35]. Запропоновані моделі не розглядали взаємодію частинок розчину та потребували модель перевірки.

Фізичній суті явищ, які відбуваються при русі будівельних розчинів найкраще відповідає закон Шведова-Бінгама відповідно до якого [40]:

$$\tau = \eta \frac{d\upsilon}{d\gamma} + \tau_0, \tag{10}$$

де $\tau$ – питома сила тертя, Н/м$^2$;
$\eta$ – динамічний коефіцієнт в'язкості, Н·с/м$^2$;
$d\upsilon$ – приріст швидкості;
$d\gamma$ – приріст нормалі до швидкості;
$\tau_0$ – граничне напруження зсуву, Н/м$^2$.

При дослідженні режимів і гідравлічного опору рухові будівельних розчинів були проаналізовані роботи різних авторів, які присвячені рухові ньютонівських і структурних рідин; їм рекомендовані для застосування загальноприйняті в гідромеханіці формули (швидкості руху, об'ємної витрати, гідравлічного нахилу). На основі експериментальних досліджень [27], було встановлено, що при рівномірному русі будівельних розчинів по трубах в межах дослідних швидкостей руху до 0,5 м/с і при рухомості розчинів від 4 см до 10 см по стандартному конусу спостерігається структурний режим протікання, на який поширюється закон Шведова-Бінгама. Для розрахунку втрат тиску на 1 пог.м була запропонована наступна формула, отримана із закону Шведова-Бінгама:

$$\Delta\rho = \frac{k_T \cdot k_M \cdot k_H}{100\,000}\left(\frac{32\eta v_{cp}}{d^2} + \frac{16\tau_0}{3d}\right), \text{ МПа} \tag{11}$$

де $v_{cp}$ – середня швидкість руху розчину, м/с;
$d$ – внутрішній діаметр водопропускної труби, м;
$k_T$ – коефіцієнт, що враховує відхилення режиму руху від закону Шведова-Бінгама при

$v_{cp} > 0{,}12$ м/с, $k_T = 1$ при $v_{cp} = 0{,}12$ м/с і $k_T = \frac{1}{1{,}8 \cdot v_{cp} + 0{,}85}$ при $v_{cp} > 0{,}12$ м/с;

$k_M$ – коефіцієнт, що враховує вплив матеріалу, $k_M = 1$ для полімерних труб та $k_M = 1{,}8$ для металевих труб;

$k_H$ – коефіцієнт, що враховує нерівномірність руху розчину: $k_H = 1$ для рівномірного руху, $k_H = 1{,}5$ для нерівномірного руху.

При незначних швидкостях руху суміші справедливий закон Шведова-Бінгама [39]:

$$\frac{dv}{d\rho} = \frac{1}{\mu}\left(\tau - \tau_0\right), \tag{12}$$

де $\tau$ – напруження зсуву;

$\mu$ – загальна в'язкість системи.

Розчин і цементне тісто при $\tau < \tau_0$ ведуть себе, як пружне тісто; при τ дещо більшому ніж $\tau_0$ – як пластично-в'язке тісто; при швидкостях руху, які обумовлюють повне руйнування структурних зв'язків, цементне тісто і розчин втрачають свої пластичні властивості і їх рух стає аналогічним рухові звичайної в'язкої рідини [39].

Процес руху цементно-піщаного розчину відбувається наступним чином: спочатку долається опір структури тіста, що призводить до значної втрати його властивості; зерна піску змішуються і сприймають дію зсувного зусилля, при цьому зсув супроводжується обертанням зерен і їх перекочуванням, тобто навіть при малих градієнтах швидкості розчин рухається турбулентно і обертання зерен піску сприяє повному руйнуванню структури тіста [39].

На основі експериментальних даних були встановлені основні вимоги до перекачування будівельних розчинів [40, 41]. При перекачуванні будівельних розчинів по трубопроводах суміш повинна мати підвищену в'язкість, однорідну структуру і забезпечувати необхідні фізико-механічні властивості розчину після твердіння. Склад суміші повинен бути підібраний таким чином, щоб при її русі в трубопроводі постійно зберігався змащувальний шар біля стінок трубопроводу, а тиск передавався по рідкій фазі. При цьому розчинна частина не повинна видавлюватись зі скелету заповнювача.

При виконанні технологічного процесу заповнення міжтрубного зазору розчином, суміш рухається в кільцевому каналі, тому для розрахунку параметрів процесу не можуть бути застосовані залежності [39], які розглядають рух рідини в трубах круглого перерізу.

Для визначення втрати тиску при заповненні міжтрубного зазору необхідно розглянути рух неньютонівських рідин в кільцевому каналі з застосуванням Закону Шведова-Бінгама і показників цементно-піщаних розчинів $\tau_0$ і $\eta$ [43].

Недоліком методики розрахунку параметрів руху неньютонівських рідин в кільцевому каналі є необхідність використання графіків [43].

Автори [44] вирішили задачу протікання рідини в кільцевому каналі для триконстрантної реологічної моделі, яка є узагальненням степеневого закону і лінійної моделі Шведова-Бінгама:

$$\tau = \tau_0 + \eta \frac{dV}{dr}\left|\frac{dV}{dr}\right|^{\frac{1}{m-1}}, \tag{13}$$

де $m$ – показник не лінійності течії.

Для розрахунків втрат тиску при русі неньютонівських рідин по кільцевому каналу можна скористатися залежністю [44]:

$$\Delta\rho = 4C_f \cdot S\frac{V_0^2}{2}\cdot\frac{1}{d_{\text{екв}}}, \tag{14}$$

де $d_{\text{екв}} = 2\,(R - \chi R)$, м;

$l$ – довжина кільцевого каналу, м;

$V_0$ – середня швидкість руху рідини в кільцевому каналі, м/с;

$S$ – густина рідини, кг/м$^3$;

$C_f$ – коефіцієнт гідравлічного опору:

$$C_f = C_{fH}\frac{(m+2)\cdot\frac{1}{m}\cdot\frac{1}{4m}}{12} + Bin\frac{19{,}5\chi^{0{,}16}}{m^{0{,}53}}, \tag{15}$$

де $C_{fH} = \dfrac{16-(1-\chi)^2}{1+\chi^2+\dfrac{1-\chi^2}{\ln\chi}}$ – відповідає неньютонівській рідині;

$Bin$ – узагальнене число Бінгама, $Bin = \dfrac{\tau_0}{\eta}\left(\dfrac{d_{\text{екв}}}{2V_0}\right)^{\frac{1}{m}}$.

Величини $\eta$ і $\tau_0$ входять в теоретичні залежності для визначення гідравлічного опору рухові розчину в міжтрубному кільцевому зазорі за законом Пуазейля [44], вихідні дані для розрахунку попередньо визначаються на капілярному віскозиметрі шляхом вимірювання часу руху розчину в трубці при відомому тиску, що діє на нього.

## Висновки

У роботі проведено аналіз та уточнено виконання ремонтних робіт методом гільзування. Досліджено теоретичні підходи із заповнення міжтрубного простору під час відновлення дорожніх водопропускних труб за рахунок методу гільзування.

Встановлено, що основні параметри руху будівельних розчинів в кільцевому зазорі між існуючою та ремонтною дорожньою водопропускною трубою визначаються на основі розрахунку витрат тиску залежно від геометричних параметрів кільцевого зазору та структури розчину. Суцільність заповнення міжтрубного зазору (кільцевого зазору) оцінюється параметрами швидкості руху розчину, а також характеристиками розчину (динамічним коефіцієнтом в'язкості та граничним напруженням зсуву). Структура розчину оцінюється величиною розшарування та числовим значенням усадки конуса.

При русі розчинів в трубах швидкість руху по всьому перерізу однакова, за виключенням області біля стінок труби, де швидкість змінна. В'язкість $\eta$ і граничне напруження зсуву $\tau_0$ є одними з основних фізико-механічних властивостей розчинів, які визначають їх поведінку при перекачуванні розчинонасосами. При русі розчинів з'являються сили тертя в'язко-пластичної рідини, величина яких залежить від градієнта швидкості, величини в'язкості $\eta$ і граничного напруження зсуву $\tau_0$.

Основними показниками, які визначають поведінку будівельних розчинів при перекачуванні є динамічний коефіцієнт в'язкості $\eta$ і граничне напруження зсуву $\tau_0$, які можуть бути визначені на віскозиметрах.

За невеликої швидкості руху (до 0,5 м/с) будівельні розчини поводять себе як структурні рідини і для них справедливий закон Шведова-Бінгама.

Від параметрів структури розчину та геометричних параметрів кільцевого зазору залежить вибір та характеристики робочого обладнання для подачі будівельної суміші.

**Список літератури**


1. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Клименко М. І. Аналіз проєктування та будівництва гідротехнічних споруд транспортного будівництва у вигляді водопропускних труб з полімерних матеріалів на автомобільних дорогах. *Дороги і мости*. 2021. Вип. 24. С. 112–133. DOI: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.24.112.
2. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Клименко М. І. Аналіз проблем забезпечення надійності та довговічності гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб в умовах експлуатації. *Дороги і мости*. Київ, 2022. Вип. 25. С. 190–202. DOI: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.25.190.
3. Piratla, K. R., W. Pang, H. Jin, and M. Stoner. Best practices for assessing culvert health and determining appropriate rehabilitation methods : a research project in support of operational requirements for the South Carolina Department of Transportation : final report.. Accessed December 25, 2021. URL: https://www.scdot.scltap.org/wp-content/uploads/2017/04/SPR-718-Final-Report-Revised.pdf (дата звернення: 12.09.2013).
4. Assessment and rehabilitation of existing culverts: A synthesis of highway practice. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Synthesis 303. Transportation Research Board, 2002.
5. Mathews, J.C., Decision analysis guide for corrugated metal culvert rehabilitation and replacement using trenchless technology. 2012: United States Department of Agriculture, Forest Service.
6. CSP Durability Guide / National Corrugated Steel Pipe Association. Washington, 2000.
7. Reza Haghani, Jincheng Yang (2016). *Application of FRP Materials for Construction of Culvert Bridges.Presented at IABSE Congress: Challenges in Design and Construction of an Innovative and Sustainable Built Environment*, Stockholm, Sweden, 21-23 September 2016, published in Challenges in Design and Construction of an Innovative and Sustainable Built Environment. P. 1312–1319.
8. Drainage Handbook Optional Pipe Materials. State of Florida Department of Transportation. Tallahassee, Florida, 2014. 38 p.
9. Hydraulic design of highway culverts. U.S. Department of Transportation. Hydraulic design series number 5. Third edition. Publication No. FHWA-HIF-12-026. April, 2012. 326 p.
10. Handbook of steel drainage and highway construction products. Published by Corrugated Steel Pipe Institute, American Iron and Steel Institute. 2002. 470 p.
11. Pettersson L., Sundquist H. Design of soil steel composite bridges. *Structural Desing and Bridges*. Stockholm, 2007. 84 p.
12. AASHTO: Standart Specifications for Highway Bridges. American Association of State Highway and Transportation Officials, 444 N. Capitol St., N. W., Ste. 249. Washington, D. C., 2001.
13. James D. Schall, Philip L. Thompson, Steve M. Zerges, Roger T. Kilgore and Johnny L. Morris. Hydrualic design of highway culverts. 2nd ed. FHWA-NHI-01-020. HDS No. 5. 2001. URL: https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/12026/hif12026.pdf (дата звернення: 12.09.2023).
14. Thomas S. Walsh (2011). Journal of ASTM International Selected Technical Papers STP 1528 Plastic Pipe and Fittings: Past, Present, and Future. ASTM International 100 Barr Harbor Drive PO Box C700 West Conshohocken. 404 p.

15. П-Г.1-218-113:2009 Технічні правила ремонту та утримання автомобільних доріг загального користування України. Київ, 2009. 45 с. (Інформація та документація).

16. ДБН В.2.3-22:2009 Мости та труби. Основні вимоги проектування. Київ. 2009. 65 с. (Інформація та документація).

17. ТТК 37641918/03450778-210:2016 Типова технологічна карта на ремонт водопропускних труб методом релайнінгу на автомобільних дорогах. Київ, 2016. 54 с. (Інформація та документація).

18. ДСТУ EN 206:2018 Бетон. Технічні вимоги, експлуатаційні характеристики, виробництво та критерії відповідності (EN 206:2013 + A1:2016, IDT). Київ, 2018. 71 с. (Інформація та документація).

19. ACI PRC-237-07 Self-Consolidating Concrete (Reapproved 2019).

20. Саницький М. А., Марущак У. Д., Кіракевич І. І., Стечишин М. С. Високоміцні самоущільнювальні бетони на основі дисперсноармованих цементуючих систем. *Будівельні матеріали і вироби*. 2015. № 1. С. 6–9.

21. Теліцина Н., Скіданова Г., & Суруп І. (2010). Алгоритм підбору СБС на повітряних в'яжучих із заданими реологічними показниками. *Восточно-Європейський журнал передових технологій*. 2(10(44). С. 71–74. URL: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2010.2785 (дата звернення: 12.09.2023).

22. Chidiac S.E. & Mahmoodzadeh F. (2009). Plastic viscosity of fresh concrete – A critical review of predictions methods. *Cement & Concrete Composites - CEMENT CONCRETE COMPOSITES*. 31. P. 535–544. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.02.004.

23. Bonen D. Fresh and hardened properties of self-consolidating concrete. *Prog. Struct. Eng. Materiuals*. 2005. № 7. P. 14–26.

24. Scnachinger J. (2002). Early-Age Creaking Risk and Relaxation by Restrained Autogenous Deformation of Ultra High Performance Concrete. *Proc. of the 6 International Symposium on Utilization of High Strength High Performance Concrete*, Leipzig. 16-20 June, 2002. P. 1341–1354.

25. Study of the Stress-Strain State in Defective Railway Reinforced-Concrete Pipes Restored with Corrugated Metal Structures. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. N 5 (1–89). P. 37–44. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.109611.

26. Онищенко А. М. Аналіз перспективи застосування ремонту, методом гільзування, водопропускних труб, як різновиду гідротехнічних споруд транспортного будівництва. *Збірник наукових праць за підсумками щорічної Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та досягнення інженерних наук в галузі гідротехнічного будівництва та водної інженерії»*. Херсон, 2021. Вип. 3. С. 147–150.

27. Войтович І. В., Ковтунович І. В., Герасімов Є. Г., Пінчук, О. Л. (2012) Перспективи відновлення сталевих трубопроводів систем зрошення безтраншейним способом. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування* (4(60)). P. 27–32.

28. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб: Справ, пособие. - 6-е изд., доп. и перераб. Москва, 1984. 116 с.

29. СОУ 45.2-00018112-045:2010 Споруди транспорту. Проектування та будівництво споруд з пластикових труб на автомобільних дорогах загального користування. Київ, 2010. 45 с. (Інформація та документація).

30. Посібник до ВБН В.2.3-218-198:2007 Споруди транспорту. Проектування та будівництво споруд із металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування. Київ, 2009. 45 с. (Інформація та документація).

31. Avijit Chaubey (2020). Practical Concrete Mix Design. CRC Press. 185 p.

32. Quemada D. Models for Rheological Behavior of Concentrated Disperse Media under Shear. *Proc IX Intl Cong on Rheology*. Mexico, 1984.

33. Struble L.J., Sun G.K. Viscosity of Portland Cement Paste as a Function of Concentration. Adv Cement Based Mat. 1994.

34. Farris R.J. Prediction of the viscosity of multimodal suspensions from unimodal viscosity data. *Trans Soc Rheol*. 1968. 12(2). P. 281–301.

35. Ferraris C.F., deLarrard F. Testing and modeling of fresh concrete rheology. Maryland: Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg. 1998.

36. Ferraris C., deLarrard F., Martys N. Fresh concrete rheology-recent developments. *Materials science of concrete VI*. Sidney Mindess and Jan Skalny, (Eds.). Westerville, OH, 2001. P. 215–41.

37. Mooney M. The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles. *J Colloids Sci* 1951. 6.162–70.

38. Roshavelov T. Prediction of fresh concrete flow behavior based on analytical model for mixture proportioning. *Cem Concr Res*. 2005. 35:831–5.

39. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. Москва, 1981. 464 с.

40. Jamrozy Z. Beton i jego technologie. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa-Krakow, 2000. 484 p.

41. E. Koniewski, Z. Orlowski I. Concrete mix transportation modelling. *Journal of civil engineering and management*. 2003. Vol IX No I. P. 52–58.

42. ДСТУ ГОСТ 33-2003 Нафтопродукти. Прозорі і непрозорі рідини. Визначення кінематичної в`язкості і розрахунок динамічної в`язкості (ГОСТ 33-2000 (ИСО 3104-94), IDT). Київ, 2003. 112 с. (Інформація та документація).

43. W. L. Wilkinson, Non-Newtonian Fluids. Fluid Mechanics, Mixing and Heat Transfer. London, 1960. 138 p.

44. Фройштетер Г.Б. Течение и теплообмен неньютоновских жидкостей в трубах. Киев, 1990. 216 с.

## References

1. Artur Onyshchenko, Mykola Harkusha, Mykola Klymenko. Analysis of design and construction of hydrotechnical structures of transport construction in the form of water pipes made of polymer matters. Dorogi i mosti [Roads and bridges]. 2021. Iss. 24. P. 112–133 DOI: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.24.112 [in Ukrainian].

2. Artur Onyshchenko, Mykola Harkusha, Mykola Klymenko. Analysis of problems of ensuring reliability and durability of hydraulic structures of transport construction from road waterways. Dorogi i mosti [Roads and bridges]. Kyiv, 2022. Iss. 25. P. 190–202. DOI: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.25.190 [in Ukrainian].

3. Piratla K. R., W. Pang, H. Jin, and M. Stoner (2016). Best practices for assessing culvert health and determining appropriate rehabilitation methods : a research project in support of operational requirements for the South Carolina Department of Transportation : final report.. Accessed December 25, 2021. URL: https://www.scdot.scltap.org/wp-content/uploads/2017/04/SPR-718-Final-Report-Revised.pdf (Last accessed: 12.09.2023) [in English].

4. Assessment and rehabilitation of existing culverts: A synthesis of highway practice. National

Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Synthesis 303. Transportation Research Board, 2002. [in English].

5. Mathews, J.C., Decision analysis guide for corrugated metal culvert rehabilitation and replacement using trenchless technology. 2012: United States Department of Agriculture, Forest Service [in English].

6. CSP Durability Guide / National Corrugated Steel Pipe Association. Washington, 2000. [in English].

7. Reza Haghani, Jincheng Yang (2016). Application of FRP Materials for Construction of Culvert Bridges.Presented at IABSE *Congress: Challenges in Design and Construction of an Innovative and Sustainable Built Environment*, Stockholm, Sweden, 21-23 September 2016, published in Challenges in Design and Construction of an Innovative and Sustainable Built Environment. P. 1312–1319 [in English].

8. Drainage Handbook Optional Pipe Materials / State of Florida Department of Transportation. Tallahassee, Florida. 2014. 38 p. [in English].

9. Hydraulic design of highway culverts. U.S. Department of Transportation. Hydraulic design series number 5. Third edition. Publication No. FHWA-HIF-12-026. April, 2012. 326 p. [in English].

10. Handbook of steel drainage and highway construction products. Published by Corrugated Steel Pipe Institute, American Iron and Steel Institute. 2002. 470 p. [in English].

11. Pettersson L., Sundquist H. Design of soil steel composite bridges. *Structural Desing and Bridges*. Stockholm, 2007. 84 p. [in English].

12. AASHTO: Standart Specifications for Highway Bridges. American Association of State Highway and Transportation Officials, 444 N. Capitol St., N. W., Ste. 249, Washington, D. C., 2001 [in English].

13. James D. Schall, Philip L. Thompson, Steve M. Zerges, Roger T. Kilgore and Johnny L. Morris. Hydrualic design of highway culverts. 2nd ed. FHWA-NHI-01-020. HDS No. 5. 2001. URL: https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/12026/hif12026.pdf (Last accessed: 12.09.2023) [in English].

14. Thomas S. Walsh (2011). Journal of ASTM International Selected Technical Papers STP 1528 Plastic Pipe and Fittings: Past, Present, and Future. ASTM International 100 Barr Harbor Drive PO Box C700 West Conshohocken. 404 p. [in English].

15. P-H.1-218-113:2009 Tekhnichni pravyla remontu ta utrymannia avtomobilnykh dorih zahalnoho korystuvannia [Technical rules for the repair and maintenance of highways in general use]. Kyiv. 2009. 45 p. (Information and documantation) [in Ukrainian].

16. DBN V.2.3-22:2009 Sporudy transportu. Mosty ta truby. Osnovni vymohy proektuvannia (State Building Norms (DBN V.2.3-22:2009) Transport facilities. Bridges and pipes. Basic design requirements). Kyiv, 2009. 65 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

17. TTK 37641918/03450778-210:2016 Typova tekhnolohichna karta na remont vodopropusknykh trub metodom relaininhu na avtomobilnykh dorohakh [Typical technological map for the repair of culverts by the relaying method on highways}. Kyiv. 2016. 54 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

18. DSTU EN 206:2018 Beton. Tekhnichni vymohy, ekspluatatsiini kharakterystyky, vyrobnytstvo ta kryterii vidpovidnosti [State Standard of Ukraine (DSTU EN 206:2018) Concrete. Technical requirements, operational characteristics, reliability and compliance criteria (EN 206:2013 + A1:2016, IDT)]. Kyiv. 2018. 71 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

19. ACI PRC-237-07 Self-Consolidating Concrete (Reapproved 2019) [in English].

20. Sanytskyi M. A., Marushchak U. D., Kirakevych I. I., Stechyshyn M. S. Vysokomitsni samoushchilniuvalni betony na osnovi dyspersnoarmovanykh tsementuiuchykh system [High-strength self-compacting concrete based on dispersed reinforced cementitious systems]. *Budivelni materialy i vyroby*. 2015, № 1. P. 6–9. [in Ukrainian].

21. Telitsyna N., Skidanova H., & Surup I. (2010). Alhorytm pidboru SBS na povitryanykh vyazhuchykh iz zadanymy reolohichnymy pokaznykamy. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2(10(44). P. 71–74. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2010.2785 [in Russian].

22. Chidiac S.E. & Mahmoodzadeh F. (2009). Plastic viscosity of fresh concrete – A critical review of predictions methods. *Cement & Concrete Composites - CEMENT CONCRETE COMPOSITES*. 31. P. 535–544. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.02.004. [in English].

23. Bonen D. Fresh and hardened properties of self-consolidating. Prog. Struct. Eng. Materiuals, 2005. № 7. P. 14–26 [in English].

24. Scnachinger J. (2002). Early-Age Creaking Risk and Relaxation by Restrained Autogenous Deformation of Ultra High Performance Concrete. *Proc. of the 6 International Symposium on Utilization of High Strength High Performance Concrete*, Leipzig. 16-20 June, 2002. P. 1341–1354 [in English].

25. Study of the Stress-Strain State in Defective Railway Reinforced-Concrete Pipes Restored with Corrugated Metal Structures. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. N 5 (1–89). P. 37–44. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.109611 [in English].

26. Onyshchenko A. M. Analiz perspektyvy zastosuvannia remontu, metodom hilzuvannia, vodopropusknykh trub, yak riznovydu hidrotekhnichnykh sporud transportnoho budivnytstva [Analysis of the prospects for the use of repair, by the method of sheathing, of culverts as a type of hydraulic structures of transport construction]. *Zbirnyk naukovykh prats za pidsumkamy shchorichnoi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Suchasni tekhnolohii ta dosiahnennia inzhenernykh nauk v haluzi hidrotekhnichnoho budivnytstva ta vodnoi inzhenerii»*. Kherson. 2021. Iss. 3. P. 147 – 150 [in Ukrainian].

27. Voitovych I. V., Kovtunovych I. V., Herasimov Ye. H., Pinchuk O. L. (2012) Perspektyvy vidnovlennia stalevykh truboprovodiv system zroshennia beztransheinym sposobom [Prospects of restoration of steel pipelines of irrigation systems using a trenchless method]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia* (4(60)). P. 27–32. [in Ukrainian].

28. Tablytsy dlia hydravlycheskoho rascheta vodoprovodnykh trub [Tables for the hydraulic calculation of water pipes]. 6-e yzd., dop. y pererab. Moscow, 1984. 116 p. [in Ukrainian].

29. SOU 45.2-00018112-045:2010 Sporudy transportu. Proektuvannia ta budivnytstvo sporud z plastykovykh trub na avtomobilnykh dorohakh zahalnoho korystuvannia [Transport facilities. Designing and construction of structures made of plastic pipes on highways with extensive use]. Kyiv. 2010. 45 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

30. Posibnyk do VBN V.2.3-218-198:2007 Sporudy transportu. Proektuvannia ta budivnytstvo sporud iz metalevykh hofrovanykh konstruktsii na avtomobilnykh dorohakh zahalnoho korystuvannia [Manual to VBN V.2.3-218-198:2007 Transport facilities. Designing and construction of structures made of metal corrugated structures on highways with extensive use]. Kyiv. 2009. 45 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

31. Avijit Chaubey (2020). Practical Concrete Mix Design. CRC Press. P.185. [in English].

32. Quemada D. Models for Rheological Behavior of Concentrated Disperse Media under Shear. *Proc IX Intl Cong on Rheology*. Mexico, 1984 [in English].

33. Struble L.J., Sun G.K. Viscosity of Portland Cement Paste as a Function of Concentration. Adv Cement Based Mat. 1994 [in English].

34. Farris R.J. Prediction of the viscosity of multimodal suspensions from unimodal viscosity data. *Trans Soc Rheol*. 1968. 12(2). P. 281–301 [in English].

35. Ferraris C.F., deLarrard F. Testing and modeling of fresh concrete rheology. Maryland: Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg. 1998 [in English].

36. Ferraris C., deLarrard F., Martys N. Fresh concrete rheology-recent developments. *Materials science of concrete VI*. Sidney Mindess and Jan Skalny, (Eds.). Westerville, OH, 2001. P. 215–41 [in English].

37. Mooney M. The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles. *J Colloids Sci* 1951. 6.162–70 [in English].

38. Roshavelov T. Prediction of fresh concrete flow behavior based on analytical model for mixture proportioning. *Cem Concr Res*. 2005. 35:831–5 [in English].

39. Akhverdov Y.N. Osnovи fyzyky betona [Basics of concrete physics]. Moscow, 1981. 464 p. [in Russian].

40. Jamrozy Z. Beton i jego technologie. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa-Krakow, 2000. 484 p. [in English].

41. E. Koniewski, Z. Orlowski I. Concrete mix transportation modelling. *Journal of civil engineering and management*. 2003. Vol IX No I. P. 52–58 [in English].

42. DSTU HOST 33-2003 Naftoprodukty. Prozori i neprozori ridyny. Vyznachennia kinematychnoi v`iazkosti i rozrakhunok dynamichnoi v`iazkosti [State Standard of Ukraine Oil products. Transparent and opaque liquids. Determination of kinematic viscosity and calculation of dynamic viscosity (HOST 33-2000 (YSO 3104-94), IDT)]. Kyiv. 2003. 112 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

43. W. L. Wilkinson, Non-Newtonian Fluids. Fluid Mechanics, Mixing and Heat Transfer. London, 1960. 138 p. [in English].

44. Froishteter, H.B. Techenye y teploobmen neniutonovskykh zhydkostei v trubakh [Flow and heat exchange of non-Newtonian liquids in pipes]. Kyiv, 1990. 216 p. [in Russian].

**Artur Onyshchenko**, *D.Sc., Prof., https://orcid.org/0000-0002-1040-4530*
**Mykola Harkusha**, *Ph.D., https://orcid.org/0000-0002-5388-0561*
**Mykola Klymenko**, *Ph.D., https://orcid.org/0000-0002-7967-5881*
**Inna Harkusha**, *https://orcid.org/0009-0006-9765-3711*
*National Transport University (NTU), Kyiv, Ukraine*

## RESEARCH AND ANALYSIS OF THE TECHNOLOGY OF RESTORATION OF HYDRO-TECHNICAL STRUCTURES OF TRANSPORTATION BUILDING FROM CULVERTS BY THE SLEATHING METHOD

***Abstract***

Introduction. Hydrotechnical structures of transport construction from road culverts are used to pass water under roadways and other structures. One of the ways to increase the durability and reliability of road culverts is to carry out repairs by the sleeve method. The proposed method involves the installation of a new road culvert in the middle of a defective road culvert, and the space between the pipes is filled with mortar. The distribution of the mixture will further determine the effectiveness of the applied restoration method and the reliability of the repaired structure. The relevance of the work consists in determining the efficiency of filling the inter-pipe space with mortar.

Problem Statement. From the literature analysis, it was established that road culverts are in difficult operating conditions, which is the reason for their premature destruction. The existing methods of repair do not provide the necessary quality of the restored building, and the existing global approaches are not fully studied.

Purpose. It consists in refining the technology of restoration of hydraulic structures of transport construction from road culverts by the sleeve method, which ensures high reliability and durability of the structure in difficult operating conditions.

Results. The research and analysis of the technology of restoration of hydraulic structures of transport construction from road culverts using the sleathing method was carried out

Conclusions. In the work, an analysis of the existing damage to road culverts was carried out and restoration was proposed using the sleathing method. The main rheological properties of construction solutions, which depend on the physical and mechanical characteristics of the restored road culvert, have been established. An analysis of the rheological properties of construction mortars was carried out. The choice and characteristics of working equipment for supplying construction mortar depends on the parameters of the mortar structure and the geometric parameters of the annular gap. The conducted studies allow us to draw a conclusion about the need to develop a method of restoring road culverts by the sleathing method.

***Keywords:*** highways, hydraulic structures, durability, road culverts, reliability, repair.

https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.221

**УДК 624.21**

**Стоянович С. В.**, *канд. техн. наук, доц., https://orcid.org/0000-0002-1363-7356*
**Полюга Р. І.**, *канд. техн. наук, доц., https://orcid.org/0000-0003-3729-0577*
*Національна академія образотворчого мистецтва і архітектури, м. Київ, Україна*

# ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ МОНОЛІТНОЇ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНОЇ ПРОГОНОВОЇ БУДОВИ ШЛЯХОПРОВОДУ

***Анотація***

Вступ. Досвід експлуатації залізобетонних прогонових будов мостів із часу свого застосування показує необхідність їх постійного вдосконалення.

За рахунок застосування попереднього натягу арматури в залізобетонних прогонових будовах мостів отримали змогу підвищити тріщиностійкість таких конструкцій, експлуатаційну надійність. Особливо це актуально при необхідності збільшення довжини прогонів залізобетонних прогонових будов.

Проблематика. Застосування монолітних попередньо напружених прогонових будов з натягом на бетон (пост-напружені системи) є новітнім для України. Вони мають багато переваг порівняно зі збірним попередньо напруженим залізобетоном. Але необхідно вирішити ще ряд проблем при проєктуванні та зведенні таких споруд для досягнення ефективності конструкцій, які б прослужили запроєктований строк, використовуючи всі свої переваги.

Тому дослідження таких конструкцій, оцінювання їх напружено-деформованого стану дозволить в подальшому знайти рішення щодо їх покращення, розроблення відповідних рекомендацій розрахунку, конструюванні таких споруд.

Мета. Дослідження напружено-деформованого стану конструкції монолітної нерозрізної попередньо напруженої прогонової будови естакади з натягом на бетон (пост-напруженої системи) в м. Херсон.

Матеріали і методи. Було проведено обстеження та випробування естакади шляхопроводу через залізницю в м. Херсон. Досліджувана прогонова будова естакади – балочна нерозрізна залізобетонна монолітна попередньо напружена конструкція, армована попередньо напруженими пучками з натягом на бетон (технологія «пост-напруження»).

Дослідження напружено-деформованого стану прогонової будови включало встановлення параметрів просторової роботи та напружено-деформованого стану елементів прогонової будови за допомогою вимірювання абсолютних деформацій (прогинів), реєстрацію сигналів акустичної емісії (АЕ) під дією статичного навантаження.

За випробувальне навантаження використовували вантажні автомобілі. Максимальне значення випробувального навантаження становило 137,74 т при установці автомобілів в межах прогонів із максимально можливим наближенням їх у поперечному напрямку до краю правої сторони проїзної частини, у поздовжньому напрямку автомобілі розташовувались так, щоб завантажити максимальним навантаженням середину випробовуваного прогону споруди.

Результати. На основі проведеного дослідження прогонової будови естакади шляхопроводу встановлено параметри її просторової роботи та напружено-деформованого стану за допомогою вимірювання абсолютних деформацій (прогинів) під дією статичного навантаження. За результатами досліджень визначено значення конструктивного коефіцієнта k, що знаходиться в межах 0,44 … 0,93.

Експериментально визначені значення коефіцієнтів поперечного розподілу (КПР) для

балок та проведений чисельний аналіз натурної та аналітичної просторової роботи прогонової будови по коефіцієнтах поперечного розподілу.

У результаті дослідження споруди із використанням методу акустичної емісії встановлено, що на час випробувань конструкції прогонової будови не мають дефектів в матеріалах, які б мали тенденцію до аварійного розвитку.

Висновки. Натурні дослідження транспортної споруди значної довжини із монолітною попередньо напруженою прогоновою будовою (пост напруженої системи) показали правильність теоретичних підходів до розрахунку та конструювання такої споруди.

На основі проведених досліджень прогонової будови встановлені параметри її просторової роботи та напружено-деформованого стану елементів. Результати аналізу отриманих даних засвідчили добру просторову роботу та жорсткість прогонової будови, а також відповідність основних параметрів споруди діючим нормам щодо проєктування мостів.

***Ключові слова:*** випробування, деформативність, пост-напружені системи, прогонова будова, технічний стан.

## Вступ

Досвід експлуатації залізобетонних прогонових будов мостів з часу свого застосування показує необхідність їх постійного вдосконалення.

За рахунок застосування попереднього натягу арматури в залізобетонних прогонових будовах мостів отримали змогу підвищити тріщиностійкість таких конструкцій, експлуатаційну надійність. Особливо це актуально при необхідності збільшення довжини прогонів залізобетонних прогонових будов.

Зі зростанням маси транспортних засобів, підвищенням рівня інтенсивності їх руху, а також необхідність підвищення експлуатаційної надійності та збільшення довговічності мостів, викликає потребу у застосування високоміцних матеріалів та надійних конструкцій при зведенні мостів.

Попередньо напружені залізобетонні конструкції в мостобудуванні постійно вдосконалюються та раціоналізуються. Застосування високоміцної арматури та якісної бетонної суміші для виготовлення залізобетонних монолітних попередньо напружених прогонових будов мостів сприяє збільшенню довжини прогонів, зменшенню затрат матеріалів на влаштування. Це дало можливість конкурувати залізобетонним прогоновим будовам з металевими при перекритті великих прогонів.

Застосування монолітних попередньо напружених прогонових будов з натягом на бетон (пост-напружені системи) є новітнім для України і тільки набуває популярності при проєктуванні та будівництві мостів [6, 7 – 9]. Вони мають багато переваг порівняно зі збірним попередньо напруженим залізобетоном. Але необхідно вирішити ще ряд проблем при проєктуванні та зведенні таких споруд для досягнення ефективності конструкцій, які б прослужили запроєктований строк, використовуючи всі свої переваги.

Досвід застосування монолітних попередньо напружених прогонових будов з натягом арматури на бетон при будівництві мостів в США, Франції, Німеччині Швейцарії, Норвегії, Австрії доводить ефективність таких конструкцій.

Метою роботи є дослідження напружено-деформованого стану конструкції монолітної нерозрізної попередньо напруженої прогонової будови естакади з натягом на бетон (пост напруженої системи) в м. Херсон.

**Основна частина**

Шляхопровід через залізницю розташований на просп. Адмірала Сенявіна – Залаегерсег в м. Херсон. Підходи до шляхопроводу влаштовані у вигляді естакади. Загальний вигляд споруди наведено на **рис. 1**.

***Рисунок 1*** – Загальний вигляд споруди

Досліджувана прогонова будова естакади в осях 7-10 – залізобетонна монолітна попередньо напружена. Статична схема прогонової будови – балочна нерозрізна, влаштована за схемою 20 м + 28 м + 20 м. Прогонова будова влаштована з трьох балок суцільного перерізу об'єднаних між собою плитою проїзної частини. Армування балок виконано попередньо напруженими пучками з натягом на бетон (технологія «пост-напруження»). Балки мають постійну висоту по всій довжині прогонової будови. Розміри балок: висота – 1,28 м; ширина – 1,2 м. Розміри плити проїзної частини: товщина між балками – 0,32 м; товщина консольних частин змінна – (0,32 – 0,22) м; виліт лівої консолі (від осі балки) плити – 2,86 м; виліт правої консолі (від осі балки) плити – 2,94 м. Загальний вигляд прогонової будови естакади наведено на **рис. 2**.

***Рисунок 2*** – Загальний вигляд досліджуваної прогонової будови естакади

Розрахункові навантаження на споруду – А-15, НК 100.

Перед випробуванням споруди були проведені обстеження її конструкцій для встановлення наявності дефектів, що могли б вплинути на їх несну здатність, вантажопідйомність. На момент обстеження споруди таких дефектів не було виявлено, тому застережень щодо її випробувань з обмеженнями щодо рівня випробувального навантаження не було.

Дослідження напружено-деформованого стану прогонової будови включало встановлення параметрів просторової роботи елементів прогонової будови за допомогою вимірювання абсолютних деформацій (прогинів), реєстрацію сигналів акустичної емісії (АЕ) під дією статичного навантаження.

За випробувальне навантаження використовували три вантажні автомобілі марки Ford Cargo 4142D та один – MAN TGA 41.400 масою від 32,18 т до 36,43 т. Максимальне значення випробувального навантаження становило 137,74 т при установці чотирьох автомобілів у межах прогонів.

Завантаження прогонів прогонових будов споруди випробувальним навантаженням (вантажними автомобілями) велось за схемами із максимально можливим наближенням автомобілів у поперечному напрямку до краю правої сторони проїзної частини. У поздовжньому напрямку автомобілі розташовувались так, щоб завантажити максимальним навантаженням середину випробовуваного прогону споруди та надопорний переріз (**табл. 1**).

***Таблиця 1***

***Опис схем завантаження елементів моста***

| № схеми | № підсхеми | Кількість автомобілів та значення максимального навантаження | Завантажуваний елемент (відповідно до нумерації опор) |
|---|---|---|---|
| 1 | | 2 (71,45 т) | Прогін 7-8 |
| 2 | 2.1 | 2 (71,45 т) | Прогін 8-9 |
| | 2.2 | 4 (137,74 т) | |
| 3 | | 2 (71,45 т) | Прогін 9-10 |

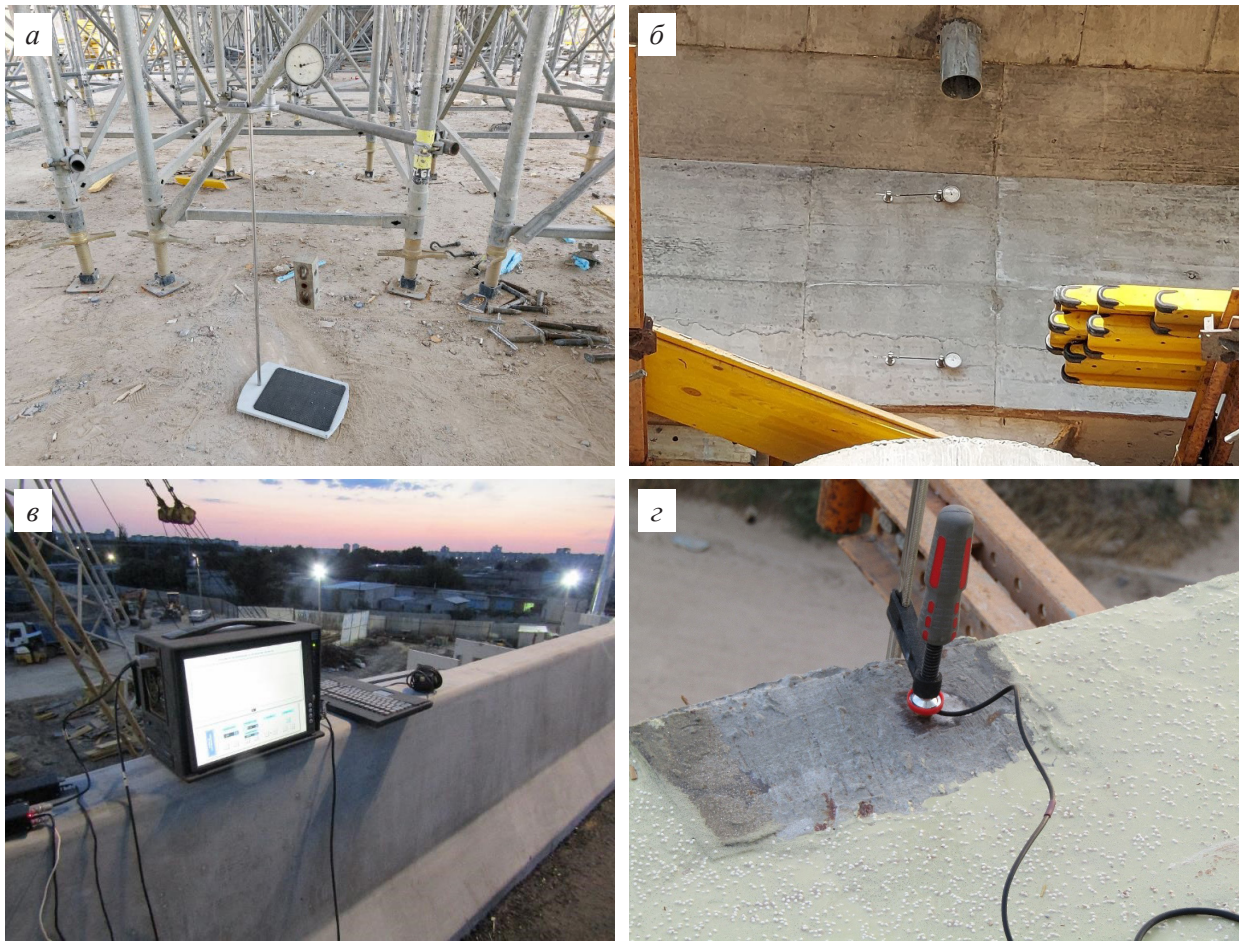
На **рис. 3** наведено загальний вигляд випробувального навантаження.

*а)* за схемою 1;
*б)* за схемою 2.

***Рисунок 3*** – Загальний вигляд випробувального навантаження

Під час випробування вимірювались вертикальні переміщення (прогини) балок прогонових будов за допомогою прогиномірів та лазерного нівеліру, реєстрували сигнали акустичної емісії (АЕ) (**рис. 4**).

Для визначення розрахункових величин зусиль, перевірки вантажопідйомності та встановлення рівня завантаження прогонової будови споруди, проводили статичний розрахунок з використання програмного комплексу Midas 2021. Геометричні розміри та січення основних елементів конструкцій споруди прийняті в розрахунковій схемі згідно результатів натурних вимірювань. Загальний вигляд скінчено-елементної моделі в ПК Midas 2021 представлено на **рис. 5**. Розрахункова просторова схема прогонової будови естакади моделювалася стержневими балочними елементами.




*а)* прогиномір ПАО;
*б)* механічний мікроіндикатор;
*в)* програмно-технічний комплекс «АКЕМ»;
*г)* датчика програмно-технічного комплексу «АКЕМ».

***Рисунок 4*** – Загальний вигляд вимірювальних приладів

Для перевірки режиму просторової роботи прогонової будови її скінченно-елементна модель була розрахована на аналітичні аналоги випробувальних схем (приклади схем наведено на **рис. 6**).

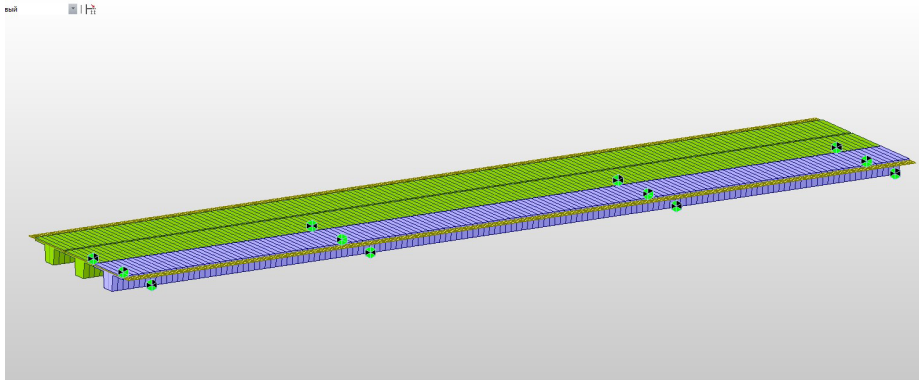
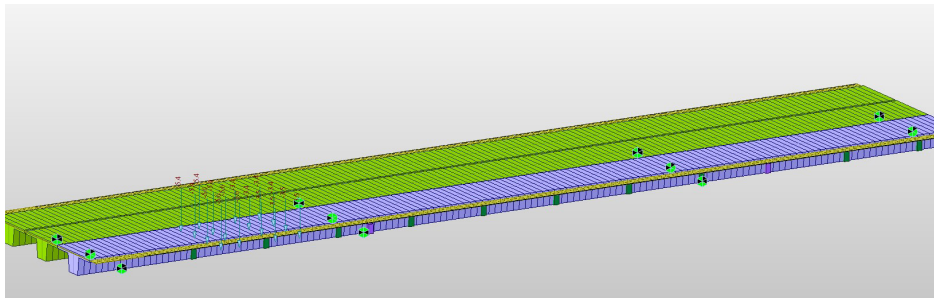
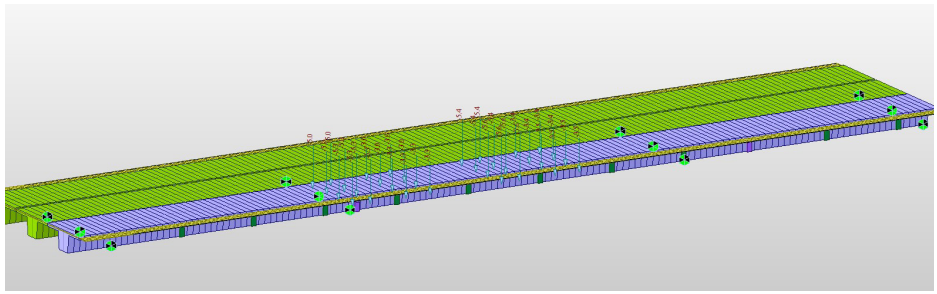


***Рисунок 5*** – Загальний вигляд скінчено-елементної моделі прогонової будови в осях 7-10 в ПК Midas

*а*



*б*



*а)* встановлення навантаження в прогоні 7-8;
*б)* встановлення навантаження в прогоні 8-9.

***Рисунок 6*** – Приклади випробувальних схем прогонової будови

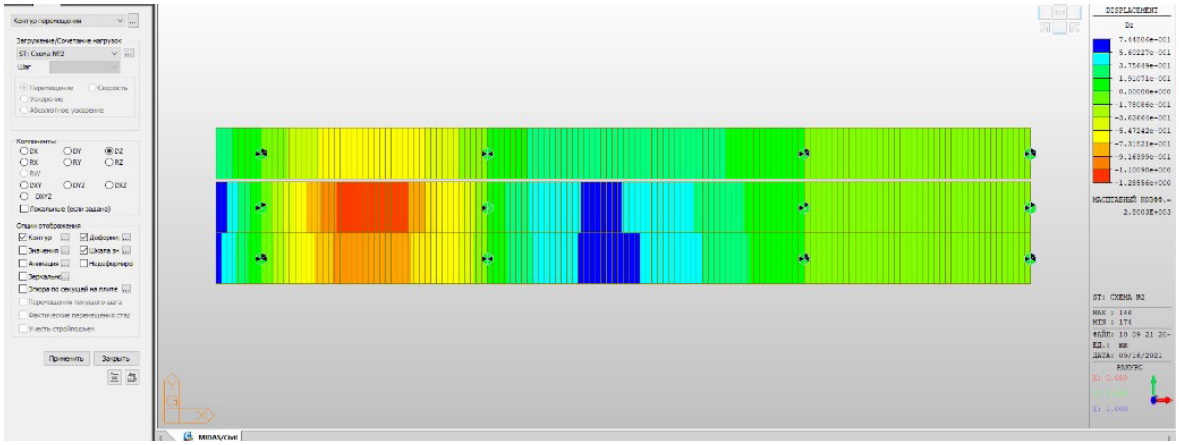
На **рис. 7** подано ізополя переміщень прогонової будови від навантажень за різними схемами.

Результати розрахунку переміщень, отриманих при розрахунку скінчено-елементної моделі, та експериментальні дані прогинів балок прогонової будови, що отримані під час випробувань наведені в **табл. 2** та **рис. 8**.

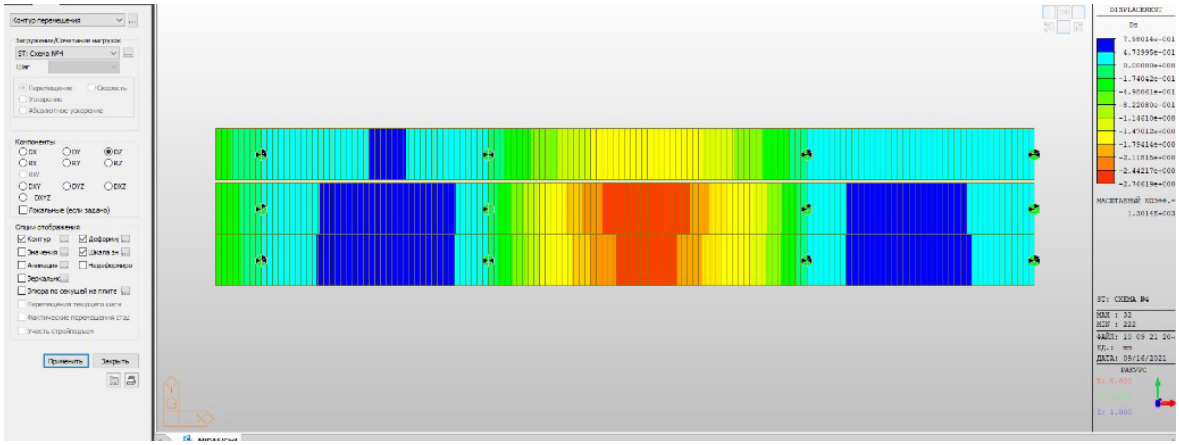
Відповідно до даних **табл. 2** значення конструктивного коефіцієнта $k$, що визначається як відношення значення виміряного прогину $f_{exp}$ до значення аналітичного $f_{calc}$ ($k = f_{exp} / f_{calc}$), знаходиться в межах 0,44 … 0,93. За даними численних випробувань відомо, що для несних залізобетонних конструкцій його значення знаходиться в межах від 0,7 до 1,0. Обчислений за випробувальними схемами конструктивний коефіцієнт менший від одиниці у всіх випадках. Малі величини коефіцієнта $k$ можуть указувати на наявність в елементах моста резервів несної здатності,

а також пояснюватися неможливістю врахування у ідеалізованій скінченно-елементній моделі усіх особливостей статичної роботи прогонової будови під час експлуатації.

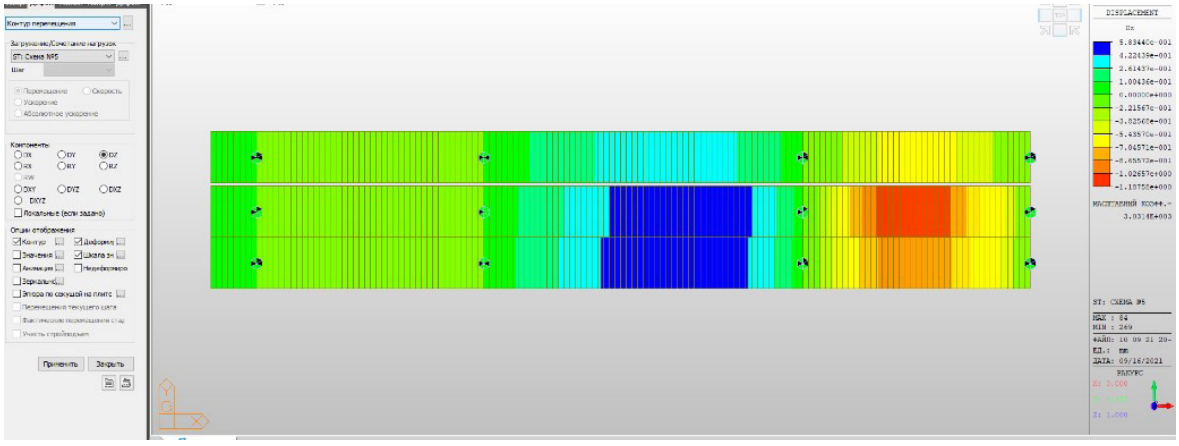
*а*



*б*



*в*



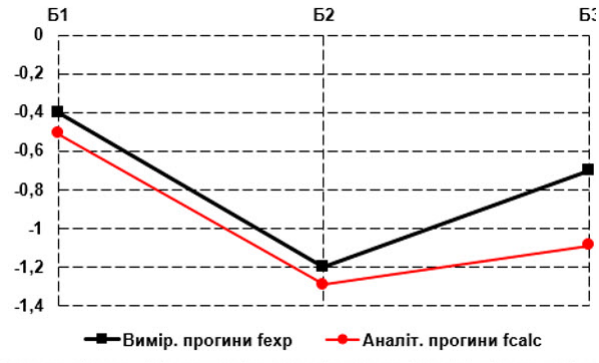
*а)* при схемі 1;
*б)* при схемі 2;
*в)* при схемі 3.

***Рисунок 7*** – Ізополя переміщень прогонової будови від навантажень

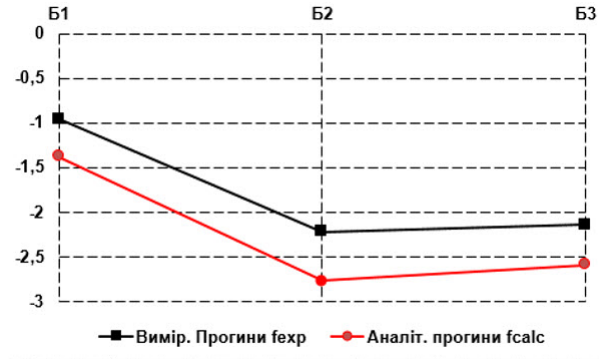
*Таблиця 2*

***Величини виміряних $f_{exp}$, аналітичних прогинів $f_{calc}$ та конструктивних коефіцієнтів k прогону***

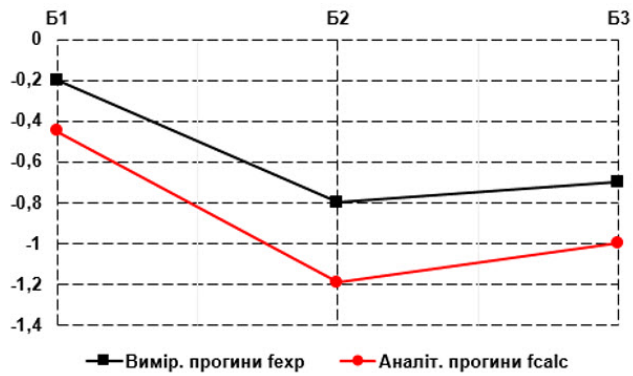
| Схема | Прогін | Показники | Балка | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Б1 | Б2 | Б3 |
| 1 | Середина 7-8 | $f_{exp}$, мм | 0,4 | 1,2 | 0,7 |
| | | $f_{calc}$, мм | 0,51 | 1,29 | 1,09 |
| | | ***k*** | **0,78** | **0,93** | **0,64** |
| 2 | Середина 8-9 | $f_{exp}$, мм | 0,96 | 2,22 | 2,14 |
| | | $f_{calc}$, мм | 1,38 | 2,77 | 2,59 |
| | | ***k*** | **0,7** | **0,8** | **0,83** |
| 3 | Середина 9-10 | $f_{exp}$, мм | 0,2 | 0,8 | 0,7 |
| | | $f_{calc}$, мм | 0,45 | 1,19 | 1,0 |
| | | ***k*** | **0,44** | **0,67** | **0,7** |




*а*




*б*




*в*

*а)* при схемі 1;
*б)* при схемі 2;
*в)* при схемі 3.

***Рисунок 8*** – Порівняння виміряних $f_{exp}$ та аналітичних прогинів $f_{calc}$

Приведені до нормативного значення експериментальні прогини наведені в **табл. 3**, з якої слідує, що значення виміряних приведених нормативного значення прогинів значно менші допустимих 1/400 $l_p$ згідно з нормативними документами.

***Таблиця 3***

***Значення експериментальних прогинів прогонових будов, приведені до нормативного навантаження***

| Схема | Прогін | Коефіцієнт приведення, $K_p$ | Максимальні виміряні прогини $f_{exp}$, | Виміряні приведені прогини $f_{exp,l}= f_{exp}/K_p$, мм | $f_{exp,l}/l_p$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Середина 7-8 | 0,48 | 1,2 | 2,5 | 1/8 000 |
| 2 | Середина 8-9 | 0,53 | 2,22 | 4,19 | 1/6 684 |
| 3 | Середина 9-10 | 0,48 | 0,8 | 1,67 | 1/1 198 |

Чисельний аналіз натурної та аналітичної просторової роботи можна провести по коефіцієнтах поперечного розподілу (*КПР*) для балок з відомими значеннями прогину. Експериментально встановлене значення коефіцієнтів поперечного розподілу для кожної балки визначають за формулою:

$$КПР_{exp,i} = \frac{f_{exp,i}}{\sum_{i=1}^{n} f_{exp,i}}, \quad (1)$$

де $f_{exp,i}$ – виміряні під час випробувань прогини балок.

Значення експериментально встановленого коефіцієнта поперечного розподілу порівнюють зі значенням аналітично встановленого *КПР*, що визначають за формулою:

$$КПР_{calc,i} = \frac{f_{calc,i}}{\sum_{i=1}^{n} f_{calc,i}}, \quad (2)$$

де $f_{calc,i}$ – обчислені аналітично прогини балок.

Результати аналізу експериментально та аналітично встановлених коефіцієнтів поперечного розподілу (**табл. 4**, **рис. 9**) свідчить про в цілому однаковий характер просторової роботи прогонової будови. Найбільший у відсотковому значенні розкид притаманний найменш завантаженим балкам, у той час як найменший розкид притаманний найбільш завантаженим.

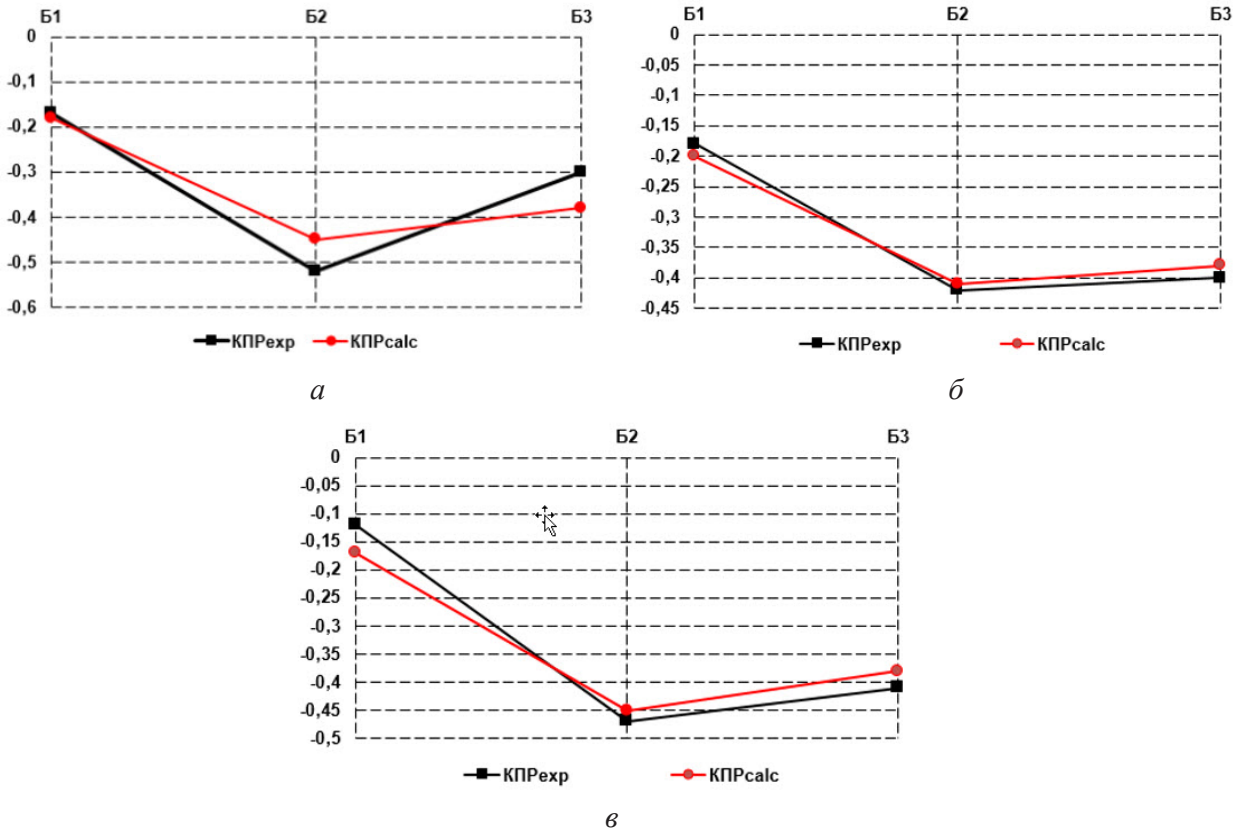
Оцінку небезпеки процесів, що відбуваються в структурі матеріалу прогонової будови споруди при її навантаженні здійснювали шляхом аналізу кінетики розвитку випромінювання АЕ з використанням спільного аналізу даних, отриманих на всіх ступенях її завантаження.

Результати проведених акустико-емісійних досліджень показують, що при статичних випробуваннях прогонової будови фіксуються сигнали АЕ від локальної динамічної перебудови структури матеріалу конструкцій прогонової будови. На це вказують відповідні значення параметру $K_p$, що не перевищують 6. Оцінка небезпеки розвитку процесів руйнування у структурі матеріалів показала, що мікродефекти структури матеріалу прогонової будови, які виникають при навантаженні конструкцій споруди за відповідними схемами завантаження не мають тенденції до розвитку і при збільшенні рівня завантаження сповільнюють свій ріст.

*Таблиця 4*

***Величини експериментально та аналітично встановлених коефіцієнтів поперечного розподілу прогонової будови***

| Схема | Показники | Балка | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Б1 | Б2 | Б3 |
| 1 | $КПР_{exp}$ | 0,17 | 0,52 | 0,3 |
| | $КПР_{calc}$ | 0,18 | 0,45 | 0,38 |
| | **Різниця, %** | **5,6** | **-15,6** | **-21,1** |
| 2 | $КПР_{exp}$ | 0,18 | 0,42 | 0,4 |
| | $КПР_{calc}$ | 0,20 | 0,41 | 0,38 |
| | **Різниця, %** | **9** | **-4** | **-5,1** |
| 3 | $КПР_{exp}$ | 0,12 | 0,47 | 0,41 |
| | $КПР_{calc}$ | 0,17 | 0,45 | 0,38 |
| | **Різниця, %** | **29,4** | **-5,1** | **-7,9** |




*а* *б*

*в*

*а)* при схемі 1;
*б)* при схемі 2;
*в)* при схемі 3.

***Рисунок 9*** – Порівняння експериментально встановлених $КПР_{exp}$ та аналітичних $КПР_{calc}$ коефіцієнтів поперечного розподілу

У результаті дослідження споруди із використанням методу акустичної емісії встановлено, що на час випробувань конструкції прогонової будови не мають дефектів в матеріалах, які б мали тенденцію до аварійного розвитку.

## Висновки

Натурні дослідження транспортної споруди значної довжини із монолітною попередньо напруженою прогоновою будовою (пост напруженої системи) показали правильність теоретичних підходів до розрахунку та конструювання такої споруди.

На основі проведених досліджень прогонової будови встановлені параметри її просторової роботи та напружено-деформованого стану елементів. Результати аналізу отриманих даних засвідчили добру просторову роботу та жорсткість прогонової будови, а також відповідність основних параметрів споруди діючим нормам щодо проєктування мостів.

## Список літератури

1. ДСТУ 9181:2022 Споруди транспорту. Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. Київ. 2022. 121 с. (Інформація та документація).

2. ДСТУ 8908:2019 Автодорожні мости. Класифікація дефектів. Київ. 2019. 89 с. (Інформація та документація).

3. ДБН В.1.2-15:2009 Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи. Київ, 2010. 45 с. (Інформація та документація).

4. ДБН В.2.3-6:2009 Споруди транспорту. Мости та труби. Обстеження і випробування Київ, 2010. 47 с. ( Інформація та документація).

5. СОУ 45.2-00018112-044:2009 Споруди транспорту. Статичні випробування автодорожніх мостів. Київ. 2009. 54 с. (Інформація та документація).

6. Р В.3.2-03450778-832 Рекомендації з проектування монолітних попередньо-напружених мостів з напруженням на бетон (пост-напружені системи). Київ. 2013. 73 с. (Інформація та документація).

7. Коваль П. М., Сташук П. М., Ковальчик Я. І. Робота залізобетонного монолітного попередньо напруженого нерозрізного моста під навантаженням. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне, 2011. № 22. С. 658–665.

8. Ковальчик Я. І., Сташук П. М., Фаль А. Є., Бабяк І. П. Аналіз термонапруженого стану монолітної попередньо напруженої естакади. *Вісник НУ «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*. Львів, 2015. С. 123–134.

9. Коваль П. М., Сташук П. М., Ковальчик Я. І. Дослідження тріщиностійкості монолітної попередньо напруженої естакади методом акустичної емісії. *Дороги і мости*. Київ, 2010. № 12. С. 56–62.

## References

1. DSTU 9181:2022 Sporudy transportu. Nastanova z otsiniuvannia i prohnozuvannia tekhnichnoho stanu avtodorozhnikh 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].

2. DSTU 8908:2019 Avtodorozhni mosty. Klasyfikatsiia defektiv [State Standard of Ukraine (DSTU 8908:2019) Road bridges. Classification of defects]. Kyiv. 2019. 89 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

3. DBN B.1.2-15:2009 Sporudy transportu. Mosty ta truby. Navantazhennia i vplyvy [State Building Norms (DBN B.1.2-15:2009) Transport facilities. Bridges and pipes. Loads and influences. Kyiv, 2010. 45 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

4. DBN B.2.3-6:2009 Sporudy transportu. Mosty ta truby. Obstezhennia i vyprobuvannia [State Building Norms (DBN B.2.3-6:2009) Transport buildings. Bridges and pipes. Examinations and tests]. Kyiv, 2010. 47 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

5. SOU 45.2-00018112-044:2009 Sporudy transportu. Statychni vyprobuvannia avtodorozhnikh mostiv (Standard of organization of Ukraine [Standard of organization of Ukraine (SOU 45.2-00018112-044:2009) Transport buildings. Static tests of road bridges]. Kyiv, 2009. 54 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

6. R V.3.2-03450778-832 Rekomendatsii z proektuvannia monolitnykh poperedno-napruzhenykh mostiv z napruzhenniam na beton (post-napruzheni systemy) [Recommendations for the design of monolithic pre-stressed bridges with stress on concrete (post tensioned systems)]. Kyiv, 2013. 73 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

7. Koval P. M., Stashuk P. M., Kovalchyk Ya. I. Robota zalizobetonnoho monolitnoho poperedno napruzhenoho nerozriznoho mosta pid navantazhenniam [Operation of a reinforced concrete monolithic prestressed continuous bridge under load]. *Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy*. Rivne, 2011. № 22. P. 658–665 [in Ukrainian].

8. Kovalchyk Ya. I., Stashuk P. M., Fal A. Ye., Babiak I. P. Analiz termonapruzhenoho stanu monolitnoi poperedno napruzhenoi estakady [Analysis of the thermal stress state of a monolithic prestressed overpass]. *Visnyk NU «Lvivska politekhnika». Teoriia i praktyka budivnytstva.* Lviv, 2015. P. 123–134 [in Ukrainian].

9. Koval P. M., Stashuk P. M., Kovalchyk Ya. I. Doslidzhennia trishchynostiikosti monolitnoi poperedno napruzhenoi estakady metodom akustychnoi emisii [Study of crack resistance of monolithic prestressed overpass by acoustic emission method]. *Dorohy i mosty*. Kyiv, 2010. № 12. P. 56–62 [in Ukrainian].

**Serhii Stoianovych**, *Ph.D., Associate Prof., https://orcid.org/0000-0002-1363-7356*
**Roman Poliuga**, *Ph.D., Associate Prof., https://orcid.org/0000-0003-3729-0577*
*National Academy of Fine Arts and Architecture, Kyiv, Ukraine*

## RESEARCH OF THE STRESSED AND DEFORMED STATE OF A REINFORCED CONCRETE MONOLITHIC PRE-STRESSED RUNWAY STRUCTURE

***Abstract***

Introduction. The experience of operation of reinforced concrete span structures of bridges from the time of their use shows the need for their constant improvement.

Due to the use of pre-tensioning of reinforcement in reinforced concrete span structures of bridges, it was possible to increase the crack resistance of such structures and operational reliability. This is especially relevant when it is necessary to increase the length of spans of reinforced concrete span structures.

Problems Statement. The use of monolithic prestressed span structures with tension on concrete (post-tensioned systems) is the newest for Ukraine. They have many advantages compared to prefabricated prestressed reinforced concrete. But it is necessary to solve a number of problems in the design and construction of such structures in order to achieve the efficiency of structures that would serve the designed term, using all their advantages.

Therefore, the study of such structures, assessment of their stress-strain state will allow in the future to find solutions for their improvement, development of appropriate calculation recommendations, construction of such structures.

Purpose. Study of the stress-strain state of the structure of the monolithic non-separated prestressed span structure of the overpass with tension on concrete (post-tensioned system) in the city of Kherson.

Materials and Methods. The survey and testing of the flyover overpass over the railway in the city of Kherson was carried out. The researched span structure of the overpass is a girder continuous reinforced concrete monolithic prestressed structure, reinforced with prestressed beams with tension on the concrete («post-tensioning» technology).

The study of the stress-strain state of the span structure included establishing the parameters of spatial work and the stress-strain state of span structure elements by measuring absolute deformations (deflections), recording acoustic emission (AE) signals under the action of static load.

Trucks were used for the test load. The maximum value of the test load was 137.74 t when the cars were installed within the spans with the maximum possible approach of them in the transverse direction to the edge of the right side of the carriageway, in the longitudinal direction, the cars were positioned so as to load the middle of the tested span of the structure with the maximum load.

Results. On the basis of the conducted study of the span structure of the overpass, the parameters of its spatial operation and stress-strain state were determined by measuring absolute deformations (deflections) under the action of static load. Based on the results of research, the value of the design factor k was determined, which is in the range of 0.44 ... 0.93.

The values of transverse distribution coefficients (CPR) for beams were experimentally determined and a numerical analysis of real-life and analytical spatial work of the girder structure based on transverse distribution coefficients was carried out.

As a result of the study of the structure using the acoustic emission method, it was established that at the time of testing the structure of the span structure did not have defects in the materials that would have a tendency towards emergency development.

Conclusion. Real-time studies of a transport structure of considerable length with a monolithic prestressed span structure (post-stressed system) showed the correctness of theoretical approaches to the calculation and construction of such a structure.

The parameters of its spatial operation and the stress-strain state of the elements have been established on the basis of the conducted studies of the span structure. The results of the analysis of the received data proved the good spatial operation and rigidity of the span structure, as well as the compliance of the main parameters of the structure with the current norms regarding the design of bridges.

***Keywords:*** test, deformability, span, post-tensioned systems, technical condition.

https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.234

**УДК 625.7**

**Беленчук О. В.**, *https://orcid.org/0000-0003-0525-0546*
**Попович Н. І.**, *https://orcid.org/0000-0001-5822-2501*
**Теплюк Є. Ф.**, *https://orcid.org/0000-0001-5581-4798*

*Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (ДП «ДержДорНДІ»), м. Київ, Україна*

# ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ РУХУ НА ТРАНСПОРТНИХ РОЗВ'ЯЗКАХ В ОДНОМУ РІВНІ

***Анотація***

Вступ. Вагома частка дорожньо-транспортних пригод трапляється саме на перехрещеннях і примиканнях автомобільних доріг в одному рівні. Тому є потреба в підвищенні безпеки дорожнього руху на них із врахуванням сучасних вимог та кращої світової практики, а саме організації руху по кільцю на перехрещеннях доріг в одному рівні.

Проблематика. Збільшення автомобільного парку значно випереджає темпи зростання протяжності мережі доріг. У зв'язку з цим погіршуються умови руху, збільшується число дорожньо-транспортних пригод, зменшується пропускна здатність доріг, що призводить до зниження ефективності роботи дороги і збільшення вартості автомобільних перевезень. У таких умовах особливої актуальності набуває питання підвищення безпеки дорожнього руху, зокрема на транспортних розв'язках в одному рівні.

Мета. Дослідження безпеки руху на транспортних розв'язках в одному рівні, визначення причин виникнення дорожньо-транспортних пригод і формування пропозицій щодо зниження їх кількості.

Матеріали та методи. У статті було застосовано метод статистичної обробки даних для аналізування безпеки руху на автомобільних дорогах.

Результати. Проаналізовано причини виникнення дорожньо-транспортних пригод, зокрема на транспортних розв'язках в одному рівні та визначено, що кільцеві транспортні розв'язки є більш безпечними, аніж інші види транспортних розв'язок в одному рівні.

Висновки. Кільцеві транспортні розв'язки мають ефект уповільнення руху і завдяки цьому впливають на зменшення тяжкості наслідків від дорожньо-транспортних пригод, якщо такі все ж виникнуть. Чим менший діаметр кільця, навколо якого організовано рух по колу, тим менша швидкість руху транспортного потоку і, звичайно, більша можливість є у водія вчасно зупинитися, а у випадку можливого зіткнення пошкодження будуть незначні, що в свою чергу приведе до зменшення економічних втрат від дорожньо-транспортних пригод.

***Ключові слова:*** автомобільна дорога, безпека дорожнього руху, дорожньо-транспортна пригода, ДТП, кільцева розв'язка, перехрестя, транспортна розв'язка.

## Вступ

Проблема безпеки дорожнього руху була і залишається актуальною для багатьох країн світу, у тому числі і для України. Темпи зростання автомобільного парку значно збільшують навантаження на вулично-дорожню мережу і всю транспортну інфраструктуру. У результаті кількість загиблих в дорожньо-транспортних пригодах (далі – ДТП) залишається на досить високому рівні.

Одними з найбільш небезпечними ділянками автомобільних доріг є транспортні розв'язки в одному рівні, на яких досить часто спостерігається концентрація дорожньо-транспортних пригод, зокрема, через порушення правил дорожнього руху (далі – ПДР) водіями та пішоходами. За інформацією [1] у 2021 році на автомобільних дорогах України порушення правил проїзду перехресть займає третє місце серед причин виникнення ДТП із загиблими та/або травмованими, а більшість таких ДТП трапилось через перевищення швидкості (**табл. 1**, **рис. 1**).

***Таблиця 1***

***Розподіл ДТП із загиблими та/або травмованими за видами порушень ПДР в Україні за 2021 рік***

| Види порушень ПДР | Кількість ДТП з загиблими та/або травмованими | Загинуло, осіб | Травмовано, осіб |
|---|---|---|---|
| Перевищення швидкості | 10 024 | 1 791 | 12 321 |
| Порушення правил маневрування | 5 022 | 436 | 6 111 |
| Порушення правил проїзду перехресть | 2 115 | 87 | 2 876 |
| Порушення правил проїзду пішохідних переходів | 1 854 | 123 | 1 846 |
| Недотримання дистанції | 1 457 | 84 | 1 805 |
| Перехід пішоходів у невстановленому місці | 877 | 188 | 759 |
| Керування транспортним засобом у стані сп'яніння | 843 | 113 | 1 072 |
| Інші види порушень ПДР | 2 329 | 416 | 2 948 |

***Рисунок 1*** – Розподіл ДТП із загиблими та/або травмованими за видами порушень ПДР на автомобільних дорогах України (2021 рік)

Перевищення швидкості, зокрема під час проїзду перехресть, є причиною загибелі більшості людей на автомобільних дорогах в Україні протягом 2021 року. І така тенденція зберігається з року в рік. Також висока швидкість збільшує ризик потрапити у ДТП. Адже якщо виникає якась нестандартна ситуація, у водія менше часу – а отже, і можливостей, щоб адекватно відреагувати. До того ж, гальмівний шлях стає довшим. Якщо ДТП все ж сталася,

швидкість збільшує тяжкість травм, а отже й імовірність смертельних наслідків. Це стосується всіх учасників руху: водіїв автомобілів, пішоходів, велосипедистів, мотоциклістів. За даними ВООЗ, зменшення середньої швидкості руху на 5 % може скоротити кількість смертельних ДТП на 30 % [2].

Наприклад, у Нідерландах близько третини всіх смертей на дорогах можна віднести до перехресть. Частка смертельних випадків у результаті ДТП на перехрестях в містах більша, ніж на перехрестях позаміських автомобільних доріг. Серед велосипедистів кількість смертей на дорогах у зоні перехресть становить у середньому за рік 54 % від загальної кількості. Також половина щорічної кількості смертей водіїв мопедів на дорогах відбувається в результаті ДТП у зоні транспортних розв'язок в одному рівні. Імовірність смерті пішоходів у зоні перехресть становить 26 % [3].

## Основна частина

Транспортна розв'язка повинна забезпечити безпечний і комфортний рух користувачів дороги, безпечне та зручне перехрещення, розгалуження, злиття транспортних потоків, а також перестроювання транспортних засобів у транспортному потоці для виконання маневрів. Організація дорожнього руху на транспортній розв'язці повинна бути зрозумілою водіям транспортних засобів для безпечного та своєчасного здійснення необхідних маневрів.

Транспортні розв'язки в одному рівні є об'єктом підвищеної небезпеки для учасників дорожнього руху.

Як правило, серед видів ДТП, що стались на транспортних розв'язках в одному рівні переважають зіткнення та наїзд на пішохода. Основними причинами виникнення такого виду ДТП, як зіткнення на перехрещеннях і примиканнях в одному рівні на автомобільних дорогах можуть бути: незабезпечена бокова видимість і видимість зустрічного автомобіля; відсутність або погана видимість попереджувальних дорожніх знаків і знаків пріоритету; відсутність чи погана видимість дорожньої розмітки; неправильний вибір типу транспортної розв'язки в одному рівні; наявність близько розташованих до перехрестя автобусних зупинок, що змушує водіїв виїжджати зразу на основну смугу руху, відсутність виділеної смуги для лівого повороту; відсутність перехідно-швидкісних смуг; відсутність напрямних острівців у передбачених будівельними нормами місцях; відсутність місцевих проїздів тощо.

Виникнення такого виду ДТП, як наїзд на пішохода в зоні транспортних розв'язок в одному рівні зумовлене звичайно ж порушенням ПДР як самими пішоходами так і водіями. Але, завданням дорожніх служб є зменшити ризики виникнення таких порушень шляхом встановлення пішохідних огороджень з метою упорядкування руху пішоходів; забезпечення роботи зовнішнього освітлення в зоні наземних пішохідних переходів; влаштування острівців безпеки на наземних пішохідних переходах, влаштування засобів заспокоєння руху тощо.

Вибір класу і форми розв'язки, з урахуванням умов її розташування, здійснюється на основі техніко-економічного порівняння варіантів згідно з [4]. Перед вибором типу розв'язки необхідно визначитися щодо розподілу інтенсивності руху за напрямками руху. Важливо також приділити увагу засобам безпеки пішоходів і маломобільних учасників дорожнього руху у разі наявності наземних пішохідних переходів на перехрещеннях доріг в одному рівні.

Першою визначальною характеристикою безпеки перехрестя є тип перехрестя. Крім того, кожен тип перехрестя має характеристики, які можуть вплинути на його безпеку:

- кількість можливих конфліктних точок;
- дозволена швидкість руху;
- різниця в масі транспортних засобів, які зустрічаються на перехресті;
- кут удару (кут перехрещення доріг);

– співвідношення інтенсивності руху між головним і другорядним транспортними потоками.

Відповідно до поняття стійкої безпеки дорожнього руху [5] ідеальне перехрестя залежить від категорій доріг, що перетинаються. Керівний принцип безпечних перехресть полягає в тому, що виникнення конфліктів між транспортними засобами дозволено лише тоді, коли швидкість і маса транспортних засобів не сильно відрізняються. Тому для безпеки дорожнього руху необхідно вживати заходів для зменшення швидкості руху на підході до перехрестя. Тобто на перехрестях, де є рух лише автомобілів, безпечною вважається максимальна швидкість руху 50 км/год. У випадку, коли інтенсивний моторизований рух перетинається з набагато легшими транспортними засобами (мопеди, велосипеди) або з пішоходами, швидкість варто зменшити ще більше. Для таких умов безпечна максимальна швидкість становить 30 км/год. Досягти фізичного зниження швидкості руху водіями можна за допомогою застосування засобів заспокоєння руху, таких, як дорожні пагорби, підвищені перехрестя чи міні-кільцеві транспортні розв'язки.

Кільцеві перехрестя 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.

Дослідження показують, що влаштування кільцевої розв'язки замість нерегульованого перехрестя дозволяє скоротити кількість ДТП на 41 % для чотирьохстороннього перехрестя та на 32 % – для тристороннього. Влаштування кільцевої розв'язки замість регульованого перехрестя – зменшує кількість аварій на (11 – 17) %. Для забезпечення комфортного і безпечного руху рекомендовано, щоб під'їзди до кільцевої розв'язки були розташовані рівномірно (**рис. 2**) [6].

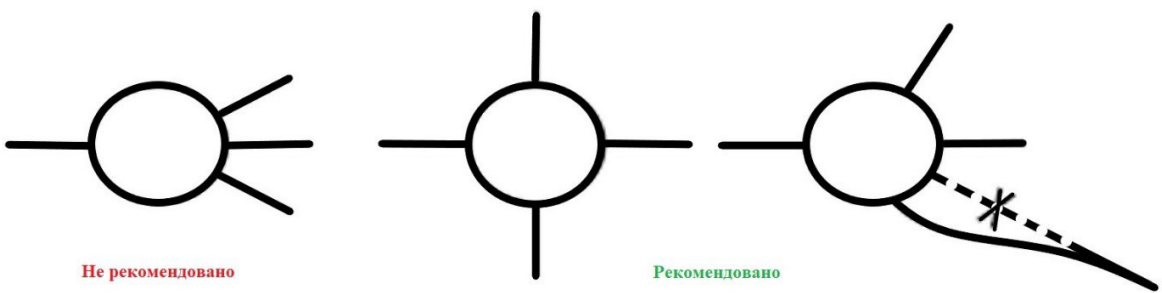



***Рисунок 2*** – Приклад схем розташування під'їздів до кільцевої розв'язки

Правильно запроєктовані кільцеві розв'язки є безпечними, а тому варто уникати надмірної кількості попереджувальних технічних засобів організації руху (знаків, засобів заспокоєння руху), що може призвести до інформаційного перевантаження і зниження ефективності їх застосування.

Звичайно, не завжди є можливість влаштувати кільцеву розв'язку, і не завжди кільцева розв'язка є оптимальним рішенням поставленої задачі. Але є певні переваги, які рекомендовано враховувати під час вибору типу транспортної розв'язки, серед яких можна виділити такі [3, 7]:

– кільцеві розв'язки мають менше конфліктних точок порівняно з нерегульованими перехрестями і тому зменшують ризики виникнення «зіткнень» на перехресті (**рис. 3**);

– займають меншу площу порівняно з транспортними розв'язками в різних рівнях, що важливо при проблемах з відведенням земельних ділянок;

– вартість влаштування кільцевої розв'язки в одному рівні суттєво менша порівняно із вартістю влаштування транспортної розв'язки в різних рівнях;

– ДТП, які виникли на розв'язці кільцевого типу з малим і середнім діаметром центрального острівця, не приводять до серйозних наслідків (тяжких поранень та загибелі людей), оскільки швидкість на кільці незначна;

– система регулювання руху (кільце головне) не потребує встановлення світлофорів і їх обслуговування, а отже не потребує зайвих витрат;

– підвищення безпеки руху, яке досягається зниженням швидкості під час наближення до транспортної розв'язки;

– пропускна здатність може бути вищою ніж у звичного перехрестя зі світлофорним регулюванням через відсутність затримок під час перехідних інтервалів;

– час очікування порівняно з лінійним перехрестям може бути меншим, оскільки кільцева розв'язка зазвичай не має світлофорного регулювання, а отже відсутня потреба очікувати зелений сигнал світлофора;

– кількість підходів до кільцевої транспортної розв'язки може бути більше ніж чотири без впливу на її складність, у той час коли лінійне перехрестя з більш ніж чотирма підходами, як правило, потребує влаштування світлофорного регулювання з тривалим циклом регулювання;

– інші переваги, зокрема можливе зниження рівня шуму та викидів шкідливих речовин через відсутність заторів.

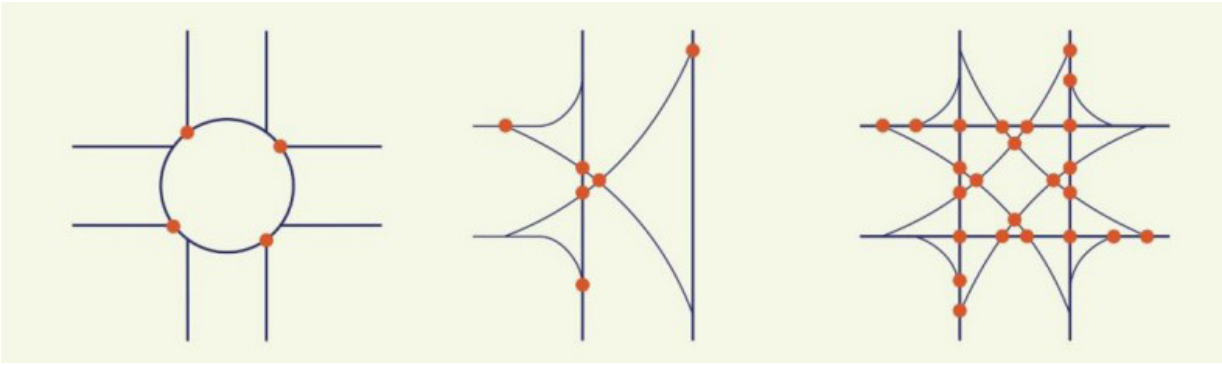


***Рисунок 3*** – Порівняння кількості конфліктних точок на кільцевих і лінійних транспортних розв'язках в одному рівні

За розміром центрального острівця кільцеві розв'язки поділяють на [8]:

– великі, діаметр центрального острівця яких становить більше ніж 60 м;
– середні – діаметр центрального острівця становить від 18 м до 60 м включно;
– малі – діаметр центрального острівця від становить від 4 м до 18 м включно;
– міні-кільцеві, з діаметром центрального острівця від 2,5 м до 4,0 м.

Великі кільцеві розв'язки влаштовують на автомобільних дорогах з інтенсивністю руху понад 5 000 авт./добу. Пріоритет у русі на них дозволено встановлювати світлофорним регулюванням. Кількість смуг руху на таких розв'язках може бути від 2 до 6.

Середні та малі кільцеві розв'язки потрібно влаштовувати на дорогах з інтенсивністю до 5 000 авт./добу. За умови, коли інтенсивність руху становить понад 5 000 авт/добу, такі розв'язки дозволено влаштовувати у випадку обмеженого простору і відповідного обґрунтування та у населених пунктах. Середні та малі кільцеві розв'язки є саморегулівними, світлофорне регулювання на них не застосовується. Єдине правило організації руху на них – кільце головне.

Міні-кільцеві розв'язки (міні-каруселі) займають меншу площу, зменшують швидкість руху на в'їзді, мають перевагу руху на кільці. Вони можуть застосовуватися тільки там, де швидкість

обмежена до 50 км/год. Передбачати такі розв'язки доцільно в населених пунктах чи передмісті на перехрещеннях з невисокою сумарною інтенсивністю руху (до 2 000 авт./добу).

Міні-кільцеві розв’язки є саморегулівні (без світлофорного регулювання). Але їх слід застосовувати при забезпеченні видимості кільця у напрямку руху. З метою полегшення розвороту великогабаритного транспорту вся або майже вся поверхня центрального острівця повинна бути доступною для руху і мати твердий покрив – асфальтобетонний, цементобетонний, бруківку або інший матеріал, який може витримувати навантаження від розрахункового транспорту.

Слід надавати перевагу проєктуванню кільцевих розв’язок з меншим діаметром центрального острівця. Окрім того, більш безпечними є односмугові кільцеві розв’язки. Їх безпека зумовлена меншою кількістю конфліктних точок, обмеженням швидкості для всього транспортного потоку та меншою різницею кутів в’їзду. Багатосмугові кільцеві розв’язки є менш безпечними, ніж односмугові, оскільки вони мають більшу кількість конфліктних точок, вони складніші, швидкість руху на них вища, а кут в’їзду менш гострий. Та разом з тим вони є безпечнішими, аніж інші типи транспортних розв’язок в одному рівні [3].

## Висновки

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. Одним з таких засобів заспокоєння руху є кільцеві транспортні розв’язки з малим діаметром центрального острівця.

Правильна організація руху на кільцевій розв’язці повністю або частково виключає перехрещення транспортних потоків, замінюючи його послідовним злиттям і розгалуженням у короткій зоні − зоні розгалуження. При цьому, якщо ДТП все ж виникають, то вони, як правило, не мають тяжких наслідків, саме тому цей вид транспортної розв’язки в одному рівні вважається одним з найбезпечніших. На відміну від звичайного лінійного перехрестя, де кількість конфліктних точок у середньому може бути 32, на кільцевій транспортній розв’язці цей показник у середньому становить 8 точок.

Окрім того, застосування кільцевих розв’язок має ряд інших переваг перед лінійними перехрестями, зокрема відсутня потреба у встановлення світлофорного обладнання, кількість підходів до транспортної розв’язки може бути більше ніж чотири, економічні показники влаштування та обслуговування кільцевої транспортної розв’язки є нижчими, ніж вартість влаштування розв’язки в двох рівнях, покращення екологічних показників і зниження рівня шуму через відсутність заторів на підходах до транспортної розв’язки.

Враховуючи власні дослідження та світовий досвід можна рекомендувати влаштування в Україні середніх, малих і міні-кільцевих транспортних розв’язок, які спонукають до уповільнення руху, що сприятиме підвищенню безпеки руху на наших автомобільних дорогах.

## Список літератури

1. Статистичні дані про аварійність Департаменту патрульної поліції Національної поліції України. URL: https://patrolpolice.gov.ua/statystyka/ (дата звернення: 10.08.2023).

2. Безпека дорожнього руху в Україні: перемоги та нові виклики в умовах війни. Центр демократії та верховенства права. Листопад, 2022. URL: https://cedem.org.ua/news/bezpeka-dorozhnogo-ruhu-v-ukrayini/ (дата звернення: 10.08.2023).

3. Roundabouts and other intersections. (Кільцеві розв’язки та інші перехрестя). Інформаційний бюлетень Інституту досліджень безпеки дорожнього руху (SWOV). Гаага, червень,

2022. 22 с. URL: https://www.swov.nl/en/facts-figures/factsheet/roundabouts-and-other-intersections (дата звернення: 10.08.2023).

4. ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. Київ, 2015. 91 с. (Інформація та документація).

5. Sustainable Road Safety. (Стійка безпека дорожнього руху). Інформаційний бюлетень Інституту досліджень безпеки дорожнього руху (SWOV). Гаага, березень, 2019. 26 с. URL: https://swov.nl/en/fact-sheet/sustainable-road-safety (дата звернення: 10.08.2023).

6. Road Safety Manual. Recommendations from the World Road Association (PIARC). (Посібник з безпеки руху. Рекомендації Світової дорожньої асоціації). Париж, 2003. 629 с. URL: https://www.piarc.org/en/PIARC-knowledge-base-Roads-and-Road-Transportation/Road-Safety-Sustainability/Road-Safety/safety-manual (дата звернення: 10.08.2023).

7. Roundabouts – Technical Summary. (Кільцеві перехрестя. Технічний звіт) Номер звіту: FHWA-SA-10-006. Федеральне управління автомобільних доріг. Управління безпеки. США, 2010. 32 с. URL: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/42603 (дата звернення: 10.08.2023)

8. ГБН В.2.3-37641918-555:2016 Автомобільні дороги. Транспортні розв'язки в одному рівні. Проектування. Зі Зміною № 1. Київ, 2022. 59 с. (Інформація та документація).

## References

1. Statistical data on the accident rate of the Patrol Police Department of the National Police of Ukraine. URL: https://patrolpolice.gov.ua/statystyka/ (Last accessed: 10.08.2023) [in Urkainian].

2. Bezpeka dorozhnoho rukhu v Ukraini: peremohy ta novi vyklyky v umovakh viiny. Centre for democracy and rule of law [Road safety in Ukraine: victories and new challenges in the conditions of war. Center for Democracy and Rule of Law]. November, 2022. URL: https://cedem.org.ua/news/bezpeka-dorozhnogo-ruhu-v-ukrayini/ (Last accessed: 10.08.2023) [in Urkainian].

3. Roundabouts and other intersections. SWOV fact sheet, June 2022. SWOV, The Hague. URL: https://www.swov.nl/en/facts-figures/factsheet/roundabouts-and-other-intersections (Last accessed: 10.08.2023) [in English].

4. DBN V.2.3-4:2015 Avtomobilni dorohy. Chastyna I. Proektuvannia. Chastyna II. Budivnytstvo [State Building Norms (DBN V.2.3-4:2015) Highways. Part I. Design. Part II. Building]. Kyiv, 2016. 104 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

5. Sustainable Road Safety. SWOV fact sheet, March 2019. SWOV, The Hague. URL: https://swov.nl/en/fact-sheet/sustainable-road-safety (Last accessed: 10.08.2023) [in English].

6. Road Safety Manual. Recommendations from the World Road Association (PIARC). Paris, 2003. 629 p. URL: https://www.piarc.org/en/PIARC-knowledge-base-Roads-and-Road-Transportation/Road-Safety-Sustainability/Road-Safety/safety-manual (Last accessed: 10.08.2023) [in English].

7. Roundabouts – Technical Summary. Report Number: FHWA-SA-10-006. Federal Highway Administration. Office of Safety. USA, 2010. 32 p. URL: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/42603 (Last accessed: 10.08.2023) [in English].

8. HBN V.2.3-37641918-555:2016 Avtomobilni dorohy. Transportni rozviazky v odnomu rivni. Proektuvannia. Zi Zminoiu № 1 [Highway. At-grade Intersections. Designing. With Change No. 1]. Kyiv, 2015. 59 p. (Information and documentation) [in Urkainian].

**Olha Belenchuk**, *https://orcid.org/0000-0003-0525-0546*
**Natalia Popovych**, *https://orcid.org/0000-0001-5822-2501*
**Yevhen Tepliuk**, *https://orcid.org/0000-0001-5581-4798*
*M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, Kyiv, Ukraine*

## IMPROVING TRAFFIC SAFETY AT INTERSECTIONS

***Abstract***

Introduction. A significant share of traffic accidents occurs precisely at intersections and junctions Therefore, there is a need to increase road safety on them, taking into account modern requirements and best global practice, namely the organization of roundabouts at intersections

Problem Statement. The increase in the car fleet is significantly ahead of the rate of growth of the road network. In this regard, traffic conditions worsen, the number of traffic accidents increases, the capacity of roads decreases, which leads to a decrease in road efficiency and an increase in the cost of road transportation. In such conditions, the issue of increasing road safety, in particular at intersections, becomes especially urgent.

Purpose. Study of traffic safety at intersections, determination of the causes of traffic accidents and formulation of proposals to reduce their number.

Materials and methods. In the article, the method of statistical data processing was used to analyze traffic safety on highways.

Results. The causes of traffic accidents were analyzed, in particular at intersections, and it was determined that roundabouts are safer than other types of intersections.

Conclusions. Roundabouts have the effect of slowing down traffic and, thanks to this, affect the reduction of the severity of the consequences of traffic accidents, if they do occur. The smaller the diameter of the roundabout is, the lower the speed of the traffic flow and, of course, the driver has a greater opportunity to stop in time, and in case of a possible accident, the damage will be insignificant, which in turn will lead to a decrease in economic losses from traffic accidents.

***Keywords***: highway, traffic safety, accident, traffic accident, roundabout, intersection.

https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.242

**УДК 625.7/.8**

**Терещенко Т. А.**, *канд. хім. наук, https://orcid.org/0000-0001-5206-9921*

*Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М. П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»), м. Київ, Україна*

# ПРОЄКТУВАННЯ АВТОМАГІСТРАЛЕЙ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО, СУБКОНТИНЕНТАЛЬНОГО ТА ТРАНСРЕГІОНАЛЬНОГО СПОЛУЧЕННЯ В РОЗРІЗІ ПОЛОЖЕНЬ ЗАКОНОДАВЧИХ АКТІВ ЄС

***Анотація***

Вступ. У вступі до статті висвітлено важливість проєктування та будівництва автомагістралей різного функціонального рівня як ключового фактора сучасних інтеграційних процесів, а також підкреслено роль автомагістралей для суттєвого підвищення безпеки мережі автомобільних доріг.

Проблематика. Тематика статті стосується аспектів проєктування автомагістралей на підставі досвіду європейських колег в розрізі положень відповідних законодавчих актів ЄС.

Мета. Метою статті є аналіз основних положень щодо проєктування автомагістралей континентального, субконтинентального і трансрегіонального сполучення з розглядом, у межах обсягу публікації, особливостей проєктування окремих елементів автомобільних доріг, які є універсальними для різних систем проєктування.

Результати. Розглянуто категоризацію автомагістралей відповідно до функціонального рівня і пов'язану з нею класифікацію за проєктними класами, де ураховано юрисдикцію автомагістралей, розташування відносно зон забудови і відповідні обмеження за швидкістю руху транспортних засобів. Визначено характеристики автомагістралей, які дозволяють розглядати їх як окрему категорію автомобільних доріг у світовій практиці дорожнього будівництва.

Виконано аналіз нормування параметрів елементів автомагістралі, які є універсальними в різних системах проєктування автомобільних доріг, зокрема елементів, що проєктуються в горизонтальній проєкції (в плані) та в вертикальному профілі дороги. Підкреслено, що згідно з розглянутим досвідом європейських колег складовими безпеки на автомагістралях є забезпечення належної якості руху транспортного потоку та збалансоване тривимірне (просторове) поєднання елементів автомагістралі.

Також стисло проаналізовано положення проєктування транспортних розв'язок і примикань з урахуванням термінології, пов'язаної з основною проїзною частиною, сполучними дорогами та їх елементами (розподільчими дорогами та з'їздами), які утворюють зони спряження транспортних потоків і повинні бути стандартизовані відповідно до вимог безпеки.

Висновки. Автомагістралі є ключовим чинником інтеграційних процесів і підвищення безпеки мережі автомобільних доріг, що пояснюється високими вимогами щодо проєктування і будівництва та характеристиками, які дозволяють розглядати автомагістралі як окрему категорію автомобільних доріг.

У разі наближення параметрів елементів автомагістралі до установлених критичних значень у частині проєктування, з метою забезпечення безпеки, висуваються окремі вимоги.

У зв'язку з євроінтеграційними процесами актуальним є питання впровадження нормативів стосовно проєктування і будівництва автомобільних доріг, які більш повно ураховують положення європейських нормативних документів, що може потребувати розширення категоризації доріг міжнародного значення з урахуванням функціонального рівня.

***Ключові слова:*** автомагістраль, категоризація за функціональним рівнем, проєктування, дорожній просвіт, поєднання елементів у горизонтальній і вертикальній проєкції, транспортна розв'язка, якість руху транспортного потоку.

## Вступ

Як зазначено в [1], однією з визначальних особливостей двадцять першого століття – не зважаючи на відстані, складність геополітичних та топографічних умов – може стати економічна інтеграція Євразійського суперконтиненту. Рушієм такого об'єднання мають бути сили глобальної інтеграції, поглиблення комунікацій і скорочення транспортних витрат, а також зростання і процвітання регіональних економік.

Питання проєктування мережі автомобільних доріг, зокрема автомагістралей, із забезпеченням транспортного сполучення за межі державних кордонів України набуває високої актуальності в зв'язку з очікуваним входженням України до європейського економічного та політичного простору й участю в розбудові трансєвропейської транспортної мережі, де основними регуляторними актами є: Угода [2], Регламент (ЄС) [3] та Директива (ЄС) [4] з урахуванням Рішення Комісії [5].

Поряд з інтеграційними та економічними чинниками, надзвичайно важливим аспектом розвитку мережі автомагістралей є безпека – згідно з даними [6] кількість ДТП на автомагістралях є значно меншою, ніж на автомобільних дорогах інших категорій: наприклад, норвезькі колеги (дані 2009 року) заявляли зниження кількості ДТП на автомагістралях порівняно з двосмуговими дорогами на (50–81) %. Схожі результати – зниження на (70–90) % порівняно з автомобільними дорогами більш низьких категорій та вулицями – заявляли дослідницькі групи багатьох європейських країн, а також США.

У статті проаналізовано досвід проєктування автомагістралей в одній з найбільш розвинутих країн ЄС – Німеччині [7][1]. Доцільно зазначити, що Німеччина є однією з небагатьох країн, де відсутні обмеження за максимально допустимою швидкістю руху транспортних засобів на автомагістралях – є рекомендована швидкість руху, яка становить 130 км/год; згідно з даними [6] станом на 2018 рік Німеччина є єдиною країною групи *IRTAD* (*International Traffic Safety Data and Analysis Group*, Міжнародна група збору даних і аналізу безпеки дорожнього руху), де такі обмеження не встановлено. Окремі напрацювання німецьких колег розглянуто в розрізі відповідних положень законодавчих актів ЄС.

## Класифікація та загальні аспекти проєктування автомагістралей різного функціонального рівня

Відповідно до положень [7] автомагістраль – це багатосмугова автомобільна дорога без доступу до прилеглих територій, з роздільними суміжними проїзними частинами, що проєктуються відповідно до вимог, установлених проєктним класом дороги, та яка не перетинається в одному рівні з будь-якою іншою автомобільною дорогою; згідно з [6] таке визначення відповідає характеристикам, що дозволяють розглядати автомагістралі як окрему категорію автомобільних доріг згідно зі світовою практикою дорожнього будівництва, не залежно від континенту.[2]

---

[1] Вихідний матеріал отриманий за посиланням на видавництво *FGSV* на сайті *Wikipedia*, є англомовним перекладом технічного регламенту «*Richtlinien für die Anlagen von Autobahnen*» 2008 р. (власний переклад *FGSV*) зі змінами від 2008 р., 2012 р., 2013 р., викладеними на сайті *FGSV*. Матеріали використано відповідно до інформації, наведеної на сайті *Wikipedia* за посиланням: https://en.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Verifiability.

[2] Згідно з [2] автомагістраль – дорога, яку спроєктовано та побудовано для руху автомобільного транспорту, яка не обслуговує прилеглі до неї території та яка:

– має, за винятком спеціальних місць або тимчасово, роздільні проїзні частини для двох напрямків руху, відокремлені одна від одної розділювальною смугою, не призначеною для руху – або, як виняток, іншими засобами;

Автомагістралі згідно з [7] віднесено до трьох категорій за дальністю сполучення: AS 0 (континентальне сполучення), AS I (субконтинентальне сполучення) та AS II (трансрегіональне сполучення); класифікацію за проєктними класами здійснюють відповідно до категорії, розташування автомагістралі по відношенню до зон забудови та з урахуванням юрисдикції автомагістралі. Проєктні класи доріг категорії AS (автомагістралей) наведено в **табл. 1**.

***Таблиця 1***

***Проєктні класи автомагістралей (категорія AS) та окремі вимоги щодо проєктування згідно з [7]***

| Проєктний клас | ЕКА I A | ЕКА I B | ЕКА 2 | | ЕКА 3 |
|---|---|---|---|---|---|
| Категорія | AS 0/AS I | AS II | AS 0/AS I | AS II | AS II |
| Автомагістралі під юрисдикцією федеральних інституцій | + | + | - | - | +/- (всі) |
| Розташування відносно зон забудови | У межах та за межами зон забудови | У межах та за межами зон забудови | У межах та за межами зон забудови | За межами зон забудови | У межах зон забудови* |
| Обмеження за максимальною швидкістю руху, км/год | немає | | | | ≤ 100** |
| Рекомендована відстань між примиканнями автомобільних доріг на автомагістралі, м*** | > 8 000 | > 5 000 | > 5 000 | | немає |

* Автомагістралі населених пунктів.
** Переважно установлюють 80 км/год.
*** Вказано як відстань між осями для двох послідовно влаштованих примикань.

Як можна зазначити, (**табл. 1**) обмеження за швидкістю руху для проєктного класу ЕКА I та ЕКА 2 не установлюють – рекомендованою є швидкість 130 км/год (проте винятком щодо обмеження може бути, наприклад, випадок, коли радіус кривої в горизонтальній проєкції є близьким до мінімально допустимого значення, або інші екстремальні умови).

При цьому потрібно додати, що обмеження за швидкістю руху на автомагістралях у більшості краї *IRTAD* (дані станом на 2015 рік) знаходяться переважно в межах від 110 км/год до 130 км/год, у США такі обмеження встановлює кожен штат окремо, діапазон обмежень (88 – 129) км/год [6].

Розглядаючи вимоги [7] (**табл. 1**) необхідно зазначити, що проєктний клас ділянок автомагістралей змінювати заборонено; винятком є випадок входження автомагістралі категорії AS II проєктного класу ЕКА 2 до зон забудови; відповідна зміна проєктного класу може бути реалізована виключно на примиканні доріг. Згідно з вимогами [2] категорійні характеристики доріг міжнародного значення повинні бути однорідними для секцій якомога більшої протяжності, зміни реалізують на ділянках, де вони будуть безумовно очевидними для користувачів дороги: на вузлах доріг, за зміни топографії місцевості, на підступах до зон забудови, на прикордонних заставах, на ділянках в'їзду/виїзду з платних доріг тощо.

– не перетинається в одному рівні з будь-якою дорогою, залізничною чи трамвайною колією чи пішохідною доріжкою; і
– має спеціальну познаку автомагістралі.

У разі стадійного будівництва автомагістралі на першій стадії забезпечується влаштування, з відкриттям руху в двох напрямках, лише однієї проїзної частини з належним плануванням усіх подальших робіт і з забезпеченням належної інформованості користувачів дороги.

Максимально допустимі габаритні розміри транспортних засобів для проїзду автомагістралями континентального, субконтинентального і трансрегіонального сполучення згідно з [7] становлять:

– ширина – 2,55 м (рефрижератор – 2,60 м);
– висота – 4,00 м;
– довжина: шарнірно-зчленований вантажний автомобіль – 16,50 м;
автопоїзд – 18,75 м;

Проїзд маршрутних транспортних засобів та відповідні вимоги до габаритних розмірів не регламентовано.

Проєктування автомагістралей, поряд із забезпеченням високої перепускальної здатності, спрямоване на забезпечення безпеки та належної якості руху транспортного потоку (*traffic flow quality*). У зв'язку з необхідністю поєднувати високу інтенсивність з високою швидкістю руху важливою характеристикою є безпека автомагістралей. Згідно з [7] чинниками безпеки є: створення умов безпечного руху власне транспортного засобу, умов безпечного руху транспортного засобу в потоці, проєктування примикань автомобільних доріг з мінімальною кількістю зон конфлікту; створення безпечних умов у зонах розділювальних смуг та елементів автомагістралі, що примикають до проїзної частини з боку узбіч; створення безпечних умов під час виконання робіт з утримання доріг.

Стосовно якості руху транспортного потоку – основними чинниками позитивного впливу є: відповідність розмірів автомагістралі в поперечному перетині («*dimensions of motorway cross-section*») умовам забезпечення належної швидкості руху транспортних засобів, у тому числі у «години пік»; наявність потрібної кількості смуг підйому на ділянках з певним висхідним градієнтом; зведення кількості примикань автомобільних доріг на трасі до абсолютного мінімуму; перепуск транспортних засобів по стандартній кількості смуг руху під час виконання дорожніх робіт і обстеження дороги [7].

Розрахункова швидкість руху згідно з [7] приймається для умов їзди по зволоженій поверхні дороги («*speed in the wet*»).[3] Елементи автомагістралей проєктуються за розрахункової швидкості руху:

– 130 км/год для ЕКА I A;
– 120 км/год для ЕКА I B;
– 100 км/год для ЕКА 2;
– 80 км/год для ЕКА 3.

Згідно з [2] розрахункову швидкість руху 80 км/год може бути призначено також за складних топографічних умов і на ділянках обмеженої протяжності за наявності суттєвих обмежень.

Проєктування автомагістралей повинне забезпечувати захист навколишнього середовища та мінімізацію використання ресурсів і здійснюється з урахуванням природоохоронних вимог чинного законодавства.

## Нормування параметрів дорожнього просвіту

Для визначення проєктних розмірів елементів автомагістралі в поперечному перетині нормуються розміри:

– коридору транспортного потоку (*traffic space*);
– бічного зазору (*lateral clearance*);
– верхового зазору (*overhead clearance*).

[3] Згідно з [2] розрахункова швидкість руху – це швидкість, яку приймають під час проєктування автомобільної дороги для вибору геометричних параметрів, які забезпечують безпечний рух відособлених транспортних засобів за такої швидкості.

Коридор транспортного потоку характеризується розмірами, що визначаються в поперечному перетині й охоплюють простір, який займає власне транспортний засіб з потрібними бічними і верховими зазорами (з урахуванням кількості смуг руху) та простір над укріпленими смугами, укріпленим узбіччям.

Бічний зазор охоплює простір, необхідний для руху важких транспортних засобів зазначених вище габаритних розмірів з акомодацією мінімальних похибок у керуванні, з урахуванням деталей на виступах (тобто простір з урахуванням габаритів рухомого складу).

Верховий зазор охоплює простір, необхідний для руху транспортних засобів з акомодацією мінімальних похибок навантажування та вертикальних коливань (відскоків) на нерівностях поверхні покриву.

Також нормуються:

– дорожній просвіт (*clearance*);[4]
– бічний зазор безпеки (*lateral safety space*);
– верховий зазор безпеки (*overhead safety space*).

Дорожній просвіт охоплює коридор руху транспортного потоку, а також бічні та верховий зазори безпеки. Дорожній просвіт є вертикальним та застосовується за всією шириною охоплюючи бічні зазори безпеки [7]. Ширина бічного зазору безпеки становить 1,00 м, проте за відсутності укріплених узбіч її збільшують до 1,25 м, стандартна висота верхового зазору безпеки становить 0,45 м, таким чином дорожній просвіт для автомагістралей згідно з [7] складає 4,70 м, з яких 0,25 м припадає на верховий зазор. Зазначається, що таке значення (4,70 м) охоплює своєрідний буфер у 0,20 м для влаштування, за потреби, верхнього шару перекриття дорожнього одягу.

До стандартних елементів автомагістралі в поперечному перетині згідно з [7] відносяться:

– проїзна частина (*carriageway*) і поперечник з монолітних матеріалів у верхньому шарі (*paved width*);
– смуги руху (*lanes*);
– укріплені смуги (*hard strips*);
– бордюри, водовідвідні канави та лотки (*kerbs, draining channels*);
– укріплені узбіччя (*hard shoulders*);
– розділювальні смуги (*central reserves*);
– узбіччя (*verges*);
– відокремлювальні смуги (*separating strips*).

Проїзна частина складається зі смуг руху та укріплених смуг. Проїзна частина разом з укріпленими узбіччями утворюють поперечник з монолітних матеріалів, який дорівнює ширині коридору транспортного потоку.

Ширина смуг руху варіюється залежно від проєктного класу автомагістралі та призначення смуги (наприклад, для переважного проїзду важких транспортних засобів, або легкових автомобілів, відповідно з розташуванням у плані на проїзній частині праворуч або ліворуч) і становить 3,75 м або 3,50 м.

Ширина укріплених смуг приймається переважно 0,50 м, та 0,75 м – з боку розділювальної смуги автомагістралей проєктного класу ЕКА І і для випадків забезпечення необхідного простору під час виконання дорожніх робіт, як описано нижче.

Конструкція дорожнього одягу на укріплених узбіччях, з метою забезпечення проїзду важких транспортних засобів у разі виконання дорожніх робіт або виникнення аварійної ситуації, повинна бути ідентичною конструкції дорожнього одягу. Ширина укріпленого узбіччя, для безпечної зупинки транспортного засобу, повинна становити не менше ніж 2,50 м. Проте для

[4] Інший варіант перекладу терміна «*clearance*» – «габарит наближення споруд».

автомагістралей проєктного класу ЕКА І з чотирма смугами руху укріплені узбіччя за певних умов проєктують шириною 3,00 м – так, щоб укріплені узбіччя разом з укріпленої смугою шириною 0,75 м могли бути використані для руху транспортних засобів.

Ширину розділювальної смуги призначають переважно 4,00 м, для автомагістралей категорії ЕКА 3 – 2,50 м, проте ці розміри можуть бути збільшені, щоб забезпечити належне розміщення елементів штучних споруд та технічних споруд.

Відокремлювальні смуги влаштовують з метою просторового відділення основного транспортного потоку від транспортного потоку зі сполучних доріг (див. далі), згідно з [7] – 3,0 м завширшки.

Аналіз вимог щодо проєктування укосів у цій статті не виконано, оскільки це потребує паралельного виконання порівняльного аналізу геотехнічних умов, проте в [7] зазначається, що за висоти укосів 5,0 м та вище може потребуватися влаштування берм, за значної довжини ширину берм призначають 3,0 м.

Виходячи з того, що розміри автомагістралей у поперечному перетині повинні забезпечувати плавний рух транспортного потоку в умовах безпеки і комфорту, розмір елементів поперечного перетину мостів та тунелів мають бути однаковими з розмірами відповідних елементів автомагістралі [2]. Проте в [7] установлено, що тунелі характеризуються більш високою, в порівнянні з «відкритою» автомобільною дорогою, вартістю будівництва та забезпечення функціонування, тому розміри певних елементів поперечного перетину тунелів призначаються меншими, ніж для автомагістралей; проїзні частини займають кожна окремий тунель.

**Вимоги до поєднання елементів автомагістралі в горизонтальній та вертикальній проєкції**

Рекомендовані параметри основних елементів автомагістралей у горизонтальній та вертикальній проєкціях згідно з [2] наведено в **табл. 2**.

***Таблиця 2***

***Рекомендовані значення параметрів для поєднання елементів автомобільних доріг у горизонтальній та вертикальній проєкції згідно з [2]***

| Параметр | Рекомендоване значення параметра за розрахункової швидкості руху, км/год | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 80 | 100 | 120 | 140 |
| Мінімальний радіус кривої в горизонтальній проєкції (відповідно до максимально допустимого похилу на віражі 7 %), м | 240 | 450 | 650 | 1 000 |
| Максимальний поздовжній похил, % | 7 | 6 | 5 | 4 |
| Максимальний поздовжній похил у тунелях, %* | 5 | | | |
| Мінімальний радіус у найвищій точці в вертикальній проєкції | 3 000 | 6 000 | 10 000 | 18 000 |
| Мінімальний радіус у найнижчій точці в вертикальній проєкції | 2 000 | 3 000 | 4 200 | 6 000 |
| *Нове будівництво | | | | |

До основних елементів автомобільних доріг у горизонтальній проєкції (в плані) відносяться прямі (*straights*), кругові криві (*circular curves*) та перехідні криві (*transition curves*).

Прямі як елемент проєктування застосовують за рівнинного рельєфу місцевості, а також переважно на в'їздах та виїздах на примиканнях доріг; згідно з [7] рекомендовано обмежувати

довжину прямих максимальним значенням 2 000 м. Не рекомендовано проєктувати короткі прямі вставки на з'єднанні двох кривих з кривизною одного напрямку, проте, якщо це є необхідним, мінімальна довжина такої прямої вставки повинна становити 400 м.

Мінімальні радіуси кругових кривих повинні становити 900 м, 720 м, 470 м та 280 м для автомагістралей проєктних класів ЕКА ІА, ЕКА ІВ, ЕКА 2 та ЕКА 3 відповідно, що узгоджується з рекомендаціями [2] (**табл. 2**), ураховуючи наведені в розділі «Нормування параметрів елементів автомагістралі…» дані щодо розрахункової швидкості руху.

Перехідні криві проєктуються між круговими кривими або між прямою та круговою кривою з метою забезпечення плавного відцентрового прискорення та поступового входження/виходу з кривої. Перехідні криві можуть бути спроєктовані у вигляді елементарної клотоїди (*simple clothoid*) – на переході від прямої до кругової кривої, зворотної клотоїди (*reverse clothoid*) – спряження двох клотоїд, кожна з яких задовольняє вимогам до елементарної клотоїди та які мають кривизну в різних напрямках, «ламаної» клотоїди *("broken-back" clothoid*) – секції клотоїди, яка з'єднує дві кругові криві різних радіусів, що мають кривизну в одному напрямку, та які не стикаються і мають різні центри.

До основних елементів автомобільних доріг у вертикальному профілі відносяться поздовжній похил (*longitudinal gradient*), опуклі криві (*crest curves*) та ввігнуті криві (*sag curves*).

Важливо, що в разі виконання робіт з доведенням параметрів автомагістралей до рівня підвищених вимог (*improvement of motorways*) з коригуванням похилів, яке в більшості випадків приводить до підвищення швидкості руху на ділянці, особливо на ділянках зі складним рельєфом місцевості, зазвичай потребується належне коригування параметрів у плані.

Максимально допустимий поздовжній похил нормується залежно від проєктного класу автомагістралі згідно з [7] таким чином: ЕКА ІА – 4,0 %, ЕКА ІВ і ЕКА 2 – 4,5 % та ЕКА 3 – 6 %. За довжини ділянки з висхідним градієнтом 500 м і більше за поздовжнього похилу понад 2,0 % потрібно розглядати питання стосовно потреби в улаштуванні смуг підйому.

Параметри опуклих та ввігнутих (у вертикальному профілі) кривих установлюють таким чином, щоб забезпечити збалансоване просторове з'єднання елементів автомагістралі, а також належну відстань видимості для зупинки транспортного засобу; ці криві проєктуються як квадратичні параболічні криві. Характеристичним параметром є діаметр в екстремальній точці такої кривої. Мінімальні значення діаметрів згідно з [7] становлять для опуклих кривих за проєктних класів ЕКА ІА, ЕКА ІВ, ЕКА 2 та ЕКА 3 13 000 м, 10 000 м, 5 000 м та 3 000 м відповідно, для ввігнутих кривих за проєктних класів ЕКА ІА, ЕКА ІВ, ЕКА 2 та ЕКА 3 8 800 м, 5 700 м, 4 000 м та 2 600 м відповідно; нормується пряма відстань до центра такої кривої. Рекомендовано приймати діаметр ввігнутої кривої не менше ніж половина діаметра суміжної опуклої кривої.

Згідно з [7] висуваються також вимоги щодо збалансованого просторового, або тривимірного, поєднання елементів автомагістралі, які підлягають контролюванню з точки зору забезпеченості панорамної перспективи для водіїв. Доцільно зазначити такі стандартизовані 3-*D* елементи:

– на прямій (у плані) ділянці автомагістралі: пряма з постійним поздовжнім похилом, ввігнута крива, опукла крива;

– на кривій (у плані) ділянці автомагістралі: крива з постійним поздовжнім похилом, ввігнута крива, опукла крива.

Збалансоване тривимірне поєднання елементів автомагістралі позитивно впливає на поведінку водіїв і на безпеку. У цілому збалансоване поєднання передбачає однакову кількість точок на викривленнях в горизонтальній та вертикальній проєкціях; у протилежному випадку потрібно забезпечити відсутність суперечності між точками на викривленні в одній з проєкцій з точками викривлення на перетині в іншій проєкції.

Важливою передумовою безпеки та належної якості транспортного потоку є забезпечення відстані видимості для зупинки транспортного засобу (*stopping sight distance, $S_h$*)[5] – такі, що ураховують умови ділянки дороги. Власне, внаслідок потреби в урахуванні умов дороги нормовані відстані видимості для зупинки транспортного засобу є більшими, ніж фізіологічно обумовлена мінімальна відстань з урахуванням довжини гальмівного шляху відповідно до динаміки транспортного засобу в русі.

Мінімальна відстань видимості для зупинки транспортного засобу залежить від швидкості руху та від поздовжнього похилу на ділянці автомагістралі. Наприклад, за швидкості руху транспортного засобу 130 км/год значення $S_h$ варіюється від 275 м до 228 м за зміни поздовжнього похилу від мінус 5 % до 5 % [7].

Загальні вимоги – без урахування поздовжніх похилів – згідно з [2] наведено в **табл. 3**.

***Таблиця 3***

***Рекомендовані значення мінімальної відстані видимості для зупинки транспортного засобу залежно від швидкості руху згідно з [2]***

| Швидкість руху, км/год | 80 | 100 | 120 | 140 |
|---|---|---|---|---|
| Мінімальна відстань видимості для зупинки транспортного засобу, м | 100 | 150 | 200 | 300 |

Фактична відстань видимості в кожній точці контролювання (контролюють за довжиною хорд, на лівоповоротних кривих – для крайньої лівої смуги руху, для правоповоротних кривих – для крайньої правої смуги руху) повинна щонайменше дорівнювати видимості до зупинки автомобіля або перевищувати її. У разі, коли радіуси кривих наближуються до мінімально допустимих значень, вимога щодо забезпечення видимості на лівоповоротних кривих може бути виконана виключно в разі відсутності на розділювальній смузі потенційних візуальних перешкод (зелені насадження, бар'єри) на висоті до 0,90 м. У протилежному випадку потрібно переглянути план (проєкт) або, якщо це етап реконструкції, ввести обмеження за швидкістю руху.

Автомагістралі проєктуються: на прямих ділянках – з односкатним профілем з поперечним похилом, низхідним назовні, не менше ніж 2,5 %[6] (такий же похил переважно мають смуги злиття та розподілу транспортних потоків й укріплені узбіччя), на кругових кривих – з поперечним похилом, низхідним усередину, не менше ніж 2,5 % за максимального значення похилу 6,0 %. Максимальний відхил у вертикальній площини (*maximum incline*) не повинен перевищувати 9,0 %. Щоб уникнути проєктування віражів, де похил проходить крізь нульове значення, дозволяється приймати «від'ємний похил» мінус 2,5 %, низхідний назовні – для таких ділянок є обов'язковим обмеження швидкості за їзди по зволоженій поверхні дороги від 80 км/год для магістралей з проєктним класом ЕКА 3 до 120 км/год – для ЕКА І В.

Під час проєктування ділянки розвитку віражу (*superelevation development section*) проїзну частину, в поперечному її перетині, «обертають» навколо осі; в [7] передбачено різний характер такого повороту: поворот проїзних частин навколо осей проїзних частин, поворот проїзних частин навколо осей, що проходять крізь край з боку розділювальної смуги, сумісний поворот проїзних частин навколо осі автомагістралі. Перший випадок є «стандартним», другий та третій застосовують переважно в разі обмеження видимості в зоні розділювальної смуги.

У випадках, що потребують улаштування розширення проїзної частини, а саме:

[5] *Minimum stopping sight distance* – відстань, необхідна водієві для зупинки транспортного засобу на мокрій поверхні дороги в разі виникнення неочікуваної перешкоди.

[6] Згідно з [2] для автомобільних доріг міжнародного значення наводиться таке визначення характеристик на прямих ділянках – для доріг з роздільними суміжними проїзними частинами, що проєктуються з односкатним профілем, поперечний похил має бути в межах від 2 % до 3 %, низхідним у напрямку від розділювальної смуги.

– зміни розмірів у поперечному перетині на підходах до мостів, тунелів тощо;
– улаштування додаткової смуги руху;
– улаштування смуг злиття та розподілу транспортних потоків – проєктування виконують так, щоб забезпечити на розширенні конічний в плані (S-подібний уздовж країв) контур шляхом стикування двох квадратичних параболічних кривих, або проєктують такий контур не залежно від осі автомагістралі.

Розширення на криволінійних ділянках проєктують переважно з внутрішнього боку кривої – асиметрично; розширення на спрямлених ділянках проєктують переважно симетрично відносно осі автомагістралі.

**Загальні вимоги до проєктування примикань та транспортних розв'язок**

Згідно з положеннями [2] надається поняття вузлів автомобільних доріг міжнародного значення як точок взаємодії двох або більше транспортних потоків. При цьому зазначено, що для автомобільних доріг з двома роздільними проїзними частинами вузол автомобільної дороги може бути реалізований у вигляді транспортних розв'язок з розділенням транспортних потоків за рівнями або з взаємодією транспортних потоків в одному рівні; розділення транспортних потоків може бути повним або частковим.

Згідно з [7] на автомагістралях реалізують транспортні розв'язки в різних рівнях (*grade-separated*) у зоні взаємодії трьох або чотирьох доріг, а також примикання доріг з повним або, переважно, частковим розділенням транспортних потоків за рівнями (*partially grade-separated*).

До основних елементів транспортних розв'язок на автомагістралях в зоні примикання доріг, поряд з основною проїзною частиною (*mainline carriageway*) відносяться:
– сполучні дороги (*connector roads*);
– виїзди (*exits*);
– в'їзди (*entries*);
– зони спряження транспортних потоків, або зони спряження (*weaving areas*).

Сполучні дороги поділяють на з'їзди (*slip roads,* з'їзди на транспортних розв'язках) та розподільчі дороги (*link roads*, також *link* (*distributor*) *roads*).

З'їзди призначені для прямування транспортних потоків з однієї основної проїзної частини на іншу основну проїзну частину на транспортних розв'язках у зоні взаємодії трьох або чотирьох доріг, а також для злиття чи розділення транспортних потоків на примиканнях доріг. Розподільчі дороги призначені для винесення маневрів, що виконуються за умов взаємодії транспортних потоків, за межі основної проїзної частини, а також для забезпечення адаптації швидкості транспортних засобів на в'їзді/виїзді з основного транспортного потоку.

У стандартних схемах в'їздів та виїздів згідно з [7] застосовують поділ сполучних доріг за двома групами. До групи I віднесено сполучні дороги, що сполучають в'їзд та виїзд з повним розподілом за рівнями (тип «*grade separated – grade separated*») – не залежно від того, чи такі в'їзди/виїзди віднесено до основної проїзної частини, чи вони є складниками системи сполучних доріг; до групи II віднесено сполучні дороги, які починаються на в'їзді та закінчуються на примиканні до автомагістралі доріг інших категорій в одному рівні (тип «*grade separated – at-grade*»).

Спряження транспортних потоків (*weaving area*) утворюється за умов, коли відстань між виїздом та в'їздом у межах транспортної розв'язки на будь-який багатосмуговій проїзній частині не дозволяє розділити транспортні потоки. Зона спряження охоплює сполучну дорогу (частково), а також в'їзд, де кількість смуг руху збільшується, та виїзд, де кількість смуг руху зменшується. В зоні спряження рух відбувається за чотирма транспортними потоками: внутрішній відокремлений транспортний потік на основній проїзній частині, зовнішній відокремлений транспортний потік,

що залишає основну проїзну частину (автомагістраль) на наступному виїзді, та два спряжені транспортні потоки: такий, що зливається з основним потоком, та такий, що маневрує з метою відділення від основного потоку з подальшим виїздом. Якщо кількість смуг руху на в'їзді та виїзді є збалансованою, зона спряження є симетричною. Основною характеристикою симетричної зони спряження є те, що транспортний засіб у спряженому транспортному потоці виконує хоча б один маневр для зміни смуги руху.

Нормовані значення параметрів сполучних доріг визначаються швидкістю руху, яка є меншою, ніж на основній дорозі (загалом установлюється в межах від 30 км/год до 80 км/год за умов їзди по зволоженій поверхні дороги) – так, за швидкості руху 80 км/год призначаються такі значення окремих геометричних параметрів: мінімальний радіус кривої на з'їзді – 250 м, мінімальний діаметр опуклих кривих – 3 500 м, мінімальний діаметр ввігнутих кривих – 2 600 м, максимальний поздовжній похил на ділянках з висхідним градієнтом – 6 %, максимальний поздовжній похил на ділянках з низхідним градієнтом – мінус 7 %; максимальний відхил у вертикальній площині становить 9 %. Стосовно геометричних параметрів у поперечному перетині, які залежать від кількості смуг руху, зазначено, що нормування застосовують лише у випадках, коли відсутнє спряження транспортних потоків. Поряд з цим потрібно додати, що в [2] для з'їздів у складі транспортних розв'язок для відповідного випадку рекомендовано мінімальну ширину, охоплюючи узбіччя, 9 м. Розширення проїзної частини сполучних доріг на кривих розраховують з урахуванням колісної бази транспортних засобів; особливо це стосується випадків з радіусом кривої 150 м і менше [7].

Також потрібно додати, що згідно з [2] проєктування транспортних розв'язок має бути спрямованим на забезпечення простоти та уніформності проєктних рішень – геометрія транспортної розв'язки має бути максимально спрощеною відповідно до її функціонального рівня та доступною для сприйняття користувачем дороги, уніформність потрібно забезпечувати з «операторної» точки зору – тобто виходячи з того факту, що користувачі дороги «очікують» виконання однакових маневрів на транспортних розв'язках різного типу.

## Висновки

Поряд із забезпеченням інтеграційних процесів, проєктування та будівництво автомагістралей є ключовим чинником підвищення безпеки мережі автомобільних доріг, що пояснюється високими вимогами у всіх аспектах проєктування і будівництва, а також характеристиками, які дозволяють розглядати автомагістралі як окрему категорію автомобільних доріг.

Одним з важливих параметрів автомагістралі є висока швидкість руху транспортних засобів, зокрема розрахункова швидкість руху, яка впливає на вибір проєктних рішень для елементів автомагістралі. У разі наближення параметрів елементів до установлених критичних значень у частині проєктування, з метою забезпечення безпеки, висуваються окремі вимоги. Також важливими чинниками безпеки є якість руху транспортного потоку і збалансоване просторове поєднання елементів автомагістралі.

У зв'язку з євроінтеграційними процесами й очікуваним прийняттям повного комплексу національних стандартів України, ідентичних європейським нормам, може постати питання впровадження нормативів стосовно проєктування і будівництва автомобільних доріг, які більш повно ураховують положення європейських нормативних документів.

У національній галузі дорожнього будівництва рушієм відповідної роботи може бути прийнято розширення, на законодавчому рівні, категоризації доріг міжнародного значення з урахуванням функціонального рівня – забезпечення континентального, субконтинентального та транс регіонального сполучення.

**Список літератури**

1. Rastogi, C, and Arvis, J.-F. The Eurasian Connection Supply-Chain Efficiency along the Modern Silk Route through Central Asia (Public Disclosure Authorized 88891). The World Bank. 133 p. URL: https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/eb7ae1ad-aafb-51cd-8c1c-957a87adbe8a/content (дата звернення: 10.08.2023).
2. 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).
3. REGULATION (EU) No 1315/2013 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 December 2013 on Union guidelines for the development of the trans-European transport network and repealing Decision No 661/2010/EU. 128 p. URL: http://publications.europa.eu/resource/cellar/f277232a-699e-11e3-8e4e-01aa75ed71a1.0006.01/DOC_1 (дата звернення: 17.07.2023).
4. DIRECTIVE (EU) 2021/1187 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 7 July 2021 on streamlining measures for advancing the realization of the trans-European transport network (TEN-T). 13 p. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021L1187 (дата звернення: 18.07.2023).
5. COMMISSION DECISION of 12.5.2022 on the signing of a High-Level Understanding between the European Union and Ukraine on indicative maps of the Trans-European transport network in Ukraine, being a high level agreement within the meaning of Article 49(6) of Regulation (EU) No 1315/2013 (TEN-T regulation). 8 p. URL: https://transport.ec.europa.eu/system/files/2022-05/C_2022_3204.pdf (дата звернення: 20.07.2023).
6. Motorways 2018. European Commission Summary. 41 p. URL: https://road-safety.transport.ec.europa.eu/system/files/2021-07/ersosynthesis2018-motorways-summary.pdf (дата звернення: 17.07.2023).
7. Guidelines for the Design of Motorways. English Version of «Richtlinien für die Anlage von Autobahnen», Edition 2008, Translation 2011. 131 p. URL:https://www.fgsv-verlag.de/pub/media/pdf/202_E_PDF.v.pdf (дата звернення: 20.07.2023).

**References**

1. Rastogi, C, and Arvis, J.-F. The Eurasian Connection Supply-Chain Efficiency along the Modern Silk Route through Central Asia (Public Disclosure Authorized 88891). The World Bank. 133 p. URL: https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/eb7ae1ad-aafb-51cd-8c1c-957a87adbe8a/content (Last accessed: 10.08.2023) [in English].
2. 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].
3. REGULATION (EU) No 1315/2013 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 December 2013 on Union guidelines for the development of the trans-European transport network and repealing Decision No 661/2010/EU. 128 p. URL: http://publications.europa.eu/resource/cellar/f277232a-699e-11e3-8e4e-01aa75ed71a1.0006.01/DOC_1 (Last accessed: 17.07.2023) [in English].
4. DIRECTIVE (EU) 2021/1187 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 7 July 2021 on streamlining measures for advancing the realization of the trans-European transport network (TEN-T). 13 p. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021L1187 (Last accessed: 18.07.2023) [in English].
5. COMMISSION DECISION of 12.5.2022 on the signing of a High-Level Understanding between the European Union and Ukraine on indicative maps of the Trans-European transport network in Ukraine, being a high level agreement within the meaning of Article 49(6) of Regulation (EU) No 1315/2013 (TEN-T regulation). 8 p. URL: https://transport.ec.europa.eu/system/files/2022-

05/C_2022_3204.pdf (Last accessed: 20.07.2023) [in English].

6. Motorways 2018. European Commission Summary. 41 p. URL: https://road-safety.transport.ec.europa.eu/system/files/2021-07/ersosynthesis2018-motorways-summary.pdf (Last accessed: 17.07.2023) [in English].

7. Guidelines for the Design of Motorways. English Version of «Richtlinien für die Anlage von Autobahnen», Edition 2008, Translation 2011. 131 p. URL: https://www.fgsv-verlag.de/pub/media/pdf/202_E_PDF.v.pdf (Last accessed: 20.07.2023) [in English].

**Tetiana Tereshchenko**, *Ph.D., https://orcid.org/0000-0001-5206-9921*

*M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, Kyiv, Ukraine*

## DESIGN OF CONTINENTAL, SUBCONTINENTAL AND TRANSREGIONAL HIGHWAYS IN THE CONTEXT OF PROVISIONS OF LEGISLATIVE ACTS OF EU

Introduction. The introduction to the paper highlights the importance of the design and construction of highways of various link functions levels as a key factor in modern integration processes and also emphasizes the role of highways for substantial increasing of the road network safety.

Problem statement. The issues of the paper concern aspects of highways design based on the experience of European colleagues in the context of the provisions of the relevant legislative acts of EU.

Purpose. The goal of the paper is to analyze the main provisions for the design of continental, subcontinental and transregional highways considering, within the format of the publication, the design features of the highways elements which are universal for various design systems.

Results. The highways categorization regarding their link functions levels and with this categorization linked classification by design classes were reviewed which accept the highways jurisdiction and the build-up areas related location and also the corresponding restrictions on vehicle speed limits. The highways characteristics were defined allowing the determination of highways as a separate category of motor roads in the world-wide practice of the road building industry.

An analysis of the parameters of the highway elements standardization was performed where those elements are uniform in various systems of road designing, in particular the highway cross-section and also elements to be designed through vertical and horizontal alignment. It was emphasized that, according to the reviewed experience of European colleagues, the components ensuring the highway safety are the proper traffic flow quality and also balanced three-dimensional (spatial) alignment of the highway elements.

Also the design of interchanges and junctions was briefly analyzed concerning the terminology related the main carriageway, the connector roads and their constituents (link (distributor) roads and slip roads) which form the weaving areas of traffic flows and should be standardized regarding the road safety requirements.

Conclusions. Highways are a key factor for the integration processes and for improving the safety of the road network that may be explained by high requirements on their design and construction and also by characteristics that allow the highways consideration as a separate category of roads.

When the parameters of the highway elements approach the established critical values in the design part, in order to ensure safety, separate requirements are put forward.

Regarding the European integration processes, the issue of implementing standards for the design and construction of highways taking into account the provisions of European normative documents more fully could be relevant, that may require the expansion of the categorization of international roads taking into account the link functions levels.

***Keywords***: highway, categorization by link functions levels, design, clearance, horizontal and vertical alignment of elements, interchange, traffic flow quality.

https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.254

**УДК 625.7/.8**

**Сістук В. О.**[1], *канд. техн. наук, доц., https://orcid.org/0000-0003-4907-4265*
**Беспалов Д. О.**[2], *https://orcid.org/0000-0002-0778-5627*
**Тарасюк В. П.**[2], *канд. техн. наук, http://orcid.org/0000-0003-4762-5668*
**Іванець Л. І.**[2], *https://orcid.org/0009-0005-1962-1071*

[1] *Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна*

[2] *Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна*

# ОСНОВНІ ПРОБЛЕМИ ІНЖЕНЕРНО-ПЛАНУВАЛЬНИХ РІШЕНЬ ТРАНСПОРТНИХ РОЗВ'ЯЗОК ТИПУ «РОЗІРВАНЕ КІЛЬЦЕ» ТА ШЛЯХИ ЇХ УСУНЕННЯ

***Анотація***

Вступ. Конфігурації транспортних розв'язок, які надаватимуть конкретні переваги учасникам дорожнього руху, завжди представлятимуть інтерес. Надзвичайно цікавим є влаштування перетину в одному рівні за типом інженерно-планувального рішення «розірване кільце», яке у закордонних літературних джерелах отримало назву «колова розв'язка-гамбургер» (hamburger roundabout) або «наскрізне кільце» (throughabout). Зазвичай дві відокремлені смуги проходять крізь витягнуте кільце, перетинаючи одна одну всередині колової частини розв'язки. Такі розв'язки можуть бути регульованими як дорожніми знаками, так і світловими сигнальними пристроями залежно від їх розмірів та інтенсивності вхідних транспортних потоків.

Проблематика. Аналіз конфігурації перетину в одному рівні за типом «розірваного кільця» недостатньо представлений як в нормативній документації з проєктування автомобільних доріг, так і в сучасній науковій періодиці. Проте даний тип перетину відноситься до альтернативних розв'язок, що використовуються у практиці дорожнього будівництва країн Європи. Таким чином, актуальною задачею стає оцінка операційних показників ефективності та показників безпеки руху «розірваного кільця», що може у подальшому слугувати підґрунтям для прийняття рішень з необхідності влаштування даного типу інженерно-планувального рішення транспортної розв'язки.

Мета – виявлення основних проблем розв'язки за типом інженерно-планувального рішення «розірваного кільця» на основі аналізу показників ефективності та безпеки руху, проведеного методом детального транспортного моделювання.

Матеріали та методи. Основний метод аналізу показників ефективності транспортної розв'язки – детальне транспортне моделювання за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення PTV Vissim. Безпека руху на перетині оцінювалась непрямими показниками, отриманими шляхом екстракції траєкторій руху транспортних засобів із детальної транспортної моделі та їх аналізі з використанням SSAM (Surrogate Safety Assessment Model).

Результати. Проведено аналіз конфігурації транспортної розв'язки за типом інженерно-планувального рішення «розірване кільце», виявлені його «вузькі місця» та особливості локалізації різних типів конфліктів транспортних засобів.

Висновки. Показник середньої затримки транспортних засобів (с/авт.) суттєво збільшуватиметься при транспортному навантаженні на розв'язку понад 3 600 авт./год. При цьому відбувається насичення транспортного вузла, пропускна здатність розв'язки вичерпується. З точки зору непрямих показників безпеки дорожнього руху, найчастішим типом конфлікту транспортних засобів при проїзді «розірваного кільця», є «наїзд ззаду».

***Ключові слова:*** детальне транспортне моделювання, PTV Vissim, транспортна розв'язка «розірване кільце», пропускна здатність, SSAM, TTC, PET.

## Вступ

Найбільшого поширення конфігурація перехрестя у вигляді «розірваного кільця» отримала в США [1], Великобританії [3] та Іспанії [2]. Приклад малого розірваного кільця в іспанському місті Ла-Корунья показаний на **рис. 1**.

Основні вимоги до розбудови транспортної розв'язки за типом «розірваного кільця» представлені в ГБН-В.2.3 [4]. Доцільність розбудови даного типу інженерно-планувальних рішень розв'язок пов'язана із врахуванням таких вимог [4]:

– на головній дорозі інтенсивність руху перевищує більше ніж на 20 % інтенсивність руху на другорядних дорогах (п. 6.1.15);

– на дорогах І-б категорії рішення «розірване кільце» у разі необхідного обґрунтування розглядається як тимчасове, із можливим подальшим перевлаштуванням перетину на кільцеву розв'язку у різних рівнях (п. 6.1.2);

– світлофорне регулювання має бути застосовано для визначення пріоритету проїзду на даному типі перетину (п. 6.1.15);

– конфігурація кільця виконується у вигляді овалу, не менше ніж на дві третини видовженого у напрямку головної дороги (п. 6.1.15);

– організація проїзду «розірваного кільця» забезпечується знаками пріоритету та наказовими знаками які б застосовувались для двох окремих перехресть (10.3.2);

– знак 4.10 «Круговий рух» не застосовується для розірваного кільця (п.10.3.2).

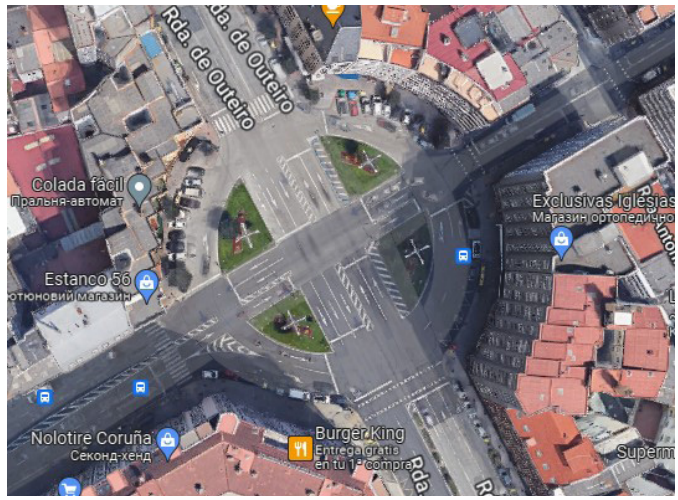



***Рисунок 1*** – Приклад міської розв'язки типу «розірване кільце»

Остання умова співвідноситься з тим фактом, що інженерно-планувальні рішення типу «розірване кільце» не можна відносити до різновиду саморегульованих кільцевих розв'язок, оскільки водії транспортних засобів, які знаходяться на коловій частині перетину не мають повноти пріоритету проїзду; крім того, відсутній острівець безпеки для розділення потоків, як на класичній саморегульованій кільцевій розв'язці. Про невідповідність назви розв'язки її функціональному призначенню говорять відповідні джерела [3].

Закордонні керівництва з будівництва та експлуатації автомобільних доріг також містять вимоги щодо влаштування даного типу розв'язок [2]. Так, відповідно до [2], інженерно-планувальне рішення транспортної розв'язки типу «розірване кільце» рекомендується влаштовувати на регульованих перехрестях автомобільних доріг.

Аналіз інженерно-планувального рішення типу «розірване кільце» наведено у науковій роботі [1], в якій основним методом дослідження виступило детальне транспортне моделювання. Опис альтернативних конфігурацій перетинів, у тому числі розірваного кільця, представлені у відповідному звіті Федеральної адміністрації автомобільних доріг [5].

Представлених відомостей та нормативних вимог недостатньо для повноцінної оцінки впливу інженерно-планувального рішення типу «розірваного кільця» на умови дорожнього руху. У зв'язку з цим, недоліки та переваги розв'язки даного типу потребують додаткового вивчення, у тому числі, із застосуванням сучасних інструментів транспортного моделювання.

**Мета роботи** – оцінювання інженерно-планувального рішення транспортної розв'язки в одному рівні за типом «розірване кільце» на основі набору показників ефективності та непрямих показників безпеки руху.

## Основна частина

*Організація руху на розірваному кільці.* Головна дорога на «розірваному кільці» проходить у наскрізному напрямку безпосередньо через кільце. Особливістю даного типу інженерно-планувального рішення транспортної розв'язки є те, що для повороту ліворуч необхідно спочатку повернути праворуч на першому перетині наскрізної дороги із коловою частиною розв'язки, виїхавши на кільце, і тільки згодом звернути із кільця ліворуч на другорядну дорогу.

Рух, відповідно до дорожнього знаку 2.3 «Головна дорога» дозволено у прямому напрямку крізь кільце, а також при повороті праворуч, що підтверджується зазвичай знаком 4.4. Рух ліворуч після проїзду наскрізної дороги у другому вузлі, заборонено.

При виїзді з другорядної дороги на перетин та повороті праворуч, водії транспортних засобів зобов'язані дати дорогу (знаки «2.1», «4.2») тим транспортним засобам, які повертають з головної дороги ліворуч, при цьому рухаючись праворуч. Крім того, з другорядною дороги прямий рух та правий поворот дозволені лише після пропуску головного руху (знаки «2.1» та «4.4» встановлені перед наскрізною дорогою). Описана організація руху узгоджується із зазначеною вище умовою ГБН, яка визначає, що влаштування розірваного кільця доцільно при перевищенні інтенсивності потоків на головній дорозі над інтенсивністю потоків на другорядній дорозі як мінімум на 20 % [4].

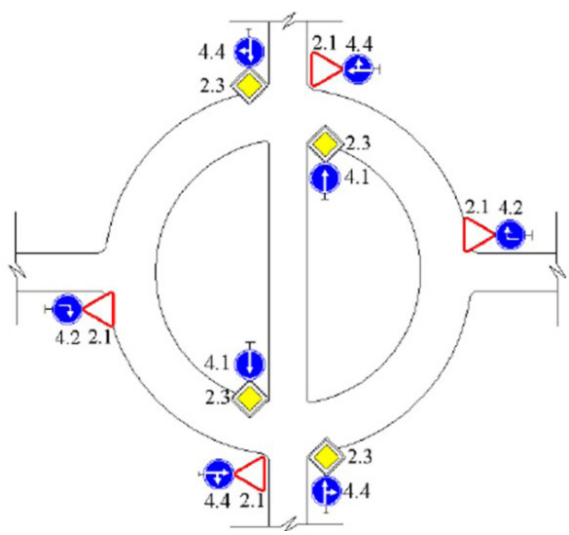



***Рисунок 2*** – Організація руху на розв'язці «розірване кільце» [4]

*Вибір критеріїв оцінювання ефективності інженерно-планувального рішення типу «розірване кільце».* Відповідно до відкритих джерел [3], у якості критеріїв оцінювання ефективності роботи кільцевої транспортної розв'язки можуть виступати:

– пропускна здатність розв'язки;
– середня затримка;
– сумарна затримка;
– довжина черги транспортних засобів.

Розглянемо можливості застосування даних критеріїв для оцінки інженерно-планувального рішення транспортної розв'язки типу «розірване кільце».

Під пропускною здатністю розуміють загальну кількість транспортних засобів, що пройшла через поперечний переріз дороги за одиницю часу [3]. Пропускна здатність вважається одним із визначальних показників функціонування транспортної розв'язки, який входить, наприклад, у розрахунок фазових коефіцієнтів світлофорного регулювання, а, отже, і тривалості світлофорного циклу та дозвільного сигналу для певного напрямку. У розрахунках оперують значеннями даного показника, приведеними до умовного легкового автомобіля за допомогою відповідних коефіцієнтів. Числові значення коефіцієнта приведення, прийняті в Україні, наведено у ДБН 2.3-4-2015 [6] та ДБН В.2.3-5-2018 [7]. Пропускну здатність можна визначати за допомогою показників тривалості поїздки та затримки.

Тривалість середньої затримки транспортних засобів отримала широке застосування в якості критерію оптимізації управління рухом на перехресті. Середня затримка тісно пов'язана із такими показниками, як інтенсивність руху, довжина черги. Слід зауважити, що при оцінці конфігурації перехрестя, точність методики розрахунку величини середньої затримки має принципове значення, оскільки на основі величини середньої затримки оцінюється довжина черг і, відповідно, визначається сумарна затримка.

Під сумарною затримкою розуміється затримка всіх транспортних засобів за певний період в межах мережі або її ділянки. Сумарна затримка знайшла застосування як критерій якості управління рухом [3]. Даний показник, на відміну від середньої затримки, більш підходить для оцінки ефективності організації руху в межах усієї мережі. Оскільки задачею даної роботи є перевірка ефективності окремого перетину, не будемо застосовувати величину середньої затримки у якості критерію оцінювання.

Зі збільшенням інтенсивності транспортних потоків можливе стрімке насичення ними перетину, коли його пропускної здатності стає недостатньо для обслуговування потоків заданої величини. Тоді неодмінно з плином часу виникатиме затор транспортних засобів. У такому разі затримку не можна повноцінно використовувати для оцінювання планувального рішення або ефективності мережі. Затримка, у такому разі, обумовлюється кумулятивним ефектом. У зв'язку з цим, критерієм оцінювання може виступити довжина черги транспортних засобів або тривалість існування затору.

Довжина черги транспортних засобів, що зупинились та вибудувались один за одним, вимірюється в одиницях довжини. При значних інтенсивностях вхідних потоків, перед транспортними планувальниками постає проблема необхідності зменшення величини затору. Отже, скоріше за все будуть прийнятими саме ті рішення, які враховуватимуть довжину черги транспортних засобів.

В [1] показано, що за малої інтенсивності транспортних потоків у якості критерію оцінки перетину доцільно використовувати показник «кількість зупинок». Даний критерій дуже важко аналітично визначити, оскільки не піддаються розрахунку мінімальні значення швидкості, що відповідають зупинці у конкретних зонах перетину. Реалізувати дану задачу стає набагато простіше за допомогою застосування сучасного спеціалізованого програмного забезпечення для детального транспортного моделювання.

Розглянуті критерії можливо адекватно визначити методом детального транспортного моделювання у програмному забезпеченні PTV Vissim [8]. Таким чином, для оцінювання ефективності роботи інженерно-планувального рішення транспортної розв'язки типу «розірване кільце» доцільно застосувати наступні показники:

– час у дорозі для конкретного напрямку руху;
– пропускна здатність транспортної розв'язки;
– середня затримка для одиничного транспортного засобу;
– довжина черги транспортних засобів у конкретному напрямку руху.

Перевірку ефективності дорожнього руху на транспортній розв'язці типу «розірване кільце» виконаємо для таких сценаріїв порогових значень інтенсивності руху транспорту:

1. Мінімальне значення – інтенсивність руху на головній дорозі відповідає розрахунковій середньодобовій перспективній інтенсивності руху для І-а та І-б категорій доріг, а на примиканнях – для IV категорії доріг (ДБН В.2.3-4:2015, табл. 4.1 [6]).

2. Максимальне значення – інтенсивність руху відрізняється від інтенсивності за сценарієм 1 збільшенням на 1 000 авт./год.

У кожному проміжному сценарії, починаючи з інтенсивності руху у 3 500 авт./год, загальне транспортне навантаження збільшується на 100 авт./год. За середньодобової інтенсивності І-а та І-б категорій доріг у 14 тис. приведених автомобілів за добу, середньогодинна інтенсивність прийнята для пікової години на рівні 2 100 прив.авт./год, відповідно до рекомендацій Керівництва з проєктування автомобільних доріг HCM2015 щодо переводу величини середньодобової до середньогодинної інтенсивності [9]. На другорядній дорозі інтенсивність руху також прийнята на основі приведених рекомендацій і визначена у 400 прив.авт./год. Відсоток інтенсивності транспортних потоків прямого руху прийнятий на рівні 70 %, а правоповоротних та лівоповоротних потоків – по 15 %. Склад транспортних потоків: 85 % – легкові автомобілі, 10 % – вантажні автомобілі, 5 % – автобуси.

У рамках даної роботи розглянуто сценарій нерегульованої розв'язки – транспортні засоби, які в'їжджають на колову частину розв'язки, мають уступити дорогу транспортним засобам на коловій частині (регулювання руху відповідає схемі на **рис. 2**).

Дентальна транспортна модель розв'язки розроблена у спеціалізованому програмному забезпеченні PTV Vissim [8]. Головна дорога має по 2 смуги руху для кожного напрямку шириною 3,75 м, а другорядна дорога – по одній смузі шириною 3,75 м. Кільцева частина розв'язки – двосмугова шириною 4,5 м для кожної смуги.

Для визначення часу у дорозі для окремого напрямку руху на розв'язці в детальній транспортній моделі використані відповідні лічильники, розташування яких показано на **рис. 3**.

Результати розрахунку часу у дорозі для різних напрямків руху представлені у **табл. 1**. Встановлено, що найбільший час у дорозі транспортних засобів приходиться на лівоповоротний напрямок із другорядної дороги на головну. За інтенсивності транспортного руху на розв'язці у 3 000 авт./год, середній час у дорозі становить 37 с, за інтенсивності руху 3 500 авт./год – 151 с, при транспортному навантаженні 4 000 авт./год – час у дорозі вже стає важко оцінити із достатньою надійністю, оскільки у даному напрямку формуватиметься черга транспортних засобів. Середнє значення часу у дорозі за різними напрямками руху при транспортному навантаженні на розв'язку більше 3 600 авт./год., отримане за результатами детального моделювання, суттєво збільшується.

Показник середньої затримки транспортних засобів (с/авт.) суттєво збільшуватиметься при збільшенні інтенсивності руху, починаючи від 3 600 авт./год (**рис. 4**). За прийнятої інтенсивності руху відбувається насичення транспортного вузла, пропускна здатність розв'язки вичерпується.

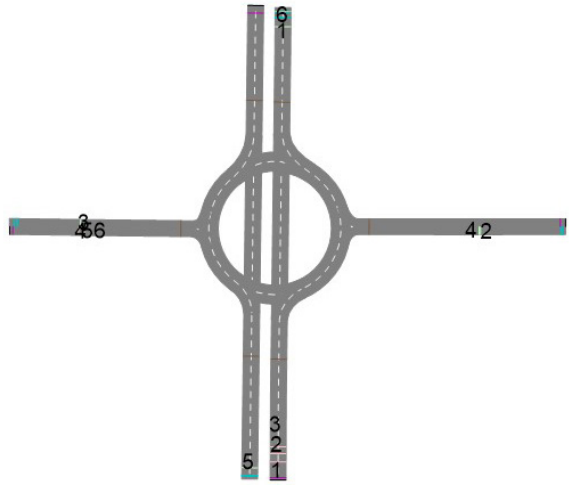



***Рисунок 3*** – Модель розірваного кільця у PTV VISSIM та розташування лічильників часу у дорозі

***Таблиця 1***

***Результати розрахунку середнього часу у дорозі для різних напрямків руху на розв'язці***

| Напрямок руху | Інтенсивність руху в межах транспортної розв'язки, авт./год | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 3 000 | 3 200 | 3 400 | 3 500 | 3 600 | 3 800 | 4 000 |
| | Середній час у дорозі, с | | | | | | |
| Південь-Північ (прямий рух по головній дорозі) | 23 | 24 | 49 | 64 | 44 | 84 | 57 |
| Південь-Схід (правоповоротні потоки з головної) | 24 | 26 | 80 | 142 | 102 | 179 | 104 |
| Південь-Захід (лівоповоротні потоки з головної) | 69 | 87 | 146 | 196 | 206 | 343 | 280 |
| Захід-Схід (прямий рух по другорядній дорозі) | 32 | 29 | 135 | 203 | 182 | 104 | 202 |
| Захід-Південь (правоповоротні потоки по другорядній дорозі) | - | - | 98 | - | 250 | - | 243 |
| Захід -Північ (лівоповоротні потоки по другорядній дорозі) | - | - | 196 | - | - | - | 453 |
| Середнє | 37 | 42 | 117 | 151 | 157 | 177 | 223 |

Підходи до перехрестя та його кільцева частина будуть основними ділянками, на яких утворюватиметься черга транспортних засобів (див. теплову картограму довжини черги на **рис. 5**).

Найбільша частина транспортного потоку буде затримуватись перед перехрестям та на «кільці» (див. **рис. 6**), що також узгоджується із особливостями формування черги транспортних засобів.

*Оцінювання безпеки руху на перетині за допомогою непрямих (замісних) показників*

Використання традиційних методів прогнозування кількості можливих конфліктів на перехрестях від добової інтенсивності руху є неможливим для нових планувальних рішень за відсутності ретроспективних даних зі звітів з дорожньо-транспортних пригод, на яких будуються відповідні прогностичні функції. У той же час, можна припустити, що, оскільки конфігурація

розв'язки визначатиме відповідну траєкторію руху транспортних засобів, від якої залежить ймовірність конфлікту, вона також впливатиме й на частоту і тяжкість потенційних конфліктів. При цьому відмінності у частоті та тяжкості конфліктів транспортних засобів, характерних для конкретної конфігурації, для практично однакового транспортного навантаження будуть говорити про перевагу за показниками організації та безпеки руху однієї розв'язки над іншою.

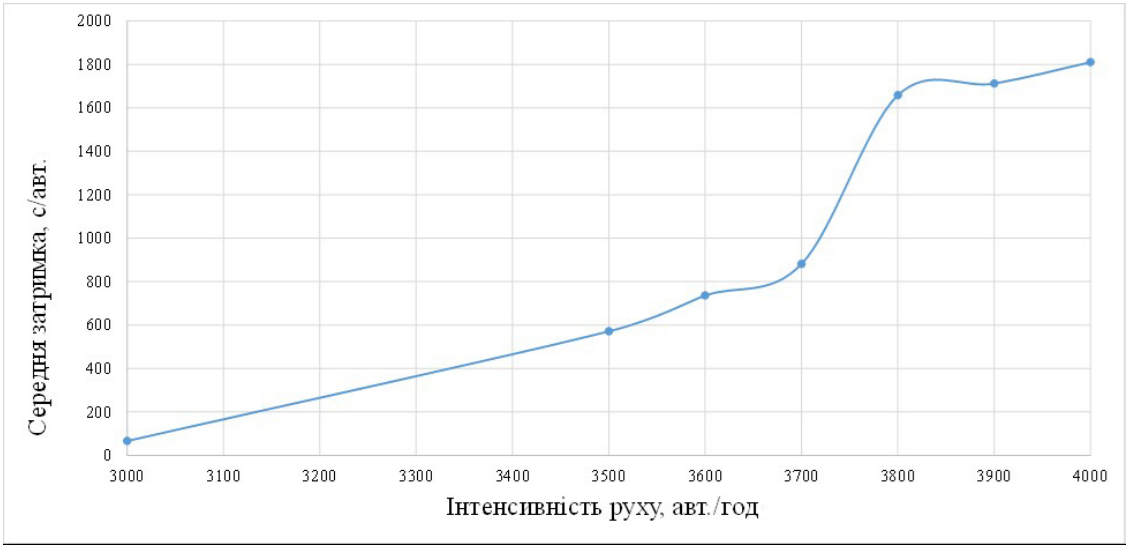



***Рисунок 4*** – Залежність середньої затримки на розв'язці від інтенсивності руху транспортних засобів

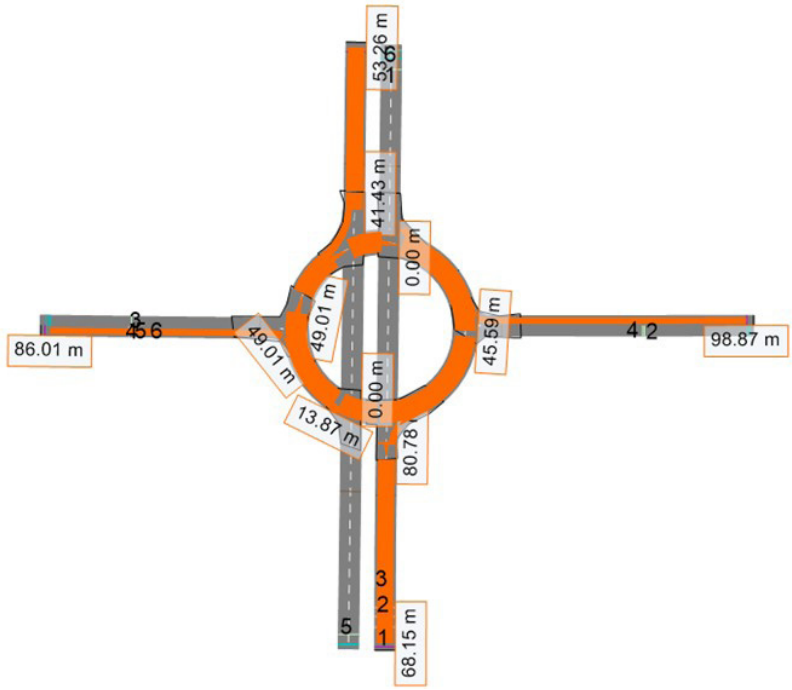



***Рисунок 5*** – Картограма довжини черги ТЗ на нерегульованому перетині за типом «розірване кільце» при транспортному навантаженні у 4 000 авт./год

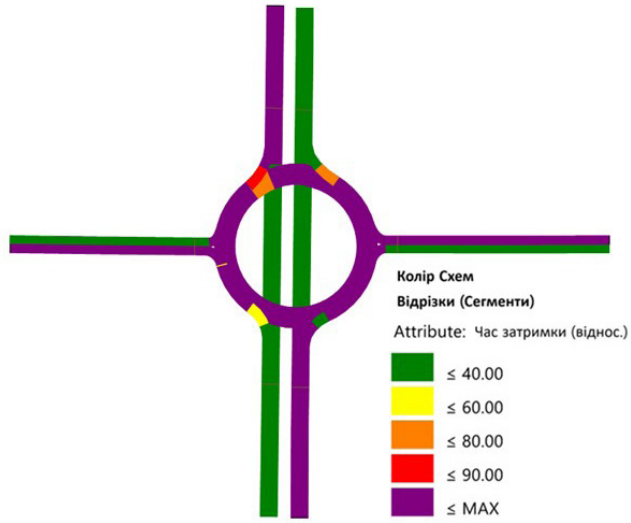



***Рисунок 6*** – Схема відносної затримки (%) на нерегульованому перетині за типом «розірване кільце» при транспортному навантаженні у 4 000 авт./год

Для перевіряння даного твердження ще у 2003 році фахівці FHWA провели відповідне дослідження, встановивши, що різні непрямі (замісні) показники безпеки дорожнього руху можуть бути отримані шляхом аналізу траєкторій транспортних засобів з широко доступного спеціалізованого програмного забезпечення для детального транспортного моделювання. З метою реалізації поставленої задачі у 2008 році було розроблено відповідне програмне забезпечення: так звана штучна модель оцінки безпеки руху на основі замісних показників (Surrogate Safety Assessment Model, коротко SSAM) [10].

У результаті проведених FHWA досліджень встановлено, що дані по конфліктам транспортних засобів, отриманих на основі детального транспортного моделювання та із використанням SSAM, мають значну кореляцію із реальною статистикою дорожньо-транспортних пригод.

На початку аналізу було проведено детальне транспортне моделювання у спеціалізованому програмному забезпеченні із числом ітерацій, достатнім для отримання набору похідних даних. Після детального транспортного моделювання генерується файл траєкторії руху транспортних засобів. Потім можливе застосування утілити SSAM. Кожний новий випадок аналізу формується у вигляді окремого файлу. Програмне забезпечення використовує 2 порогових значення для непрямих показників безпеки для визначення характеру взаємодій між транспортними засобами, якому відповідають конфлікти. Ці порогові значення використовуються для величини так званого «часу до зіткнення» (Time-to-collision, далі TTC) та «часу після вторгнення» (Post-encroachment time, далі PET). Значення порогових величин за замовчуванням для TTC становить 1,5 с. Після налаштування порогових параметрів для визначення конфліктів стає доступним процес аналізу файлу траєкторії для визначення взаємодії транспортних засобів у відповідності до певних класифікаційних ознак.

SSAM надає зведений звіт за результатами аналізу, у якому представлено різні типи конфліктів для кожної фази детального транспортного моделювання, а також загальні та усередненні значення показників безпеки руху. Окремо представлені середні значення кожного непрямого показника безпеки дорожнього руху.

Для сценарію прийнятої у якості максимальної інтенсивності руху на розв'язці типу «розірване кільце» проведений аналіз непрямих показників безпеки руху за допомогою SSAM.

Загальна кількість потенційних конфліктів на перехресті оцінена на рівні 227 за період аналізу, з яких конфлікти, що пов'язані із перехрещенням потоків – 32, за типом «наїзду ззаду» – 115, зміною смуги руху – 80. У даному випадку важлива «структура» типів конфліктів: наїзд ззаду є найбільш розповсюдженим серед інших типів. Розподіл конфліктів відповідно до конфігурації розв'язки можливо оцінити на схемі потенційних конфліктів, яка показана на **рис. 7**. Конфлікти типу «перехрещення» показані у вигляді червоних конусів, типу «наїзд ззаду» – жовтих прямокутників, а «зміна смуги руху (перебудова)» – синіх еліпсів. З отриманої картограми виходить, що наїзд транспортних засобів ззаду в основному може трапитись на прямих ділянках другорядної та головної доріг, зміна смуги руху може викликати конфлікт між транспортними засобами при виїзді із кільця, а перебудова є небезпечною при заїзді на кільце.

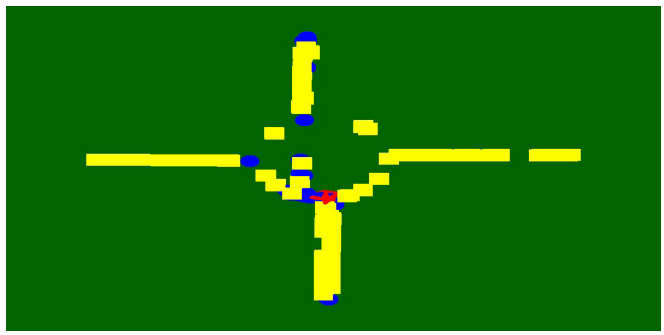


***Рисунок 7*** – Схема потенційних конфліктів на нерегульованому перетині за типом «розірване кільце» при транспортному навантаженні у 4 000 авт./год

Середнє значення TTC дорівнює 0,78 за порогового значення 1,5, середнє значення PET – 1,32 при пороговому у 1,71.

## Висновки

Результати аналізу конфігурації транспортної розв'язки інженерно-планувального рішення типу «розірване кільце», проведеного методом детального транспортного моделювання, показують, що вичерпання пропускної здатності даного інженерно-планувального рішення відбувається при транспортному навантаженні на розв'язку у 3 600 авт./год або більше. Найбільший час у дорозі транспортних засобів приходиться на лівоповоротний напрямок із другорядної дороги на головну. Підходи до перехрестя та його кільцева ділянка є «вузькими місцями» транспортної розв'язки, для яких характерна черга транспортних засобів при збільшенні транспортного навантаження більше 3 600 авт./год.

За результатами напрацювань рекомендуємо ввести зміни до [4] у частині доцільності розбудови інженерно-планувального рішення розв'язки за типом «розірване кільце», доповнивши дані будівельні норми пунктом: «влаштування транспортної розв'язки в одному рівні за типом «розірване кільце» є доцільним при максимальній інтенсивності руху вхідних транспортних потоків на всіх під'їздах до даного типу перетину, яка не перевищує 3 600 авт./год».

Аналіз траєкторії руху транспортних засобів, отриманих у результаті детального транспортного моделювання, у програмі SSAM, дозволив провести оцінювання безпеки руху на перетині за допомогою непрямих (замісних) показників. Встановлено, що основним типом потенційних конфліктів транспортних засобів є «наїзд ззаду», який виникає на прямих ділянках перехрещень другорядної та головної дороги. Небезпеку представляють також заїзд та виїзд на кільце при виконанні маневрів.

Для усунення «вузьких місць» досліджуваного інженерно-планувального рішення розповсюдженою практикою є облаштування світлофорного регулювання дорожнього руху. Слід відмітити, що таке рішення може бути у деяких випадках лише тимчасовим засобом покращення стану безпеки дорожнього руху, коли інтенсивність руху транспортних засобів значно перевищує прогнозоване значення. Забезпечення належного рівня безпеки на розв'язках типу «розірване кільце» дозволять встановлені камери автоматичного контролю швидкості руху, використання світловідбиваючої фарби для дорожньої розмітки, інформативність та правильне розміщення дорожніх знаків.

## Список літератури

1. Tollazzi, Tomaž & Rencelj, Marko. Modern and alternative types of roundabouts – state of the art. The *9th International Conference "ENVIRONMENTAL ENGINEERING"*. 10.3846/enviro. 2014.137.

2. Orden Circular 32/2012. GUÍA DE NUDOS VIARIOS. Portugal, 2012. 317 p.

3. Zakeri, Sajjad & Choupani, Ahad. Operational Evaluation of a Throughabout to Give Priority to Public Transport at Standard Roundabouts. *Journal of Advanced Transportation*. 2021. P. 1–13. 10.1155/2021/1840040.

4. ГБН В.2.3-37641918-555:2016: Автомобільні дороги. Транспортні розв'язки в одному рівні проектування. Київ, 2016. 62 с. (Інформація та документація).

5. Alternative Intersections/Interchanges: Informational Report (AIIR). URL: https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/09060/006.cfm (дата звернення: 14.08.2023).

6. ДБН В.2.3-4:2015: Автомобільні дороги. Споруди транспорту. Частина І. Будівництво. Частина ІІ. Проєктування. Київ, 2015. 113 с. (Інформація та документація).

7. ДБН В.2.3-5:2018: Вулиці та дороги населених пунктів. Зі зміною № 1. Київ, 2018. 82 с. (Інформація та документація).

8. PTV Vissim 11 user manual. PTV AG, Karlsruhe, Germany. 1526 p. URL: https://pdfcoffee.com/vissim-11-manual-2-pdf-free.html (дата звернення: 14.08.2023).

9. Highway Capacity Manual 7th Edition. A Guide for Multimodal Mobility Analysis, 2022. URL: https://nap.nationalacademies.org/catalog/26432/highway-capacity-manual-7th-edition-a-guide-for-multimodal-mobility (дата звернення: 14.08.2023).

10. Surrogate Safety Assessment Model Overview. URL: https://highways.dot.gov/research/safety/ssam/surrogate-safety-assessment-model-overview (дата звернення: 14.08.2023).

## References

1. Tollazzi, Tomaž & Rencelj, Marko. Modern and alternative types of roundabouts – state of the art. The *9th International Conference "ENVIRONMENTAL ENGINEERING"*. 10.3846/enviro. 2014.137 [in English].

2. Orden Circular 32/2012. GUÍA DE NUDOS VIARIOS. Portugal, 2012. 317 p. [in English].

3. Zakeri, Sajjad & Choupani, Ahad. Operational Evaluation of a Throughabout to Give Priority to Public Transport at Standard Roundabouts. *Journal of Advanced Transportation*. 2021. P. 1–13. 10.1155/2021/1840040 [in English].

4. HBN V.2.3-37641918-555:2016 Avtomobilni dorohy. Transportni rozviazky v odnomu rivni proektuvannia [Departmental Building Norms (HBN V.2.3-37641918-555:2016) Highway. At-grade Intersections. Designing]. Kyiv, 2016. 62 p. (Information and documentation) [in Urkainian].

5. Alternative Intersections/Interchanges: Informational Report (AIIR). URL:https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/09060/006.cfm (Last accessed: 14.08.2023).

6. DBN V.2.3-4:2015 Avtomobilni dorohy. Chastyna I. Proektuvannia. Chastyna II. Budivnytstvo [State Building Norms (DBN V.2.3-4:2015) Highways. Part I. Design. Part II. Building].

Kyiv, 2016. 104 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

7. DBN V.2.3-5:2018 Vulytsi ta dorohy naselenykh punktiv. Zi Zminoiu № 1 [State Building Norms (DBN V.2.3-5:2018) Streets and roads settlements. With Change No. 1]. Kyiv, 2018. 61 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

8. PTV Vissim 11 user manual. PTV AG, Karlsruhe, Germany. – 1526 p. URL: https://pdfcoffee.com/vissim-11-manual-2-pdf-free.html (Last accessed: 14.08.2023) [in Germany].

9. Highway Capacity Manual 7th Edition. A Guide for Multimodal Mobility Analysis. 2022. URL: https://nap.nationalacademies.org/catalog/26432/highway-capacity-manual-7th-edition-a-guide-for-multimodal-mobility (Last accessed: 14.08.2023) [in English].

10. Surrogate Safety Assessment Model Overview. The electronic source: https://highways.dot.gov/research/safety/ssam/surrogate-safety-assessment-model-overview (Last accessed: 14.08.2023) [in English].

**Volodymyr Sistuk**[1], *Ph.D., Assoc.Prof., https://orcid.org/0000-0003-4907-4265*
**Dmytro Bespalov**[2], *https://orcid.org/0000-0002-0778-5627*
**Volodymyr Tarasiuk**[2], *Ph.D., http://orcid.org/0000-0003-4762-5668*
**Lev Ivanets**[2], *https://orcid.org/0009-0005-1962-1071*

[1] *Kryvyi Rih National Univrsity, Kryvyi Rih, Ukraine*
[2] *Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine*

## THE MAJOR PROBLEMS OF ENGINEERING AND PLANNING SOLUTIONS FOR «THROUGHABOUT» TYPE INTERCHANGES AND WAYS TO ADDRESS THEM

***Abstract***

Introduction. Interchange designs that provide specific benefits to road users will always be of interest. It is extremely interesting a type of interchange in the same level named in literary sources as a «hamburger roundabout» or «throughabout». Usually, two separate lanes run through the extended roundabout, crossing each other inside the interchange. Such intersections can be regulated by both road signs and traffic lights, depending on their size and the intensity of incoming traffic flows.

Problem Statement. The analysis of the designs of the intersection at one level by the type of throughabout is insufficiently presented both in the normative documentation for the design of highways and in modern scientific periodicals. However, this type of intersection refers to alternative junctions used in road construction practice in European countries. Thus, an urgent task is to evaluate the operational efficiency indicators and surrogate traffic safety indicators of the throughabout, which can later serve as a basis for making decisions about the need to construct this type of intersection.

Purpose – to identify the main problems of the interchange by the type of throughabout based on the analysis of traffic efficiency and safety indicators, carried out by the method of traffic microsimulation.

Materials and methods. The main method of analyzing the performance indicators of a interchange is microsimulation modeling using the PTV Vissim software. Traffic safety at the intersection was assessed by surrogate indicators obtained by extracting vehicle trajectories from a traffic simulation model and analyzing them in the SSAM program.

Results. The analysis of the configuration of the " throughabout " type of interchange was carried out, the bottlenecks of this configuration and the localization features of various types of vehicle conflicts were identified.

Conclusions. The indicator of the average delay of vehicles (c/car) will increase significantly when the traffic load at the intersection is 3,600 cars/hour, while the saturation of the transport node is observed, the throughput capacity of the intersection is exhausted. Most often, vehicles driving through a throughabout face the problem of rear-end conflicts.

***Keywords:*** microsimulation, PTV Vissim, throughabout, capacity, SSAM, TTC, PET.

https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.265

**УДК 625.7:504.06**

**Ковальчук В. В.**, *д-р техн. наук, доц., https://orcid.org/0000-0003-4350-1756*
*Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна*

# ШУМОЗАХИСНІ ЗАХОДИ НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ

***Анотація***

Вступ. Наукові дослідження показали, що шум, який генерується транспортними засобами, негативно впливає на здоров'я людей. Тому необхідні вдосконалені рішення в галузі проєктування та планування автомобільних доріг для зменшення шумового навантаження на житлові території.

Проблематика. Зазвичай, шум виникає внаслідок руху автомобілів, їх двигунів та дорожнього покриву. Цей шум може призводити до стресу, проблем зі сном, погіршення концентрації та інших проблем з фізичним і психологічним здоров'ям.

Однією з ключових стратегій щодо шумозахисту є вибір правильного місця для будівництва автомобільної дороги та використання спеціальних геометричних рішень, які можуть сприяти зменшенню шумового навантаження на прилеглі території. Також важливим елементом є встановлення звукоізоляційних бар'єрів.

Мета. Мета роботи полягала у дослідженні та аналізу можливих рішень шумозахисту прилеглих до автомобільної дороги селитебних територій від шумового навантаження автомобільних доріг.

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. Об'єктами в даній статті є шумозахисні споруди і заходи на автомобільних дорогах.

Результати. У статті висвітлено проблеми шумового забруднення навколишнього середовища від автомобільних доріг та шляхи їх вирішення.

Висновки. Високий рівень шуму може призводити до значного негативного впливу на здоров'я людини. Його прояви включають в себе збільшення нервового напруження, постійне стомлення, виснаження центральної нервової системи та кори мозку. Ці фактори негативно впливають на творчу активність, робочу продуктивність. Крім того, вони можуть викликати швидке виснаження, погіршення пам'яті, уваги, зорової гостроти та сприяти виникненню патологічних змін у слухових та серцево-судинних системах, а також інших фізіологічних змін в організмі людини.

Проаналізувавши шумозахисні заходи на автомобільних дорогах, можна зробити висновки, що питання шумової безпеки прилеглих до автомобільної дороги територій, то є комплекс заходів, що включає в себе планування, будівництва, утримання як самої дороги, так і шумозахисних об'єктів на певній автомобільній дорозі.

***Ключові слова***: автомобільна дорога, акустичне проєктування, геометрія дороги, транспортні засоби, шумове забруднення, шумове навантаження, шумозахисні екрани, шумозахисні конструкції, шумозахисні принципи, шумопоглинаючі конструкції.

## Вступ

Різні екологічні аспекти значно впливають на якість житлового середовища. Одним із видів цього впливу є шумова забрудненість, яка, згідно з даними вітчизняних і міжнародних

джерел, на сьогодні є однією з найбільш шкідливих фізичних складових [1 – 3]. Людину постійно переслідує зростаюче навантаження від шуму, яке може мати серйозний вплив на її здоров'я та психоемоційний стан. Надмірний шум може призвести до нервового виснаження, психічної пригніченості, вегетативних неврозів, виразкової хвороби, розладу ендокринної та серцево-судинної систем, а також призвести до швидкого втомлення, погіршення пам'яті, концентрації уваги та гостроти зору.

Ці негативні наслідки особливо виражені на придорожніх територіях, де рівні шуму є надмірно високими. Високі рівні шуму також негативно впливають на продуктивність та якість праці, а також збільшують ризик травм. Наприклад, навіть збільшення рівня шуму на 10 децибелів може знизити продуктивність на (5 – 8) % [4, 5]. Для підтримання нормального рівня продуктивності при підвищенні рівня шуму від 70 дБ до 90 дБ, працівник повинен витратити на (10–20) % більше фізичних і нервових зусиль.

Проблема шуму, пов'язаного з автомобільними дорогами, є актуальною та поширеною явищем у численних населених районах всього світу. Зростання автомобільного транспорту, розширення мережі доріг та підвищення швидкостей руху спричиняють збільшення шумового навантаження на прилеглі території, особливо в житлових районах, навколо шкіл та медичних закладів.

Шум, який виникає від автомобільних доріг, має значний негативний вплив на якість життя людей. Він може спричинити проблеми зі сном, викликати стан збудження, погіршити здатність до концентрації уваги, сприяти стресовим реакціям та погіршенню як фізичного, так і психологічного здоров'я. Крім того, тривала експозиція до високих рівнів шуму може призвести до серйозних проблем із слухом.

Ця проблема стає все більше актуальною в сучасному світі, і вирішення її вимагає комплексних заходів у галузі дорожньої інфраструктури та звукоізоляції для забезпечення здорового та комфортного життя мешканців відповідних районів.

## Основна частина

Наукові дослідження показали, що шум, який генерується транспортними засобами, негативно впливає на здоров'я людей. Тому необхідні вдосконалені рішення у галузі проєктування та планування автомобільних доріг для зменшення шумового навантаження на житлові території та збільшення екологічного комфорту [6].

Зазвичай, шум виникає внаслідок руху автомобілів, їх двигунів та дорожнього покриву. Цей шум може призводити до стресу, проблем зі сном, погіршення концентрації та інших проблем з фізичним і психологічним здоров'ям. Шумове забруднення може складати навіть більше ніж 70 дБ. Наприклад, за результатами вимірювань у населеному пункті Підгородне – через нього проходить автодорога Е-50 (М-04) – рівень шуму там становить 78 дБА [7]. Порівнюємо його із встановленими нормами для денної пори доби, які становлять 55 децибелів [8], і приходимо до висновку, що розрахунковий рівень шуму на території селища перевищує встановлені норми на 23 дБА:

Однією з ключових стратегій щодо шумозахисту є вибір правильного місця для будівництва автомобільної дороги та використання спеціальних геометричних рішень, які можуть сприяти зменшенню шумового навантаження на прилеглі території. Також важливим елементом є встановлення звукоізоляційних бар'єрів.

Ефективним способом боротьби з шумовим навантаженням від автомобільних доріг є встановлення шумозахисних бар'єрів вздовж них. Ці бар'єри можуть мати різні матеріали та геометричну структуру.

Наукові дослідження також підтверджують, що ефективним способом захисту сільських територій від шуму транспорту є будівництво спеціальних будинків-екранів вздовж транспортних

магістралей. За результатами досліджень, рівень шуму за такими будинками зменшується до 23 дБА порівняно з рівнем шуму на самій автомобільній дорозі. Також, крім будинків-екранів, досить ефективними є шумозахисні екрани, зроблені з різних матеріалів (бетон, плексиглас, пластмаса тощо).

Для оцінки шумового середовища населених територій використовується карта шуму (**рис. 1**), яка відображає рівні звукового тиску на плановій схемі. Ці карти дозволяють оцінювати зниження рівня шуму з віддаленням від транспортної магістралі. Створення та розроблення картографічного зображення рівня шуму на автомобільній дорозі дозволяє здійснити раціональне впровадження заходів щодо зменшення шуму, а також прийняти відповідні адміністративні та організаційні заходи та інші відповідні дії по зниженню шумового навантаження.

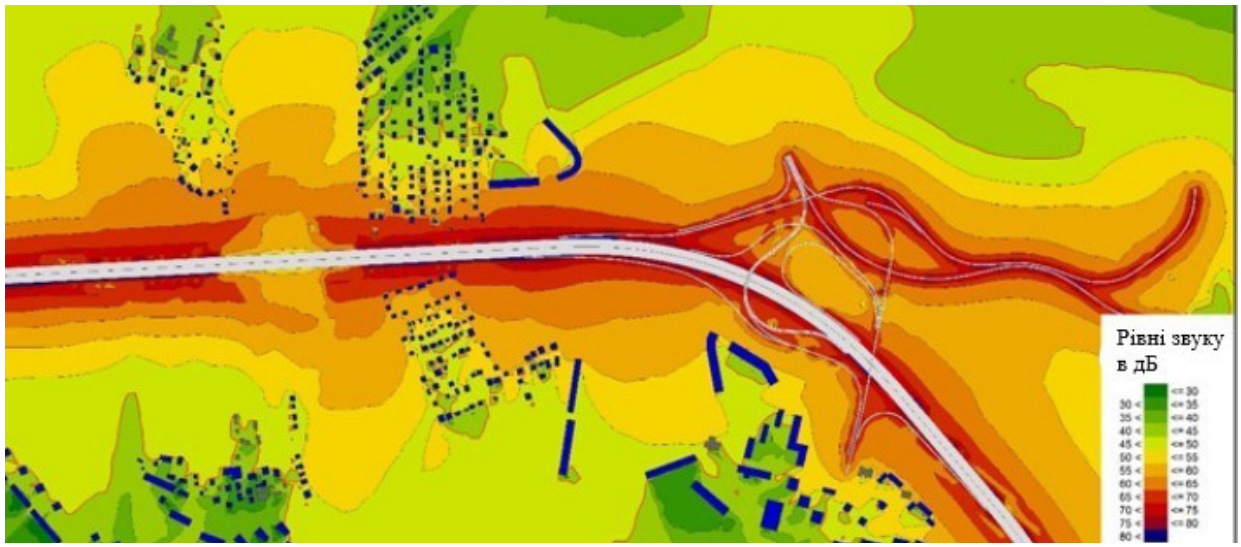



***Рисунок 1*** – Приклад карти шуму на прилеглій до автомобільної дороги території. Червоним позначено шумове навантаження від 75 дБ до 80 дБ, зеленим – від 30 дБ до 50 дБ

Транспортний шум є наслідком взаємодії між транспортними потоками та дорожньою мережею. З метою забезпечення акустичного комфорту на житлових територіях, розробляються заходи у трьох основних напрямках:

– Зменшення шуму на джерелі його виникнення.
– Зниження шуму під час поширення від джерела до житлових зон.
– Зменшення шуму в межах житлових забудов.

Наразі однаково важливою є ініціатива зменшення шуму на джерелі його утворення. Хоча зниження шуму автомобілів є найбільш ефективним заходом, прискорений розвиток автомобільного транспорту призвів до того, що джерелом шуму стала сама автомобільна дорога, а не окремі транспортні засоби. Таким чином, важливо враховувати рівні шуму на дорогах як частину розрахункового планування.

Для зниження шуму, який генерують автомобільні дороги, використовуються заходи організації руху, такі як зменшення швидкостей руху на ділянках, що проходять через населені пункти, раціональне розташування перехрестя та поділ транспортних потоків. До інших заходів входить будівництво шумозахисних покривів на дорогах, які дозволяють зменшити шум автомобілів під час руху.

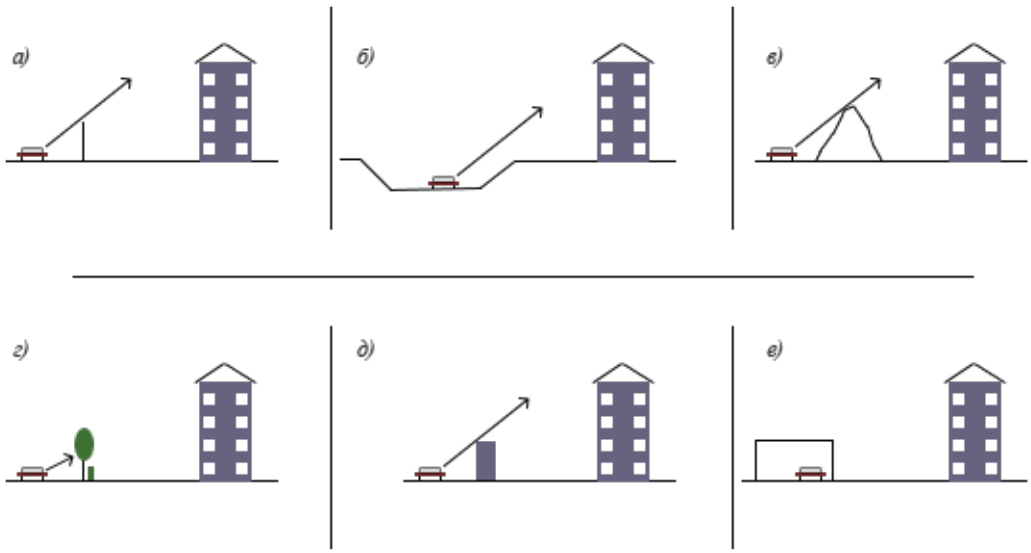
Зниження шуму на шляху його поширення від джерела до житлових зон передбачає раціональне проєктування плану дороги, використання оптимальних поперечних профілів і смуг

відводу. У випадках, коли ці умови не можуть бути виконані, для зниження транспортного шуму використовуються спеціальні шумозахисні споруди, такі як виїмки, стіни, земляні вали та будинки різного призначення. Вибір конкретних типів споруд залежить від ступеня необхідного захисту від шуму на житлових територіях.

Для зниження шуму, який поширюється від джерела до житлової забудови через автомобільну дорогу, важливе раціональне проєктування дорожньої інфраструктури, включаючи план дороги, поперечні профілі і розміщення смуги для відводу шуму. Однак у багатьох випадках неможливо забезпечити повне виконання цих умов через обмеженості дорожнього середовища та існуючі інфраструктурні обмеження.

У таких ситуаціях для зменшення транспортного шуму необхідно використовувати споруди, які створюють бар'єр для звуку. Ці споруди можуть включати в себе виїмки, стінки, земляні вали та будівлі різних призначень. Вибір конкретного типу споруди залежить від необхідного рівня захисту від шуму на житлових територіях.

Залежно від ступеня захисту території від транспортного шуму, можуть використовуватися різні типи звукоізоляційних пристроїв, такі як виїмки, стіни, кавальєри, смуги зелених насаджень, шумозахисні будівлі (**рис. 2**). Комбінування цих елементів дозволяє досягти оптимального зменшення впливу транспортного шуму на прилеглі житлові зони.




*а)* шумозахисний екран;
*б)* виїмка;
*в)* насип ( кавальєр);
*г)* смуга зелених насаджень,
*д)* шумозахисна будівля (може бути промислова – склади тощо);
*е)* галерея.

***Рисунок 2*** – Типи шумозахисту

Серед найбільш ефективних засобів зниження шуму в житловій забудові можна виділити шумозахисні будинки, шумозахисні екрани та шумозахисні вікна. Шумозахисні будинки можна розділити на два основних типи, орієнтовані на зменшення шуму:

– Будинки з особливою архітектурно-планувальною структурою та об'ємно-просторовим розширенням.

– Будинки, у яких вікна та балконні двері мають підвищену звукоізолюючу здатність і обладнані спеціальними вентиляційними пристроями, що поєднуються з шумовими амортизаторами.

Також можливі комбіновані варіанти шумозахисних будинків, які використовуються для забезпечення акустичного комфорту для мешканців і можуть служити високоефективними засобами акустичного екранування. Це означає, що шумозахисні будинки не лише покращують умови для проживання населення, але також допомагають в значній мірі зменшити рівні шуму в областях, що перебувають у «звуковій тіні» цих будинків, досягаючи зниження рівнів шуму навіть на 25 децибел.

До 2003 року вулицею проходила трамвайна лінія. Для зменшення шуму у квартирах, майже всі вікна орієнтовані у двір і на торці, на дорогу виходить лише засклена галерея сходової клітки (**рис. 3**).

***Рисунок 3*** – Шумозахисний житловий будинок на вулиці Саксаганського, 45. Київ, 1979 рік. Архітектори: Н. Брушинська, В. Шарапов, інженер Я. Шамес

Після землетрусу 1966 року Київ побудував у Ташкенті кілька будинків, що успадковують стиль київської серії 1КГ-480 – «чешок» з характерними балконами по периметру і еркерами (**рис. 4**).

***Рисунок 4*** – Житловий будинок на вулиці Афросіаб. Ташкент, 1967. КиївЗНДІЕП

Шумозахисні будинки, екрани та шумозахисні вікна є важливими складовими в сучасних стандартах житла і міського планування, оскільки забезпечують не лише комфорт та здоров'я мешканців, але й покращують якість середовища. Ці засоби зменшення шуму не тільки відокремлюють житлову зону від шуму автомобільних доріг, але й можуть служити захисними бар'єрами, що допомагають знизити шумове навантаження на прилеглі території та дозволяють створювати комфортні та безпечні середовища для проживання.

Підвищена звукоізоляція вікон і дверей сприяє захисту внутрішнього простору житла від надмірного шуму, забезпечуючи тишу та спокій для мешканців. Ці вікна і двері можуть також бути обладнані спеціальними вентиляційними системами, що дозволяють забезпечити свіже повітря без шуму та забруднення зовнішнього середовища.

Шумозахисні екрани (**рис. 5**) є одним з найефективніших засобів зменшення рівня шуму, не лише від транспортного руху, але й для захисту житлових зон. Вони отримали широке визнання та застосування в Сполучених Штатах, країнах Європи та Азії, і тепер активно впроваджуються в Україні. За своєю структурою, шумозахисні екрани виглядають як відносно тонкі суцільні стінки, які зменшують рівні шуму на території, що перебуває за ними. Дослідження впливу різних параметрів конструкції екрану та взаємного розташування джерела звуку та зони, яку вони захищають від шуму, почалося ще у 50-х роках двадцятого століття і продовжується до наших днів.

***Рисунок 5*** – Шумозахисні екрани на автомобільних дорогах

Застосування шумозахисних екранів, будинків та вікон сприяє зниженню шумового забруднення, покращенню якості життя та збереженню здоров'я мешканців, що робить їх важливою складовою сучасного житлового будівництва та розвитку міських інфраструктур.

Шумозахисні зелені насадження на автомобільних дорогах – це ефективний спосіб зменшити рівень шуму, що виникає від автотранспорту і негативно впливає на оточуюче середовище та життя людей. Ці зелені насадження можуть включати дерева, кущі, трав'янисті покриви та інші види рослин, які ростуть вздовж автомобільних доріг (**рис. 6**).

Ось кілька важливих аспектів шумозахисних зелених насаджень на автомобільних дорогах:

Зменшення шуму: Рослини абсорбують і розсіюють звукові хвилі, допомагаючи знизити рівень шуму в околицях дороги. Це особливо важливо в місцях з інтенсивним автомобільним рухом, де шум може стати серйозною проблемою для місцевих жителів.

Покращення якості повітря: Зелені насадження також впливають на якість повітря, поглинаючи вуглекислий газ і виділяючи кисень. Це може покращити середовище навколо доріг та зменшити вплив автотранспорту на забруднення повітря.

Екологічні переваги: Шумозахисні рослини сприяють біорізноманіттю, надаючи місцю для життя та живлення різних видів комах, птахів та інших тварин. Вони також сприяють збереженню ґрунту та водних ресурсів.

Естетичний вигляд: Зелені насадження прикрашають дороги і роблять їх більш привабливими для водіїв та пасажирів. Красиві ландшафтні композиції можуть сприяти відчуттю комфорту і релаксації під час поїздок.

Заощадження енергії: Рослини можуть зменшити потребу в штучному освітленні вздовж доріг під час ночі, оскільки вони відбивають світло від фар автомобілів і створюють природний зелений «завіс». Це допомагає зменшити споживання електроенергії.

***Рисунок 6*** – Зелені насадження вздовж автомобільної дороги

Розрахунок ефективності шумозахисних зелених насаджень на автомобільних дорогах може включати декілька параметрів і методів визначення впливу рослин на рівень шуму. Ось кілька основних аспектів, які можна враховувати в такому розрахунку:

Рівень шуму перед та після насадження: Першим кроком є вимірювання рівня шуму на дорозі до та після створення шумозахисних насаджень. Для цього використовуються звукові вимірювачі та акустичні тестування. Різниця в рівнях шуму дасть загальне уявлення про ефективність насаджень.

Тип та розмір рослин: Розташування та характер рослин у шумозахисних насадженнях мають значення. Великі дерева, кущі та інші рослини з багатою листвою можуть бути більш ефективними у поглинанні шуму, особливо у комбінації з іншими видами рослин.

Густота насаджень: Густота рослин у насадженнях також важлива. Товщина зеленої «завіси» впливає на її ефективність у поглинанні звуку. Зазвичай, більше рослин на одиницю площі допомагає знизити рівень шуму.

Довжина насаджень: Довший шумозахисний коридор з більшими рослинами може бути більш ефективним у зменшенні рівня шуму, оскільки він надає більше місця для поглинання та розсіювання звуку.

Місцеві умови: Рельєф, клімат і ґрунтові умови можуть впливати на ріст рослин і їхню ефективність у боротьбі зі шумом.

Розташування від дороги: Відстань між насадженнями та дорогою важлива. Чим ближче рослини розташовані до дороги, тим ефективніше вони можуть знижувати шум.

Моніторинг та коригування: Результати розрахунків повинні бути піддані систематичному моніторингу, і в разі потреби може знадобитися коригування схеми насаджень.

Розрахунок ефективності шумозахисних насаджень може включати математичні моделі та програми для оцінки впливу різних параметрів на рівень шуму. Ці програми та розрахунки допомагають планувати та вдосконалювати системи зелених насаджень для зменшення шуму на автомобільних дорогах і підтримувати стале середовище для життя місцевого населення. Ось деякі з них:

STAMINA (STAtistical Model for assessing the Impact of Noise Abatement): Ця програма розроблена для оцінки впливу різних видів зелених насаджень на рівень шуму на автодорозі. STAMINA використовує статистичні моделі для прогнозування зниження рівня шуму, яке може бути досягнуто завдяки рослинам.

CNOSSOS-EU (Common Noise Assessment Methods in Europe): Ця програма була розроблена для оцінки шуму в Європейському Союзі, і вона включає оцінку ефективності зелених насаджень як один із можливих заходів для зниження шуму. Вона надає методику розрахунку впливу рослин на рівень шуму.

CADNA (Computer Aided Design for Noise Abatement): Це програмне забезпечення дозволяє інженерам та архітекторам проєктувати шумозахисні структури та зелені насадження на автодорогах. Воно враховує різні параметри, включаючи типи рослин, їх розташування та властивості для оцінки їхнього впливу на шум.

TNM (Traffic Noise Model): Ця модель розвинута Федеральною автодорожньою адміністрацією США для оцінки шуму вздовж автомобільних доріг. Вона дозволяє враховувати вплив різних факторів, включаючи зелені насадження, на рівень шуму.

INM (Integrated Noise Model): Ця програма також розроблена для оцінки впливу шуму від автомобільних доріг і включає функції для розрахунку зниження шуму за допомогою зелених насаджень.

Ці програми і математичні моделі допомагають інженерам та дослідникам визначити, які параметри зелених насаджень можуть бути найбільш ефективними в зниженні рівня шуму на автомобільній дорозі. Вони також допомагають у розробці оптимальних планів для створення шумозахисних зон і зелених насаджень з метою покращення якості життя місцевого населення та зниження впливу шуму на довкілля.

Загалом, шумозахисні зелені насадження на автомобільних дорогах не лише зменшують негативний вплив шуму на людей та довкілля, але й приносять численні екологічні, естетичні та соціальні переваги. Тому їх розвиток і підтримка важливі для сталого розвитку наших міст та інфраструктури.

## Висновки

Шум є однією з основних турбуючих факторів для жителів, і транспорт виступає одним із основних джерел шуму. Вплив шумових факторів на здоров'я людини виявляється у високому рівні нервового напруження, постійному перевтомі, виснаженні центральної нервової системи та кори мозку. Ці аспекти негативно впливають на творчу діяльність, продуктивність роботи, її якість та безпеку. Також вони можуть викликати швидку втомлюваність, погіршення пам'яті, зосередженості, гостроти зору, а також призводити до патологічних змін у органах слуху та серцево-судинній системі, а також інших фізіологічних змін в організмі людини.

При проєктуванні або реконструкції житлових територій проєктувальники повинні передбачити та прогнозувати очікувані рівні шуму, враховуючи основні фактори, що впливають на їхню інтенсивність. Крім того, вони повинні гарантувати створення акустичного комфорту для мешканців.

Для забезпечення комфортних умов в житлових зонах щодо шумового забруднення від автотранспорту можуть бути вжиті такі заходи:

Зменшення шуму в джерелі його утворення, наприклад, зміною конструкції автомобілів або двигунів, використання шумопоглинаючого покриву доріг або обмеження руху.

Зменшення шуму на шляху його поширення, застосовуючи екрануючі споруди та зелені насадження.

Зменшення шуму внутрішнього простору будинку шляхом використання шумозахисних вікон та планування будинку.

Ці заходи сприяють поліпшенню якості життя та сприяють збереженню здоров'я мешканців, сприяючи створенню комфортних та безпечних умов для проживання.

Додатково, при проєктуванні житлових територій, слід враховувати інтеграцію зелених насаджень та ландшафтного планування, оскільки рослини та дерева можуть слугувати

природними засобами поглинання шуму та зниження його впливу на мешканців. Додатково, архітектурні рішення житлових комплексів можуть передбачати створення тих місць, які дозволять жителям відпочивати та знаходити у тиші, незважаючи на шум навколишнього середовища.

Загальний підхід до шумозахисту в житлових районах полягає в комплексному плануванні, в якому враховуються як шумові характеристики транспортних маршрутів і доріг, так і дизайн будівель та внутрішньої планування житла. Це сприяє створенню сприятливих умов для мешканців і зменшенню негативного впливу шуму на їхнє фізичне та психологічне здоров'я.

**Список літератури**

1. Гільов В. В. Забезпечення екологічної безпеки промислового регіону. Вісник Придніпровської державної академії академії та архітектури. Дніпропетровськ, 2015. №4 (205). С. 62–67.

2. Гільов В.В. Оцінка якості та безпеки життєдіяльності населення, яке проживає на території з багатоповерховою забудовою за фактором шумового забруднення. International Scientific Journal. Київ, 2015. № 1. С. 14–17.

3. Road traffic noise and health-related quality of life: A cross-sectional study. Berlin, 2021. URL: https://www.noiseandhealth.org/article.asp?issn=1463-1741;year=2013;volume=15;issue=65;spage=224;epage=230;aulast=Welch (дата звернення 23.10.2023).

4. Stephen A. Stansfeld, Mark P. Matheson. Noise pollution: non-auditory effects on healt. British Medical Bulletin. Berlin, 2003. Volume 68, Issue 1. DOI: https://doi.org/10.1093/bmb/ldg033 (дата звернення 23.10.2023).

5. Summary of Noise Barriers Constructed By December 31, 2010. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, July 2012.

6. Гільов В. В. Визначення коефіцієнту акустичного комфорту (дискомфорту) для територій з садибною забудовою. Строительство, материаловедение, машиностроение. Днепропетровск, 2007. Вип. 43. С. 111–113.

7. Ріпний О.Ю., Глобчак Б.В., Гільов В. В., Ткач Н.О. Засоби зменшення негативного впливу на населення від автомобільної дороги на прикладі м. Підгороднє. Молодь: наука та інновації: Матеріали VI Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених, 19 листопада 2018 р. Дніпро, 2018. Т. 10. екологічні проблеми регіону. С. 89–90.

8. ДБН В.1.1-31:2013 Захист території, будинків і споруд від шуму. Київ, 2013. 45 с. (Інформація та документація).

**References**

1. Hilov V. V. Zabezpechennia ekolohichnoi bezpeky promyslovoho rehionu [Ensuring environmental safety of the industrial region]. Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii akademii ta arkhitektury. Dnipropetrovsk, 2015. №4 (205). P. 62–67 [in Ukrainian].

2. Hilov V.V. Otsinka yakosti ta bezpeky zhyttiediialnosti naselennia, yake prozhyvaie na terytorii z bahatopoverkhovoiu zabudovoiu za faktorom shumovoho zabrudnennia ]Assessment of the quality and safety of life activities of the population living in the territory with multi-storey buildings by the factor of noise pollution]. International Scientific Journal. Kyiv, 2015. № 1. P. 14–17 [in Ukrainian].

3. Road traffic noise and health-related quality of life: A cross-sectional study. Berlin, 2021. URL: https://www.noiseandhealth.org/article.asp?issn=1463-1741;year=2013;volume=15;issue=65;spage=224;epage=230;aulast=Welch (Last accessed: 23.10.2023) [in English].

4. Stephen A. Stansfeld, Mark P. Matheson. Noise pollution: non-auditory effects on healt. British Medical Bulletin. Berlin, 2003. Volume 68, Issue 1. DOI: https://doi.org/10.1093/bmb/ldg033 (Last accessed: 23.10.2023).

5. Summary of Noise Barriers Constructed By December 31, 2010. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, July 2012 [in German].

6. Hilov V. V. Vyznachennia koefitsiientu akustychnoho komfortu (dyskomfortu) dlia terytorii z sadybnoiu zabudovoiu [Determination of the coefficient of acoustic comfort (discomfort) for territories with manor buildings]. Stroitel′stvo, materialovedenie, mašinostroenie. Dnepropetrovsk, 2007. Iss. 43. P. 111–113 [in Ukrainian].

7. Ripnyi O.Iu., Hlobchak B.V., Hilov V. V., Tkach N.O. Zasoby zmenshennia nehatyvnoho vplyvu na naselennia vid avtomobilnoi dorohy na prykladi m. Pidhorodnie [Means of reducing the negative impact on the population from the road on the example of the city of Pidgorodnoe]. Molod: nauka ta innovatsii: Materialy VI Vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii studentiv, aspirantiv i molodykh vchenykh, 19 lystopada 2018 r. Dnipro, 2018. T. 10. ekolohichni problemy rehionu. P. 89–90 [in Ukrainian].

8. DBN V.1.1-31: 2013 Zakhyst terrytoryy, budynkiv i sporud vid shumu [State Building Norms (DBN V.1.1-31: 2013) Territories, buildings and structures protection against noise]. Kyiv, 2013. 45 p. (Information and documantation) [in Ukrainian].

**Vitalii Kovalchuk**, *D.Sc., Associate Prof*, *https://orcid.org/0000-0003-4350-1756*
*Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine*

## NOISE PROTECTION MEASURES ON HIGHWAYS

***Abstract***

Introduction. Scientific studies have shown that noise generated by vehicles has a negative impact on human health. Therefore, improved solutions in the field of road design and planning are needed to reduce the noise load on residential areas.

Problems. Typically, noise is caused by traffic, engines, and road surfaces. This noise can lead to stress, sleep problems, impaired concentration, and other physical and psychological health problems.

One of the key strategies for noise protection is to choose the right location for road construction and use special geometric solutions that can help reduce the noise load on the surrounding areas. Another important element is the installation of sound barriers.

Objective. The purpose of the study was to investigate and analyze possible solutions for noise protection of residential areas adjacent to the highway from the noise load of highways.

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. The objects in this article are noise protection structures and measures on highways.

Results. The article highlights the problems of noise pollution of the environment from highways and ways to solve them.

Conclusions. High noise levels can have a significant negative impact on human health. Its manifestations include an increase in nervous tension, constant fatigue, and depletion of the central nervous system and cerebral cortex. These factors have a negative impact on creative activity and work productivity. In addition, they can cause rapid exhaustion, deterioration of memory, attention, visual acuity, and contribute to pathological changes in the auditory and cardiovascular systems, as well as other physiological changes in the human body.

Having analyzed noise protection measures on highways, we can conclude that the issue of noise safety of the territories adjacent to the highway is a set of measures that includes planning, construction, maintenance of both the road itself and noise protection facilities on a particular highway.

***Keywords:*** highway, noise load, noise barriers, noise-absorbing structures, acoustic design, noise protection principles, road geometry, vehicles, noise pollution, noise protection structures.

https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.275

**УДК 504:625.7**

**Харитонова Н. М.**, *https://orcid.org/0000-0001-5732-3407*
**Ярощук О. С.**, *https://orcid.org/0000-0003-1550-0131*

*Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»), м. Київ, Україна*

# ЗАХОДИ З ПОКРАЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ДОВКІЛЛЯ У ЗОНІ ВПЛИВУ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

***Анотація***

Вступ. В умовах сучасного розвитку автодорожнього комплексу автомобів в цілому збільшується рівень техногенного навантаження на довкілля від експлуатації. Тому набувають актуальності заходи з мінімізації негативного впливу від функціонування автомобільних доріг.

Проблематика. На відміну від країн Європейського союзу в Україні неналежно розвинуте забезпечення екологічно безпечних технологій, упровадження нормативно-правового забезпечення обов'язковості інтеграції екологічної політики до інших документів, що містять засади державного, галузевого регіонального та місцевого розвитку, запровадження підходів щодо еколого-соціально-економічного планування розвитку, ліквідація залежності економічного зростання від збільшення використання природних ресурсів і підвищення рівня забруднення довкілля, формування системи захисту навколишнього середовища від впливу автомобільних доріг – на цих принципах базується розроблення та впровадження комплексу заходів щодо забезпечення екологічної безпеки у дорожньому господарстві.

Мета. Визначити рівень екологічної безпеки діяльності всього дорожнього комплексу, визначити зміни природоохоронного законодавства України та проаналізувати стратегію державної екологічної політики України.

Матеріали і методи. Аналітичні, інформаційно-пошукові.

Результати. Запропоновано заходи з підвищення екологічної безпеки автомобільних доріг загального користування, забезпечення вимог природоохоронного законодавства України і сприяння екологічно збалансованого розвитку держави шляхом обмеження негативного впливу дорожньої складової та виробництв дорожнього господарства на довкілля.

Висновки. Реалізація заходів дозволить покращити державну економічно-соціальну політику країни як на загальнодержавному рівні, що сприятиме наближенню України до європейських вимог, так і на локальному рівні, що покращить інвестиційну привабливість та екологічний стан регіонів.

***Ключові слова:*** автомобільна дорога, довкілля, екологічна безпека, забруднюючі речовини, комплекс заходів.

## Вступ

Розвиток різних напрямків виробництва і надання послуг для задоволення глобальних потреб людства спричинило низку видів діяльності, які чинять екологічне навантаження на навколишнє середовище і в багатьох випадках призводить до значного погіршення його стану через забруднення.

Якщо така діяльність буде не контрольована, то багато промислових та інших проєктів спричиняють небажані наслідки на довкілля [1].

Довкілля вважається безпечним, коли його стан відповідає встановленим у законодавстві [2 – 4] критеріям, стандартам, лімітам і нормативам, які стосуються його чистоти

(незабрудненості), ресурсомісткості (невиснаженості), екологічної стійкості, санітарних вимог, видового різноманіття, здатності задовольняти інтереси громадян.

Проблема охорони довкілля є однією з найважливіших питань у комплексі подальшого розвитку нашого суспільства.

Вплив автомобільної дороги на навколишнє середовище розділяється відповідно до джерел його походження на такі види: автомобільна дорога як інженерна споруда; транспортний рух; технологічні процеси будівництва та реконструкції; технологічні процеси експлуатаційного утримання.

Розвиток автомобільних доріг неможливий без забезпечення екологічно безпечної діяльності всього дорожнього комплексу.

Упровадження екосистемного підходу, забезпечення імплементації в дорожнє господарство джерел права ЄС, запровадження екологічно безпечних технологій, упровадження нормативно-правового забезпечення обов'язковості інтеграції екологічної політики до інших документів, що містять засади державного, галузевого (секторального), регіонального та місцевого розвитку, запровадження підходів щодо еколого-соціально-економічного планування розвитку, ліквідація залежності економічного зростання від збільшення використання природних ресурсів та підвищення рівня забруднення довкілля, формування системи захисту навколишнього середовища від впливу автомобільних доріг – на цих принципах базується розроблення та впровадження комплексу заходів щодо забезпечення екологічної безпеки у дорожньому господарстві.

Для вирішення цих питань необхідно проаналізувати сучасний технічний стан дорожнього господарства та рівень впровадження природоохоронних заходів протягом останніх років, визначити перспективи впровадження заходів, спрямованих на збереження, поліпшення та охорону довкілля Заходи з обмеження негативного впливу автомобільних доріг на довкілля сприятиме економічному розвитку і технічному прогресу й оцінювати їх з урахуванням екологічних пріоритетів, наявності екологічних ризиків та стану екологічної безпеки.

Відповідно до вимог [5] доцільно застосувати такі природоохоронні заходи:

– забезпечення навчання або проводити практичні заняття з персоналом дорожніх служб, щодо відповідальності за стан навколишнього середовища;

– розроблення системи регулярного моніторингу основних показників параметричного (шумового) та інгредієнтного забруднення, що мають суттєвий вплив на навколишнє середовище;

– документування та підтримування в робочому стані інформацію на електронних або інших носіях;

– розроблення системи контролю виконання природоохоронних заходів;

– розроблення критеріїв оцінки ефективності природоохоронних заходів, що впроваджуються;

– розроблення процедури коригувальних дій за результатами оцінки ефективності.

Поліпшення транспортно-експлуатаційних характеристик автомобільних доріг шляхом реконструкції та капітального ремонту (влаштування покривів удосконаленого типу, зміна геометричних параметрів автомобільної дороги, облаштування з'їздів на місцеві дороги, ремонт покривів автомобільних доріг і транспортних споруд тощо) безпосередньо знижує негативний вплив автомобільної дороги на навколишнє середовище.

## Основна частина

Природоохоронні заходи, які необхідно впроваджувати не тільки під час будівництва, ремонту та утримання автомобільних доріг, а і на підприємства виробничих базах (кар'єри кам'яних матеріалів, притрасові кар'єри, асфальто- та цементобетонні заводи, притрасові склади мінеральних матеріалів, склади протиожеледних матеріалів, бітумосховища тощо).

До природоохоронних заходів із забезпечення екологічної безпеки в дорожньому господарстві, необхідно віднести такі заходи (**рис. 1**).

***Рисунок 1*** – Перелік природоохоронних заходів в дорожньому господарстві

До ресурсозберігаючих належать заходи, які передбачають збереження та раціональне використання земельних, водних, енергетичних, паливних ресурсів, повторне їх використання, у тому числі:

а) влаштування насипів за рахунок ґрунтів виїмок та шахтних порід;

б) збереження та повторне використання родючого шару ґрунту;

в) повторне використання дорожніх будівельних матеріалів та матеріальних ресурсів, отриманих від розбирання конструкцій, знесення споруд або шляхом добування попутно у процесі виконання робіт на об'єкті або асфальтобетонному заводі;

д) застосування промислових відходів (металургійні шлаки, золи-винесення та суміші золошлакові теплових електростанцій, вторинні продукти вугільної промисловості, відходи гірничозбагачувальних комбінатів тощо);

е) утилізація деревини при розчищенні захисних лісонасаджень;

є) виключення роботи машин і механізмів на холостому ході;

ж) теплозберігаючі заходи щодо механізмів і побутових приміщень за умови проведення будівельних робіт у холодний сезон;

з) використання альтернативних видів освітлення та палива;

и) використання нових технологій, сучасних матеріалів і прогресивних проєктних рішень, а саме:

– використання (гофрованих) металевих і пластикових водопропускних труб;

– влаштування ефективних дренажних систем, споруд дорожнього водовідведення та водоочисних споруд, протизсувних конструкцій, протилавинних, протиселевих споруд, шумозахисних, снігозахисних споруд, випарних басейнів; габіонів, захисних галерей тощо;

– влаштування дорожнього одягу підвищеної довговічності та довговічних захисних шарів зносу;

– укріплення укосів геосинтетичними матеріалами.

Захисні заходи поділяються на:

– комплексні заходи;
– заходи зі зменшення запиленості;
– заходи із захисту водного середовища та ґрунтів;
– заходи із захисту від шуму;
– заходи із захисту споруд від вібрації;
– заходи щодо захисту фауни;
– заходи щодо поводження з відходами.

До комплексних заходів щодо попередження небезпечних геологічних явищ (зсувів, водної ерозії, підтоплення), які одночасно із заходами із захисту водного середовища, відносяться:

– влаштування водопропускних споруд у понижених місцях з поперечним похилом автомобільної дороги;

– створення систем поверхневого водовідведення (лотки, бистрини, кювети тощо) для попередження водної ерозії та запобігання забруднення ґрунтів, поверхневих водних об'єктів та ґрунтових вод;

– гідроізоляція та укріплення русел біля вхідних і вихідних отворів водопропускних споруд;

– захист від водної та вітрової ерозії земляного полотна шляхом укріплення укосів, бокових канав, розділювальної смуги;

– влаштування ефективних дренажних систем, протизсувних конструкцій, габіонів, захисних галерей тощо;

– облаштування на зсувонебезпечних ділянках (на схилах у місцях близького розташування підземних вод) перехоплювального дренажу.

Заходи зі зменшення запиленості:

– укріплення узбіч дороги матеріалами із застосуванням в'яжучих, щебеневими матеріалами – посівом трав;

– застосовування технологій, які дозволяють знизити інтенсивність утворення пилу в смузі відведення автомобільної дороги.

Заходи із захисту водного середовища та ґрунтів передбачають:

– влаштування конструкції дорожнього одягу і земляного полотна без застосування токсичних матеріалів;

– влаштування на ділянках автомобільної дороги в межах водоохоронних зон ізольованих систем водовідведення з очисними спорудами;

– влаштування гідроботанічних майданчиків для здійсненні очищення стічних вод із поверхні автомобільних доріг і мостових споруд;

– влаштування елементів санітарного облаштування – туалети, урни, контейнери для сміття тощо.

Заходи із захисту від викидів забруднюючих речовин та шуму:

– влаштування шумозахисних споруд, зокрема екранів, у межах населених пунктів, смуг регульованої рекреації та стаціонарної рекреації;

– висадження шумозахисних смуг зелених насаджень.

Заходи щодо захисту фауни передбачають:

– встановлення захисних парканів для обмеження потрапляння тварин на проїзну частину;

– влаштування біопереходів для міграції тварин відповідно до існуючих біотипів.

Оптимізація роботи з відходами при будівництві автомобільних доріг передбачає:

– належну організацію і контроль будівництва з метою мінімізації утворення відходів;

– локалізацію, тимчасове складування та подальше вивезення будівельних і побутових відходів до місць їх переробки та утилізації;

– встановлення на ділянках виконання робіт спеціальних контейнерів для відходів металу, промасленого ганчір'я, нафтопродуктів тощо;

– максимальне повторне використання дорожніх будівельних матеріалів і матеріальних ресурсів, отриманих від розбирання конструкцій, знесення споруд.

До відновлювальних заходів віднесено:

– рекультивацію земель у межах смуги відведення автомобільної дороги, кар'єрів та резервів ґрунту, територій технологічних проїздів, будівельних майданчиків, земель тимчасового відводу тощо;

– догляд та відновлення зелених насаджень.

Компенсаційні заходи направлені на:

– компенсацію видалених зелених насаджень висаджуванням нових;

– компенсаційні виплати за збитки рибному господарству при роботах у водоохоронних зонах та акваторіях;

– матеріальну компенсацію за порушення стану довкілля при неможливості його адекватного відновлення;

– матеріальну компенсацію за постійний і тимчасовий відвід земель сільськогосподарського призначення.

Охоронними заходами є:

– оцінювання впливу нового будівництва на довкілля (оточуючі будівлі і споруди та населення, що проживає у межах територій забудови);

– інформування населення про наміри щодо нового будівництва, реконструкції та капітального ремонту автомобільної дороги чи її ділянки;

– інформування населення про екологічні наслідки нового будівництва, реконструкції та капітального ремонту автомобільної дороги чи її ділянки;

– обстеження, аналізування й оцінювання фактичних впливів на довкілля умежах зон впливів планованої діяльності.

Реалізація заходів щодо зменшення рівня забруднення територій у межах впливу об'єктів дорожнього комплексу забезпечить підвищення екологічної безпеки територій, що знаходяться в межах зон впливу автомобільної дороги.

Діяльність підприємств і організацій, які входять до сфери управління дорожньої галузі, направлена на запобігання (мінімізацію) негативного впливу на довкілля. Шляхи та напрямки охорони довкілля в дорожньому господарстві в повній мірі відповідають основним завданням і заходам Закону України «Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року», згідно з якими охорона довкілля під час будівництва, поточного ремонту та утримання автомобільних доріг повинна здійснюватися відповідно до законодавства України, ратифікованих Україною міжнародних конвенцій та угод щодо охорони довкілля.

Напрямки впровадження комплексу природоохоронних заходів:

– збільшення частки природоохоронних заходів з у проєктній документації на нове будівництво, реконструкцію та капітальний ремонт об'єктів дорожнього господарства;

– розширення обсягів науково-дослідних і експериментально-конструкторських робіт по природоохоронним проблемам та створення умов широкого їх впровадження в дорожнє господарство;

– розроблення та впровадження нових технологій експлуатаційного утримання автомобільних доріг;

– розроблення та впровадження екологічно безпечних матеріалів та технологій;

– удосконалення технологій очищення атмосферного повітря, водних об'єктів, ґрунтів;

– удосконалення та впровадження системи контролю стану ґрунтів, поверхневих та ґрунтових вод;

– виконання науково-дослідних робіт з питань зменшення забруднення атмосферного повітря та поверхневих вод твердими частинками, у тому числі мікрочастинками з органічних речовин, що утворюються внаслідок зношування дорожнього покриву та шин, а також з питань зниження рівня шуму при контакті шин транспортних засобів з дорожнім покривом (на яких зосереджена значна увага у країнах Європейського Союзу);

– інвентаризація викидів забруднюючих речовин та впровадження системи контролю забруднення атмосферного повітря від стаціонарних джерел забруднення на підприємствах дорожнього господарства та пересувних (тимчасових) джерел забруднення на ділянках автомобільних доріг;

– розроблення енерго- та ресурсозберігаючих технологій, що передбачають збереження і раціональне використання земельних, водних, енергетичних, паливних ресурсів та їх повторне використання (використання відходів різних видів виробництв (металургійні шлаки, золи-винесення та суміші золошлакові, вторинні продукти вугільної промисловості, відходи гірничозбагачувальних комбінатів тощо);

– розроблення системи заходів із контролю утворення відходів та мінімізації їх обсягів під час будівництва, поточного ремонту та утримання автомобільних доріг;

– оптимізація планування забудови і розвитку зелених зон за рахунок створення та утримання зелених насаджень у смугах відведення автомобільних доріг і захисних насаджень уздовж автомобільних доріг;

– розроблення та впровадження нових технологій, конструкцій і матеріалів під час будівництва, поточного ремонту та утримання автомобільних доріг, з метою зменшення рівня шуму та обсягу викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря під час руху автомобілів та при виконанні ремонтно-будівельних робіт.

Для реалізації вищезазначених напрямків і вирішення низки питань екологічного характеру, що існують у дорожньому господарстві, необхідно:

а) забезпечити повне виконання природоохоронних заходів під час утримання автомобільних доріг загального користування та підприємств дорожнього господарства:

***1) на автомобільних дорогах загального користування державного значення:***

– укріплення узбіч, розділювальних смуг та укосів земляного полотна і виїмок (матеріалами із застосуванням в'яжучих, гравієм, щебенем, засівом трав, одернуванням тощо);

– догляд за деревами та кущами (санітарна рубка);

– висаджування нових дерев та кущів;

– влаштування нових, утримання та відновлення діючих майданчиків для приготування та складування дорожніх будівельних матеріалів;

– проведення робіт із забезпечення санітарного стану смуги відведення;

– влаштування нових, утримання та відновлення діючих сміттєзбиральних контейнерів;

– утилізація відходів (побутових, будівельних);

– упередження та ліквідація обвалів, зсувів, селевих виносів, осипів та каменепадів, снігових лавин;

– влаштування нових, утримання та відновлення діючих водопропускних труб;

– влаштування нових, утримання та відновлення діючих підпірних стін, протилавинних галерей, захисних укріплень, регуляційних споруд тощо;

– влаштування нових, утримання та відновлення діючих очисних споруд поверхневого водовідведення автомобільних доріг;

– рекультивація земель;

– влаштування нового, утримання та відновлення існуючого огородження для обмеження потрапляння тварин на проїзну частину;

– влаштування нових, утримання та відновлення діючих біопереходів для міграції тварин;

– здійснення післяпроєктного моніторингу довкілля.

***2) на підприємствах дорожнього господарства:***

– влаштування нових, утримання та відновлення діючих складів протиожеледних матеріалів (влаштування основи складського майданчику асфальтобетонним покривом, систем водовідведення тощо);

– влаштування нових, утримання та відновлення діючих очисних споруд та установок (циклони, фільтри, скрубери, пилоуловлювачі тощо) на асфальтобетонних заводах;

– проведення робіт з інвентаризації джерел забруднення довкілля;

– влаштування нових, утримання та відновлення діючих сміттєзбиральних контейнерів;

– утилізація відходів (побутових, будівельних);

б) визначити плановане виконання природоохоронних заходів під час будівництва, поточного ремонту та утримання автомобільних доріг загального користування (додаток А);

в) забезпечити виконання науково-дослідних робіт, які будуть направленні на розроблення будівельних норм, нормативних документів, методичної бази; розроблення системи моніторингу та систему коригувальних заходів (додаток Б).

Вищезазначені заходи ураховують вимоги нормативно-правових актів, що регулюють сферу охорони довкілля [2 – 4], будівельних норм [6, 7] та національних стандартів [8, 9], і визначає основні напрямки охорони навколишнього середовища на автомобільних дорогах і дорожньої інфраструктури.

Заходи із забезпечення екологічної безпеки впроваджуються відповідно до проєктної документації на нове будівництво, реконструкцію та капітальний ремонт автомобільних доріг та інших об'єктів дорожнього господарства та фінансових розподілів Агентств відновлення в областях.

## Висновки

Запропоновані заходи з обмеження негативного впливу автомобільних доріг на довкілля направлені на поліпшення стану навколишнього природного середовища, шляхом інтеграції екологічної політики України для гарантування екологічно безпечного природного середовища для життя і здоров'я населення, впровадження екологічно збалансованої системи природокористування та збереження природних екосистем.

Комплекс заходів з обмеження негативного впливу на навколишнє середовище при новому будівництві, реконструкції, ремонті та експлуатаційному утриманні автомобільних доріг загального користування, повинен здійснюватися із застосуванням методів системного аналізу, які дозволяють сформувати структуру та логічну організацію досліджень, що враховують особливості основних процесів системи, зворотні зв'язки та зв'язки з навколишнім середовищем.

Впровадження і реалізація заходів з обмеження впливу на довкілля забезпечить:

– покращення транспортно-експлуатаційного стану автомобільних доріг і приведення його у відповідність до вимог нормативних документів з охорони довкілля;

– підвищення ефективності використання бюджетних коштів, які спрямовано на вирішення екологічних проблем;

– зменшення негативного впливу автомобільних доріг на довкілля за рівнем забруднення атмосферного повітря, водних ресурсів та ґрунту, у тому числі за межами смуги відведення;

– збереження територій та об'єктів природного заповідного фонду, пам'яток культури, об'єктів археології тощо.

## Список літератури

1. Харитонова Н.М., Розрахунковий метод оцінки впливу транспортних засобів на повітряне середовище. *Дороги і мости*. Київ, 2023. Вип. 27. С. 289–295. DOI: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.27.289.

2. Про оцінку впливу на довкілля: Закон України від 17.10.2019 № 199-XI, редакція від 01.01.2022 № 2059-VIII // База даних Законодавство України / Верховна рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19#Text (дата звернення: 08.02.2022).

3. Про охорону навколишнього природного середовища: Закон України від 26.06.1991 № 1268-XII, релакція від 01.01.2022 № 1264-XII// База даних Законодавство України / Верховна рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text (дата звернення: 08.02.2022).

4. Про автомобільні дороги: Закон України від 20.12.20025 № 3235-IV редакція від 19.12.2021 № 2862-IV // База даних Законодавство України / Верховна рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2862-15#Text (дата звернення: 08.02.2022).

5. ДСТУ ISO 14001:2006 Системи екологічного керування. Вимоги та настанови щодо застосовування (ISO 14001:2004, IDT). Київ, 2006. 17 с. (Інформація та документація).

6. ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. Київ, 2015. 104 с. (Інформація та документація).

7. ДБН А.2.2-1:2021 Склад і зміст матеріалів оцінки впливів на навколишнє середовище (ОВНС). Київ, 2022. 22 с. (Інформація та документація).

8. ДСТУ 9030:2020 Автомобільні дороги. Оцінка впливів на навколишнє середовище. Вимоги до проектної документації. Київ, 2020 р. 42 с. (Інформація та документація).

9. ДСТУ 9076:2021 Автомобільні дороги. Оцінка впливів на довкілля. Київ, 2021 р. 13 с (Інформація та документація).

10. Вирожемський В.К., Волошина І.В. Нерозривний екологічний ланцюг: дорога – довкілля – життя. *Дорожня галузь України*. Київ, 2013. № 3. С. 27–32.

11. Лисиченко Г. В., Бородіна Н. А., Тищенко Ю. Є. Комплексний підхід при оцінюванні впливів автомобільних доріг загального користування на навколишнє середовище. *Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика*. Херсон, 2015. С. 184–191.

**References**

1. Kharytonova N.M. Rozrakhunkovyi metod otsinky vplyvu transportnykh zasobiv na povitriane seredovyshche [Calculation method for assessing the impact of vehicles on the air environment]. *Dorohy i mosty*. Kyiv, 2023. Iss. 27. P. 289–295. DOI: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.27.289 [in Ukrainian].

2. Pro otsinku vplyvu na dovkillia: Law of Ukraine of 17.10.2019 № 199-KhI, editorial office of 01.01.2022 № 2059-VIII // Database of Legislation of Ukrainy / Verkhovna rada Ukrainy. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19#Text (Last accessed: 08.02.2022) [in Ukrainian].

3. Pro okhoronu navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha: Law of Ukraine of 26.06.1991 № 1268-KhII, editorial office of 01.01.2022 № 1264-KhII// Database of Legislation of Ukrainy / Verkhovna rada Ukrainy. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text (Last accessed: 08.02.2022) [in Ukrainian].

4. Pro avtomobilni dorohy: Law of Ukraine of 20.12.20025 № 3235-IV editorial office of 19.12.2021 № 2862-IV // Database of Legislation of Ukrainy / Verkhovna rada Ukrainy. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2862-15#Text (Last accessed: 08.02.2022) [in Ukrainian].

5. DSTU ISO 14001:2006 Systemy ekolohichnoho keruvannia. Vymohy ta nastanovy shchodo zastosovuvannia [State Standard of Ukraine (DSTU ISO 14001:2006) Environmental management systems. Application requirements and guidelines) (ISO 14001:2004, IDT)]. Kyiv, 2006. 17 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

6. DBN V.2.3-4:2015 Avtomobilni dorohy. Chastyna I. Proektuvannia. Chastyna II. Budivnytstvo [State Building Norms (DBN V.2.3-4:2015) Highways. Part I. Design. Part II. Building]. Kyiv, 2016. 104 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

7. DBN A.2.2-1:2021 Sklad i zmist materialiv otsinky vplyviv na navkolyshnie seredovyshche [State Building Norms (DBN A.2.2-1:2021) Composition and content of environmental impact assessment materials (OVNS)]. Kyiv. 2022. 22 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

8. DSTU 9030:2020 Avtomobilni dorohy. Otsinka vplyviv na navkolyshnie seredovyshche. Vymohy do proektnoi dokumentatsii [State Standard of Ukraine (DSTU 9030:2020) Automobile roads. Environmental impact assessment. Requirements for project documentation]. Kyiv. 2020. 42 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

9. DSTU 9076:2021 Avtomobilni dorohy. Otsinka vplyviv na dovkillia [State Standard of Ukraine (DSTU 9076:2021) Highways. Environmental impact assessment]. Kyiv. 2021 13 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

10. Vyrozhemskyi V.K., Voloshyna I.B. Nerozryvnyi ekolohichnyi lantsiuh: doroha – dovkillia

– zhyttia [An inseparable ecological chain: road – environment – life]. *Dorozhnia haluz Ukrainy*. Kyiv, 2013. № 3. P. 27–32 [in Ukrainian].

11. Lysychenko H. V., Borodina N. A., Tyshchenko Yu. Ye. Kompleksnyi pidkhid pry otsiniuvanni vplyviv avtomobilnykh dorih zahalnoho korystuvannia na navkolyshnie seredovyshche [A comprehensive approach to assessing the environmental impact of public highways]. *Bezpeka zhyttiediialnosti na transporti ta vyrobnytstvi – osvita, nauka, praktyka*. Kherson, 2015. P. 184–191 [in Ukrainian].

**Nataliia Kharytonova,** *https://orcid.org/0000-0001-5732-3407*
**Olesia Yaroshchuk,** *https://orcid.org/0000-0003-1550-0131*
*M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, Kyiv, Ukraine*

## MEASURES TO IMPROVE THE ENVIRONMENTAL CONDITION IN THE IMPACT ZONE OF HIGHWAYS

***Abstract***

Introduction. In the context of the modern development of the automotive industry and the road sector as a whole, the level of technogenic load on the environment from the operation of the road complex is increasing. Therefore, measures to minimize the negative impact of the operation of roads are becoming increasingly important.

Problem Statement. Unlike the countries of the European Union, Ukraine has not properly developed the provision of environmentally friendly technologies, the introduction of regulatory and legal support for the mandatory integration of environmental policy into other documents containing the principles of state, sectoral regional and local development, the introduction of approaches to environmental, socio-economic development planning, the elimination of the dependence of economic growth on the increased use of natural resources and increased environmental pollution, the formation of a system of environmental protection from the impact of roads - these principles are the basis for the development and implementation of a set of measures to ensure environmental safety in the road sector.

Purpose. To determine the level of environmental safety of the entire road complex, to identify changes in the environmental legislation of Ukraine, and to analyze the strategy of the state environmental policy of Ukraine.

Materials and methods. Analytical, information retrieval.

Results. The article analyzes and proposes measures to improve the environmental safety of public roads, meet the requirements of environmental legislation of Ukraine, and promote environmentally balanced development of the state by limiting the negative impact of the road component and road sector industries on the environment.

Conclusions. After the implementation of the measures, the state economic and social policy of the country is expected to be improved both at the national level, which will help Ukraine to approach European requirements and at the local level, which will improve the investment attractiveness and environmental condition of the regions.

***Keywords:*** highway, environment, set of measures, pollutants, environmental safety.

Наукове видання

**ДОРОГИ І МОСТИ**

Збірник наукових праць

Випуск 28

Головний редактор Безуглий А. О.
Відповідальний редактор Каськів В. І.
Технічний редактор Нівчик Т. С.

03113, м. Київ, просп. Берестейський 57, ДП «ДерждорНДІ»
тел. +38 (044) 206-98-90
імейл: roads_bridges@dorndi.org.ua

Підписано до друку 19.12.2023
Формат 60x84 1/9. папір офсетний. Друк цифровий.
Умовн.-друк. арк. 29,35. Фіз. друк. арк. 31,56.
Наклад 100 прим.
Поліграфія printto.ua, м. Київ
(044) 205-34-34