

# АВТОШЛЯХОВИК України — 2'2025 —

АНАЛІЗ НОРМАТИВНО-ПРАВОВИХ  
АКТІВ ЄС ЩОДО  
ЦИФРОВИХ (SMART) ТАХОГРАФІВ

**Назаренко М. Б., Агєєв В. Б., Голик А. В.,  
Устименко В. С., Кузьмич Ю. А.**

Аналіз нормативно-правових актів Європейського Союзу щодо  
цифрових (Smart) тахографів та пропозиції щодо актуалізації  
національного законодавства України

2

**Закревський О. І., Устименко В. С., Бондар О. В.**

До питань енергетичної та екологічної безпеки транспорту в умовах  
воєнного стану

7

**Зеленько Ю. В., Черкудінов В. Е.,  
Главацький К. Ц., Щека І. М.**

Проблеми та перспективи постачання палива в Україну  
в період воєнного стану

12

**Марченко А. П., Міщенко М. Т., Міщенко С. Г.**

Стратегії декарбонізації енергетичних установок  
наземного транспорту

17

**Цюман М. П.**

Система управління енергоефективністю транспортної енергоустановки  
в експлуатаційних режимах

24

**Галактіонов М. С., Бредун В. І.**

Роль інтелектуальних транспортних систем  
у мінімізації забруднення повітря

33

**Федоров В. В., Корпач О. А., Яценко Д. М.**

Поліпшення маскувальних властивостей бронеавтомобіля «Барс-8»  
шляхом зниження його рівня зовнішнього шуму

38

**Тарабан С. М., Брегіда Ф. М., Бабін Ю. В.**

Сучасні вимоги нормативних документів до сміттєвозів  
з різним типом завантаження

43

**Шуклінов С. М., Михалевич М. Г.**

3-D моделювання гіпоїдної головної передачі автомобіля  
у Autodesk Inventor

49

**Купіна О. В., Нестеренко О. В., Швагер Н. Ю., Блізнюкова О. Ю.**

Система цивільного захисту України: структура, завдання  
та актуальні виклики

61

**Мурований І. С., Сахно В. П., Поляков В. М., Шарай С. М.,  
Босенко В. М., Паламарчук О. В.**

До визначення стійкості руху триланкового причіпного автопоїзда-  
контейнеровоза

69

**Золотарьов В. О.**

Про доцільність заміни індексу penetraції бітумів коефіцієнтом їхньої  
температурної чутливості

78

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

Макетування: Копаниця І. В.

Усі статті проходять двостороннє сліпе рецензування.

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

Редакція не завжди поділяє погляди авторів публікацій.

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

Видавець: ДП "Державний автотранспортний науково-дослідний і  
проектний інститут", 03113, Київ, просп. Берестейський, 57, к. 1009  
(редакція), e-mail: ikopanytsya@insat.org.ua

Укомплектовано 31.07.2025



© М. Б. Назаренко, канд. техн. наук, заступник начальника науково-дослідного центру, ORCID: 0000-0001-8649-9014, e-mail: nnazarenko@insat.org.ua;  
© В. Б. Агеєв, канд. техн. наук, начальник науково-дослідного центру, ORCID: 0000-0002-5701-2518, e-mail: vageev@insat.org.ua;  
© А.В. Голик, канд. техн. наук, завідувач відділу, ORCID: 0000-0002-0994-9541, e-mail: aholyk@insat.org.ua;  
© В.С. Устименко канд. техн. наук, завідувач сектору, ORCID: 0000-0003-3657-077X, e-mail: vustymenko@insat.org.ua;  
© Ю.А. Кузьмич, інженер I категорії, ORCID: 0009-0008-7590-1707, e-mail: ykuzmich@insat.org.ua  
(ДП «Державний автотранспортний науково-дослідний і проектний інститут»)

© Mykola Nazarenko, Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of the Research Center, ORCID: 0000-0001-8649-9014, e-mail: nnazarenko@insat.org.ua;  
© Volodymyr Ageev, Candidate of Technical Sciences, Head of the Research Center, ORCID: 0000-0002-5701-2518, e-mail: vageev@insat.org.ua;  
© Andrii Holyk, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department, ORCID: 0000-0002-0994-9541, e-mail: aholyk@insat.org.ua;  
© Viktor Ustymenko, Candidate of Technical Sciences, Head of the Sector, ORCID: 0000-0003-3657-077X, e-mail: vustymenko@insat.org.ua;  
© Yuriy Kuzmich, Engineer Category I, ORCID: 0009-0008-7590-1707, e-mail: ykuzmich@insat.org.ua  
(State Enterprise «State Road Transport Research Institute»)

## АНАЛІЗ НОРМАТИВНО-ПРАВОВИХ АКТІВ ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ ЩОДО ЦИФРОВИХ (SMART) ТАХОГРАФІВ ТА ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО АКТУАЛІЗАЦІЇ НАЦІОНАЛЬНОГО ЗАКОНОДАВСТВА УКРАЇНИ

### ANALYSIS OF THE REGULATORY LEGAL ACTS OF THE EUROPEAN UNION ON DIGITAL (SMART) TACHOGRAPHS AND PROPOSALS FOR UPDATING THE NATIONAL LEGISLATION OF UKRAINE

**Анотація.** Стаття присвячена гармонізації законодавства України з нормативно-правовими актами Європейського Союзу у сфері автомобільного транспорту. Особливу увагу приділено впровадженню цифрових (SMART) тахографів, що регулюються Регламентом (ЄС) № 165/2014. Розглянуто зобов'язання України за Угодою про асоціацію з ЄС, зокрема необхідність адаптації технічних стандартів. Визначено переваги впровадження цифрових технологій у транспортній сфері, а саме: зменшення рівня ДТП, модернізацію системи контролю та інтеграцію до європейської транспортної мережі (TEN-T). Окреслено напрями вдосконалення національного законодавства, зокрема узгодження термінології, технічних вимог і правил функціонування системи тахографів. Реалізація цих заходів сприятиме підвищенню конкурентоспроможності українських перевізників, розвитку транспортної інфраструктури та зростанню інвестиційної привабливості галузі.

**Ключові слова:** автомобільний транспорт, інформаційно-комунікаційні технології, цифрові технології, безпека дорожнього руху, система тахографів, актуалізація, законодавство, гармонізація законодавства України із законодавством Європейського Союзу.

**Abstract.** In the context of European integration, Ukraine has committed to harmonizing its national legislation with that of the European Union, including in the field of road transport. A critical component of this process is the implementation of modern technologies aimed at improving road safety, enforcing drivers' working and rest time regulations, and ensuring fair competition in the transportation market. One such measure involves the introduction of SMART tachographs, as mandated by EU Regulation No. 165/2014. This regulation sets out technical and functional requirements for the installation, operation, and maintenance of tachographs to enhance transparency, data protection, and enforcement efficiency. Despite significant progress, Ukraine's current legal framework still lacks consistency with key EU definitions and standards, particularly regarding terminology. This article assesses EU legal instruments governing tachograph systems, analyzes the current state of Ukrainian legislation, and outlines necessary amendments to align national laws with EU norms. It identifies

*gaps in the harmonization of terminology, such as the absence of clear distinctions between analog, digital, and SMART tachographs in Ukrainian legal texts.*

*The study highlights the benefits of implementing EU standards, including improved road safety, fraud prevention, and the integration of Ukraine's transport system into the Trans-European Transport Network (TEN-T). It proposes developing a unified glossary of terms and amending core legal acts, including the Law of Ukraine "On Motor Transport" and related administrative regulations, to ensure precise and standardized terminology across the sector.*

*Harmonizing legal definitions and enforcing SMART tachograph standards will enhance Ukraine's compliance with EU obligations, foster investment in the transport sector, and strengthen the country's position in the international transport market.*

**Keywords:** road transport, information and communication technologies, digital technologies, road safety, tachograph system, legislation update, harmonization of Ukraine's legislation with European Union law.

## Вступ

У процесі євроінтеграції Україна зобов'язалася гармонізувати своє законодавство із законодавством Європейського Союзу в різних сферах, зокрема у сфері транспорту. Важливим елементом цього процесу є впровадження сучасних технологій для забезпечення безпеки дорожнього руху, дотримання режиму праці та відпочинку водіїв, а також створення рівних умов для функціонування ринку автомобільних перевезень. Одним із ключових аспектів є використання цифрових (SMART) тахографів, що регламентується законодавством ЄС, зокрема **Регламентом (ЄС) № 165/2014**.

Цей документ запроваджує технічні та функціональні вимоги до конструкції, встановлення, експлуатації та обслуговування тахографів із метою підвищення прозорості, ефективності контролю та захисту даних. SMART тахографи, крім іншого, дозволяють дистанційно зчитувати інформацію про транспортні засоби, що забезпечує ефективний контроль дотримання правил без необхідності зупинки транспорту.

Незважаючи на суттєвий прогрес у нормативно-правовій адаптації України до стандартів ЄС, чинне національне законодавство ще потребує певного доопрацювання та актуалізації. Зокрема, потребує вирішення питання щодо узгодження основних термінів та визначень системи тахографів.

Основними завданнями є:

1. Оцінка європейських стандартів у сфері регулювання автомобільного транспорту, які стосуються контролю за режимом роботи водіїв, безпеки дорожнього руху;
2. Визначення необхідних змін у національному законодавстві України для його гармонізації з нормами ЄС;
3. Розробка пропозицій для практичної імплементації сучасних технологій SMART-тахографів в Україні.

Впровадження таких змін сприятиме підвищенню конкурентоспроможності українських перевізників на міжнародному ринку, забезпеченню високого рівня безпеки дорожнього руху та відповідності європейським нормам транспортування.

Актуальність теми:

1. Зобов'язання за Угодою про асоціацію з ЄС

Угода про асоціацію між Україною та ЄС передбачає гармонізацію національного законодавства із законодавством ЄС, зокрема регламентацію у сфері транспорту.

Згідно з Додатком XXXII до Угоди Україна має впровадити норми та технічні стандарти, що регулюють використання тахографів у комерційному автомобільному транспорті.

Виконання цих зобов'язань є важливим етапом в інтеграції транспортної системи України до європейської спільноти.

2. Підвищення безпеки дорожнього руху

Цифрові (SMART) тахографи дозволяють здійснювати ефективний контроль за дотриманням водіями режиму праці та відпочинку, що є ключовим фактором для запобігання аваріям, викликаним перевтомою водіїв. Впровадження цих технологій сприятиме зниженню рівня ДТП і покращенню безпеки дорожнього руху як всередині країни, так і під час міжнародних перевезень.

3. Боротьба із шахрайством у сфері перевезень

SMART-технології в тахографах дозволяють дистанційно контролювати дотримання законодавства, запобігаючи маніпуляціям із записами часу роботи та відпочинку водіїв.

4. Інтеграція до загальноєвропейської транспортної системи

Впровадження стандартів ЄС, зокрема використання SMART-тахографів, є необхідним для інтеграції українського транспортного ринку до європейської транспортної мережі (TEN-T). Це відкриє нові можливості для українських

перевізників, дозволить знизити бар'єри для міжнародних перевезень і сприятиме розвитку експортного потенціалу.

#### 5. Економічна та технічна модернізація транспортної сфери

Використання цифрових тахографів є частиною глобальної тенденції до автоматизації та цифровізації транспортної галузі. Це сприятиме підвищенню ефективності транспортних операцій, зменшенню витрат на контроль та адміністрування, а також зміцненню довіри до українських перевізників на міжнародному ринку.

#### 6. Перспективи для бізнесу та держави

Гармонізація нормативно-правової бази дозволить не лише забезпечити виконання європейських зобов'язань, але й покращити інвестиційну привабливість транспортного сектору України. Для бізнесу це означає доступ до нових ринків, а для держави – розвиток транспортної інфраструктури, підвищення рівня економічної співпраці з ЄС та зростання доходів від транзиту.

### Основна частина

Впровадження системи тахографів, крім іншого, обумовлене зобов'язаннями України згідно з положеннями додатку XXXI до глави 7 «Транспорт» розділу V «Економічна і галузева співпраця» Угоди про асоціацію Україна-ЄС.

Відповідно до положень Угоди про асоціацію Україна-ЄС протягом п'яти років з дати набрання нею чинності повинні бути впроваджені в національному транспортному секторі для внутрішніх автомобільних перевезень Регламент (ЄЕС) № 3821/85 та Регламент (ЄС) № 561/2006.

Відповідно до п. 33 Регламент (ЄС) № 165/2014 про тахографи на дорожньому транспорті, що скасовує Регламент Ради (ЄЕС) № 3821/85 щодо записуючого обладнання в автомобільному транспорті та вносить зміни до Регламенту (ЄС) № 561/2006 Європейського Парламенту та Ради щодо гармонізації певного соціального законодавства, що стосується дорожнього руху транспорт (далі – Регламент № 165/2014), посилення на Регламент (ЄЕС) № 3821/85 необхідно розуміти як посилення на Регламент № 165/2014.

Регламент № 165/2014 є основою для регулювання використання цифрових тахографів у ЄС. Основні положення Регламенту охоплюють:

- встановлення обов'язкового використання цифрових тахографів у комерційному транспорті;

- визначення технічних вимог до тахографів, включаючи SMART-технології (дистанційний контроль, інтеграція з GPS для відстеження місцезнаходження транспортного засобу);

- вимоги до збереження та захисту даних від маніпуляцій або несанкціонованого доступу;

- сертифікацію пристроїв відповідно до технічних стандартів ЄС.

Основним документом, на підставі якого систему тахографів впроваджено в Україні, є Європейська угода щодо роботи екіпажів транспортних засобів, що виконують міжнародні автомобільні перевезення (ЄУТР).

Положення системи тахографів, визначені в ЄУТР, є майже тотожними вимогам викладеним у Регламенті (ЄС) № 561/2006 Європейського Парламенту та Ради від 15.03.2006 (щодо робочого часу та часу відпочинку екіпажу) та Регламенті Ради (ЄЕС) № 3821/85 від 20.12.1985 (про реєструвальні пристрої на автотранспорті).

Більшість положень уже імplementовано в нормативно-правових актах України, а саме:

- наказ Мінінфраструктури України від 30.05.2013 № 329 «Про затвердження Порядку обігу карток, що використовуються в цифрових контрольних пристроях (тахографах)».

- наказ Мінінфраструктури України від 17.04.2013 № 226 «Про затвердження Порядку ведення переліку суб'єктів господарювання, що здійснюють установлення та технічне обслуговування контрольних пристроїв (тахографів) в автомобільних транспортних засобах»;

- наказ Мінтрансзв'язку України від 17.08.2010 № 600 «Про затвердження зразків карток, що використовуються в цифрових контрольних пристроях (тахографах)»;

- наказ Мінтрансзв'язку України від 24.06.2010 № 385 «Про затвердження Інструкції з використання контрольних пристроїв (тахографів) на автомобільному транспорті»;

- наказ Мінтрансзв'язку України від 07.06.2010 № 340 «Про затвердження Положення про робочий час і час відпочинку водіїв колісних транспортних засобів».

Крім зазначеного, працівниками ДП «ДержавтотрансНДІпроект» було опрацьовано та надано пропозиції до проекту Закону від

30.12.2020, реєстраційний № 4560, про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо врегулювання ринку послуг автомобільного транспорту в Україні з метою приведення їх у відповідність з актом Європейського Союзу (зі змістом пропозицій можна ознайомитись у журналі «Автошляховик України» №1 за 2023 рік).

Наразі у вище перелічених нормативно-правових актах, на жаль, вже прослідковується певна розбіжність в основних термінах та визначеннях. Відсутність відповідних термінів або їхня неправильна інтерпретація може ускладнити адаптацію європейських регламентів в українське законодавство. Одним із важливих елементів гармонізації національного законодавства України з європейським є впровадження чіткої, уніфікованої та відповідної європейським стандартам термінології у сфері використання тахографів. Відсутність єдиної термінології створює значні труднощі як у нормативно-правовому регулюванні, так і у практичному застосуванні законодавства. Серед таких:

1) відсутність чітких визначень у законодавстві України:

- у чинному українському законодавстві терміни, пов'язані з тахографами, їх використанням, функціями та технічними вимогами, не завжди відповідають європейським нормам. Наприклад, відсутність чіткого поділу на аналогові, цифрові та "SMART" тахографи ускладнює процес правового регулювання;

- термінологія, пов'язана з режимом праці та відпочинку водіїв, а також технічними стандартами, іноді є неоднозначною або застарілою;

2) узгодження з європейськими регламентами.

В ЄС чітко регламентовано терміни у транспортному секторі. Наприклад, Регламент (ЄС) № 165/2014 визначає такі поняття,

як «тахограф» або «реєструвальне обладнання». Останнє означає обладнання, призначене для встановлення на дорожніх транспортних засобах для відображення, реєстрування, друку, збереження та виведення даних про рух в автоматичному або напівавтоматичному режимі, зокрема даних про швидкість, таких транспортних засобів відповідно до статті 4 (3), а також даних про деякі періоди активності водіїв;

«бортовий блок» означає тахограф, за винятком датчика руху і кабелів, що з'єднують датчик руху. Такий блок може складатися з одного або декількох блоків, розташованих у різних частинах транспортного засобу, за умови, що він відповідає вимогам безпеки цього Регламенту; бортовий блок містить, серед іншого, блок опрацювання даних, пам'ять даних, функцію вимірювання часу, два інтерфейси для смарт-карток водія і водія-напарника, принтер, дисплей, з'єднувачі та механізми для введення даних користувача.

Згадані вище терміни та інші базові визначення доцільно зазначати в нормативно-правових актах (далі – НПА) України, які мають вищий рівень, наприклад, у Законі України «Про автомобільний транспорт». Після запровадження єдиної термінології в НПА рівня Закону України в інших НПА буде достатньо робити посилання на основне визначення.

Наявність єдиної термінології уніфікує всі нормативно-правові акти, що регулюють використання тахографів, їхнє технічне обслуговування, сертифікацію та контроль. Це дозволить уникнути правових колізій і дублювання норм у різних законах та підзаконних актах. Чітка термінологія спростить процес імплементації європейських регламентів, таких як Регламент (ЄС) № 165/2014 та Регламент (ЄС) № 561/2006.

#### *Пропозиції щодо впровадження єдиної термінології*

1. Розробка і затвердження єдиного словника термінів у законодавстві України, який відповідатиме положенням Регламенту (ЄС) № 165/2014.

2. Внесення змін до чинних нормативно-правових актів, таких як закони України «Про автомобільний транспорт» та «Про дорожній рух», із запровадженням чітких визначень термінів.

3. Внесення змін до Кодексу України про адміністративні правопорушення (КУпАП) та надати уточнення

переліку адміністративних правопорушень, пов'язаних із порушеннями у використанні тахографів, зокрема:

- недотримання водієм режиму праці та відпочинку;

- використання тахографів, які не відповідають встановленим вимогам;



- невиконання обов'язків перевізником щодо встановлення та обслуговування тахографів;

- посилення санкцій за порушення вимог у сфері контролю транспортної діяльності, що сприятиме забезпеченню дисципліни серед перевізників.

4. Доопрацювати (актуалізувати) вищезгадані накази Міністерства інфраструктури України

- наказ Мінінфраструктури України від 30.05.2013 № 329;

- наказ Мінінфраструктури України від 17.04.2013 № 226;

- наказ Мінтрансв'язку України від 17.08.2010 № 600;

- наказ Мінтрансв'язку України від 24.06.2010 № 385;

- наказ Мінтрансв'язку України від 07.06.2010 № 340.

### Висновки

Впровадження єдиної термінології у сфері використання тахографів сприятиме гармонізації законодавства України із законодавством ЄС, зменшенню правових бар'єрів для українських перевізників, підвищенню прозорості регулювання та ефективності контролю. Це стане важливим кроком у процесі євроінтеграції та створить умови для безпечного й конкурентоспроможного функціонування транспортної галузі.

Перспективою подальших досліджень є детальний аналіз технічних і практичних аспектів упровадження SMART-тахографів в Україні та оцінка їхнього економічного впливу на перевізників. Особливу увагу доцільно приділити створенню нормативно-правової бази, що забезпечить ефективну імплементацію цих технологій у національну транспортну сферу.

### References

1. State Service of Ukraine for Transport Safety. (2022). Analysis of the state of traffic safety and accidents on land transport in Ukraine for 2021. [http://dsbt.gov.ua/sites/default/files/imce/Bezpeka\\_DTP/2022/analiz\\_avariynosti\\_2021.pdf](http://dsbt.gov.ua/sites/default/files/imce/Bezpeka_DTP/2022/analiz_avariynosti_2021.pdf)
2. State Service of Ukraine for Transport Safety. (2023). Analysis of the state of traffic safety and accidents on land transport in Ukraine for 2022. [https://www2.dsbt.gov.ua/sites/default/files/imce/Bezpeka\\_DTP/2023/analiz\\_avariynosti\\_2022\\_1.pdf](https://www2.dsbt.gov.ua/sites/default/files/imce/Bezpeka_DTP/2023/analiz_avariynosti_2022_1.pdf)
3. Ministry for restoration. (2030). The project of the National Transport Strategy of Ukraine for the period up to 2030. <https://shorturl.at/bGKO4>
4. Sytnyk, V. F. (2009). Decision support systems. Kyiv National Economic University. 614pp.
5. Subbotin S. O. (2008). Representation and processing of knowledge in artificial intelligence and decision support systems. National University "Zaporizhzhia Polytechnic". 341 pp.
6. International Transport Forum. (2022). ECMT Multilateral Quota: User Guide 2022. <https://www.itf-oecd.org/user-guide-certificates>
7. Verkhovna Rada of Ukraine. (2014). Directive 2014/45/EU of the European Parliament and of the Council of 3 April 2014 on periodic roadworthiness tests for motor vehicles and their trailers and repealing Directive 2009/40/EC. [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_034-14#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_034-14#Text)
8. EUR-Lex. (2014). Directive 2014/45/EU of the European Parliament and of the Council of 3 April 2014 on periodic roadworthiness tests for motor vehicles and their trailers and repealing Directive 2009/40/EC Text with EEA relevance. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32014L0045>
9. Verkhovna Rada of Ukraine. (2006). The 1997 Agreement. [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995\\_e51#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_e51#Text)
10. DerzhautotransNDIproject. (2022). Expert system of vehicle suitability checks according to the requirements of the ECMT/ITF and the 1997 Agreement. Prospects for the development of road transport and infrastructure: collection of theses of reports of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference, Kyiv, 2022, 420.

© О. І. Закревський, старший наук. співробітник,  
e-mail: ozakrevsky@insat.org.ua,  
ORCID: 0000-0002-6810-5146;  
© В. С. Устименко, канд. техн. наук,  
зав. сектору, e-mail: vustymenko@insat.org.ua,  
ORCID: 0000-0003-3657-077X;  
© О. В. Бондар, зав. лабораторії,  
e-mail: obondar@insat.org.ua,  
ORCID: 0009-0008-8904-8858  
(ДП «ДержавтотрансНДІпроект»)

© Oleksandr Zakrevsky, Senior Research Fellow,  
e-mail: ozakrevsky@insat.org.ua,  
ORCID: 0000-0002-6810-5146;  
© Viktor Ustymenko, PhD, Head of Section,  
e-mail: vustymenko@insat.org.ua,  
ORCID: 0000-0003-3657-077X;  
© Oleksandr Bondar, Head of Laboratory,  
e-mail: obondar@insat.org.ua,  
ORCID: 0009-0008-8904-8858  
(SE «State Road Transport Research Institute»)

## ДО ПИТАНЬ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТРАНСПОРТУ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ

### ON ISSUES OF ENERGY AND ENVIRONMENTAL SECURITY IN TRANSPORT UNDER WARTIME CONDITIONS

**Анотація.** Досліджено проблематику екологічної безпеки та енергетичної безпеки – на прикладі транспорту – в умовах воєнного стану. Питання енергетичної та екологічної безпеки розглянуто в широкому контексті взаємозв'язку різних аспектів життєдіяльності суспільства загалом та його окремих соціальних прошарків. Проаналізовані як національні законодавчі та стратегічні документи в зазначеній царині, так і відповідні техніко-технологічні аспекти. Запропоновані рекомендації щодо оптимізації у воєнних умовах державного регулювання у сфері енергетичної та екологічної безпеки на транспорті.

**Ключові слова:** енергетична безпека, екологічна безпека, національна безпека, транспортний сектор, енергозбереження, диверсифікація енергоносіїв, вплив зміни клімату.

**Abstract.** The issues of environmental and energy safety and security are closely interconnected, and this can be clearly seen in the example of transport. Energy and environmental security are often considered in a broader context, in relation to various aspects of societal life as a whole and its separate social groups, with significant attention given to the economic, social, environmental, and other interests, as well as the corresponding rights of different stakeholders. When considering energy-environmental security for the transport sector in terms of the implementation of economic and social interests, or the impact on such interests, it is important to focus on the processes (in the broadest sense) of production, supply, and use of energy resources: different types of motor fuel and energy for propelling transport vehicles. While the societal groups directly involved in the production and supply of energy carriers for transport are relatively small, the groups that use these energy carriers (i.e., transport companies, entrepreneurs, individuals) are much larger. A vivid example of contradictions in the issue of energy-environmental security is that the circle of people whose environmental interests and rights (in particular, the right to a pollution-free environment) may be violated by the use of energy resources in transport is extremely broad – practically, it includes the entire population that breathes polluted air in urban areas. It is undeniable that the issue of energy-environmental security (particularly in the transport sector) is an integral part of national security; this is especially relevant in times of war.

**Keywords:** energy safety/security, environmental safety/security, national security, transport sector, energy conservation; energy diversification, impact of climate change.

#### Вступ

Питання екологічної та енергетичної безпеки тісно пов'язані, і це можна добре бачити на прикладі транспорту. У вітчизняній науковій літературі енергетичну безпеку переважно трактують як гарантоване забезпечення паливно-енергетичними ресурсами для задоволення життєвих потреб, збереження здоров'я та благополуччя членів суспільства за умов мінімізації техногенного тиску на довкілля, а екологічну безпеку – як оптималь-

ний стан природокористування (зокрема використання паливно-енергетичних ресурсів) та збереження природних ресурсів за умови обмеження антропогенного впливу на довкілля та усунення небезпеки для здоров'я людей. Спираючись на вищезазначені дефініції, цілком можливо вести мову про енерго-екологічну безпеку, зокрема, і для транспортного сектору. В теперішніх умовах вона є особливо актуальною через велику залежність України від постачання, зокрема імпорту, мо-



торного палива нафтового походження, високу загрозу фізичного руйнування об'єктів енергетичної і транспортної інфраструктури, значний шкідливий вплив транспортних засобів на місцеве та планетарне довкілля, а також через негативні прояви глобальної зміни клімату, що, зокрема, погіршують умови для надійного енергозабезпечення транспорту.

### Основна частина

У літературних джерелах зарубіжних науковців енергетичну та екологічну безпеку (energy and environmental security) часто розглядають у більш широкому плані і взаємозв'язку різних аспектів життєдіяльності суспільства загалом та його окремих соціальних прошарків. Велике значення надають питанням економічних, соціальних, природоохоронних та інших інтересів, а також відповідних прав різних верств суспільства. Якщо розглядати енерго-екологічну безпеку для сектору транспорту під кутом зору реалізації економічних та соціальних інтересів або ж впливу на такі інтереси, то тут, насамперед, слід привернути увагу до процесів (у широкому розумінні) виробництва, постачання і використання енергетичних ресурсів: різних видів моторного палива та енергії для утримання транспортних засобів. І якщо суспільні групи, що безпосередньо задіяні у виробництві та постачанні енергоносіїв для транспорту, є порівняно невеликими, то ті, що використовують такі енергоносії (тобто транспортні компанії, підприємці, фізичні особи), є значно ширшими. Яскравим прикладом суперечностей у проблематиці енерго-екологічної безпеки є те, що коло людей, чий екологічний інтереси та права (зокрема, право на чисте довкілля) можуть бути порушені у процесі використання енергоресурсів на транспорті, є надзвичайно широким. Практично – це все населення, що дихає забрудненим повітрям у населених пунктах.

Питання енерго-екологічної безпеки (зокрема, у транспортному секторі) є інтегральною складовою національної безпеки; і це особливо актуально за воєнного часу. Примітно, що у вітчизняному законодавстві, насамперед, у Законі України «Про національну безпеку України» велика вага надається саме інтересам людини і суспільства загалом: «національна безпека – захищеність життєво важливих інтересів людини і громадянина, су-

спільства і держави, за якої забезпечуються сталий розвиток суспільства, своєчасне виявлення, запобігання і нейтралізація реальних та потенційних загроз національним інтересам».

З іншого боку, в зазначеному законі, прийнятому ще до повномасштабної агресії, до загроз національній безпеці України віднесені лише такі, як, наприклад, в економічній сфері – неефективність використання паливно-енергетичних ресурсів, недостатні темпи диверсифікації джерел їхнього постачання тощо, в екологічній сфері – нераціональне, виснажливе використання мінерально-сировинних природних ресурсів як невідновлюваних, так і відновлюваних.

Проте уже в переддень великої війни в контексті впровадження Стратегії національної безпеки України були прийняті окремі Стратегія енергетичної безпеки і Стратегія екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату, які вже більш чітко враховують реальні виклики воєнного часу. Так у Стратегії енергетичної безпеки зазначено, що висока частка імпортованих енергоресурсів у структурі паливно-енергетичного комплексу знижує рівень енергетичної безпеки. У 2020 р. імпортований газ становив близько 30% сукупного споживання природного газу в Україні. Україна стала на 85% залежною від імпорту нафтопродуктів. При цьому частка нафтопродуктів, вироблених у рф або з російської сировини (передусім у білорусі), у структурі імпорту перевищувала до початку повномасштабної агресії рф 80%. Поточний незадовільний технічний стан паливно-енергетичного комплексу, низький рівень енергоефективності формує виклики перед Україною, пов'язані зі спроможністю виконувати міжнародні зобов'язання та адаптуватися до ініціатив ЄС, зокрема до цілей «Європейського зеленого курсу». Окремо відзначено про вплив зміни клімату на структуру та режими енергоспоживання – такий як формування додаткових загроз операційній безпеці систем енергозабезпечення внаслідок виникнення непередбачуваних під час попереднього проектування системи режимів роботи та різких коливань в режимах споживання/виробництва, ризиків припинення енергозабезпечення споживачів внаслідок аварій тощо.

У Стратегії екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату основними проблемами

визнано забруднення навколишнього природного середовища викидами в атмосферне повітря та скидами у водні об'єкти, нераціональне використання основних природних ресурсів та їхнє виснаження, відсутність ефективною системи хімічної безпеки, посилення глобальної зміни клімату і негативних наслідків для низки секторів економіки і сфер життєдіяльності людини. Зокрема, для транспортної інфраструктури через збільшення кількості днів із дуже високою температурою та стихійних гідрометеорологічних явищ підвищується загроза руйнувань та деформації. Так, на автошляхах зростає загроза деформації асфальтового покриття, мостів, утворення небажаних колій, зростання потреби в додаткових ремонтних роботах. Для транспортних засобів прогнозується тенденція зростання споживання енергії для охолодження (кондиціювання) повітря. Вторинним впливом такої тенденції може стати збільшення викидів озоноруйнівних речовин від кондиціонерів застарілих автомобілів (частка яких в Україні є досить високою). Інтенсивне короткочасне випадання опадів може призводити до порушення графіка руху та скасування регулярних перевезень. А також – до пошкодження мостів, автомобільних шляхів тощо, що спричинене проблемою непристосованості зливових каналізаційних систем та тунелів до випадання значних обсягів опадів. Почастішання явищ сильних вітрів та штормів може призводити до ускладнення роботи водного транспорту, пошкодження огорожувальних конструкцій, дорожнього полотна, мостів та елементів дорожньої інфраструктури, що, крім усього, спричиняє підвищення кількості аварій. Істотне підвищення температури повітря у літню пору призводить до посилення випаровування хімічних речовин. Зокрема це стосується різних видів моторного палива, насамперед – сумішевого бензину зі вмістом біокомпонентів (етанол тощо).

Більш детально зупиняючись на проблематиці енерго-екологічної безпеки автомобільного транспорту, який є домінантним за ступенем впливу і на довкілля, і на енергетику транспорту, необхідно звернути увагу на її багатоплановий характер. Насамперед під час експлуатації колісних транспортних засобів (КТЗ) в атмосферне повітря викидаються величезні обсяги шкідливих речовин. КТЗ є основними джерелами шуму, вібрації та електромагнітного випромінювання

в населених пунктах. Суттєвого забруднення довкілля завдає виробнича діяльність підприємств сфери обслуговування: мийка КТЗ, їхнє фарбування, заправлення та заміна паливних й експлуатаційних матеріалів, а також неутилізовані зношені вузли і деталі, насамперед, шини і навіть покинуті власниками старі автомобілі. Інфраструктура автотранспорту також погіршує якість довкілля, займаючи великі території та виключаючи з користування продуктивні землі. Проте найбільша загроза полягає в тому, що автомобілі проникають практично на будь-яку територію, у найвіддаленіші місця, де навіть немає жодних інших джерел шкідливих викидів. Підвищена екологічна небезпека викликана тим, що шкідливі викиди КТЗ потрапляють у повітря саме в зоні, де люди дихають цим повітрям.

Технологічні й організаційні питання забезпечення автомобільного транспорту паливно-енергетичними ресурсами, пов'язані з енергетичною безпекою, здійснюють суттєвий вплив на його екологічну безпеку, адже від типу моторного палива, його властивостей і якості залежать екологічні показники роботи мільйонів КТЗ. Водночас великих збитків довкіллю, зокрема атмосферному повітрю та водним об'єктам, завдає сама діяльність нафтопереробних заводів. До цього потрібно додати шкідливий екологічний вплив від функціонування підприємств зі зберігання і дистрибуції моторних палив. Долучаючи до суто технологічних і організаційних аспектів екологічної та енергетичної безпеки на автотранспорті ще й питання соціальні, а також внутрішньоекономічні та зовнішньоекономічні, а саме – забезпечення розвитку громадського автотранспорту, функціонування мережі АЗС (що мають постачати якісне паливо) та станцій технічного обслуговування (зокрема у сільській місцевості), ввезення з-за кордону нових і вживаних автомобілів, зайнятості на підприємствах автотранспорту тощо, організація виробництва біологічних видів моторного палива, імпорт моторних палив нафтового та газового походження, отримаємо інтегровану картину проблематики еколого-енергетичної безпеки автотранспорту.

Оцінюючи найбільш реалістичні заходи з підвищення енергетичної та екологічної безпеки, зокрема у транспортному секторі, у важких фінансово-економічних умовах, спричинених війною, варто передовсім говорити про такі напрями, як енергозбереження та енергоефективність, разом з диверсифікацією

джерел і видів енергоносіїв. Проте, якщо енергозбереження та енергоефективні заходи гармонійно поєднують проблематику надійного енергозабезпечення з аспектами раціонального використання природних ресурсів (зокрема паливно-енергетичних) та охорони довкілля, серед іншого сприяють запобіганню глобальній зміні клімату завдяки зниженню викидів парникових газів, то проблематика енергетичної диверсифікації не завжди може бути безконфліктною з питаннями захисту довкілля та охорони здоров'я людей. Так, застосування сумішевого бензину з середнім (понад 10 % за об'ємом) та високим вмістом етанолу на автомобільному транспорті вбачається одним із важливих напрямів вирішення проблеми енергозабезпечення галузі в середньостроковій перспективі, зважаючи на наявність значних сировинних ресурсів для виробництва етанолу в Україні.

Для використання палив із таким вмістом етанолу є повністю пристосованими лише так звані *flexible-fuel vehicles (FFVs)* – автомобілі з паливними системами, які дозволяють гнучко застосовувати суміші етанолу та бензину з різним співвідношенням, автоматично здійснюючи адаптацію паливоподачі залежно від складу суміші. Останніми роками в Україну ввозили досить багато FFVs з американського ринку, які можуть працювати на альтернативному паливі з великим вмістом етанолу навіть краще, ніж на бензині. Однак оператори ринку, які реалізують таке біопаливо, зазвичай замовчують особливості його застосування. Тим самим наражають автовласників звичайних, особливо застарілих, автомобілів, не пристосованих для споживання палив із високим вмістом етанолу, на істотні ризики.

Для переважно застарілого парку автомобілів, характерного для країни, широке використання такого сумішевого бензину може призвести до подальшого загострення стану довкілля у містах через потенційну проблему викидів особливо небезпечних речовин: оксидів азоту, твердих частинок, а також законодавчо ненормованих викидів вуглеводнів, таких як ацетальдегід. Вплив ацетальдегіду вважається особливо шкідливим, оскільки він реагує з  $\text{NO}_x$  і під впливом сонячної радіації в атмосферному повітрі утворює пероксиацетилнітрат, який є фітотоксикантом і мутагенною речовиною. Застосування бензино-

етанолових сумішей для автомобілів також може спричинити підвищення шкідливих викидів унаслідок випаровування протягом літнього періоду.

Окремі проблеми енергетичної та екологічної безпеки можна більш рельєфно простежити на прикладі великих і середніх міст.

Вимушений перехід до широкого використання дизельних і бензинових електричних генераторів малої потужності в умовах дефіциту централізованого енергопостачання спричиняє зростання забруднення атмосферного повітря безпосередньо у приземній зоні. Там відбувається скупчення людей, яке ще більше погіршує спричинений викидами автомобільного транспорту критичний стан забруднення повітря. Пропонований у деяких планових документах, розроблюваних для забезпечення реалізації Національної транспортної стратегії України до 2030 р., перехід у містах тільки на електричні автобуси, з досвіду воєнного стану, несе певні ризики енергетичній безпеці транспорту. Адже спричинений воєнними діями дефіцит енергопостачання для заряджання акумуляторів електробусів може призвести до повної зупинки функціонування міського пасажирського транспорту. Очевидно, що електробуси мають зайняти свою важливу нішу, однак для диверсифікації транспортного забезпечення значною має залишатись і частка автобусів із двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ). Передусім тих, що працюють на газовому паливі тощо. Через глобальне потепління почастішало природне явище переходу температури повітря від плюсових до мінусових значень і навпаки, що, наприклад, призводить до обледеніння контактної електромережі трамваїв і тролейбусів. Почастішали також випадки обриву дротів такої мережі через сильний вітер. У такому разі саме дублювання маршрутів міського електротранспорту маршрутами автобусів із ДВЗ слугуватиме підтриманню належної (енергетичної) безпеки на транспорті.

Ще одне питання, що стає надто важливим в умовах воєнного стану, – посилення державного регулювання усіх сфер суспільно-економічних відносин. Насамперед це стосується питань національної безпеки, складовою яких є енерго-екологічна безпека у транспортному секторі. Варто лише згадати, що в часи Великої депресії у країні з найбільш розвиненою ринковою економікою – США – було запроваджено Новий (економічний) порядок (який фактично діяв до кінця Другої світової

війни). У той час було значно посилено роль державного регулювання і, наприклад, створено декілька великих державних енергетичних компаній, які функціонують і донині. Принагідно варто згадати, що і Секретаріат Енергетичної Хартії ще на початку 2000-х років видав рекомендації для країн-членів, в яких зазначено про недоцільність повсюдної приватизації в енергетичній сфері. Отже, в умовах воєнного стану, можливо, було б доцільним здійснити націоналізацію, принаймні, найбільш критичних компонентів енергетичної системи країни. Аналогічно, варто було б розглянути можливість повернутися до більш широкої практики функціонування державних та комунальних транспортних компаній, як для перевезення пасажирів, зокрема, в сільській місцевості, так і перевезення вантажів стратегічного значення.

Одним із важливих напрямів державного регулювання у сфері енергетичної та екологічної безпеки на транспорті, який спрямований на забезпечення виконання стратегічного завдання щодо енергозбереження та енергоефективності, є саме нормування споживання паливно-енергетичних ресурсів на транспорті. Напевно, було б доцільним надати державним органам більш широкі повноваження з регулювання та контролювання ефективності використання усіх ресурсів, передусім енергетичних.

### Висновки

Декому може видаватися, що в умовах війни, коли вкрай загострюються питання забезпечення обороноздатності, підтримання принаймні мінімальних соціальних потреб, проблеми охорони навколишнього природного середовища й екологічної безпеки відступають на задній план. Проте це не так! Принаймні природоохоронна тематика може бути поза пріоритетом лише в короткій перспективі. Адже через ворожі бомбардування й ракетні обстріли, спрямовані на руйнування та знищення об'єктів енергетичної інфраструктури, виникають великі пожежі, розливи та випаровування хімічно небезпечних речовин, підтоплення територій тощо. Це все спричиняє не лише скорочення резервів енергоресурсів та ускладнення процесу енергопостачання транспортного сектору, а й призводить до масштабного забруднення всіх складових довкілля: атмосферного повітря, поверхневих водних об'єктів, підземних вод, земельних та біологічних ресурсів.

Усі ці компоненти шкідливого впливу здебільшого викликають довготермінові негативні екологічні наслідки. Їхнє тривале ігнорування може призвести до більш масштабного забруднення через пов'язані ланцюги живої та неживої природи, а також до посилення глобальної зміни клімату.

Воєнні дії особливо загострили та наочно показали для всіх проблеми енергетичної та екологічної безпеки на транспорті. Загально визнані теоретичні підходи до енергозбереження та енергоефективності разом із диверсифікацією джерел і видів енергоносіїв стають усе більш критично важливими, проте вимагають творчого застосування в реальному житті.

Прояви глобальної зміни клімату інколи пом'якшують катастрофічний вплив від ворожих дій завдяки зменшенню споживання паливно-енергетичних ресурсів, зокрема, в комунальному секторі. Однак у багатьох випадках стратегія і тактика забезпечення енерго-екологічної безпеки у транспортному секторі – як у період воєнного стану, так і через можливі загрози в майбутньому – повинні суттєво коригуватись для забезпечення стійкості, надійності та загальної безпеки. До того ж безпека має все більш широко бути гарантована в усіх проявах інтересів людини і відкритого демократичного суспільства.

### References

1. Verkhovna Rada Ukrainy. [Verkhovna Rada of Ukraine]. (2022). Zakon Ukrainy "Pro natsionalnu bezpeku Ukrainy." [Law of Ukraine On National Security of Ukraine] Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2469-19#n3>
2. Ofis Prezidenta Ukrainy. [Office of the President of Ukraine]. (2020). Strategiya natsionalnoyi bezpeky Ukrainy. [The National Security Strategy of Ukraine]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/392/2020#n12>
3. Kabinet Ministriv Ukrainy. [Cabinet of Ministers of Ukraine]. (2021). Stratehiya energetichnoyi bezpeky. [Energy Security Strategy] Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/907-2021-%D1%80#Text>
4. Kabinet Ministriv Ukrainy. [Cabinet of Ministers of Ukraine]. (2021). Strategiya ekologichnoyi bezpeky ta adaptatsiyi do zminy klimatu. [Environmental Security and Climate Adaptation Strategy]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1363-2021-%D1%80#Text>
5. Kabinet Ministriv Ukrainy. [Cabinet of Ministers of Ukraine]. (2018). Natsionalna transportna strategiya Ukrainy do 2030 roku. [National Transport Strategy of Ukraine rrefd 2030] Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80#Text>
6. Dehtiar, Z., Ustymenko, V., Symonenko, R. (2023). Zbirka tez dopovidey Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi "Perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transport ta infrastruktury" [Collection of abstracts of the International Scientific and Practical Conference "Prospects for the Development of Road Transport and Infrastructure"], 435 p.

© Ю. В. Зеленько, докт. техн. наук,  
професор, завідувач кафедри,  
ORCID: 0000-0001-5551-0305,  
e-mail: j.v.zelenko@gmail.com;  
© В. Е. Черкудінов, аспірант,  
старший викладач кафедри,  
ORCID: 0000-0003-3164-0329,  
e-mail: volodymyrcherkudinov@gmail.com;  
© К. Ц. Главатський, канд. техн. наук,  
доцент кафедри,  
ORCID: 0000-0003-0921-9845,  
e-mail: kazimir.glavatskij@gmail.com;  
© І. М. Щека, канд. техн. наук,  
доцент кафедри,  
ORCID: 0000-0002-4608-3898,  
e-mail: shcheka.ig@gmail.com;  
(Український державний університет науки  
і технології)

© Yulia Zelenko, Doctor of Technical  
Sciences, Professor, Head of the Department,  
ORCID: 0000-0001-5551-0305,  
e-mail: j.v.zelenko@gmail.com;  
© Volodymyr Cherkudinov, Postgraduate,  
Senior Lecturer,  
ORCID: 0000-0003-3164-0329,  
e-mail: volodymyrcherkudinov@gmail.com;  
© Kazimir Hlavatskyi, Candidate of Technical  
Sciences, Associate Professor of the Department,  
ORCID: 0000-0003-0921-9845,  
e-mail: kazimir.glavatskij@gmail.com;  
© Ihor Shcheka, Candidate of Technical  
Sciences, Associate Professor of the Department,  
ORCID: 0000-0002-4608-3898,  
e-mail: shcheka.ig@gmail.com;  
(Ukrainian State University of Science  
and Technologies)

## ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОСТАЧАННЯ ПАЛИВА В УКРАЇНУ В ПЕРІОД ВОЄННОГО СТАНУ

### PROBLEMS AND PROSPECTS OF FUEL SUPPLY TO UKRAINE DURING THE PERIOD OF MARTIAL LAW

**Анотація.** Одним з найпотрібніших продуктів в Україні на сьогодні є нафтопродукти. Процес перевезення має безліч обмежень і вимог. Здійснюючи перевезення продуктів переробки нафти, існує небезпека нанести негативний вплив навколишньому середовищу – виток рідини може створити екологічну проблему для певної території. Транспортування нафтовміщуючих вантажів в Україну, під час воєнного стану, здійснюється мультимодальним транспортом, а саме, автомобільний, морський і залізничний види транспорту. Авторами здійснено огляд актуальних проблем та задач організації вантажних перевезень нафтопродуктів в Україну та аналіз тенденцій, пов'язаних з використанням транспортного комплексу.

**Ключові слова:** екологічний інцидент, логістика, маршрут, мультимодальна система, транспортний комплекс, транзитна політика, нафтопродукт, транзитний коридор, шлях.

**Abstract.** One of the most popular products in Ukraine today is petroleum products. The transportation process has many restrictions and requirements. When transporting petroleum products, there is a risk of having a negative impact on the environment - a liquid leak can create an environmental problem for a certain territory. Transportation of oil-containing cargo to Ukraine during martial law is carried out by multimodal transport, namely, road, sea and rail modes of transport. The authors reviewed the current problems and tasks of organizing cargo transportation of petroleum products to Ukraine and analyzed trends related to the use of the transport complex. Using a systems analysis, methods were proposed for assessing existing problems and tasks, and the actual definition of environmental issues in the transportation of petroleum products during martial law was also presented. At the same time, energy redistribution processes are taken into account in the form of specific and generalized efficiency indicators that can be used to meet the needs of multimodal transportation. Based on the considered and analyzed problems and trends in the operation of transport systems, recommendations have been developed for comprehensively solving transport planning tasks, improving safety, and reducing the negative impact of transport on the environment for further dissemination of the most successful solutions in each of the areas of transportation. Solving problems arising in the field of supply chain management is critically important for the stable functioning of the state. The war has made significant adjustments to the usual way of life, destroying ties between people and business, and also led to significant economic losses. Since imports now occur mostly across the border of Ukraine with European countries, new supply chains have begun to be built in the western regions and transport hubs have been created for receiving, distributing and grouping cargo and transporting it to the central, northern and eastern regions.

**Keywords:** logistics, multimodal system, transport complex, environmental incident, transit policy, oil product, route.

#### Вступ

Воєнні дії значною мірою вплинули на зовнішньоекономічну діяльність України. Через

високий рівень небезпеки неможливо здійснювати доставку нафтовантажів морським та авіасполученням, доступним залишаються

сухопутний кордон і порти Румунії, Польщі та країн Балтії.

Зміни в логістиці, географії попиту та втрата доступу до певних ресурсів суттєво вплинули на ситуацію. Внаслідок цього єдиною альтернативою залишилися постачання пального через кордони з Європейським Союзом. Прогнозується, що європейські компанії зможуть забезпечити стабільні поставки пального, оскільки вже укладено контракти на значні обсяги ресурсу, які наразі транспортуються. Однак, це супроводжується суттєвими витратами, оскільки в країнах Європи існує дефіцит нафтопродуктів, і регіон є імпортозалежним.

Рішення проблем, що виникають у сфері управління ланцюгами постачання, є критично важливим для стабільного функціонування держави. Війна внесла суттєві корективи в звичний життєвий устрій, призвела до значних економічних втрат. Оскільки імпорт тепер відбувається здебільшого через кордон України з європейськими країнами, то в західних областях, почали вибудовуватися нові ланцюги постачань, створюватися транспортні хаби для отримання, розподілу та групування вантажів, їхнього транспортування до центральних, північних і східних областей.

*Метою роботи* є аналіз шляхів поставки нафтопродуктів в Україну під час воєнного стану, розгляд питання енергоефективності мультимодальної транспортної системи, зокрема використання автомобільного транспорту в системі мультимодальних перевезень палива.

*Постановка проблеми.* Основним завданням ми поставили аналіз існуючих маршрутів транспортування, вивчення ефективності мультимодальних перевезень, зокрема автомобільного транспорту.

Також вирішили оцінити вплив відстаней, технічних обмежень та природних умов на енергоспоживання і безпеку перевезень. Визначити основні ризики екологічних інцидентів, пов'язаних із перевезенням небезпечних вантажів.

Оцінити загрози, пов'язані з воєнними діями, зокрема масованими атаками на транспортні засоби. Запропонувати заходи для зменшення антропогенного впливу на довкілля під час транспортування. Оцінити енергетичні витрати різних видів транспорту та запропонувати способи їхнього зменшення.

## Основна частина

Завдяки високій мобільності та здатності доставляти вантажі «від дверей до дверей» автомобільний транспорт є одним із найпоширеніших способів перевезення нафтопродуктів. Проте, його основними недоліками є:

- високі витрати на транспортування;
- обмежена вантажопідйомність;
- залежність від стану дорожньої інфраструктури.

Залізничний транспорт є економічно вигідним та енергоефективнішим способом перевезення нафтопродуктів. Його основні переваги:

- велика вантажопідйомність;
- незалежність від погодних умов;
- нижчі викиди CO<sub>2</sub> у порівнянні з автомобільним транспортом.

Однак, залізничний транспорт має обмеження порівняно з автомобільним, а саме: потребує спеціальної інфраструктури, тривалішого часу на доставку через обмежену кількість перевантажувальних станцій.

Перевезення нафтопродуктів пов'язане з ризиком витоків, що можуть спричинити значної шкоди довкіллю. Основними факторами можуть бути пошкодження транспортних ємностей та аварії під час перевантаження.

Умови воєнного стану надають додаткових загроз транспортуванню, таких як:

- обстріли транспортних засобів;
- руйнування інфраструктури (доріг, мостів, залізничних колій);
- небезпека мінування ключових транспортних шляхів.

Поєднання різних видів транспорту дозволяє забезпечити оптимальну ефективність доставки. Наприклад, доставка морським транспортом до портів Європи. Перевантаження на залізничний транспорт для транспортування до західних регіонів України. Використання автомобільного транспорту для кінцевої доставки.

Для мінімізації витрат і часу перевезення часто використовують міжнародні логістичні хаби в Польщі, Румунії та Словаччині. Основні їхні переваги – це розвинена транспортна інфраструктура та зручне географічне розташування.

Зменшення негативного впливу транспортування на довкілля можливе завдяки використанню енергоефективних транспортних засобів, оптимізації маршрутів для зниження



витрат пального, впровадження альтернативних джерел енергії (біопаливо, електротранспорт).

Впровадження сучасних систем моніторингу стану транспорту та вантажу дасть змогу запобігти аваріям і витокам нафтопродуктів.

Використання спеціалізованого програмного забезпечення для координації мультимодальних перевезень дасть змогу знизити ризики затримок та оптимізувати маршрути в режимі реального часу.

Встановлення GPS-трекерів і сенсорів на транспортні засоби забезпечує контроль за рухом вантажу та його станом. Це особливо важливо в умовах воєнних ризиків.

Впровадження мультимодальних послуг є сучасною тенденцією у міжнародній транспортній логістиці, що обґрунтовує необхідність подальших досліджень методів організації перевезень нафтопродуктів і розробки шляхів вдосконалення транспортно-логістичних систем мультимодальної інфраструктури.

Негативні тенденції, пов'язані з використанням транспортного комплексу, стимулюють пошук і розробку нових методів мінімізації впливу транспорту на довкілля та здоров'я людей. Екологічний аспект залишається ключовим у створенні та функціонуванні транспортного комплексу: з одного боку, збільшення вантажообігу нафтопродуктів сприяє зростанню антропогенного навантаження, а з іншого – небезпека цих видів вантажів вимагає запровадження спеціальних заходів для уникнення їхнього негативного впливу на довкілля.

Серед основних причин екологічних інцидентів:

- природні катаклізми, які призводять до пошкодження цистерн із нафтовими вантажами;
- порушення технологічних вимог до перевезення нафтопродуктів;
- терористичні акти, спрямовані на захоплення нафтовміщуючих вантажів для злочинного використання.

Рішення у сфері розвитку транспортної системи мають враховувати як економічну ефективність, так і безпеку руху та зменшення негативного впливу на довкілля, причому ці критерії є рівнозначними.

Важливо зазначити, що забезпечення поступового переорієнтування вантажопотоків

на екологічно безпечні види транспорту. Замість ліквідації наслідків варто зосередитися на запобіганні екологічних проблем.

Реалізація принципу «забруднювач платить» у поетапному порядку сприятиме зменшенню шкідливого впливу економічної діяльності на довкілля. Комплексний підхід до транспортного планування, підвищення безпеки та зниження екологічного навантаження має бути зосереджений насамперед у великих містах, курортних зонах і біля міжнародних транспортних коридорів, із подальшим поширенням успішних рішень.

Міжнародні транспортні коридори потребують посиленої уваги з погляду охорони довкілля, особливо під час перевезення небезпечних нафтовантажів. Транспортна політика повинна враховувати екологічні особливості регіонів, спираючись на вдосконалення законодавства, тарифів та інноваційної діяльності. Це дасть змогу створити умови для залучення транзитних вантажопотоків.

Мультимодальна транспортна система, як складова транспортно-логістичної системи країни, включає:

- мультимодальну транспортну мережу (інтеграцію різних видів транспорту);
- міжнародні мультимодальні транспортні коридори;
- об'єкти мультимодальної інфраструктури (транспортні вузли).

Особливу роль відіграють об'єкти інфраструктури, що забезпечують допоміжні операції (зберігання, обробка нафтовантажів), і мають відповідати таким умовам:

- розташування на перетині транспортних шляхів;
- розвиненість інфраструктури різних видів транспорту;
- наявність потужних складських і термінальних комплексів;
- забезпечення митного, фінансового та інформаційного супроводу.

Процес перевезення нафтовмісних речовин автомобільним транспортом, суворо контролюється і регламентується Законом України «Про перевезення небезпечних вантажів», Правилами дорожнього руху України, Угодою про міжнародне дорожнє перевезення небезпечних вантажів (ДОПНВ).

Маршрут перевезення нафтопродуктів повинен обходити густонаселені пункти, заповідники і території для відпочинку.

Найкоротший маршрут транспортування не завжди є найбільш енергоефективним.

Під час транспортування нафтопродуктів, на енерговитрати впливає багато чинників:

- технічний стан авто;
- дорожнє покриття (асфальт, ґрунт);
- рельєф місцевості;
- якість дизпалива;
- потужність двигуна;
- стиль водіння.

Останній фактор має суттєве значення, оскільки саме рівномірний рух дає економію пального. В умовах міста, особливо у пробках, рухатися з постійною швидкістю досить складно.

Зменшення енерговитрат також залежить від обертів двигуна, опору та тертя коліс. За дотримання певних умов руху можна на третю частину скоротити використання пального. Основний алгоритм найменшої витрати палива забезпечується для дизельних двигунів за умови, коли оптимальний показник кількості обертів не має перевищувати 1500-2000 за хвилину. Це актуально для турбодизельних силових агрегатів.

Залежно від марки та моделі вантажного автомобіля на найвищій передачі середня найекономічніша швидкість коливається в діапазоні 75-90 км/год під час руху по трасі.

Також до факторів, що безпосередньо впливають на кількість пального, яке споживається транспортним засобом, виділимо дорожні та погодні умови. До перших належать як стан дорожнього покриття, так і щільність руху на міському чи змішаному режимах пересування. Подолання бруду або снігового покриття вимагає додаткових зусиль двигуна, автоматично збільшуючи споживання пального.

Вплив погодних умов особливо помітний за високих або низьких температур, коли потребується увімкнення кліматичних установок. Обігрівач і кондиціонер надають додаткового навантаження на бортову мережу, відбираючи на себе частину потужності.

Порівняння даних із різних джерел показує, що регулярне користування кондиціонером приблизно на 15 % підвищує споживання палива.

Серйозно впливає на економічність двигуна маса вантажу, який транспортується, технічний стан та якість пального.

Дослідження питання енергоефективного використання можливе завдяки моделюванню дорожнього руху.

Для моделювання транспортних потоків існує багато математичних підходів, які дають змогу дослідити різні параметри руху та методи керування такими потоками.

Існують декілька класифікацій математичних моделей транспортних потоків. Їх прийнято розбивати на три класи: моделі-аналоги, моделі проходження за лідером та імовірнісні моделі, кожна з яких реалізовує один із двох підходів – детермінований або стохастичний.

В основі детермінованих моделей лежить функціональна залежність між окремими показниками.

У стохастичних моделей транспортний потік розглядається як імовірнісний процес із застосуванням відповідного математичного апарату.

В імовірнісних моделях транспортний потік розглядається на мікрорівні як результат взаємодії (має стохастичний характер) окремих транспортних засобів на елементах транспортної мережі. Окремі моделі використовують принципи клітинних автоматів. І хоча моделі на клітинних автоматах поступаються в точності часово-неперервним моделям, вони все ж здатні відтворити велику кількість дорожніх ситуацій. Завдяки своїй простоті чисельно вони найефективніші й можуть використовуватися для моделювання великих дорожніх мереж у реальному часі.

Саме моделювання руху автомобіля є найбільш дієвим і швидким способом дослідження його характеристик та параметрів у різних умовах і з відмінними особливостями конструкцій. Головною проблемою є, однак, забезпечення достатньої достовірності й адекватності реальним процесам руху, що обумовлює необхідність експериментальних досліджень щодо оцінки точності математичної моделі та результатів розрахунків.

## Висновки

У нинішніх умовах мультимодальні перевезення нафтопродуктів в Україну стали не просто логістичним викликом, а стратегічним чинником енергетичної безпеки держави. Військова агресія РФ докорінно змінила логістичні маршрути, водночас стимулюючи модернізацію транспортної інфраструктури та

впровадження нових підходів до управління ланцюгами постачання.

Поєднання залізничного та автомобільного транспорту в системі мультимодальних перевезень є оптимальним компромісом між економічною доцільністю, енергоефективністю та оперативністю. Проте, з огляду на зростаючі ризики воєнних дій, критично важливим є запровадження гнучких логістичних моделей, які здатні швидко адаптуватися до змін безпекової ситуації.

З погляду екології, питання мінімізації впливу на довкілля набуває нового значення. Низьковуглецеві технології, перехід на альтернативні види пального, а також цифровізація процесів моніторингу та планування перевезень — це не просто тренди, а вимога часу. Реалізація цих рішень дає змогу не лише зменшити викиди CO<sub>2</sub>, а й підвищити стійкість транспортної системи до форс-мажорних обставин.

Вибір автомобільного транспорту для перевезення нафтопродуктів забезпечує мобільність і доставку «від дверей до дверей», проте має недоліки, такі як високі витрати, обмежену вантажопідйомність та залежність від дорожньої інфраструктури.

Перевезення нафтопродуктів супроводжуються ризиками витоків і аварій, що можуть завдати шкоди довкіллю. Основними факторами ризику є пошкодження транспортних ємностей, порушення технологічних норм перевезення та воєнні загрози, такі як обстріли й мінування.

Впровадження сучасних систем моніторингу стану транспорту, GPS-трекерів, сенсорів та програмного забезпечення для координації мультимодальних перевезень дозволяє підвищити безпеку перевезень та ефективність роботи.

Для зменшення енерговитрат важливі технічний стан автомобілів, стиль водіння, якість палива та оптимальний режим роботи двигуна. Економія пального можлива завдяки дотриманню певних умов руху та використанню моделювання для оцінки енергоефективності.

Ці висновки підкреслюють необхідність подальших досліджень у сфері логістики

автомобільного транспорту, зокрема впровадження новітніх технологій і розвитку мультимодальної інфраструктури

## References

1. Zelenko Yu. V., Myamlin S. V. (2017). Environmental and economic measures for stabilization and improvement of the environmental condition in railway transport. Collection of scientific works of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. Problems of Transport Economy, 7, 47–51. DOI: 10.15802/pte.v0i7.32094
2. Vernygora R. V., Okorokov A. M., Tsuprov P. S., Pavlenko O. I. Multimodal transportation as a basic segment of the transit potential of Ukraine. Transport systems and transportation technologies: collection of scientific works of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. Dnipro, 4, 20–29. DOI: 10.15802/tstt2017/123148.
3. Deineka O. G., Pozdnyakova L. O. (2019). Principles of the logistic approach to railway transportation. Bulletin of Transport and Industry Economics: abstracts of reports based on the materials of the 15th scientific-practical international conference "International transport infrastructure, industrial centers and corporate logistics", Kharkiv, 66, 130–132.
4. Zelenko Yu. V., Kalymbet M. V., Fesenko D. V. (2020). Implementation of measures to eliminate the consequences of accidents during the transportation of dangerous goods. Transport systems and transportation technologies. Dnipro, 20. 20–26. DOI: 10.15802/tstt2020/217394.
5. Cherkudinov, V., & Zelenko, Y. (2023). Environmental strategy of multimodal transportation. European Science, 1(sge24-01), 136–142. <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2023-24-01-018>
6. Yulia Zelenko, Volodymyr Cherkudinov. (2024). Energy-efficient means of transporting oil products to Ukraine during martial law. MATEC Web of Conferences 390, 01007 EOT-2023. <https://doi.org/10.1051/matec-conf/202439001007>

© А. П. Марченко, докт. техн. наук, професор,  
проректор з наукової роботи,  
ORCID: 0000-0001-9746-4634,  
e-mail: AndreyMarchenko51@gmail.com;  
© М. Т. Міщенко, аспірант,  
ORCID: 0000-0002-1265-8155,  
e-mail: mykyta.mishchenko@gmail.com;  
© С. Г. Міщенко, канд. пед. наук,  
завідувач навчальної лабораторії,  
ORCID: 0000-0001-6535-2400,  
e-mail: svtlana.mishchenko@khpi.edu.ua;  
(Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний  
інститут»)

© Andrii Marchenko, Doctor of Engineering,  
Professor,  
Vice Rector for Science and Research,  
ORCID: 0000-0001-9746-4634;  
e-mail: AndreyMarchenko51@gmail.com;  
© Mykyta Mishchenko, PhD student,  
ORCID: 0000-0002-1265-8155,  
e-mail: mykyta.mishchenko@gmail.com;  
© Svitlana Mishchenko, PhD,  
Head of educational laboratory  
ORCID: 0000-0001-6535-2400,  
e-mail: svtlana.mishchenko@khpi.edu.ua;  
(National Technical University  
«Kharkiv Polytechnic Institute»)

## СТРАТЕГІЇ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТУ

### STRATEGIES FOR DECARBONIZING LAND TRANSPORT ENERGY POWER PLANTS

**Анотація.** Сучасна транспортна індустрія є одним із найбільших джерел викидів парникових газів, що негативно впливають на навколишнє середовище та кліматичну систему. У відповідь на ці виклики міжнародна спільнота, уряди та науковці активно працюють над впровадженням стратегій декарбонізації, спрямованих на зменшення викидів CO<sub>2</sub> та підвищення енергоефективності транспортних установок. Стаття присвячена аналізу основних тенденцій, стратегій і технологій у сфері декарбонізації наземного транспорту, зокрема використання водневих двигунів, паливних елементів, біопалива та впровадження технологій Індустрії 4.0 і 5.0. Розглянуто переваги застосування водневих опозитно-поршневих двигунів, які забезпечують високу екологічну ефективність та енергетичну продуктивність. Визначено перспективні напрями інтеграції водню та інших альтернативних джерел енергії у транспортну галузь, а також розглянуто можливості зниження викидів за рахунок модернізації традиційних двигунів. Особливу увагу приділяється створенню та використанню інтелектуальних транспортних систем, здатних адаптуватися до нових екологічних стандартів та змін клімату.

Декарбонізація транспортної галузі є необхідною складовою сталого розвитку, що охоплює перехід на більш екологічні види палива, оптимізацію процесів згоряння у двигунах внутрішнього згоряння та інтеграцію цифрових технологій. У статті представлені результати досліджень щодо впливу водню як палива, його ефективності та економічності, а також аналізу проблем і перспектив використання альтернативних джерел енергії. Підкреслюється важливість адаптації національних транспортних стратегій до вимог міжнародних екологічних ініціатив, зокрема Європейської зеленої угоди, для досягнення сталого розвитку.

**Ключові слова:** декарбонізація, транспортні установки, альтернативне паливо, сталий розвиток, водневий двигун, Індустрія 4.0, паливні елементи.

**Abstract.** The modern transport industry is one of the largest sources of greenhouse gas emissions that negatively impact the environment and climate system. In response to these challenges, the international community, governments and scientists are actively working to implement decarbonisation strategies aimed at reducing CO<sub>2</sub> emissions and improving the energy efficiency of transport facilities. The article analyses the main trends, strategies and technologies in the field of decarbonisation of land transport, including the use of hydrogen engines, fuel cells, biofuels and the introduction of Industry 4.0 and 5.0 technologies. The advantages of using hydrogen oppositional piston engines, which provide high environmental efficiency and energy productivity, are considered. The article identifies promising areas for the integration of hydrogen and other alternative energy sources into the transport industry, and considers the possibilities of reducing emissions by modernising traditional engines. Special attention is paid to the creation and use of intelligent transport systems that can adapt to new environmental standards and climate change. The decarbonisation of the transport industry is a necessary component of sustainable development, which includes the transition to more environmentally friendly fuels, optimisation of combustion processes in internal combustion engines and integration of digital technologies. The article presents the results of research on the impact of hydrogen as a fuel, its efficiency and cost-effectiveness, as well as an analysis of the problems and prospects of using alternative energy sources. The article emphasises the importance of adapting national transport strategies to the requirements of international environmental initiatives, in particular the European Green Deal, in order to achieve sustainable development.

**Keywords:** decarbonisation, transport systems, alternative fuel, sustainable development, hydrogen engine, Industry 4.0, fuel cells.

## Вступ

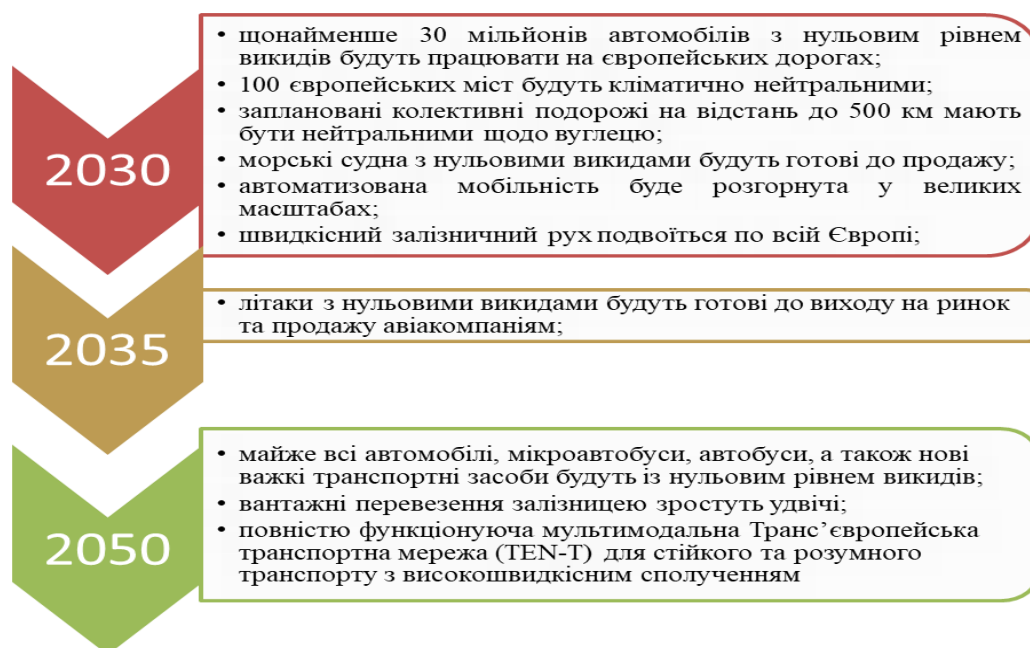
Транспортна галузь є важливим елементом сучасної економіки, але водночас виступає одним із найбільших забруднювачів довкілля. Викиди парникових газів від наземного транспорту чинять значний вплив на зміну клімату, що є однією з найсерйозніших глобальних проблем сьогодення. Відповідно до міжнародних екологічних ініціатив, зокрема Європейської зеленої угоди, до 2050 року необхідно зменшити викиди в транспортному секторі на 90%. Для цього впроваджуються нові стратегії, спрямовані на декарбонізацію транспортних систем. У статті висвітлено сучасні підходи до впровадження альтернативних джерел енергії, модернізації транспортних силових установок і використання новітніх технологій у сфері енергетичних установок наземного транспорту. Для вирішення цієї проблеми впроваджуються стратегії декарбонізації, що охоплюють нові технології, цифровізацію та використання альтернативних видів палива, таких як водень.

*Мета статті* полягає в дослідженні сучасних технологій декарбонізації енергетичних установок наземного транспорту, визначенні ефективних стратегій впровадження альтернативних джерел енергії та модернізації силових установок.

## Основна частина

### Сталий розвиток і транспортна система

У вересні 2015 року в межах 70-ї сесії Генеральної Асамблеї ООН у Нью-Йорку відбувся Саміт ООН зі сталого розвитку. Підсумковим документом Саміту «Перетворення нашого світу: порядок денний у сфері сталого розвитку до 2030 року» встановлено 17 цілей сталого розвитку та 169 завдань [1]. Ці цілі та завдання в подальші 15 років мали на меті стимулювати діяльність у сферах, що є критично значущими для людства і планети [2]. Вони визначають бачення майбутнього – амбітне і спрямоване на інноваційні перетворення. Майбутнє, в якому існує світ, де середовище проживання людини є безпечним, життєстійким та екологічно здоровим і де забезпечено всезагальний доступ до недорогого, надійного і стабільного енергопостачання. Сталість усіх видів транспорту – серед головних пріоритетів ЄС. Європейськими стратегіями відзначається те, що вона повинна зростати задля забезпечення широкої доступності зелених альтернатив та запровадження відповідних заохочень для стимулювання переходу. Європейській транспортній системі рухатися до розумного та сталого майбутнього повинні допомогти конкретні часові рамки, в яких сформовано визначені цілі [3] (рис. 1).



**Рис. 1.** Часові межі та визначені цілі руху Європейської транспортної системи до розумного та сталого майбутнього

У повідомленні комісії до Європейського Парламенту, Ради, Європейського економічного та соціального комітету та Комітету регіонів «Стратегія стійкої та розумної мобільності – європейський транспорт на шляху до майбутнього» [4] акцентовано увагу на необхідності зробити всі види транспорту більш сталими. А саме: для досягнення кліматичних цілей до 2030 і 2050 років та нульового забруднення навколишнього середовища потрібно сприяти поширенню транспортних засобів з низьким і нульовим рівнем викидів, а також відновлюваного та низьковуглецевого палива для автомобільного, водного, повітряного та залізничного транспорту.

Законодавчі акти України, які стосуються транспортного сектору економіки держави сприяють імплементації стратегій сталого розвитку ООН і стратегій ЄС. Це передбачає адаптацію наявних структур та впровадження стратегій, спрямованих на реструктуризацію та модернізацію транспортного сектору й наближення до чинних стандартів ЄС [5]. Можна стверджувати, що ці стратегії є базовими для вітчизняної транспортної системи в загальних вітчизняних стратегіях післявоєнного відновлення та подальшого інноваційного розвитку.

Важливо відзначити й те, що НТУ «ХПІ» активно підтримує Цілі сталого розвитку ООН, спрямовані на забезпечення сталого розвитку транспортної системи. У межах цього підходу університет ініціює інноваційні проекти, зокрема у сфері енергетичних установок, адаптуючи їх до сучасних екологічних стандартів. Зменшення шкідливих викидів з відпрацьованими газами завжди було пріоритетним завданням наукової діяльності НТУ «ХПІ» [6].

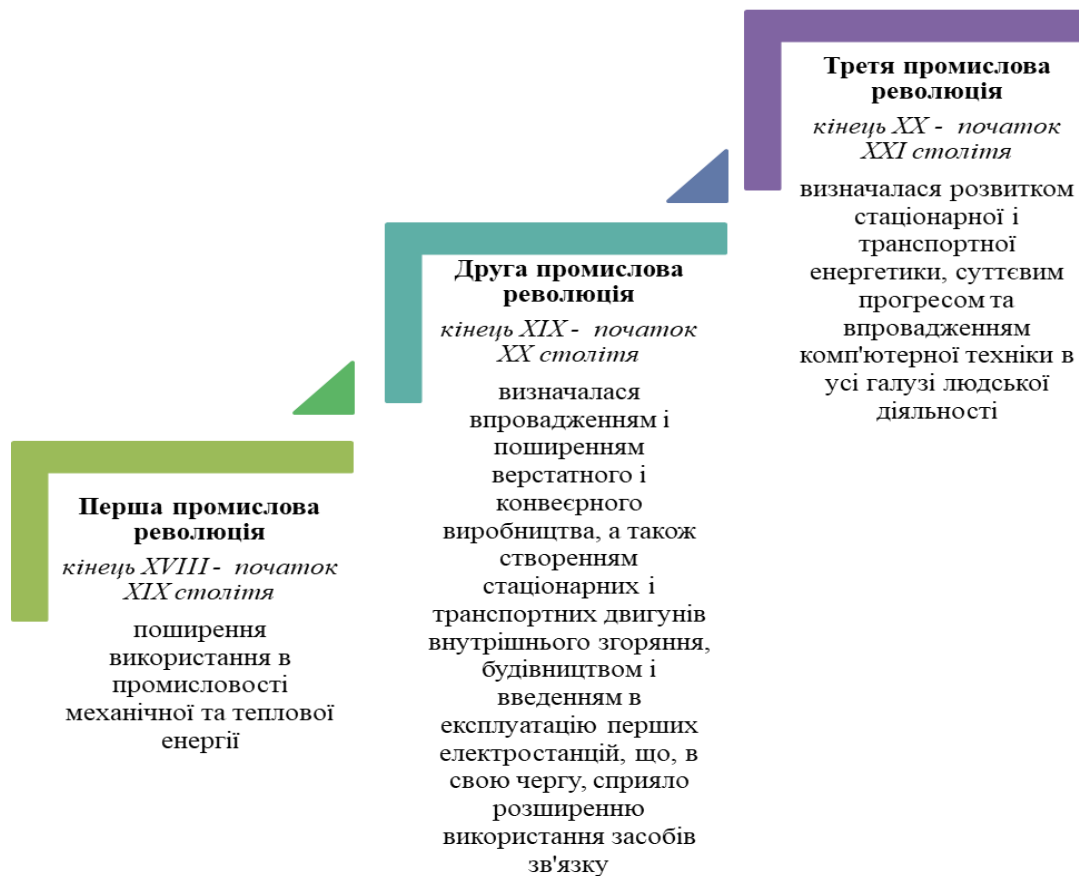
З урахуванням проблем реалізації актуальних стратегій Індустрії 4,0 та Індустрії 5,0,

які є важливими інструментами щодо модернізації вітчизняної транспортної системи, в НТУ «ХПІ» створена унікальна програма підготовки ІТ-фахівців, яка отримала назву «Інноваційний кампус». Ця програма підготовки посіла друге місце міжнародного конкурсу QS-Wharton Reimagine Education Awards 2022. Загалом у ньому брали участь понад 1200 проектів від компаній, інститутів та інших організацій із 70 країн світу. Освітній проект «Інноваційний кампус НТУ «ХПІ» був представлений на міжнародному саміті QS Higher Ed Summit: Europe 2023, який відбувся в Ірландії в червні 2023 року.

### **Індустрія 4.0 і 5.0 у контексті транспортних установок**

Концептуальні засади четвертої промислової революції всебічно досліджені в роботі [7]. За концепцією Клауса Шваба, «...четверта промислова революція пов'язана не тільки з розумними та взаємопов'язаними машинами та системами. Її спектр дії значно ширший. Одночасно виникають хвилі подальших проривів у різних сферах: від розшифровки інформації, записаної в людських генах до нанотехнологій, від відновлюваних енергоресурсів до квантових обчислень. Саме синтез цих технологій та їхня взаємодія у фізичних, цифрових та біологічних доменах становлять фундаментальну відмінність четвертої промислової революції від усіх попередніх революцій». Слід зауважити, що четвертій промисловій революції передували три системно сформовані та історично визначені промислові революції.

Індустрія 4.0 та Індустрія 5.0 мають значний вплив на розвиток транспортних установок, особливо з точки зору автоматизації, цифровізації та екологічної ефективності (**рис. 2**).



**Рис. 2.** Історичний поступ промислових революцій

Ці концепції використовуються для підвищення ефективності транспортних систем, зменшення шкідливих викидів та зниження негативного впливу на навколишнє природне середовище [8].

**Індустрія 4.0 – Цифровізація та автоматизація.** Індустрія 4.0 дає змогу оптимізувати транспортні установки, знижуючи їхню витратність і зменшуючи навантаження на навколишнє середовище завдяки більш точному моніторингу та автоматизації процесів.

**Індустрія 5.0 – Людина та технології разом.** Індустрія 5.0 сприяє більш гуманному та персоналізованому підходу, поєднуючи технології та людський фактор для досягнення максимальної ефективності й безпеки в транспорті. Цей підхід дозволяє створювати адаптивні та прогресивні транспортні системи, які зменшують вплив на довкілля, оптимізують витрати і підвищують комфорт перевезень.

#### **Актуальність декарбонізації**

Міжнародні ініціативи, такі як Воднева стратегія ЄС і подібні програми в США та Японії, визначають водень як ключовий елемент переходу до кліматично нейтральної

економіки. Участь України в Європейському зеленому курсі є надзвичайно важливою для досягнення відповідності міжнародним стандартам.

Протягом останніх років провідні країни світу розробили та затвердили на законодавчому рівні стратегії та програми переходу сучасних вуглецевих економік до водневих. У 2020 році ЄС затвердив Водневу стратегію для кліматично нейтральної Європи, США – Водневий програмний план, а у 2019 році уряд Японії схвалив стратегічну водневу карту для створення водневого суспільства замість вуглецевого. Участь України в Європейському зеленому курсі є особливо важливою, як підкреслено у спільній заяві за підсумками 7-го засідання Ради асоціації Україна – ЄС у 2019 році.

Зазначене формує високу актуальність декарбонізації на транспорті, яка повинна стати ключовою для вітчизняної транспортної системи у післявоєнному відновленні та стратегіях інноваційного сталого розвитку.

#### **Тенденції декарбонізації**

Одним із головних завдань Індустрії 4.0 і 5.0 є зменшення екологічного впливу



транспортних установок. Аналіз проблеми свідчить, що хоча електромобілі мають потенціал для зниження викидів, реальний вплив залежить від емісій CO<sub>2</sub> під час виробництва електроенергії. Разом із цим дизельні двигуни та їхні екологічні показники продовжують вдосконалюватися завдяки впровадженню нових технологій. Фактична відсутність методології реалізації стратегічних завдань з декарбонізації транспортних силових установок на базі ДВЗ призвела до таких негативних наслідків:

- популізм у реалізації технічних рішень – зараз на першому місці;
- роль електричних силових установок автомобілів у вирішенні проблеми декарбонізації на транспорті значно перевищена;
- не враховуються викиди CO<sub>2</sub>, які утворюються у процесі виробництві електроенергії;
- у дослідженнях і прогнозах основна роль відводиться новим енергетичним силовим установкам на транспорті;
- практично відсутні методології декарбонізації, які б використовувалися сьогодні і були глобальними виконавцями для забезпечення життєдіяльності людства;
- основним інструментом вирішення проблем декарбонізації є система заборон.

Альтернативні види палива можуть замінити викопні види палива, якщо їхня доступність обмежена світовими геополітичними проблемами [9].

Водневі та біопаливні технології, які стають доступними завдяки Індустрії 4.0, у поєднанні з автономними транспортними засобами, дозволяють значно зменшити викиди CO<sub>2</sub>. Завдяки застосуванню технологій Індустрії 5.0 транспорту будуть ставати все більш адаптивними до змін навколишнього середовища, що дасть можливість знижувати енергоспоживання і покращувати екологічну ефективність. Альтернативні види палива для двигунів з ДВЗ стають все більш популярними через соціально-економічні та екологічні причини.

### **Альтернативні джерела енергії**

**Водень** – перспективне паливо, яке здатне забезпечити низькі викиди шкідливих речовин. Воднева енергетика широко визнана як один із ключових елементів для відмови від викопного палива у транспортному секторі. Водень (H<sub>2</sub>) є унікальним паливом, яке не

утворює вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>) або чадного газу (CO) у процесі згоряння, також має низькі рівні викидів оксидів азоту (NO<sub>x</sub>) та високу ефективність.

Завдяки високій енергетичній щільності водень є перспективним паливом для високотемпературних процесів у промисловості та транспорті, а також знаходить широке застосування в інших галузях. Звіт «Initial Hydrogen Test Results» від компанії Achates Power представляє результати перших тестувань водневих двигунів опозитно-поршневого типу (Hydrogen Opposed-Piston Engine, H<sub>2</sub> OPE) [10]. Основна увага приділяється характеристикам ефективності, стабільності процесу згоряння та екологічності.

Науковцями розглянуто практику та потенційну можливість широкого використання водневого палива в автомобільних двигунах з примусовим запалюванням [11].

**Біопаливо** – тверда біомаса та біодизель є основними видами біопалива, які використовуються в промисловості та транспорті як комерційно прийнятні альтернативи [12]. У контексті сталого розвитку важливо створювати нові рішення для розширення їхнього застосування, оскільки попит на ці ресурси ймовірно зростатиме в майбутньому. Управління відходами також може бути інтегроване у виробничі процеси біопалива, що дозволяє одночасно зменшувати екологічні проблеми та підвищувати якість кінцевого продукту.

Вітчизняні науковці приділяють увагу можливості та перспективам використання альтернативних видів палив із поновлювальних джерел енергії. Зокрема визначені позитивні та негативні фактори впливу на довкілля використання біопалив протягом усього життєвого циклу ТЗ. Встановлено, що незначне зменшення емісії CO<sub>2</sub> у процесі застосування типового сучасного біодизельного палива супроводжується суттєвим зростанням емісії NO<sub>x</sub>, витрат води й енергії в умовах використання біодизельного палива першого покоління [13].

Водночас науковці проводять експериментальні випробування легкового автомобіля з дизелем у роботі на дизельному біопаливі з утилізованих відходів продовольчих жирів. Проведені дослідження засвідчили зменшення сумарних масових викидів, приведених до викидів оксиду вуглецю [14].

## Модернізація транспортних силових установок

У світі, де діють суворі правила та обмеження щодо забруднення довкілля, підвищення ефективності та зменшення викидів забруднювальних речовин і парникових газів є важливими цілями для дослідників. Високоєфективним методом досягнення передумов, описаних вище, є використання альтернативних видів палива, які можуть мати сильний вплив на процеси згоряння в двигунах з іскровим запалюванням. Для збільшення швидкості згоряння, теплової ефективності гальмування, а також зниження рівня викидів забруднювальних речовин і парникових газів використання екологічних альтернативних видів палива паралельно з традиційними видами палива є слушною ідеєю.

Науковці досліджують перспективи використання гібридних приводів на автомобілях[15]. Поряд із цим широко обговорюється питання безпеки гібридних транспортних засобів та їхньої інфраструктури.

Серед альтернативних видів палива водень є чудовим паливом за своїми фізико-хімічними властивостями, що робить його привабливою заміною для класичних видів палива в процесі згоряння. Можна прогнозувати, що додавання водню до традиційного палива є найближчою перспективою на шляху до його застосування в транспортних ДВЗ, згідно зі стратегією декарбонізації.

Дослідження [16] параметрів згоряння бензину з добавкою водню в двигуні з іскровим запалюванням на режимах зовнішньої швидкісної характеристики представляє комплексний аналіз процесу згоряння бензино-водневої суміші та встановлення її впливу на концентрацію двоокису вуглецю у відпрацьованих газах. У роботі наведено результати розрахунків, які свідчать, що зі збільшенням добавки водню до 10% за масовою часткою до бензину, спостерігається зниження викидів CO<sub>2</sub> майже до 20% на режимах зовнішньої швидкісної характеристики.

Теоретичні та експериментальні дослідження [17], проведені на двигуні з наддувом та іскровим запалюванням за умови 55% навантаження двигуна і частоти обертання 2500 об/хв, відображають вплив 2,15% водню, що замінює бензин, на процес згоряння, непрямо досліджується енергетична та паливна ефективність двигуна, а також досліджуються рівні

викидів забруднювальних речовин і парникових газів.

Водневі опозитно-поршневі двигуни відкривають нові можливості для декарбонізації транспорту. Їхня розробка є важливим кроком до сталого розвитку, поєднуючи екологічність, економічність і високу продуктивність.

Представлено наукові розробки водневого опозитно-поршневого двигуна (H<sub>2</sub> OPE) із прямим уприскуванням та компресійним запалюванням, створеного компанією Achates Power у співпраці з дослідницькими установами, такими як Argonne National Laboratory [18, 19]. Ця інноваційна технологія орієнтована на створення вискоєфективної силової установки для комерційного транспорту та важких вантажівок, здатної досягати показників ефективності, порівнянних із паливними елементами, за менших витрат і спрощеної конструкції.

### Ключові особливості водневого двигуна

*Ефективність* – двигун демонструє тепловий ККД, близький до дизельних двигунів, і перевершує традиційні технології за рахунок зменшення теплових втрат через відсутність головок циліндрів.

*Екологічність* – використання водню забезпечує нульові викиди CO<sub>2</sub> і мінімальні викиди NO<sub>x</sub>, що робить двигун придатним за жорсткими екологічними стандартами.

Отже, наведений аналіз дозволяє зробити позитивні узагальнення і висновки щодо потенційних можливостей модернізації вітчизняних силових установок транспорту.

### Висновки

Декарбонізація транспортної галузі є важливою складовою глобального переходу до сталого розвитку та боротьби зі зміною клімату.

Технології Індустрії 4.0 і 5.0, зокрема цифровізація, автоматизація та створення інтелектуальних транспортних систем, відкривають нові можливості для оптимізації транспортних процесів. Вони дозволяють зменшити витрати пального, підвищити безпеку дорожнього руху та покращити взаємодію між різними видами транспорту, забезпечуючи сталий розвиток транспортної системи.

Результати проведених досліджень свідчать, що впровадження інноваційних транспортних технологій, зокрема водневих двигунів

та альтернативних видів палива, є ключовим фактором досягнення кліматичних цілей. Проте для успішної реалізації таких стратегій необхідно вирішити технічні, економічні та інфраструктурні проблеми. Це стане основою для створення екологічної, ефективної та надійної вітчизняної транспортної системи майбутнього.

## References

1. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2025). Sustainable Development Goals and Ukraine. Retrieved from <https://www.kmu.gov.ua/diyalnist/cili-stalogo-rozvitku-ta-ukrayina>
2. United Nations Development Programme. (2018). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Retrieved from <https://www.undp.org/uk/ukraine/publications/peretvorennya-nashoho-svitu-poryadok-dennyu-u-sferi-staloho-rozvitku-do-2030-roku>
3. Mobility Strategy. (2021). A fundamental transport transformation: Commission presents its plan for green, smart and affordable mobility. Retrieved from [https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/mobility-strategy\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/mobility-strategy_en)
4. Sustainable and Smart Mobility Strategy – putting European transport on track for the future. (2020). Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions. [Online]. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0789>
5. Green Deal. (2024). How can Ukraine launch sustainable development of the transport system – expert opinion. Retrieved from <https://interfax.com.ua/news/greendeal/970775.html>
6. Depczyński, W., Marchenko, A., Mishchenko, S., & Mishchenko, M. (2025). The effect of hydrogen addition to traditional petrol engine fuel in a hybrid power plant on its environmental performance and fuel efficiency. *Combustion Engines*, 200, 1, 87–94. Retrieved from <https://doi.org/10.19206/CE-199735>
7. Marchenko, A., & Parsadanov I. (2024). Criteria for assessing the effectiveness of transport power plants decarbonisation in accordance with implementation of the sustainable development concept. *Internal combustion engines*, 1, 3-11. Retrieved from <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2024.1.01>
8. Schwab, K. (2016). The Fourth Industrial Revolution. World Economic Forum. [Online]. Retrieved from <https://www.weforum.org/about/the-fourth-industrial-revolution-by-klaus-schwab/>
9. Mishchenko, M. (2024). Defining innovative areas and prospects to develop the patenting of technological advances in the automotive power plant industry. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 13, 127, 92-102. Retrieved from <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298643>
10. Achates Power. (2024). Single Cylinder 1.6L Engine Initial Hydrogen Test Results Report. Achates Power. [Online]. Retrieved from <https://achatespower.com/wp-content/uploads/2024/02/Achates-Power-SCE-Initial-H2-Test-Results-Report.pdf>
11. Kryshchop, S., Smigins, R., Kryshchop, L. (2024). A Study of Heat Recovery and Hydrogen Generation Systems for Methanol Engines. *Energies*, 17, 21, 5266. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/en17215266>
12. Zakrevsky, O., Nazarenko, M. (2022). On the experience of using hydrogen fuel for automobile engines with forced ignition. *Avtošljachovyk Ukrainy*, 4, 272, 49-58. Retrieved from <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2022-4-272-49-58>
14. Volkov, V., Vnukova, N., Pozdnyakova, O. (2022). The impact of road transport on climate change when using traditional and alternative fuels Ukrainian Highwayman. *Avtošljachovyk Ukrainy*, 1, 269, 24-29. Retrieved from <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2022-1-269-24-29>
14. Kovbasenko, S., Bugryk, O. (2023). Experimental tests of a passenger car with a diesel engine operating on diesel fuel and diesel biofuel. *Avtošljachovyk Ukrainy*, 1, 273, 35-43. Retrieved from <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2022-1-273-35-43>
15. Kyslovskyi, P. V., Pukha, V., Yashchenko, V. (2017). Prospects for the use of hybrid drives in cars. *Avtošljachovyk Ukrainy*, 2017, 4, 252, 9-11. Retrieved from [https://journal.insat.org.ua/?page\\_id=1473&lang=uk](https://journal.insat.org.ua/?page_id=1473&lang=uk)
16. Marchenko, A., Mishchenko, M. (2024). Research of the combustion parameters of petrol with hydrogen additive in a spark ignition engine in the modes of external speed characteristic. *Internal combustion engines*, 1, 52-60. Retrieved from <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2024.1.07>
17. Georgescu, R., Pană, C., Negurescu, N., Cernat, A., Nutu, C., Sandu, C. (2024). The Influence of Hydrogen Addition on a SI Engine – Theoretical and Experimental Investigations. *Sustainability*, 16, 6873. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/su16166873>
18. Ming Huo, Dnyanesh Sapkal, Essam El-Hannouny. (2023). Hydrogen Opposed-Piston Engine with Direct Injection, Compression Ignition Combustion. Achates Power. Retrieved from <https://achatespower.com/wp-content/uploads/2023/11/Hydrogen-Opposed-Piston-Engine-with-Direct-Injection-Compression-Ignition-Combustion.pdf>
19. Achates Power. (2024). Sustainable Now: Opposed Piston Engine Operating on Renewable Diesel. Retrieved from <https://achatespower.com/wp-content/uploads/2024/05/Sustainable-Now-OP-Engine-Operating-with-Renewal-Diesel.pdf>

© М. П. Цюман, канд. техн. наук, доцент,  
в. о. завідувача кафедри,  
ORCID: 0000-0003-2537-8010,  
e-mail: tsuman@ukr.net  
(Національний транспортний університет)

© Mykola Tsiuman, Associate Professor,  
Acting Head of Department,  
ORCID: 0000-0003-2537-8010,  
e-mail: tsuman@ukr.net  
(National Transport University)

## СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЮ ТРАНСПОРТНОЇ ЕНЕРГОУСТАНОВКИ В ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМАХ

### ENERGY EFFICIENCY CONTROL SYSTEM FOR VEHICULAR POWER PLANTS IN OPERATING MODES

**Анотація.** Висвітлено формування структури системи управління та критеріїв оцінювання енергоефективності транспортної енергоустановки (ТЕУ) в експлуатаційних режимах. Розроблено системний підхід до управління експлуатаційними режимами ТЕУ, який передбачає загальне формування системи інтелектуального управління (ІСУ) експлуатаційними режимами ТЕУ, формування інформаційної підсистеми обміну даними в процесі управління експлуатаційними режимами ТЕУ, формування математичної підсистеми інтелектуальної системи управління експлуатаційними режимами ТЕУ, оцінювання ефективності інтелектуального управління енергоефективністю ТЕУ в різних експлуатаційних режимах для окремих варіантів розвитку системи «ТЕУ-ІСУ». Сформовано структуру системи «ТЕУ-ІСУ», під час функціонування якої процеси умовно розподілені між трьома підсистемами: інформаційною, математичною та фізичною. Система забезпечує визначення параметрів управління робочими процесами ТЕУ для забезпечення її максимальної ефективності у відповідних експлуатаційних режимах у результаті досягнення максимального значення критерію енергоефективності ТЕУ. Оцінено закономірності зміни окремих та загального інтегральних критеріїв ТЕУ БОГДАН-21114 з двигуном 4Ч 8,2/7,56 в експлуатаційних режимах, які відповідають міським умовам. Представлений підхід дає можливість досліджувати ефективність застосування різних способів впливу на робочий процес ТЕУ, зокрема застосуванням альтернативних палив та добавок до традиційних палив у експлуатаційних режимах за визначеним критерієм енергоефективності.

**Ключові слова:** транспортна енергоустановка, енергоефективність, система управління, експлуатаційні режими, системний підхід, структура системи, критерій енергоефективності, транспортний засіб.

**Abstract.** The article is devoted to the development of a control system structure and evaluation criteria for the energy efficiency of a vehicular power plant (VPP) in operating modes. A systematic approach to managing the vehicular power plant operating modes has been developed, which includes the overall formation of an intelligent control system (ICS) for vehicular power plant operating modes, the formation of an information subsystem for data exchange during vehicular power plant operating modes management, the formation of a mathematical subsystem of the intelligent control system for vehicular power plant operating modes, and the evaluation of the effectiveness of intelligent management of vehicular power plant energy efficiency in various operating modes for specific scenarios of the "VPP-ICS" system development. The structure of the "VPP-ICS" system has been formed, within which the processes are conditionally distributed among three subsystems: informational, mathematical, and physical. The system ensures the determination of control parameters for vehicular power plant operating processes to maximize its efficiency in corresponding operating modes by achieving the maximum value of the vehicular power plant energy efficiency criterion. The patterns of changes in individual and overall integral criteria of the vehicular power plant of the BOGDAN-21114 with a 4FS 8.2/7.56 engine in operating modes corresponding to urban conditions have been evaluated. The proposed approach enables the investigation of the effectiveness of various methods for influencing the vehicular power plant operating process, including the use of alternative fuels and additives to conventional fuels, in operating modes based on the specified energy efficiency criterion.

**Keywords:** vehicular power plant, energy efficiency, control system, operating modes, systematic approach, system structure, energy efficiency criterion, vehicle.

#### Вступ

У сучасних умовах розвитку показники енергоефективності засобів автомобільного транспорту є найбільш важливими. Ці показники великою мірою визначаються ефективністю роботи енергетичної установки

транспортного засобу, яка значно змінюється в умовах експлуатації відносно конструктивно закладених показників унаслідок зміни теплового режиму, режимів роботи, якості палива, умов руху автомобіля, технічного стану тощо. Тому забезпечення високої ефективності

транспортної енергоустановки (ТЕУ) в умовах експлуатації є найважливішим перспективним напрямом розвитку автомобільних транспортних засобів та автомобільного транспорту в цілому. Одним із можливих шляхів досягнення цієї мети є використання інтелектуальних систем управління транспортними енергоустановками. Такі системи можуть здійснювати поточний аналіз показників ефективності енергоустановки в процесі експлуатації, на основі чого можливо приймати рішення щодо доцільності подальшої експлуатації, використання тих чи інших палив, добавок до палив, оптимального управління окремими параметрами, режимами руху, необхідності відновлення технічного стану тощо.

Енергоефективність ТЕУ значною мірою залежить від здатності їхніх систем управління адаптуватися до змінних умов роботи та параметрів ТЕУ, які в процесі експлуатації можуть якісно змінюватися. Забезпечити таку адаптивність можуть інтелектуальні системи управління (ІСУ), які в процесі експлуатації ТЕУ «навчаються» відповідно до поточних умов та передбачають відповідну гнучкість алгоритмів управління чи значень базових параметрів. Формування ІСУ передбачає врахування впливу на показники об'єкта управління великої кількості внутрішніх та зовнішніх параметрів. Для вирішення такого завдання найбільш ефективним може бути системний підхід.

У галузі проблем ТЕУ та транспорту системний підхід застосовувався у роботах багатьох відомих вчених: Гутаревича Ю. Ф., Головчука А. Ф., Матейчика В. П., Лісовала А. А., Канила П. М., Грицука І. В., Воронкова О. І., Клименка О. А., Симоненка Р. В. та інших [1-9].

*Метою роботи є формування структури системи управління та критеріїв оцінювання енергоефективності транспортної енергоустановки в експлуатаційних режимах.*

### Основна частина

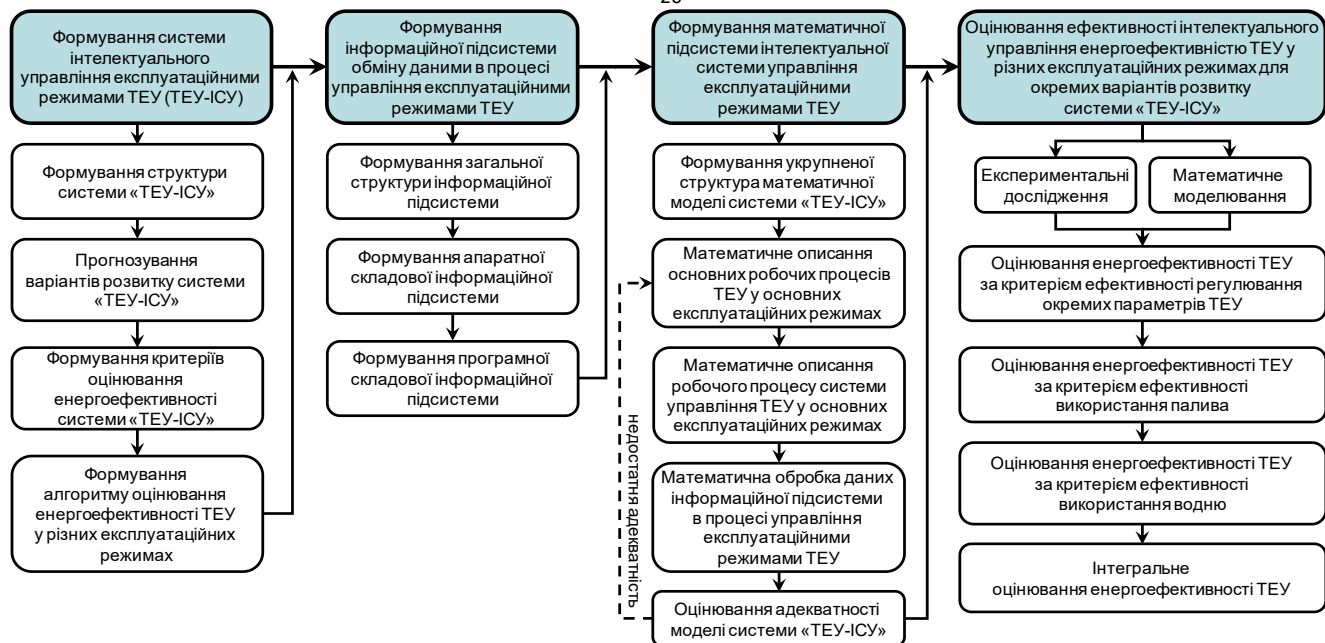
Системний підхід до управління експлуатаційними режимами ТЕУ охоплює такі етапи (рис. 1):

1) загальне формування системи інтелектуального управління експлуатаційними режимами ТЕУ, під час якого формуються структура системи, що описує основні процеси її функціонування та обміну даними в процесах управління, основні структурні ознаки та способи практичної реалізації цих ознак, комбінування яких дозволить прогнозувати різні варіанти розвитку системи «ТЕУ-ІСУ», критерії оцінювання енергоефективності та алгоритм такого оцінювання у різних експлуатаційних режимах ТЕУ, які дозволять здійснювати аналіз розвитку системи «ТЕУ-ІСУ»;

2) формування інформаційної підсистеми обміну даними в процесі управління експлуатаційними режимами ТЕУ, під час якого формується інформаційна підсистема, яка забезпечить наповнення ІСУ поточними даними, отриманими під час моніторингу основних робочих процесів ТЕУ. Зокрема сформовані апаратна та програмна складові інформаційної підсистеми;

3) формування математичної підсистеми інтелектуальної системи управління експлуатаційними режимами ТЕУ, під час якого формується математична модель системи «ТЕУ-ІСУ» як сукупності трьох підмоделей: моделі робочих процесів ТЕУ у основних експлуатаційних режимах, моделі робочих процесів системи управління ТЕУ у основних експлуатаційних режимах та моделі математичної обробки даних інформаційної підсистеми в процесі управління експлуатаційними режимами ТЕУ. Оцінювання адекватності моделі системи «ТЕУ-ІСУ» необхідне для визначення достовірності даних математичної підсистеми ІСУ.

4) оцінювання ефективності інтелектуального управління енергоефективністю ТЕУ в різних експлуатаційних режимах для окремих варіантів розвитку системи «ТЕУ-ІСУ», під час якого оцінюється ефективність на основі результатів експериментальних досліджень та математичного моделювання з використанням встановлених окремих критеріїв, зокрема ефективності регулювання окремих параметрів ТЕУ, використання палива та водню (як компонента палива), а також інтегральне оцінювання енергоефективності ТЕУ.



**Рис. 1.** Системний підхід до управління експлуатаційними режимами ТЕУ

Загальна структура системи «ТЕУ-ІСУ» може бути сформована на основі принципу, закладеного в сучасні електронні системи управління ТЕУ, а саме забезпечення необхідного крутного моменту та з урахуванням можливостей ІСУ. Застосовуючи загальні принципи аналізу систем, представимо загальну структуру системи «ТЕУ-ІСУ» (рис. 2).

Вхідними величинами системи «ТЕУ-ІСУ» є поточні значення моменту опору  $M_{оп}(t)$  на вихідному валу ТЕУ та частоти обертання вихідного валу  $n_d(t)$ . Ці значення обумовлені дією факторів зовнішнього середовища: вибраним маршрутом руху ТЗ, що визначає його переміщення  $S_a$  та значення коефіцієнта дорожнього опору  $\psi$ , швидкісного режиму  $V_a(t)$  ТЗ, встановленим передаточним числом трансмісії  $u_i$  та внутрішніми втратами енергії в ТЕУ. В результаті здійснення робочих процесів ТЕУ, з урахуванням параметрів стану навколишнього середовища, на вихідному валу ТЕУ розвивається крутний момент  $M_e(t)$  за частоти обертання  $n_d(t)$ , які складають механічну енергію, що надходить ТЗ.

Зворотний зв'язок забезпечує визначення параметрів управління робочими процесами ТЕУ для забезпечення її максимальної ефективності (ефективності перетворення енергії, ефективності управління) у відповідних експлуатаційних режимах завдяки досягненню максимального значення критерію ефективності ТЕУ  $k_{ef}$ .

На основі загальної структури системи «ТЕУ-ІСУ» розроблено деталізовану структуру. Процеси, що відбуваються під час функціонування системи, умовно розподілено між трьома підсистемами: інформаційною (А), математичною (В) та фізичною (С) (рис. 3, 4, 5).

Процеси інформаційної підсистеми А системи «ТЕУ-ІСУ» (рис. 3) полягають в отриманні необхідних поточних параметрів руху ТЗ та робочих процесів ТЕУ, необхідних для подальшої обробки у математичній підсистемі з метою встановлення управлінських параметрів виконавчими пристроями ТЕУ для досягнення на вихідному валу необхідного крутного моменту за відповідної частоти обертання та максимального рівня енергоефективності.

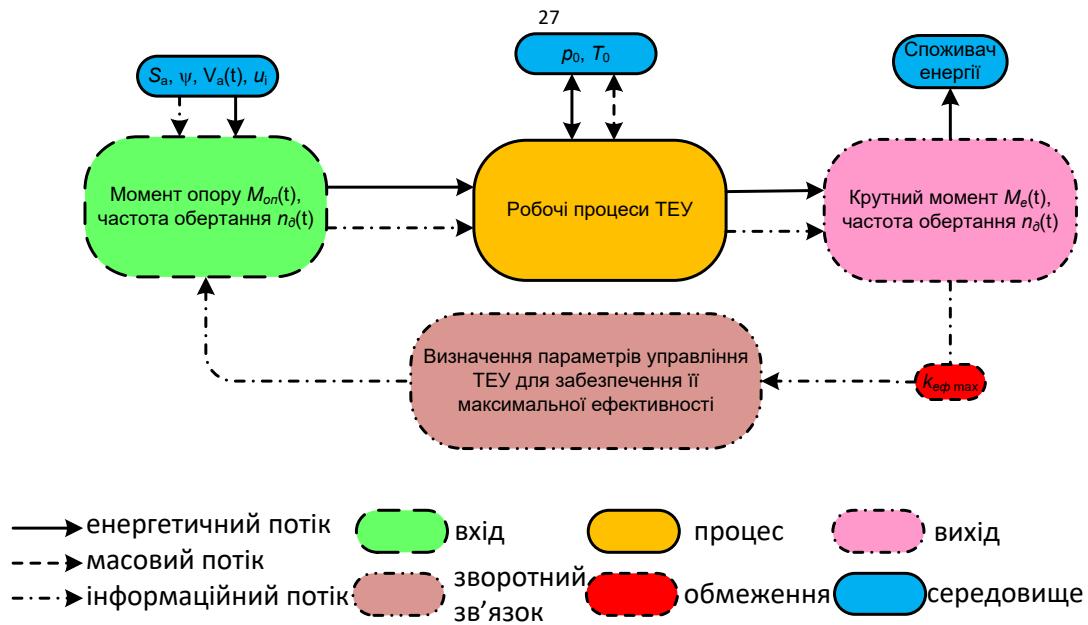


Рис. 2. Загальна структура системи «ТЕУ-ІСУ»

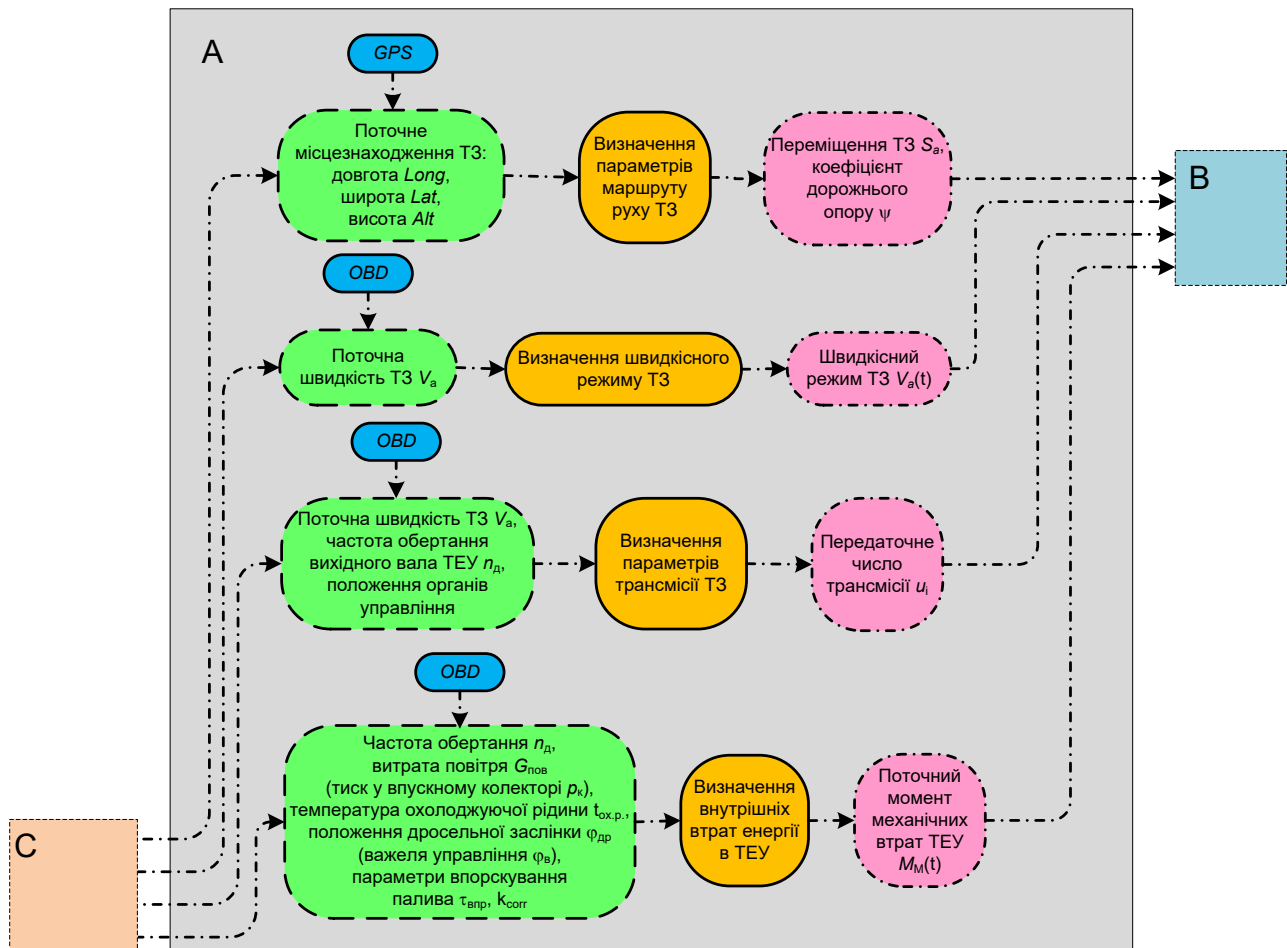


Рис. 3. Деталізована структура інформаційної підсистеми системи «ТЕУ-ІСУ»

Ці процеси передбачають, зокрема, визначення: переміщення ТЗ  $S_a$  та значення коефіцієнта дорожнього опору  $\psi$  на основі даних про поточне місцезнаходження ТЗ, отриманих від (GPS); швидкісного режиму  $V_a(t)$  ТЗ,

передаточного числа трансмісії  $u_i$  та поточного моменту механічних втрат  $M_M(t)$  ТЕУ на основі даних про поточну швидкість  $V_a$  ТЗ, частоту обертання вихідного вала  $n_d$  ТЕУ, положення органів управління ТЗ, витрату повітря



$G_{\text{пов}}$  (тиск у впускному колекторі  $p_k$ ), температуру охолоджувальної рідини  $t_{\text{ох.р.}}$ , положення важеля управління  $\phi_B$ ), параметри

впорскування палива  $\tau_{\text{впр}}$ ,  $k_{\text{согг}}$ , отримані від системи On-Board Diagnostics (OBD).



Рис. 4. Деталізована структура математичної підсистеми системи «ТЕУ-ІСУ»

Процеси математичної підсистеми В (рис. 4) системи «ТЕУ-ІСУ» полягають в обробці отриманих від інформаційної підсистеми даних про переміщення ТЗ  $S_a$ , коефіцієнт дорожнього опору  $\psi$ , швидкісний режим  $V_a(t)$  ТЗ, передаточне число трансмісії  $u_i$  та поточний момент механічних втрат  $M_M(t)$  ТЕУ для визначення поточних параметрів управління виконавчими пристроями ТЕУ, зокрема: момент початку і тривалість впорскування  $\tau_{\text{впр}}(t)$  палива, величина на важіль управління  $\phi_{\text{др}}(t)$ , момент початку і тривалість керівного імпульсу на котушку запалювання  $\tau_{\text{кз}}(t)$  тощо, які забезпечують досягнення на вихідному валу необхідного крутного моменту за відповідної частоти обертання та максимального рівня енергоефективності. На основі даних про  $S_a$ ,  $\psi$ ,  $V_a(t)$ ,  $u_i$ ,  $M_M(t)$  з урахуванням конструктивних параметрів ТЗ здійснюється визначення моменту опору  $M_{\text{оп}}(t)$  на вихідному валу ТЕУ та частоти обертання вихідного валу  $n_d(t)$ , які, в свою чергу, з

урахуванням інших конструктивних параметрів ТЕУ, є основою для визначення необхідного швидкісного та навантажувального режиму ТЕУ (необхідного крутного моменту  $M_e(t)$ ). Визначені параметри швидкісного та навантажувального режиму роботи ТЕУ з урахуванням відомостей про вид палива та склад свіжого заряду дозволяють сформувати вимоги до управління подачею палива  $G_{\text{пал}}(t)$ , повітря  $G_{\text{пов}}(t)$ , системами запалювання  $\theta(t)$  тощо. На основі сформованих вимог до подачі палива, повітря, випередження запалювання та інших з урахуванням поточної напруги  $U_{\text{мережі}}$  у мережі електрообладнання ТЗ здійснюється формування керівних сигналів до відповідних виконавчих пристроїв: моменту початку і тривалості впорскування  $\tau_{\text{впр}}(t)$  палива паливними форсунками, величини впливу на важіль управління  $\phi_{\text{др}}(t)$ , моменту початку і тривалості керівного імпульсу на котушку запалювання  $\tau_{\text{кз}}(t)$ , тощо.

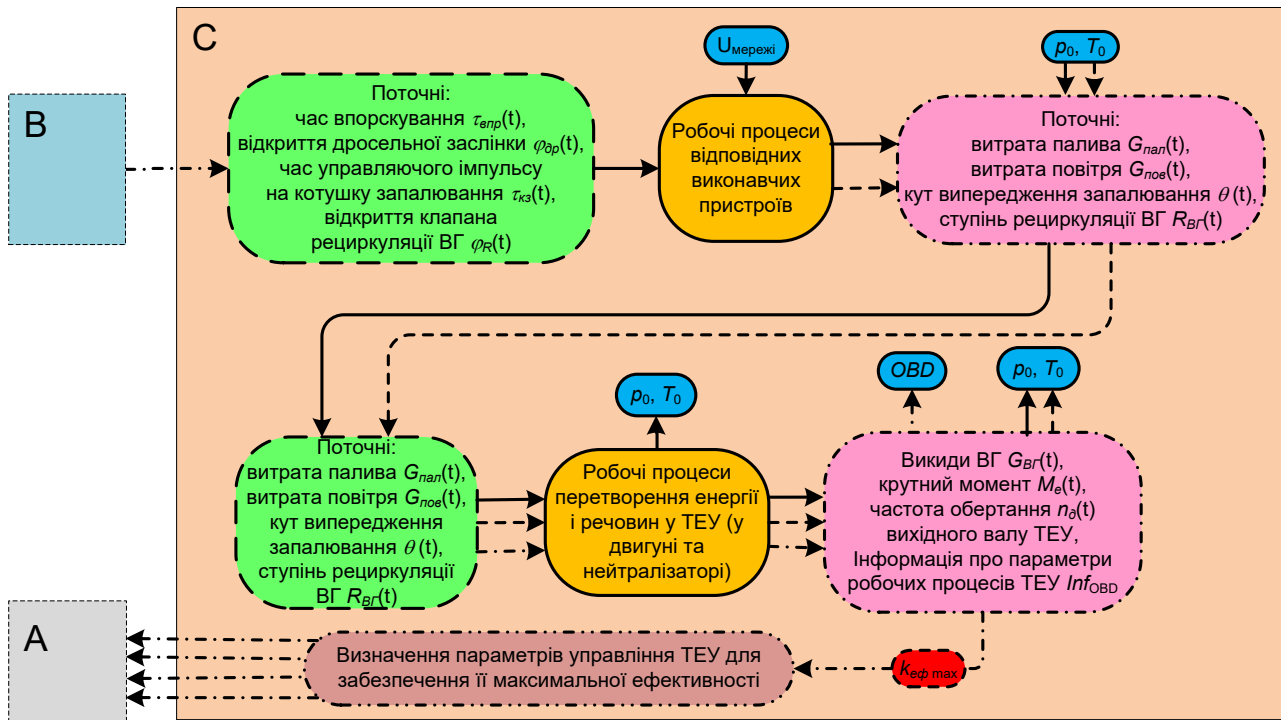


Рис. 5. Деталізована структура фізичної підсистеми системи «ТЕУ-ІСУ»

Процеси фізичної підсистеми С (рис. 5) системи «ТЕУ-ІСУ» полягають у здійсненні робочих процесів відповідних виконавчих пристроїв управління ТЕУ та процесів перетворення енергії та речовин в елементах ТЕУ (у двигуні та системі очистки ВГ) внаслідок реалізації визначених математичною підсистемою керівних сигналів у відповідних виконавчих пристроях управління ТЕУ та процесах енергомасоперетворення в елементах ТЕУ, які забезпечують досягнення на вихідному валу необхідного крутного моменту за відповідної частоти обертання та максимального рівня енергоефективності. Завдяки надходженню до виконавчих пристроїв сигналів, сформованих математичною підсистемою, про  $\tau_{впр}(t)$ ,  $\varphi_{др}(t)$ ,  $\tau_{кз}(t)$ ,  $\varphi_{к}(t)$  тощо, залежно від поточної напруги  $U_{мережі}$  у мережі електрообладнання ТЗ здійснюються робочі процеси, які, відповідно до параметрів стану навколишнього середовища, забезпечують фактичну подачу в ТЕУ необхідної кількості палива, повітря, іскрового розряду в момент запалювання, кількості рециркульованих ВГ тощо. Подані у ТЕУ енергомасові ресурси використовуються у робочих процесах ТЕУ, результатом яких є утворена кількість відпрацьованих газів  $G_{ВГ}(t)$ , що очищується від шкідливих компонентів у системі очистки ВГ та викидається в навколишнє середовище ( $p_0, T_0$ ), розвинутий на вихідному валу

ТЕУ крутний момент  $M_e(t)$  за частоти обертання  $n_d(t)$ , інформація про основні параметри робочих процесів ТЕУ  $Inf_{OBD}$ , яка зчитується системою OBD та використовується для оцінювання відповідності отриманих показників ТЕУ необхідним показникам. На основі  $Inf_{OBD}$  здійснюється загальний зворотний зв'язок системи через коригування окремих параметрів управління відповідно до обмеження  $k_{еф} \Rightarrow \max$ , тобто за умови максимізації загальної ефективності (енергоефективності та ефективності управління).

Загальний критерій ефективності ТЕУ визначимо як середній інтегральний груповий критерій за період часу  $t$ :

$$k_{еф} = \frac{\int \eta(t)dt + \int \eta^{xx}(t)dt}{\int dt}, \quad (1)$$

де  $\eta$  – груповий критерій ефективності ТЕУ в окремому експлуатаційному режимі в поточний момент часу;

$\eta^{xx}$  – груповий критерій ефективності ТЕУ в режимі холостого ходу в поточний момент часу.

Групові критерії визначаються перемноженням окремих критеріїв енергоефективності ТЕУ:

$$\eta = \eta_e \cdot \eta_{H_2O} \cdot \eta_{n_d} \cdot \eta_{\alpha} \cdot \eta_{CO} \cdot \eta_{CO_2} \cdot \eta_{NO_2} \cdot \eta_{C_mH_n}, \quad (2)$$

$$\eta^{xx} = \eta_e^{xx} \cdot \eta_{H_2O} \cdot \eta_{n_d} \cdot \eta_{\alpha} \cdot \eta_{CO} \cdot \eta_{CO_2} \cdot \eta_{NO_2} \cdot \eta_{C_mH_n}, \quad (3)$$

де  $\eta_e, \eta_e^{xx}$  – окремі критерії ефективності безпосереднього перетворення енергії палива в корисну роботу в окремому експлуатаційному режимі чи режимі ялового (холостого) ходу (є, по суті, коефіцієнтами корисної дії ТЕУ або в режимі ялового (холостого) ходу коефіцієнтами перетворення енергії палива в умовну роботу 1 МДж за 1 годину);

$\eta_{H_2O}, \eta_{CO}, \eta_{CO_2}, \eta_{NO_2}, \eta_{C_mH_n}$  – окремі критерії енергоефективності ТЕУ за еквівалентними викидами  $H_2O, CO, CO_2, NO_2, C_mH_n$  (визначаються як відношення еквівалентних викидів відповідних речовин до загальних відносних еквівалентних викидів відпрацьованих газів (ВГ); еквівалентні викиди  $H_2O$  визначають енергоефективність за походженням енергії; еквівалентні викиди інших компонентів визначають відносну безпечність викидів; еквівалентними викидами є сума добутків масових викидів компонентів ВГ на теплові ефекти реакцій утворення або згоряння відповідних компонентів з урахуванням неповноти згоряння палива);

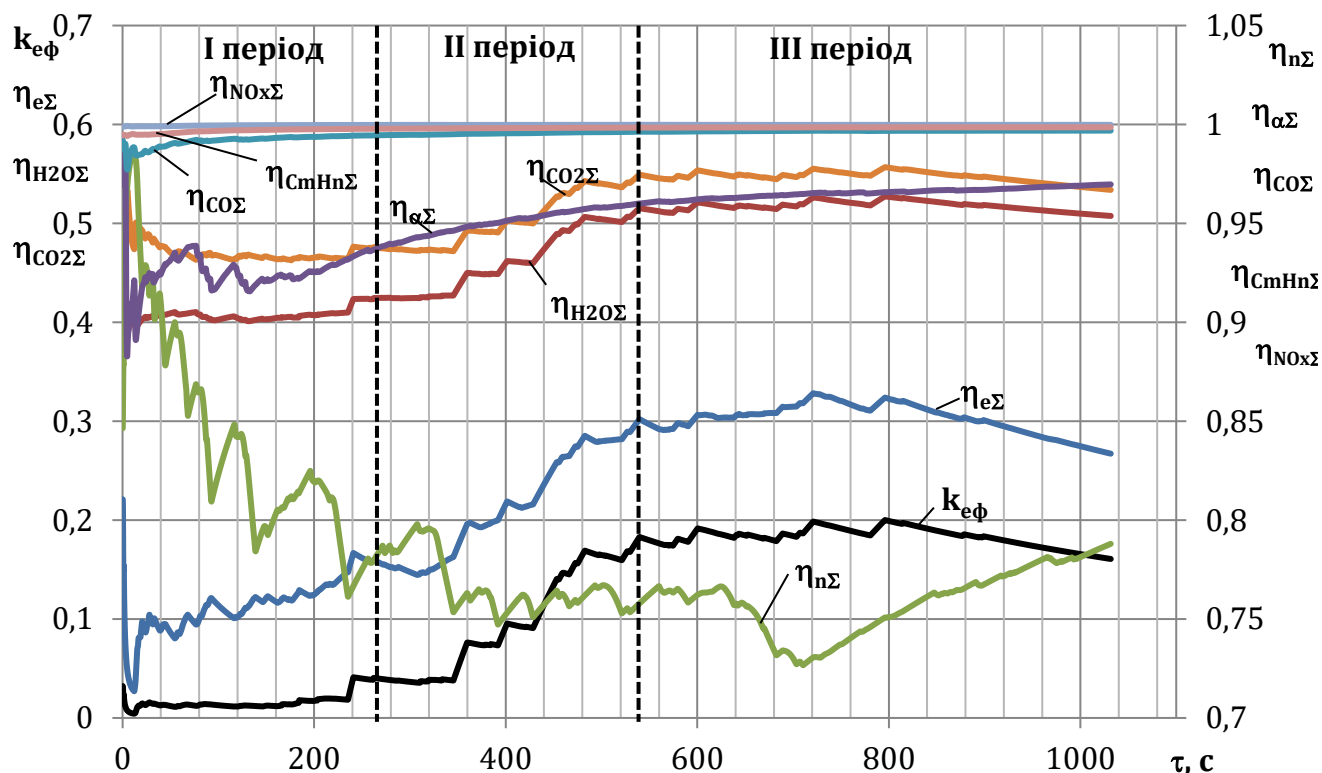
$\eta_{\alpha}, \eta_{n_d}$  – окремі критерії ефективності управління коефіцієнтом надміру повітря  $\alpha$  (ефективністю нейтралізації) та частотою обертання вихідного валу  $n_d$  ТЕУ (визначаються як ступінь досягнення необхідного швидкісного режиму ТЕУ у відповідному

передаточному відношенні трансмісії або складу паливоповітряної суміші).

Приклад оцінювання енергоефективності ТЕУ БОГДАН-21114 з двигуном 4Ч 8,2/7,56 в експлуатаційних режимах, які відповідають міським умовам, за вищенаведеними інтегральними критеріями представлено на рис. 6. Окремі інтегральні критерії енергоефективності отримані за аналогічною до (1) методикою підстановки замість групових окремих критеріїв.

Як видно з представлених залежностей, від моменту початку руху транспортного засобу окремі критерії змінюються відповідно до поточних робочих процесів ТЕУ, які, зі свого боку, суттєво залежать від експлуатаційних режимів. Загалом отримані закономірності є типовими для міських умов експлуатації, для яких час від моменту початку руху транспортного засобу можна умовно розділити на три періоди.

Перший період – це період прогріву та рух із невисокими швидкостями та навантаженнями. В цьому періоді критерії енергоефективності переважно мають нижчі значення. Ефективність перетворення вхідної енергії в корисну роботу ТЕУ знижена внаслідок низької ефективності робочого процесу в умовах низькотемпературного стану елементів енергоустановки та впливу експлуатаційних режимів із низькими навантаженнями та швидкостями. Ефективність нейтралізації та відповідно критерії викидів шкідливих речовин мають нижчі значення внаслідок низької температури елементів системи нейтралізації.



**Рис. 6.** Залежності інтегральних критеріїв енергоефективності ТЕУ від часу з моменту початку руху транспортного засобу

Другий період – це період, коли відбувається перехід до більш енергоефективних експлуатаційних режимів ТЕУ та досягнення робочого температурного стану. Третій період – період руху в найбільш енергоефективних режимах із температурним станом ТЕУ, близьким до оптимального. В цих періодах критерії енергоефективності зростають до вищих значень.

Отримані результати дозволяють встановити також і значимість окремих складових енергоефективності в досягненні загального критерію, що суттєво відрізняє представлену методику від відомих методик оцінювання екологічної безпеки [3] або ефективності експлуатації автомобільних транспортних засобів [9], в яких застосовувались коефіцієнти відносної значимості окремих критеріїв, отримані не безпосередньо, а методом експертних оцінок.

### Висновки

На основі системного підходу сформовано структуру системи управління та критерії оцінювання енергоефективності ТЕУ в експлуатаційних режимах.

Оцінено закономірності зміни окремих та загально інтегральних критеріїв ТЕУ БОГДАН-21114 з двигуном 4Ч 8,2/7,56 в

експлуатаційних режимах, які відповідають міським умовам.

За результатами оцінювання встановлено, що найбільшою мірою загальний критерій енергоефективності визначається ефективністю безпосереднього перетворення енергії палива в корисну роботу, що можна розглядати як базову енергоефективність, а інші окремі критерії змінюють базову енергоефективність відповідно до походження енергії, викидів забруднювальних речовин, ефективності роботи системи нейтралізації та ступеня досягнення оптимального швидкісного режиму ТЕУ, що водночас дає можливість дослідити ефективність застосування різних способів впливу на робочий процес ТЕУ, зокрема застосуванням альтернативних палив та добавок до традиційних палив в експлуатаційних режимах за визначеним критерієм енерго-ефективності.

### References

1. Hutarevych, Yu. F. (1986). *Znyzhennia shkidlyvykh vykydiv i vytraty palyva dvyhunamy avtomobiliv shliakhom optymizatsii ekspluatatsiinykh faktoriv* (Unpublished doctoral dissertation). Kyiv Automobile and Highway Institute, Kyiv, Ukraine.

2. Holovchuk, A. F. (1992). *Polipshennia palyvnoi ekonomichnosti ta znyzhennia dymnosti traktornykh dyzeliv shliakhom udoskonalennia systemy avtomatychnoho rehuliuвання* (Unpublished doctoral dissertation). Dnipropetrovsk Agrarian University, Dnipropetrovsk, Ukraine.

3. Mateichyk, V. (2006). *Metody otsiniuvannia ta sposoby pidvyshchennia ekolohichnoi bezpeky dorozhnikh transportnykh zasobiv: monohrafiia*. Kyiv, Ukraine: National Transport University.

4. Lisoval, A.A. (2010). *Teoretychni osnovy upravlinnia podacheiu palyva i povitria v dyzeliakh z hazoturbinnym nadduvom* (Unpublished doctoral dissertation). National Transport University, Kyiv, Ukraine.

5. Kanylo, P. (2013). *Avtotransport. Palyvno-ekolohichni problemy i perspektyvy: monohrafiia*. Kharkiv, Ukraine: Kharkiv National Automobile and Highway University.

6. Hrytsuk, I. V. (2016). *Kontsepsiia zabezpechennia optymalnoho temperaturnoho stanu dvyhuniv i transportnykh zasobiv v umovakh ekspluatatsii* (Doctoral dissertation, Kharkiv National Automobile and Highway University,

Kharkiv, Ukraine). Retrieved from <https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/1859>

7. Voronkov, O. I. (2017). *Metodolohiia orhanizatsii robochoho protsesu pnevmodyhuna kombinovanoi enerhetychnoi ustanovky miskoho avtomobilia* (Doctoral dissertation, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine). Retrieved from <https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/2262>

8. Klymenko, O. A. (2021). *Systemne upravlinnia pidvyshchenniam efektyvnosti vykorystannia enerhii ta zmeshchenniam zabrudnenia atmosferного povitria dorozhnimi transportnymi zasobamy* (Doctoral dissertation, National Transport University, Kyiv, Ukraine). Retrieved from

[http://diser.ntu.edu.ua/Klymenko\\_dis.pdf](http://diser.ntu.edu.ua/Klymenko_dis.pdf)

9. Symonenko, R. V. (2021). *Pidvyshchennia efektyvnosti ekspluatatsii kolisnykh transportnykh zasobiv na osnovi intelektualnykh telematychnykh tekhnolohii* (Doctoral dissertation, National Transport University, Kyiv, Ukraine). Retrieved from [http://diser.ntu.edu.ua/Symonenko\\_dis.pdf](http://diser.ntu.edu.ua/Symonenko_dis.pdf)

© М.С. Галактіонов, аспірант кафедри  
прикладної екології  
ORCID: 0009-0006-7949-5713  
e-mail: nikolay@galaktionov.com  
© В.І. Бредун, канд. техн. наук, доцент  
ORCID: 0000-0002-8214-3878  
(Національний університет  
«Полтавська політехніка  
імені Юрія Кондратюка»)

© Mykola Halaktionov, Postgraduate at  
the Department of Applied Ecology  
ORCID: 0009-0006-7949-5713  
e-mail: nikolay@galaktionov.com  
© Viktor Bredun, Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor  
ORCID: 0000-0002-8214-3878  
(National University  
«Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»)

## РОЛЬ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ У МІНІМІЗАЦІЇ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ

### THE ROLE OF INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS IN MINIMIZING AIR POLLUTION

**Анотація.** Забруднення атмосферного повітря автотранспортом є однією з найактуальніших екологічних проблем сучасних міст, особливо промислових центрів, таких як Кривий Ріг. Висока інтенсивність руху транспорту, перевантаженість доріг та неефективне керування трафіком призводять до підвищення концентрацій шкідливих речовин, що негативно впливають на здоров'я населення та стан навколишнього середовища. У зв'язку з цим виникає потреба у впровадженні інноваційних підходів до регулювання транспортних потоків із використанням сучасних технологій, зокрема інтелектуальних транспортних систем (ІТС).

Досліджено можливості застосування ІТС для мінімізації впливу автотранспорту на довкілля. Проаналізовано основні методи та інструменти, що використовуються в ІТС, включаючи системи моніторингу трафіку, адаптивне керування світлофорним регулюванням, математичні моделі прогнозування рівня забруднення повітря та технології штучного інтелекту для аналізу транспортних потоків. Особливу увагу приділено розробці комплексної системи, яка інтегрує управління дорожнім рухом із системами екологічного моніторингу, що дає змогу оперативно реагувати на зміну ситуації та вживати заходів для зниження рівня викидів.

Запропонована схема оптимізації транспортних потоків базується на кількох ключових етапах: збиранні вихідних даних за допомогою датчиків і камер спостереження, обробці інформації за допомогою аналітичних алгоритмів, регулюванні дорожнього руху на основі екологічних показників та оцінці ефективності впроваджених заходів. Використання такої системи дозволяє зменшити кількість заторів, скоротити час перебування транспорту в режимі очікування та знизити рівень забруднення повітря.

Реалізація ІТС у міському середовищі сприятиме не лише екологічній безпеці, а й підвищенню комфорту мешканців, ефективності роботи громадського транспорту та загальному покращенню транспортної інфраструктури. Комплексний підхід до оптимізації дорожнього руху може стати важливим кроком у напрямі сталого розвитку міст та зменшення негативного впливу автотранспорту на навколишнє середовище.

**Ключові слова:** забруднення повітря, оптимізація транспортних потоків, викиди автотранспорту, інтелектуальні транспортні системи, екологічний вплив, міський трафік.

**Abstract.** Air pollution caused by motor vehicles is one of the most pressing environmental issues in modern cities, especially in industrial centers such as Kryvyi Rih. High traffic intensity, road congestion, and inefficient traffic management contribute to increased concentrations of harmful substances, negatively affecting public health and the environment. This necessitates the implementation of innovative approaches to traffic regulation using modern technologies, particularly intelligent transportation systems (ITS).

This paper explores the potential application of ITS to minimize the environmental impact of motor vehicles. The main methods and tools used in ITS are analyzed, including traffic monitoring systems, adaptive traffic light control, mathematical models for predicting air pollution levels, and artificial intelligence technologies for traffic flow analysis. Special attention is given to the development of a comprehensive system that integrates traffic management with environmental monitoring systems, allowing for real-time response to changing conditions and the implementation of measures to reduce emissions.

The proposed traffic flow optimization scheme is based on several key stages: data collection using sensors and surveillance cameras, data processing through analytical algorithms, traffic regulation based on environmental indicators, and evaluation of the effectiveness of implemented measures. The use of such a system reduces congestion, shortens vehicle idle time, and lowers air pollution levels.

The implementation of ITS in urban environments will contribute not only to environmental safety but also to improved comfort for residents, increased efficiency of public transport, and overall enhancement of transportation infrastructure. A comprehensive approach to traffic optimization can become a crucial step toward sustainable urban development and reducing the negative impact of motor vehicles on the environment.



**Keywords:** *intelligent transportation systems, traffic flow optimization, emission prediction, environmental monitoring, adaptive traffic control, urban transport.*

## Вступ

У сучасному світі, де технологічний прогрес розвивається надзвичайно швидко, питання ефективного регулювання дорожнього руху у великих містах стає все більш актуальним. Особливо це стосується таких промислових центрів, як Кривий Ріг, де інтенсивність руху транспорту є досить високою. Транспорт є одним із потужних джерел забруднення атмосферного повітря, особливо у великих містах. Викиди шкідливих речовин від автомобілів, таких як оксиди азоту, оксид вуглецю, вуглеводні та тверді частки, негативно впливають на здоров'я людей та екологічну ситуацію загалом.

Впровадження новітніх технологій, таких як інтелектуальні транспортні системи (ІТС), може стати ключовим фактором не тільки для оптимізації дорожнього руху в Кривому Розі, а й для зменшення негативного впливу транспорту на навколишнє середовище. ІТС включають різноманітні рішення, від систем моніторингу трафіку в реальному часі до адаптивних світлофорів, які можуть змінювати свій режим роботи залежності від завантаженості доріг.

**Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій.** Оптимізація автомобільного руху є ключовим інструментом для зменшення негативного впливу на екологію, тому це питання активно досліджується у багатьох наукових роботах. Для досягнення різних цілей, зокрема зменшення викидів від транспорту, використовуються різноманітні методи та технології. Серед них – ІТС, адаптивне керування рухом, екологічні зони, а також розвиток громадського та альтернативного транспорту. Особлива увага в багатьох дослідженнях приділяється розвитку інтелектуальних транспортних систем [1-3].

Вивчення поєднання інтелектуальних транспортних систем та штучного інтелекту дає змогу більш ефективно аналізувати транспортні потоки, прогнозувати затори, оптимізувати роботу світлофорів і мінімізувати шкідливі викиди. Це сприяє створенню екологічно сталих та безпечних міських транспортних систем [2].

Використання інтелектуальних транспортних систем для вирішення проблем зміни клімату, зокрема викидів парникових газів, також є предметом досліджень [3].

У наукових роботах розглядаються підходи до управління транспортними потоками та системи паркування [4, 5].

З огляду на постійне збільшення кількості автомобілів і різноманітність транспортних потоків, впровадження ІТС є надзвичайно важливим для розробки стратегій зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.

**Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми.** Незважаючи на можливості сучасних технологій ІТС та системи моніторингу якості повітря часто існують окремо, належним чином не інтегровані. Особливо гостро ця проблема відчувається в таких промислових містах, як Кривий Ріг, де стара система регулювання дорожнього руху не враховує комплексно дані про транспортні потоки та рівень забруднення повітря.

Через відсутність інтеграції, ефективність заходів із покращення екологічної ситуації залишається обмеженою. Наприклад, інформація про завантаженість доріг, типи транспорту та їхні маршрути не використовується для прийняття рішень щодо зменшення викидів. В умовах значного промислового навантаження, яке характерне для Кривого Рогу, неефективність традиційних методів регулювання дорожнього руху лише посилює екологічні ризики.

Для вирішення цієї проблеми необхідно створити єдину платформу, яка б об'єднала дані про транспорт, забруднення повітря та промислові викиди. Це дасть змогу аналізувати вплив транспорту на екологію та оперативно реагувати на зміни ситуації, замість того, щоб покладатися на застарілі методи.

**Постановка завдання.** Це дослідження має на меті створити єдину систему, яка б допомагала оптимізувати рух транспорту, враховуючи при цьому екологічну ситуацію в Кривому Розі. *Головна мета* – об'єднати ІТС системи з системою екологічного моніторингу міста.

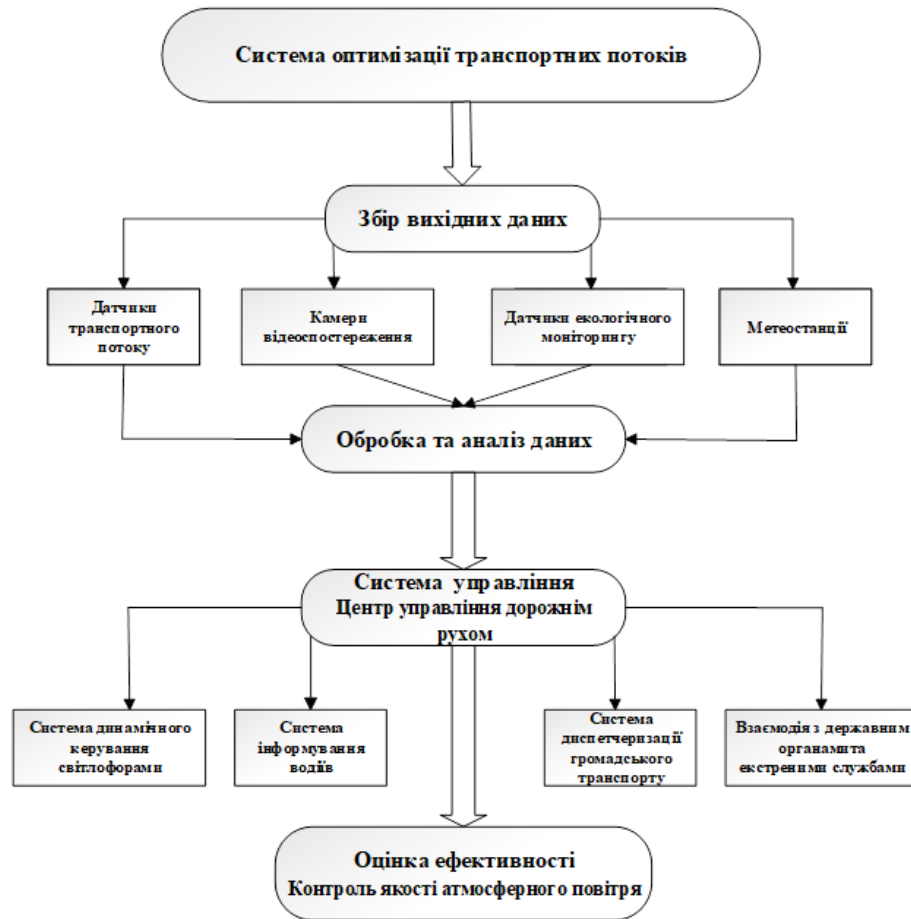


### Основна частина

Система оптимізації транспортних потоків – це комплексний підхід, який включає різноманітні заходи, інструменти та технології для досягнення максимальної ефективності використання дорожньої інфраструктури. Її головна мета – зменшити затори на дорогах,

а й мінімізувати його негативний вплив на навколишнє середовище, що є особливо важливим для промислових міст, таких як Кривий Ріг.

Оптимізація транспортних потоків є складним завданням через численні обмеження, що ускладнюють формалізацію проце-



**Рис. 1.** Блок-схема «Система оптимізації транспортних потоків»

скоротити час, який люди витрачають у дорозі, та мінімізувати негативний вплив транспорту на навколишнє середовище.

На жаль, у таких містах як Кривий Ріг, досі часто використовуються застарілі методи регулювання дорожнього руху, які не враховують сучасні технології та вимоги екологічної безпеки. Тому існує нагальна потреба у переході на нові, більш ефективні системи оптимізації транспортних потоків.

З огляду на сучасні технології управління дорожнім рухом та актуальні вимоги до екологічної стійкості, було розроблено схему системи оптимізації транспортних потоків (рис. 1). Вона базується на комплексному аналізі даних про транспортні потоки та застосуванні інтелектуальних алгоритмів. Це дає змогу не тільки ефективно регулювати рух транспорту,

сів управління рухом та часто призводить до використання емпіричних методів. У цьому контексті, ІТС є перспективним напрямом, що дає змогу вирішувати різноманітні завдання, зокрема:

1. Оцінка рівня забруднення: ІТС можуть збирати дані про інтенсивність руху, погодні умови та інші фактори, що впливають на рівень забруднення повітря, і на основі цієї інформації оцінювати поточний стан екологічної ситуації.

2. Застосування превентивних заходів: ІТС можуть використовувати отриману інформацію для застосування превентивних заходів, спрямованих на зменшення викидів. Наприклад, вони можуть регулювати режими роботи світлофорів для оптимізації руху та зменшення заторів або ж рекомендувати водіям

альтернативні маршрути, щоб зменшити навантаження на найбільш забруднені ділянки доріг.

3. Контроль якості повітря в реальному часі: ІТС забезпечують можливість контролю якості повітря наживо, що є особливо важливим для перевантажених ділянок дорожньої мережі, де рівень забруднення може перевищувати допустимі норми.

Таким чином, ІТС є важливим компонентом сучасної транспортної інфраструктури, спрямованим на підвищення екологічної ефективності та забезпечення комфорту і безпеки для всіх учасників дорожнього руху.

Система оптимізації руху складається з кількох ключових етапів, кожен з яких має вирішальне значення для ефективного функціонування дорожньої мережі та зниження екологічного навантаження:

#### 1. Збір вихідних даних

На цьому етапі здійснюється моніторинг транспортних потоків за допомогою датчиків, камер відеоспостереження, GPS-трекерів та інших сенсорів [6-8]. Паралельно збираються відомості про погодні умови та рівень забруднення повітря для врахування зовнішніх факторів [9].

#### 2. Обробка та аналіз інформації

Отримані дані надходять до аналітичних систем, де вони обробляються за допомогою інтелектуальних алгоритмів та спеціалізованого програмного забезпечення. Це дає змогу визначити інтенсивність руху, виявити затори та спрогнозувати потенційні проблеми на дорогах.

#### 3. Система управління

На основі аналізу даних система генерує оптимальні маршрути, регулює роботу світлофорів і пропонує альтернативні напрямки руху для мінімізації заторів. Також враховуються екологічні показники, що дає змогу зменшити рівень викидів забруднюючих речовин. Оптимізовані рішення передаються до центрів управління дорожнім рухом, диспетчерських служб громадського транспорту та відображаються на інформаційних табло або в мобільних застосунках для водіїв та пішоходів [10].

#### 4. Оцінка ефективності

Завершальний етап передбачає оцінку ефективності впроваджених заходів шляхом аналізу змін у транспортних потоках, рівня заторів і обсягів шкідливих викидів. Це дає змогу

коригувати стратегію оптимізації та підвищувати її результативність.

Поетапна реалізація цих заходів є частиною комплексного підходу до розвитку міської транспортної інфраструктури. Такий підхід не лише розв'язує актуальні проблеми дорожнього руху, а й створює умови для подальшої модернізації транспортної системи відповідно до екологічних стандартів і зростаючих потреб міста.

Завдяки впровадженню інтелектуальних рішень у сфері управління трафіком, місто отримає не лише ефективну транспортну систему, а й покращить екологічну ситуацію, забезпечуючи комфортніші та здоровіші умови життя для мешканців.

### Висновки

Запропонована схема оптимізації дорожнього руху – це інтегрований підхід, який поєднує моніторинг, аналіз даних, прогнозування та реалізацію рішень для зменшення негативного впливу транспорту на навколишнє середовище, особливо в умовах промислового міста, яким є Кривий Ріг.

Система передбачає постійний контроль транспортних потоків та якості повітря, використання сучасних аналітичних інструментів для виявлення зон підвищеного забруднення та розробки ефективних рішень.

Реалізація таких підходів дає змогу не лише зменшити рівень забруднення атмосфери, а й підвищити ефективність міського трафіку, поліпшити якість життя мешканців та сприяти сталому розвитку. Особлива увага приділяється специфічним викликам промислових регіонів, де концентрація шкідливих викидів є найбільшою.

Досягнення максимального ефекту можливе завдяки тісній взаємодії місцевої влади, наукових установ і громадськості, а також реалізації відповідних організаційно-правових і технічних заходів. Такий підхід сприятиме формуванню екологічно безпечного та комфортного міського середовища.

### References

1. Kliuiev, S. A., Sihonin, A. E., & Tsymbal, S. V. (2024). Development of intelligent transport systems. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 18(2), 80–86. doi:10.31649/2413-4503-2023-18-2-80-86
2. Sharma, S., & Mishra, S. (2012). *Intelligent Transportation Systems-Enabled Optimal*

Emission Pricing Models for Reducing Carbon Footprints in a Bimodal Network. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 17(1), 54–64. doi:10.1080/15472450.2012.708618

3. Gkritza, K., & Karlaftis, M. G. (2013). Intelligent Transportation Systems Applications for the Environment and Energy Conservation (Part 1). *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 17(1), 1–2. doi:10.1080/15472450.2013.747826

4. ALEKO, D. R., & Djahel, S. (2020). An Efficient Adaptive Traffic Light Control System for Urban Road Traffic Congestion Reduction in Smart Cities. *Information*, 11(2). doi:10.3390/info11020119

5. Matuschenko K. S. (2020). Artificial intelligence driving the development of autonomous vehicles. Retrieved from [https://informatika.udpu.edu.ua/?page\\_id=6731](https://informatika.udpu.edu.ua/?page_id=6731)

6. Dynamic Road Traffic Signals Control

System with help of IR Sensors. (b. d.). Vzyato z <https://www.elprocus.com/dynamic-road-traffic-signal-control/>

7. DOZOR - systema kontrolyu ta vy-yavleniya pravoporushen' | IPCOM. (b. d.). Vzyato z <https://ipcom.ua/uk/dozor>

8. GPS monitorynh transportu. (b. d.). Vzyato z <https://skt-globus.com.ua/gps-monitoring-transportu/>

9. Yakist' povitrya u misti Kryvyy Rih, Dnipropetrovs'ka oblast' onlayn: karta yakosti atmosferneho povitrya Ukrayiny - SaveEcoBot. (b. d.). Vzyato z <https://www.saveecobot.com/maps/kryvyi-rih>

10. Malygin, I., Seliverstov, Y., Seliverstov, S., Silnikov, M., Muksimova, R., Gergel, G., ... Fahmi, S. (2020). Mobile Technologies in Intelligent Transportation Systems. 384–391. doi:10.1007/978-3-030-37436-5\_33

УДК 629.113/.115; 534.836.2; 534.286; 621.43.065

DOI: 10.33868/0365-8392-2025-2-283-38-42

© В. В. Федоров, канд. техн. наук, доцент,  
ORCID:0000-0002-1085-5112,

e-mail: fedorov.volodymyr@gmail.com;

© О. А. Корпач, канд. техн. наук, доцент,  
ORCID:0000-0002-2496-4395,

e-mail: korpach1988@gmail.com;

© Д. М. Ященко, канд. техн. наук, доцент,  
ORCID:0000-0003-3674-0089,

e-mail: y\_d@ukr.net

(Національний транспортний університет)

© Volodymyr Fedorov, PhD, Associate Professor,  
ORCID:0000-0002-1085-5112,

e-mail: fedorov.volodymyr@gmail.com;

© Oleksii Korpach, PhD, Associate Professor,  
ORCID:0000-0002-2496-4395,

e-mail: korpach1988@gmail.com;

© Dmytro Yashchenko, PhD, Associate Professor,  
ORCID:0000-0003-3674-0089,

e-mail: y\_d@ukr.net

(National Transport University)

## ПОЛІПШЕННЯ МАСКУВАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БРОНЕАВТОМОБІЛЯ «БАРС-8» ШЛЯХОМ ЗНИЖЕННЯ ЙОГО РІВНЯ ЗОВНІШНЬОГО ШУМУ

### IMPROVING THE CAMOUFLAGE PROPERTIES OF THE BARS-8 ARMORED CAR BY REDUCING ITS EXTERNAL NOISE LEVEL

**Анотація.** До військових автомобілів, крім загальновідомих виробничих, експлуатаційних, споживчих вимог та вимог безпеки, висувують також специфічні вимоги, зокрема щодо балістичного та протимінного захисту, здатності до маскування. Маскування – це комплекс заходів, спрямованих на приховування своїх військ від спостереження супротивника. У маскуванні реалізується найважливіший закон війни: «Не виявив – не вразив ціль». Маскувати – значить робити непомітними, невидимими для супротивника військові об'єкти. Це досягається за допомогою впливу на психічну діяльність противника з метою породити в нього ілюзії сприйняття. Вони можуть бути: зорові, звукові, кінестетичні. До звукових відносять шумові перешкоди, в яких необхідно приховати шум бойової техніки або «тиху» військову техніку з низьким рівнем зовнішнього шуму. У цій роботі розглядається поліпшення маскувальних властивостей військового автомобіля, які є вкрай важливими та залежать від низки факторів: габаритних розмірів, покриття корпусу (термічне випромінювання) та рівня зовнішнього шуму. Один із найбільших шумів автомобілів – шум відпрацьованих газів двигунів внутрішнього згорання, який зменшують за допомогою відповідних глушників. Для військового автомобіля є доцільним створення нового глушника шуму, який принципово відрізнявся б від наявних. Наведено розроблений глушник шуму для бронеавтомобіля «Барс-8». Для розробки глушника за основу було взято популярну в оптиці модель абсолютно чорного тіла у вигляді ізольованої макропорожнини з малим отвором: промінь, потрапивши крізь отвір у порожнину, зазнає багаторазового відбиття, частково поглинається під час кожного з них і практично не повертається звідти. У розробленому глушнику «чорна дірка» забезпечується багаторазове відбиття звукових хвиль від внутрішніх поверхонь сферичної форми. Розроблено математичну модель роботи цього глушника, яка базується на врахуванні багатократного відбиття звукових хвиль від поверхні та коефіцієнта звукопоглинання поверхонь глушника. Встановлено, що ефективність глушника в зоні низьких частот становить 23 дБ. Спрогнозовано залежність рівня зовнішнього шуму бронеавтомобіля «Барс-8» від швидкості руху.

**Ключові слова:** бронеавтомобіль, «Барс-8», шум, маскування, глушник шуму, відпрацьовані гази, абсолютно чорне тіло, чорна дірка, двигун, магістральний цикл.

**Abstract.** Military vehicles, in addition to well-known production, operational, consumer and safety requirements, are also subject to specific requirements, in particular regarding ballistic and anti-mine protection, camouflage ability. Camouflage is a set of measures aimed at hiding one's troops from enemy observation. In camouflage, the most important law of war is realized: "If you don't detect it, you don't hit the target." To camouflage means to make military objects imperceptible, invisible to the enemy. This is achieved by influencing the enemy's mental activity in order to create illusions of perception. Such illusions include: visual, sound, kinesthetic. Sound barriers include noise barriers, in which it is necessary to hide the noise of military equipment or "quiet" military equipment with a low level of external noise. This work examines the improvement of camouflage properties of a military vehicle, which are extremely important and in turn depend on a number of factors: overall dimensions, body coating (thermal radiation) and external noise level. One of the biggest noises of cars is the noise of exhaust gases from internal combustion engines, which is reduced with the help of appropriate mufflers. For a military vehicle, it is expedient to create a new muffler, which would be fundamentally different from the existing ones. The developed silencer for the armored car "Bars-8" is given. When developing the muffler, the popular in optics model of an absolutely black body in the

form of an isolated macrocavity with a small hole was taken as a basis: the beam, having entered the cavity through the hole, undergoes multiple reflections, is partially absorbed during each of them and practically does not return from there. The developed muffler "black hole" ensures multiple reflection of sound waves from the internal surfaces of a spherical shape. A mathematical model of the operation of this muffler was developed, which is based on taking into account the multiple reflection of sound waves from the surface and the sound absorption coefficient of the muffler surfaces. It was established that the muffler efficiency in the low frequency range is 23 dB. A forecast of the dependence of the external noise level of the Bars-8 armored car on the speed of movement was made.

**Keywords:** armored car, "Bars-8", noise, masking, silencer, exhaust gases, black body, black hole, engine, main cycle.

### Вступ

Однією з обов'язкових умов ведення сучасної війни є ефективне використання засобів маскування, за принципом «війна – мистецтво обману». Це стосується як особового складу, так і військової техніки. Свою увагу ми зосередимо на такому виді військової техніки, як броневий автомобіль, а саме – на броневому автомобілі «Барс-8». З метою поліпшення маскувальних властивостей останнього нами бу-

ло розроблено високо-ефективний глушник шуму відпрацьованих газів ДВЗ, завдяки чому прогнозується суттєве зменшення рівня зовнішнього шуму цього броневий автомобіля.

### Об'єкт дослідження – броневий автомобіль «Барс-8»

Зменшення зовнішнього шуму розглянуто на базі броневий автомобіля «Барс-8» (рис. 1) [1].



**Рис. 1.** Броневий автомобіль «Барс-8»

З метою зниження рівня зовнішнього шуму нами розроблений глушник шуму відпрацьованих газів ДВЗ «чорна дірка» [2].

Глушник є сферою радіусом  $R$  (рис. 2), до якої входять два концентричні патрубки з радіусами  $r_1$  (вхідний) і  $r_2$  (вихідний). Між цими розмірами виконується співвідношення

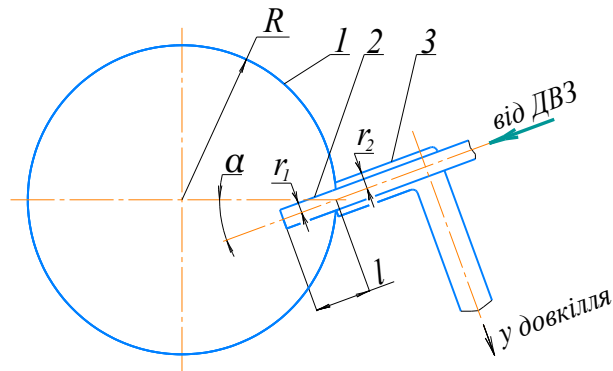
$$r_1 < r_2 \ll R.$$

З огляду на факт, що  $r_1 \ll \lambda$ , отвір вхідного патрубка працює як точкове джерело хвиль, яке випромінює майже симетрично в

усі боки. Тому кут нахилу патрубків не має принципового значення. З цієї ж причини не варто розмішувати вихідний отвір у безпосередній близькості із вхідним, щоб виключити пряму передачу звуку по найкоротшому шляху. Розв'язанням цієї проблеми може бути висування впускного патрубка в напрямку до центру сфери на деяку відстань  $l$ , таку що

$$r_1 \ll l \ll R.$$





**Рис. 2.** До математичної моделі розробленого глушника шуму: 1 – корпус глушника; 2, 3 – вхідний та вихідний патрубки відповідно

Для випадку середніх частот, коли  $\lambda \approx R$ , а тим паче високих, коли  $\lambda \ll R$ , закон Паскаля в об'ємі камери глушника вже не виконується, і тому прямої передачі тиску між вхідним і вихідним патрубком немає. Тоді треба врахувати можливість багатократних відбивань звукових хвиль від стінок, кожне з яких супроводжується частковим поглинанням. Частина відбитої хвилі потрапляє у вікно вихідного патрубка, здійснюючи свій внесок у звуковий тиск на виході з глушника. Розрахуємо результуючу інтенсивність звуку на виході з глушника. З огляду на те, що звукові хвилі переважно не когерентні, можемо додавати їхню енергію у вихідному патрубку.

Для деякого спрощення моделі покладемо, що кінець вхідного патрубка доходить до середини сферичної камери глушника, тобто

$$r_1 \ll l \approx R. \quad (1)$$

Оскільки співвідношення  $r_1 \ll \lambda$ , як і раніше, виконується практично на всіх робочих частотах, звукову хвилю, що поширюється від кінця вхідного патрубка, можна вважати сферично симетрично. З огляду на (1), ця хвиля буде поширюватись також симетрично до поверхні камери.

Нехай із кожним квантом звуку в камеру глушника із вхідного патрубка потрапляє початкова енергія звукових коливань і становить  $E_0$ . В умовах симетричного поширення ця хвиля рівномірно розподіляється по поверхні камери площею  $S = 4\pi R^2$  (за винятком

площі перерізу вхідного патрубка  $S_1 = 4\pi r_1^2$ ). При цьому на вікно вихідного патрубка площею  $S_2$  потрапляє частина енергії

$$\Delta E_0 = E_0 \frac{S_2}{S - S_1}. \quad (2)$$

Для співвідношення площ у рівнянні (2) зручно ввести позначення

$$k = \frac{S_2}{S - S_1}. \quad (3)$$

Тобто  $\Delta E_0 = k \cdot E_0$ .

Решта енергії, яка залишається в камері та потрапляє на її стінки, становить:

$$E_0 - \Delta E_0 = E_0 - k \cdot E_0 = E_0(1 - k). \quad (4)$$

Нехай коефіцієнт поглинання поверхні  $\alpha$  дорівнює відношенню поглинутої енергії звукових хвиль до хвилі, що падає. Варто зазначити, що це визначення відрізняється від подібного розмірного коефіцієнту, який входить у формулу для визначення часу реверберації [3].

Тоді з енергії, заданої формулою (4), від стінок камери відіб'ється:

$$E_1 = E_0(1 - k)(1 - \alpha).$$

Отже, відповідно до співвідношення (2), після першого відбивання на вікно вихідного патрубка потрапляє така порція енергії

$$\Delta E_1 = k \cdot E_1 = E_0 \cdot k(1 - k)(1 - \alpha). \quad (5)$$

Продовжуючи міркування щодо наступних відбивань, отримаємо формулу для порції енергії звукової хвилі, яка потрапляє на вікно вихідного патрубку після довільного  $n$ -го відбивання:

$$\Delta E_n = k \cdot E_n = E_0 \cdot k(1-k)^n(1-\alpha)^n.$$

Формула (5) є не чим іншим, як формулою для  $n$ -го члена геометричної прогресії, для якої перший член  $\alpha_1 = E_0 k$ , а знаменник  $q = (1-k) \cdot (1-\alpha) < 1$ . Тоді результуючу енергію звукової хвилі на виході глушника знайдемо як суму нескінченної спадної геометричної прогресії,  $s = \alpha_1 / (1-q)$ :

$$E = \sum_{n=0}^{\infty} \Delta E_n = \frac{E_0 \cdot k}{1 - (1-k) \cdot (1-\alpha)} = \frac{E_0 \cdot k}{k + \alpha(1-k)} \quad (6)$$

У цьому випадку не є істотним, який конкретно індекс (0 чи 1) приписано 1-му члену прогресії, оскільки початок нумерації умовний.

З огляду на значення величин у формулі (3), можна вважати  $k \ll 1$ . Тоді співвідношення (6) спрощується до вигляду

$$E = E_0 \frac{k}{k + \alpha}. \quad (7)$$

Враховуючи зв'язок інтенсивності звуку з енергією  $I_0 = E_0 / S_1$  та  $I = E / S_2 \approx E / S_1$ , знайдемо остаточне співвідношення для рівня гасіння шуму:

$$\Delta L = L - L_0 = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 10 \lg \frac{k}{k + \alpha}$$

де  $\alpha$  – безрозмірний коефіцієнт поглинання матеріалу стінок камери глушника, коефіцієнт  $k$  визначається співвідношенням

$$k = \frac{S_2}{S - S_1} = \frac{r_2^2 - r_1^2}{4R^2 - r_1^2} \approx \frac{r_1^2}{4R^2 - r_1^2}.$$

За умови підстановки для коефіцієнту поглинання значення  $\alpha = 0,4$ , а також для радіусів  $R$  і  $r_1$  значень 20 і 3 см, відповідно, з формули (7) отримуємо рівень гасіння шуму  $\Delta L = L - L_0 \approx -19 \text{ дБ}$ . Слід зазначити, що ця оцінка є досить оптимістичною, але виникає з дещо ідеалізованого сценарію. В реальності на деяких частотах можуть виникати резонанси, внаслідок чого можливе їхнє підсилення. З отриманих співвідношень видно, що підвищення ефективності глушника можливе завдяки збільшенню розміру камери, а також вибору матеріалу стінок із високим звукопоглинанням. Зокрема, перспективним виглядає застосування ребристої структури внутрішніх стінок.

Цікаво також, що отримані теоретичні формули не передбачають частотної залежності для ефективності глушника. В реальності на високих частотах вона може бути вища (близька до отриманого теоретичного значення), оскільки застосована модель є ближчою до реальності. Коли умова  $\lambda \ll R$  не виконується, і довжина хвилі стає одного порядку з розмірами системи, починає працювати низькочастотне наближення ( $\lambda \gg R$ ). Тоді маємо

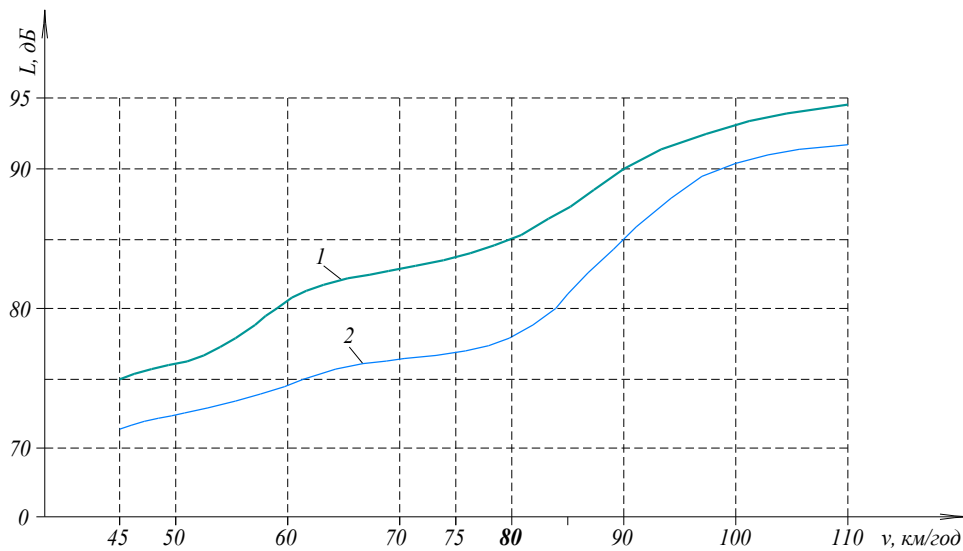
$$k = \frac{(3 \cdot 10^{-2})^2}{4 \cdot (20 \cdot 10^{-2})^2 - (3 \cdot 10^{-2})^2} \approx 5,66 \cdot 10^{-3};$$

$$\Delta L = 10 \lg \frac{5,66 \cdot 10^{-3}}{5,66^{-3} + 0,2} = -15,6 \text{ дБ} \\ (\text{для } \alpha = 0,2);$$

$$\Delta L = 10 \lg \frac{5,66 \cdot 10^{-3}}{5,66^{-3} + 0,4} = -18,6 \text{ дБ} \\ (\text{для } \alpha = 0,4).$$

На **рис. 3** показана прогнозована залежність рівня зовнішнього шуму бронеавтомобіля «Барс-8» від швидкості руху (на магістральному циклі) з наявним та розробленим глушником.





**Рис. 3.** Залежність рівня зовнішнього шуму бронеавтомобіля «Барс-8» від швидкості руху (на магістральному циклі на дорозі): 1 – із наявним глушником; 2 – з розробленим глушником

### Висновки

Розроблено математичну модель для визначення акустичної ефективності розробленого глушника в зоні середніх (СЧ) та високих частот (ВЧ). Відповідно до цієї моделі встановлено ефективність глушника в зоні СЧ і ВЧ: близько 19 дБ.

В результаті впровадження розробленого глушника шуму прогнозується зменшення рівня зовнішнього шуму бронеавтомобіля «Барс-8» на 3 – 6 дБА в діапазоні швидкостей руху 45 – 110 км/год.

### References

1. Ukrainian Military Pages. (2019). "Bars-8". Retrieved from <https://www.ukrmilitary.com/2019/07/bars8.html>.
2. Utility model patent No. 79130 UA, IPC (2006) F01N 1/06. Exhaust silencer / V. V. Fedorov, V. P. Sakhno; National Transport University. – Application 09.02.2005; Publ. 05/25/2007; Bul. No. 7.
3. Fedorov V. V. (2008). Akustyka avtomobilya. Prynt [Car acoustics: Print]. Kyiv, 285. [in Ukraine].

© С. М. Тарабан, канд. техн. наук, завідувач відділу дослідження безпеки на транспорті, питань нормування, стандартизації та метрології, ORCID: 0000-0002-3886-7369, e-mail: staraban@insat.org.ua;  
© Ф. М. Брегіда, канд. техн. наук, заступник завідувача відділу дослідження безпеки на транспорті, питань нормування, стандартизації та метрології, ORCID: 0000-0002-9611-6205, e-mail: fbregida@insat.org.ua;  
© Ю. В. Бабін, завідувач лабораторії активної безпеки транспортних засобів, ORCID: 0000-0003-0417-1977, e-mail: ybabin@insat.org.ua (ДП «ДержавтотрансНДІпроект»)

© Serhii Taraban, PhD, Head of Department of Transport Safety Research, Issues of Normalization, Standardization and Metrology, ORCID: 0000-0002-3886-7369, e-mail: staraban@insat.org.ua;  
© Fedir Bregida, PhD, Deputy Head of Department of Transport Safety Research, Issues of Normalization, Standardization and Metrology, ORCID: 0000-0002-9611-6205, e-mail: fbregida@insat.org.ua;  
© Yurii Babin, Head of Laboratory of Active Safety of Transport Means, ORCID: 0000-0003-0417-1977, e-mail: ybabin@insat.org.ua (SE «State Road Transport Research Institute»)

## СУЧАСНІ ВИМОГИ НОРМАТИВНИХ ДОКУМЕНТІВ ДО СМІТТЄВОЗІВ ІЗ РІЗНИМ ТИПОМ ЗАВАНТАЖЕННЯ

### MODERN REGULATIONS OF REGULATORY DOCUMENTS FOR REFUSE COLLECTION VEHICLES WITH DIFFERENT TYPES OF LOADED

**Анотація.** Відповідно до вимог Закону України «Про стандартизацію» та основоположних національних стандартів національної стандартизації виконано роботи з розроблення (із застосуванням методу підтвердження та методу перекладу) національних стандартів України, що встановлюють вимоги до сміттєвозів із різним типом завантаження та їхніх підіймальних пристроїв, – ДСТУ EN 1501-1:2022 (EN 1501-1:2021, IDT), ДСТУ EN 1501-2:2022 (EN 1501-2:2021, IDT), ДСТУ EN 1501-3:2022 (EN 1501-3:2021, IDT), ДСТУ EN 1501-5:2022 (EN 1501-5:2021, IDT), гармонізованих з відповідними європейськими стандартами EN 1501-1:2021, EN 1501-2:2021, EN 1501-3:2021 та EN 1501-5:2021.

**Ключові слова:** колісний транспортний засіб, підіймальний пристрій, сміттєвоз, сміттєвоз із тильним завантаженням, сміттєвоз із боковим завантаженням, сміттєвоз із фронтальним завантаженням, сміттєвий контейнер.

**Abstract.** In accordance with the requirements of the Law of Ukraine "On Standardization" and the fundamental national standards of national standardization, work has been carried out to develop (using the confirmation method and the translation method) national standards of Ukraine that establish requirements for refuse collection vehicle (RCV) with different types of loaded and their lifting devices, – DSTU EN 1501-1:2022 (EN 1501-1:2021, IDT), DSTU EN 1501-2:2022 (EN 1501-2:2021, IDT), DSTU EN 1501-3:2022 (EN 1501-3:2021, IDT), DSTU EN 1501-5:2022 (EN 1501-5:2021, IDT), harmonized with the relevant European standards. EN 1501-1:2021, EN 1501-2:2021, EN 1501-3:2021 and EN 1501-5:2021.

The standards describe the designs and characteristics of refuse collection vehicle (RCV) with different types of loaded (rear, side, front) and their lifting devices. The standards consider all significant hazards, dangerous situations and events that may occur during the operation of refuse collection vehicle (RCV) and their equipment (lifting devices, designated refuse container, etc.) throughout their entire service life.

The standards address all significant hazards, dangerous situations and events that may occur during the operation of refuse collection vehicle (RCV) during their service life. The standards describe the designs and characteristics refuse collection vehicle (RCV) with different types of loaded (rear, side, front).

National standards specify requirements that comply with the legislation of Ukraine.

The standards contain definitions of terms such as refuse collection vehicle (RCV), rear loaded RCV, side loaded RCV, front loaded RCV, lifting device, designated refuse container, etc.

**Keywords:** vehicle, lifting device, refuse collection vehicle (RCV), rear loaded RCV, side loaded RCV, front loaded RCV, refuse container.

#### Вступ

23 червня 2022 року лідери 27 країн-членів Європейського Союзу (ЄС) ухвалили рішення про надання Україні статусу кандидата на членство в ЄС. Такий статус вимагає від

України активних зусиль, зокрема в частині приведення національної системи стандартизації до європейських норм та правил, зокрема прийняття в стислі терміни значної кількості національних стандартів, гармонізованих із

нормами стандартів ЄС, що стосуються різних сфер економіки (сфери автомобільного транспорту зокрема).

*Метою роботи є аналіз європейських вимог до сміттевозів із різним типом завантаження та їхніх підймальних пристроїв для визначення та встановлення гармонізованих (зі стандартами ЄС) вимог у національних нормативних документах України щодо конструкції сміттевозів із погляду виробництва та експлуатації таких транспортних засобів.*

### Основна частина

Правові та організаційні засади стандартизації в Україні установлює Закон України «Про стандартизацію» [1]. Відповідно до вимог цього Закону, національний орган стандартизації (НОС), функції якого покладено на державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ») забезпечує систему стандартизації в Україні.

НОС щорічно готує «Програми робіт з національної стандартизації», враховуючи пропозиції заінтересованих сторін та ухваленого позитивного рішення відповідальних технічних комітетів стандартизації. Програма робіт із національної стандартизації охоплює розроблення нових проєктів національних стандартів і кодексів усталеної практики, зокрема на заміну чинним документам.

Чинні стандарти каталогу нормативних документів (НД), прийняті методом підтвердження, ідентичні європейським стандартам, що розроблені європейськими організаціями зі стандартизації в цілях застосування актів законодавства ЄС, зокрема щодо безпеки машин (Директива 2006/42/ЄС) і включені до переліків європейських гармонізованих стандартів для цілей застосування відповідних актів законодавства ЄС, відповідають затвердженому переліку національних стандартів для цілей застосування технічних регламентів, Угоді про оцінку відповідності та прийняття промислових товарів (Угода АСАА), яка є частиною плану пріоритетних дій Уряду на 2024 рік. На основі зазначених НД до Програми робіт з національної стандартизації на 2024 рік [2] було включено нові теми з розроблення методом перекладу низки національних стандартів, гармонізованих з європейськими стандартами (зокрема стандарти, що належать до сфери

діяльності технічного комітету стандартизації ТК 80 «Дорожній транспорт», функції секретаріату якого здійснює ДП «ДержавтотрансНДІ-проект»), зокрема:

- ДСТУ EN 1501-1 (EN 1501-1:2021, IDT) «Сміттевози. Загальні вимоги та вимоги щодо безпеки. Частина 1. Сміттевози з тильним завантаженням»;

- ДСТУ EN 1501-2 (EN 1501-2:2021, IDT) «Сміттевози. Загальні вимоги та вимоги щодо безпеки. Частина 2. Сміттевози з боковим завантаженням»;

- ДСТУ EN 1501-3 (EN 1501-3:2021, IDT) «Сміттевози. Загальні вимоги та вимоги щодо безпеки. Частина 3. Сміттевози з фронтальним завантаженням»;

- ДСТУ EN 1501-5 (EN 1501-5:2021, IDT) «Сміттевози. Загальні вимоги та вимоги щодо безпеки. Частина 5. Підймальні пристрої для встановлення на сміттевози.

Згідно з наказом Національного органу стандартизації (ДП «УкрНДНЦ») від 08.09.2022 № 183 «Про прийняття та скасування національних стандартів, прийняття та скасування змін та поправок до національних стандартів», зазначені національні стандарти України прийнято методом підтвердження.

Згідно з наказом ДП «УкрНДНЦ» від 26.12.2024 № 333 «Про прийняття національних стандартів» національні стандарти України щодо сміттевозів з різним типом завантаження та їхніх підймальних пристроїв, гармонізовані з відповідними європейськими стандартами, було прийнято методом перекладу, зі збереженням року першого прийняття європейського стандарту як національного методом підтвердження (з наданням чинності з 01 червня 2025 р.).

Якщо звернутись до хронології створення вимог до сміттевозів, [то перші редакції серії цих стандартів у Європі вийшли у 1998 році і до 2021 року змінювались кілька разів \(див. табл. 1\)](#). Розширення вимог відбулось вже у 2005 році та продовжувалось до 2011 року. Повноцінне оновлення вимог відбулось у 2021 році. Україна вперше приєдналась до цих вимог у 2006 році.

У 2022 році за безпосередньої ініціативи та участі ДП «ДержавтотрансНДІпроект» в Україні було прийнято (методом підтвердження) ДСТУ EN 1501-1:2022 (EN 1501-1:2021, IDT), ДСТУ EN 1501-2:2022 (EN 1501-2:2021, IDT), ДСТУ EN 1501-3:2022 (EN 1501-3:2021, IDT),

ДСТУ EN 1501-5:2022 (EN 1501-5:2021, IDT), гармонізовані з відповідними європейськими стандартами EN 1501-1:2021 [3], EN 1501-2:2021 [4], EN 1501-3:2021 [5] та EN 1501-5:2021 [6].

Під час застосування методу підтвердження виконано опрацювання та змістовне аналізування текстів європейських стандартів EN 1501-1:2021, EN 1501-2:2021, EN 1501-3:2021 та EN 1501-5:2021 із застосуванням словників і додаткової літератури. Виконано аналізування чинних нормативних документів задля встановлення можливості застосування розроблених національних стандартів України користувачами без перекладу (мовою оригіналу), а також уникнення неоднозначного тлумачення положень стандартів.

**Переклад актуальних версій стандарту було зроблено у 2024 році** фахівцями ДП «ДержавтотрансНДІпроект» в рамках науково-дослідної роботи з розробки методом перекладу національних стандартів, гармонізованих з європейськими (Стандарт НС-10) згідно з Програмою робіт з національної стандартизації на 2024 рік, код CPV за ДК 021:2015 код 73110000-6 Дослідницькі послуги (науково-дослідні роботи з розробки гармонізованих стандартів).

Під час проведення роботи виконано поетапний переклад тексту європейських стандартів із виконанням таких видів перекладів,

як чорновий переклад, робочий та ідентичний переклади (для опублікування) згідно з розділом 6.1.4 ДСТУ 1.7:2015. На першому етапі був виконаний чорновий переклад європейських стандартів, який передав технічний зміст тексту європейських стандартів. На другому – опрацьовано та відредаговано чорновий переклад. На третьому – виконано ідентичний переклад (для опублікування) європейських стандартів, під час якого був опрацьований робочий переклад європейських стандартів щодо використання спеціальної термінології в галузі автомобільного транспорту. Виконано аналізування чинних нормативних документів задля встановлення можливості застосування положень європейських стандартів і виявлення таких, до яких потрібно було внести редакційні зміни, примітки, та які мають технічні відхилення.

Метою розроблення і прийняття національних стандартів України ДСТУ EN 1501-1 (EN 1501-1:2021, IDT), ДСТУ EN 1501-2 (EN 1501-2:2021, IDT), ДСТУ EN 1501-3 (EN 1501-3:2021, IDT), ДСТУ EN 1501-5 (EN 1501-5:2021, IDT) є установлення гармонізованих з редакціями європейських стандартів EN 1501-1:2021, EN 1501-2:2021, EN 1501-3:2021 та EN 1501-5:2021 єдиних вимог до сміттєвозів із різним типом завантаження (тильним, боковим, фронтальним) та вимог до їхніх підіймальних пристроїв.

**Таблиця 1**

Хронологія прийняття стандартів серії EN 1501

| Позначка<br>НД | Роки прийняття стандартів |         |        |        |         |        |        |         |         |
|----------------|---------------------------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|---------|
|                | Європа                    | Україна |        | Європа | Україна |        | Європа | Україна |         |
| EN 1501-1      | 1998                      | —       | 2006** | 2011   | 2014*   | 2019** | 2021   | 2022*   | 2024*** |
| EN 1501-2      | 2005                      | 2014*   | 2019** | —      | —       | —      | 2021   | 2022*   | 2024*** |
| EN 1501-3      | 2008                      | 2014*   | 2019** | —      | —       | —      | 2021   | 2022*   | 2024*** |
| EN 1501-4      | 2007                      | 2014*   | 2018** | —      | —       | —      | 2023   | —       | 2024*   |
| EN 1501-5      | 2011                      | 2014*   | 2018** | —      | —       | —      | 2021   | 2022*   | 2024*** |

**Примітки:**

\* – підтвердження;

\*\* – переклад;

\*\*\* – переклад (зі збереженням року першого прийняття європейського стандарту як національного методом підтвердження – 2022 р.).

Стандарти описують конструкції і характеристики смітєвозів із різним типом завантаження та їхніх підймальних пристроїв. У стандартах розглядаються всі суттєві небезпеки та події, можливі при експлуатації **смітєвозів та його** обладнання (підймальних пристроїв, смітєвих контейнерів тощо) протягом всього їхнього строку експлуатації.

У стандартах вперше дають визначення понять, зокрема таких:

**смітєвоз** (refuse collection vehicle, **рис. 1**) – КТЗ, який використовують для збирання і перевезення сміття (наприклад, побутових відходів, великогабаритного сміття, вторинної сировини), яке завантажується до нього через смітєві контейнери або вручну;

**смітєвоз з тильним завантаженням** (rear loaded RCV, **рис. 1 а**) – смітєвоз, до

якого сміття завантажується з тильної сторони через смітєві контейнери до бункера / кузова;

**смітєвоз з боковим завантаженням** (side loaded RCV, **рис. 1 б**) – смітєвоз, у який сміття або матеріали, призначені для утилізації завантажуються з боків;

**смітєвоз з фронтальним завантаженням** (front loaded RCV, **рис. 1 в**) – смітєвоз, в якому сміття або матеріали, призначені для утилізації, завантажують спереду;

**підймальний пристрій** (lifting device) – механічний пристрій, встановлений на смітєвозі, призначений для вивантаження сміття з контейнера в кузов смітєвоза;

**сумісний смітєвий контейнер** (designated refuse container) – смітєвий контейнер, сумісний з підймальним пристроєм.



**Рис. 1.** Смітєвози з різним типом завантаження: а – з тильним завантаженням; б – з боковим завантаженням; в – з фронтальним завантаженням [7 – 9]

За типами смітєві контейнери поділяються на:

- циліндричні контейнери;
- контейнери для трикутної системи захоплення;
- ковшовий контейнер;
- смітєві контейнери з цапфовою системою захоплення;
- смітєві контейнери з вилковою системою захоплення;
- смітєві контейнери з системою захоплення типу «BG».

Стандарти визначають основні види небезпек для персоналу під час роботи з обладнанням смітєвозів, до яких належать, зокрема, защемлення, захоплення елементами смітєвоза; поштовх, механічний удар елементами смітєвоза або сміттям; падіння

оператора з висоти; відрізання, відтинання частин тіла елементами смітєвоза; затягування до механізмів смітєвоза; дія гідравлічної рідини, що перебуває під тиском через несправність; дія стиснутого повітря через несправність; небезпека ураження електричним струмом через несправність; небезпека термічного ураження через контакт з гарячими поверхнями; небезпеки викликані вібрацією елементів смітєвоза; небезпеки, викликані вдиханням пилу чи випарів; біологічна небезпека (контакт із залишками сміття); механічні небезпеки та ризики; асфіксія дихальних шляхів; вплив шуму; незадовільний технічний стан смітєвоза; небезпеки, які пов'язані з непередбаченим увімкненням обладнання смітєвоза та непередбаченими рухами його елементів; недостатня видимість під час проведення



робіт (освітлення, перекриття тощо); проникнення гострих частин сміття у кабінку під час його ущільнення.

Визначено основні зони небезпеки: 1,5 метри від переднього/заднього країв сміттєвоза;

- 1,5 метри від заднього краю сміттєвоза, який утворюється під час відкриття та вивантаження бункера;

- 0,85 метри з боків сміттєвоза;

- 5 метрів від переднього краю сміттєвоза з фронтальним завантаженням;

- 2,5 метри по висоті;

- зона у межах руху кузова під час вивантаження бункера, що виникає при його піднятті.

У сміттєвозів, які мають елементи для завантаження контейнерів за допомогою «кранової установки» виникають додаткові зони небезпеки до яких входить радіус дії кранової установки, висота підйому стріли, радіус навколо контейнера.

На сьогодні в Україні налічується понад 200 суб'єктів господарювання (виробників), що задекларували діяльність, зокрема з виробництва вантажних транспортних засобів категорії N, до яких належать і сміттєвози. Продукція українських виробників сміттєвозів повинна відповідати вимогам національних стандартів України ДСТУ EN 1501-1:2022 (EN 1501-1:2021, IDT), ДСТУ EN 1501-2:2022 (EN 1501-2:2021, IDT), ДСТУ EN 1501-3:2022 (EN 1501-3:2021, IDT), ДСТУ EN 1501-5:2022 (EN 1501-5:2021, IDT).

Основними виробниками спецтехніки є ТОВ «Укравтокомплект ТД», ТОВ «ВКК «Спецмаш», ТОВ «Підйомні механізми», ТОВ «Спецтехсервіс», ТОВ «ВК «Автотранспортник», ТОВ «Техкомплект», ТОВ «Спецбудмаш», ПП «ВКП «Альфатекс», ТОВ «Авто-Реґіон» та інші.

Відповідно до пункту 17 постанови Кабінету Міністрів України від 07.09.1998 № 1388 «Про затвердження Порядку державної реєстрації (перереєстрації) зняття з обліку автомобілів, автобусів, а також самохідних машин, сконструйованих на шасі автомобілів, мотоциклів усіх типів, марок і моделей, причепів, напівпричепів, мотоколясок, інших прирівняних до них транспортних засобів та мопедів», Головний сервісний центр МВС та ДП «ДержавтотрансНДІпроект» узгоджують технічні завдання виробників

експериментальних зразків транспортних засобів, що проходять випробування. За період 2022–2024 років лише ДП «ДержавтотрансНДІпроект» було проведено 86 науково-технічних експертиз нормативної документації щодо розроблення та виготовлення **українськими виробниками дослідних зразків сміттєвозів із різними типами завантаження** для подальшої сертифікації та державної реєстрації таких транспортних засобів.

Наведена вище інформація свідчить про національний масштаб впливу результатів наукової діяльності ДП «ДержавтотрансНДІпроект» в частині, що стосується встановлення гармонізованих з європейськими стандартами вимог до конструкції сміттєвозів та їх виробництва.

## Висновки

1. Розроблені ДП «ДержавтотрансНДІпроект» національні стандарти установлюють гармонізовані з редакціями європейських стандартів єдині вимоги до сміттєвозів із різним типом завантаження та їхніх підймальних пристроїв, спрямовані на розвиток сучасної нормативної бази в галузі автомобільного транспорту, сприяють усуненню технічних бар'єрів **у торгівлі** та підтриманню конкурентоспроможності української продукції на міжнародному ринку.

2. Прийняття таких національних стандартів, гармонізованих із нормами ЄС, забезпечує наближення системи національної стандартизації до європейських норм і правил у галузі автомобільного транспорту.

3. Відповідно до протокольного рішення технічного комітету стандартизації ТК 80 «Дорожній транспорт» від 06 грудня 2024 р. № 10/2024 **було прийнято методом підтвердження (мовою оригіналу)** як національний стандарт України ДСТУ EN 1501-4:2024 (EN 1501-4:2023, IDT) «Сміттєвози. Загальні вимоги та вимоги щодо безпеки. Частина 4. Контролювання рівня шуму для сміттєвозів» з наданням чинності з 01 березня 2025 р. (наказ ДП «УкрНДНЦ» від 30.12.2024 № 345), **ідентичного до європейського нормативного документа EN 1501-4:2023 Refuse collection vehicles – General requirements and safety requirements – Part 4: Noise test code for refuse collection vehicles.** Цей стандарт є четвертою частиною із серії координованих стандартів EN 1501 та

стосується контролювання рівня шуму для сміттевозів. Водночас для подолання мовних бар'єрів, сприяння уніфікації та стандартизації термінології у сфері виробництва та експлуатації сміттевозів є необхідність розроблення та прийняття ДСТУ EN 1501-4 (EN 1501-4:2023, IDT) методом перекладу.

### References

1. Official webportal of the Parliament of Ukraine. (2014). Law of Ukraine «On Standardization». Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1315-18#Text>.

2. National Standardization Body SE «UkrNDNTS». (2024). Prohrama robit z natsionalnoi standartyzatsii na 2024 rik. Retrieved from <https://uas.gov.ua/standardization/prohrama-robit-z-natsionalnoi-standa/2024>.

3. Home page of the European Committee for Standardization. (2021). EN 1501-1:2021 Refuse collection vehicles - General requirements and safety requirements - Part 1: Rear loaded refuse collection vehicles. Retrieved from <https://www.cencenelec.eu/about-cen>.

4. Home page of the European Committee for Standardization. (2021). EN 1501-2:2021 Refuse collection vehicles - General requirements and safety requirements - Part 2: Side loaded refuse

collection vehicles. Retrieved from <https://www.cencenelec.eu/about-cen>.

5. Home page of the European Committee for Standardization. (2021). EN 1501-3:2021 Refuse collection vehicles - General requirements and safety requirements - Part 3: Front loaded refuse collection vehicles. Retrieved from <https://www.cencenelec.eu/about-cen>.

6. Home page of the European Committee for Standardization. (2021). EN 1501-5:2021 Refuse collection vehicles - General requirements and safety requirements - Part 5: Lifting devices for refuse collection vehicles. Retrieved from <https://www.cencenelec.eu/about-cen>.

7. Ukravtokomplekt. (2025). Smittievoz UAC USV iz zadnim zavantazhenniam na JAC N200. Retrieved from <https://uak.ua/product/ukravtokomplekt/smittyevozy-ukravtokomplekt/smittyevov-uac-usv-iz-zadnim-zavantazhenniam-na-jac-n200>.

8. Ukravtokomplekt. (2025). Smittievoz UAC USV-B2 z bichnym zavantazhenniam na RENAULT TRUCKS D13. Retrieved from <https://uak.ua/product/renault/smittyevozy-renault/smittyevov-uac-z-bichnym-zavantazhenniam-na-renault-trucks-d>.

9. Durabac. (2025). Refuse trucks. Front-load refuse bodies. Retrieved from <https://durabac.net/en/cat/divisions/chagnon/front-load-refuse-bodies>.



© С. М. Шуклінов,  
доктор технічних наук, професор,  
ORCID: 0000-0002-3157-3069,  
e-mail: schuklinovsn@gmail.com;  
© М. Г. Михалевич,  
доктор технічних наук, професор,  
проректор, ORCID: 0000-0001-9890-3838,  
e-mail: mkolyag@gmail.com  
(Харківський національний автомобільно-  
дорожній університет)

© Serhii Shuklinov,  
Doctor of Technical Sciences, Professor,  
ORCID: 0000-0002-3157-3069,  
e-mail: schuklinovsn@gmail.com;  
© Mykola Mykhalevych, Doctor of Technical Sciences,  
Professor, Vice-Rector,  
ORCID: 0000-0001-9890-3838,  
e-mail: mkolyag@gmail.com  
(Kharkiv National Automobile  
and Highway University)

## 3D-МОДЕЛЮВАННЯ ГІПОЇДНОЇ ГОЛОВНОЇ ПЕРЕДАЧІ АВТОМОБІЛЯ В AUTODESK INVENTOR

### 3D MODELING OF A VEHICLE'S HYPOID FINAL GEAR IN AUTODESK INVENTOR

**Анотація.** У системі твердотільного параметричного проектування Autodesk Inventor Professional немає можливості безпосередньої побудови гіпоїдного зацеплення. Ця робота присвячена створенню методу побудови зубчастих коліс гіпоїдного зацеплення у програмі Autodesk Inventor для надання можливості 3D-компонування елементів гіпоїдної головної передачі та автоматизованого оформлення її конструкторської документації. Це підвищує рівень продуктивності проектування в конструкторському бюро, а в навчальному процесі – компетентності здобувачів та їхню зацікавленість у навчанні.

**Ключові слова:** головна передача, гіпоїдна передача, зубчасте колесо, зубчаста шестерня, нормальний модуль, зміщення в гіпоїдній передачі, кількість зубців, початковий конус гіпоїдних зубчастих коліс, кут зацеплення, кут нахилу лінії зуба, 3D-моделювання.

**Abstract.** It is difficult to imagine modern design of any unit and development of working drawings without the use of CAD elements. The Autodesk Inventor Professional solid-state parametric design system is a fairly powerful tool for performing design work and mechanical engineering drawings. But it should be noted that the existing gear generators in Autodesk Inventor can build cylindrical and bevel gears, even worm gears, but not hypoid. Therefore, when designing hypoid main gears of a car, difficulties arise in creating 3-D models of hypoid gears. The inability to directly build hypoid gears in the Autodesk Inventor gear generator does not allow for 3-D design of hypoid main gears, and this is a problem. This work is devoted to solving this problem, the purpose of which is to create a method for constructing a hypoid gear in the Autodesk Inventor program to provide the possibility of 3-D layout of hypoid main gear elements and further automated development of drawings. The method of achieving the goal is that two separate bevel gears are created in the Autodesk Inventor bevel gear generator, with the parameters of one gear corresponding to the parameters of the hypoid gear, and the second - the hypoid wheel, then a 3-D model of the hypoid gear is created as an assembly product from the hypoid gear and hypoid wheel models. The proposed method allows you to build a 3-D model of the hypoid gear in the Autodesk Inventor program, which allows 3-D layout of hypoid main gear elements and automated design of its design documentation. This increases the level of design productivity in the design office, and in the educational process, it increases the level of competence of applicants and their interest in learning.

**Keywords.** main gear, hypoid gear, gear wheel, pinion gear, normal module, offset in hypoid gear, number of teeth, initial cone of hypoid gears, meshing angle, tooth line inclination angle, 3D modeling.

#### Вступ

У проектуванні головних передач трансмісії автомобілів доцільно використовувати елементи систем автоматизованого проектування. При цьому серед вихідних даних застосовують як результати тягового розрахунку автомобіля:

- максимальний крутний момент двигуна  $M_{e \max}$ ;
- частота обертання колінчатого валу двигуна за максимального моменту  $n_M$ ;

- тип головної передачі (одинарна з циліндричним або гіпоїдним зацепленням);

- передатне число, так і результати функціонального розрахунку головної передачі:

- кількість зубців у зацепленні;
- кут профілю зуба;
- модуль та кут нахилу зубців та ширина зубчастого венця.

Визначення решти геометричних параметрів зубчастих зацеплень у процесі проектування головної передачі доцільно виконати у

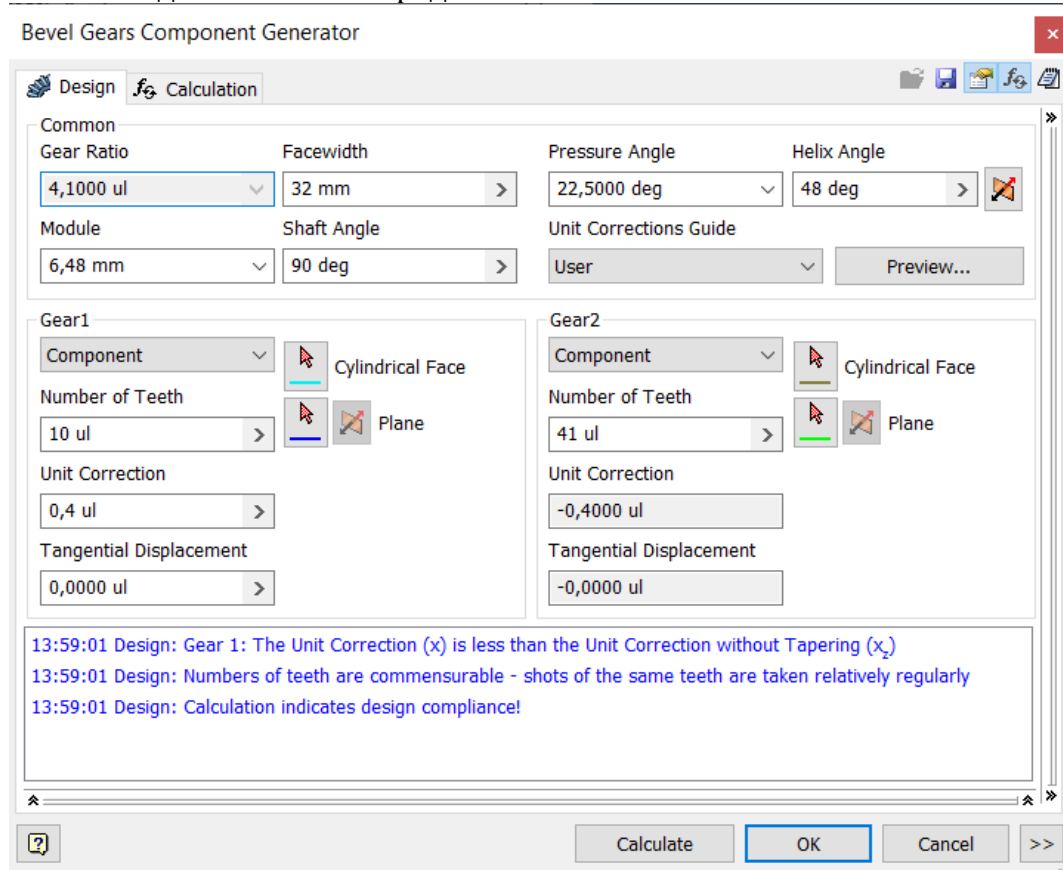
системі твердотільного параметричного проектування Autodesk Inventor Professional. Водночас створюється 3D-модель зубчастого зачеплення та решти складових головної передачі. У Autodesk Inventor є генератор зубчастих зачеплень, за допомогою якого будуються 3D-моделі циліндричного та конічного зубчастих зачеплень. Слід зазначити, що створення 3D-моделі гіпоїдного зачеплення у генераторі зубчастих зачеплень Autodesk Inventor не передбачено [1]. Це обумовлює неможливість побудови 3D-моделі головної передачі з гіпоїдним зачепленням.

Мета роботи – створення методики побудови гіпоїдного зачеплення у програмі Autodesk Inventor для можливості 3D-компонування елементів гіпоїдної головної передачі.

Робоча гіпотеза – створення 3D-моделі гіпоїдного зачеплення у генераторі зубчастих конічних зачеплень Autodesk Inventor як складальну одиницю з моделей шестерні та колеса окремих конічних зачеплень з параметрами, що відповідають параметрам гіпоїдної шестерні та гіпоїдного колеса.

### Огляд та аналіз параметрів генератора зубчастих конічних зачеплень Autodesk Inventor

Для моделювання в генераторі конічних зачеплень Autodesk Inventor (Bevel Gears Component Generator) необхідно внести початкові дані (рис. 1):



**Рис. 1.** Діалогове вікно генератора конічних зачеплень Autodesk Inventor

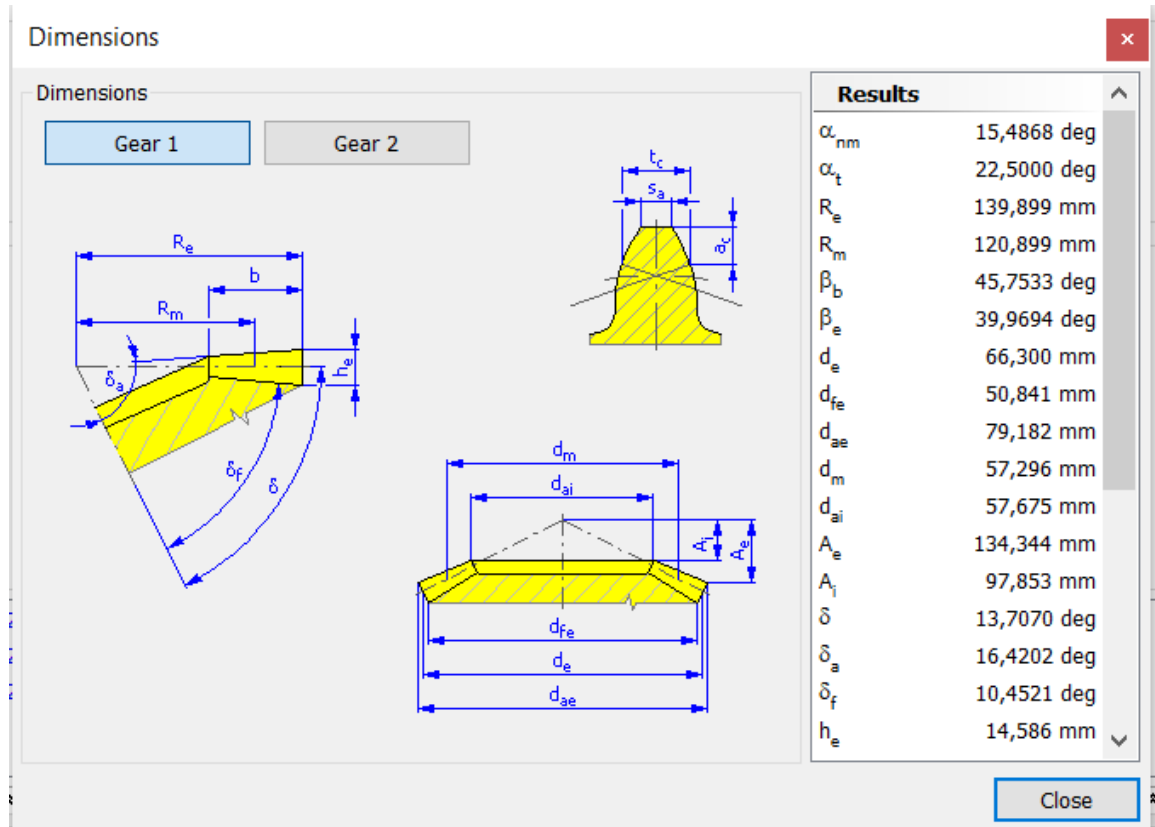
- кількість зубців шестерні  $z_{ш}$  (Gear 1 Number of Teeth) та колеса  $z_k$  (Gear 2 Number of Teeth);
- кут нахилу зубців шестерні та колеса  $\beta$  (Helix Angle);
- торцевий модуль  $m_t$  (Module);
- ширину зубчастого вінця  $b_{\omega}$  (Facewidth);
- кут зачеплення  $\alpha$  (Pressure Angle);
- кут перетину осей шестерні та колеса (Shaft Angle).

Коефіцієнт зміщення (Unit Correction) та тангенціальне зміщення (Tangential Displacement) розраховуються автоматично. Але є можливість корегування цих значень для шестерні з метою наближення до рівномірності зубців шестерні та колеса.

Для розрахунку параметрів моделі зубчастого зачеплення треба натиснути «Розрахунок» (Calculate). Значення отриманих результатів можна подивитися, відкривши вкладку

«Огляд» (Preview). Приклад результатів розрахунку геометричних параметрів шестерні (Gear 1) та колеса (Gear 2) конічного зачеплення наведено на рис. 3.2. Слід зазначити, що результатом розрахунку є геометричні параметри зубчастих коліс та параметри профілю

зуба у конічному зачепленні. Також треба підкреслити, що профіль зуба в конічному зачепленні є симетричним на відміну від профілю зуба коліс гіпоїдного зачеплення. Крім цього, конструювання зубчастих коліс виконується окремо у форматі «.ipt».



**Рис. 2.** Вкладка «Огляд» (Preview) діалогового вікна генератора конічних зачеплень Autodesk Inventor

### Функціональний розрахунок гіпоїдної передачі

Функціональний розрахунок гіпоїдної передачі починається з вибору кількості зубців у зачепленні гіпоїдної головної передачі. Кількість зубців у гіпоїдному зачепленні визначається залежно від значення передавального числа головної передачі  $u_0$ , що отримано в тяговому розрахунку автомобіля. Залежно від значення передатного числа головної передачі вибирають кількість зубців  $z_{ш}$  ведучої гіпоїдної шестерні за рекомендаціями досвіду автомобілебудування (табл. 1). Кількість зубів  $z_k$  веденого гіпоїдного колеса обчислюють за формулою

$$z_k = z_{ш} \cdot u_0. \quad (1)$$

Кількість зубів  $z_k$  веденого гіпоїдного колеса, що визначено за формулою (1), округлюють до цілого значення й уточнюють передатне число головної передачі відповідно до визначених значень кількості зубців шестерні та колеса:

$$u_0 = \frac{z_k}{z_{ш}}. \quad (2)$$

**Таблиця 1**

Рекомендації для визначення кількості зубців шестерні та колеса гіпоїдної передачі

|                                                                               |     |    |   |   |         |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----|----|---|---|---------|
| $u_0$                                                                         | 2,5 | 3  | 4 | 5 | 6,...,8 |
| $z_{ш}$                                                                       | 15  | 12 | 9 | 7 | 5, 6    |
| Сумарна кількість зубців у зачепленні<br>$z_{\Sigma} = z_{ш} + z_k = 50...60$ |     |    |   |   |         |

Гіпоїдне зачеплення характеризується зміщенням осей валів шестерні та колеса – гіпоїдним зміщенням  $e$ . Його максимальна величина у проектуванні головної передачі зазвичай обмежується технологічними умовами виготовлення та зростанням специфічних особливостей гіпоїдного зачеплення – повздовжнє ковзання між зубцями, несиметричність зачеплення та ін. Зазвичай для визначення величини гіпоїдного зміщення використовують відносну величину – коефіцієнт гіпоїдного зміщення  $k_e = e/r_{\omega k}$  ( $r_{\omega k}$  – середній радіус зачеплення гіпоїдного колеса). Значення якого з досвіду автомобілебудування рекомендується приймати:  $k_e = 0,4$  для головних передач легкових автомобілів та  $k_e = 0,2$  – для вантажних автомобілів. За однакових розмірів коліс конічної та гіпоїдної передач, тобто за однакової кількості їхніх зубців, остання матиме більше передавальне число. Збільшення передатного числа гіпоїдної передачі характеризується коефіцієнтом збільшення гіпоїдної шестерні

$$k_{гип} = \cos \beta_2 / \cos \beta_1, \quad (3)$$

де  $\beta_1, \beta_2$  – кути нахилу лінії зубців відповідно до шестерні та колеса.

З досвіду автомобілебудування рекомендується приймати:  $k_{гип} = 1,35 \dots 1,5$  для головних передач легкових автомобілів та  $k_e = 1,17 \dots 1,2$  – для вантажних автомобілів.

Розрахунковий радіус середнього ділильного кола конічного колеса відповідно методу погонного навантаження визначається за:

$$r_{\omega k} = \sqrt{\frac{M_p \cdot \sin \delta_k}{0,35 \cdot [q]}}, \quad (4)$$

де  $M_p$  – розрахунковий момент на колесі головної передачі;

$\delta_k \approx \arctg \left( \frac{z_k}{z_{ш}} \cdot \sqrt{1 - 0,9 \cdot k_e^2} \right)$  – кут ділильного конуса зубчастого колеса;

$[q]$  – допустиме погонне навантаження на зуб.

Розрахунковий момент  $M_p$  на колесі головної передачі визначається за трьома режимами:

– розрахунковий режим за максимальним моментом двигуна:

$$M_e = M_{e \max} \cdot u_{к1} \cdot \frac{z_k}{z_{ш}}, \quad (5)$$

де  $M_{e \max}$  – максимальний крутний момент двигуна;

$u_{к1}$  – передатне число першої передачі коробки передач.

– розрахунковий режим за максимальною силою зчеплення ведучих коліс:

$$M_{\phi} = G_B \cdot \phi_x \cdot r_d, \quad (6)$$

де  $G_B$  – вага, що припадає на ведучі колеса;

$\phi_x$  – коефіцієнт зчеплення ведучих коліс;

$r_d$  – динамічний радіус ведучих коліс.

– Розрахунковий режим за максимальним моментом двигуна на вищій передачі:

$$M_{ev} = M_{e \max} \cdot u_{kv} \cdot \frac{z_k}{z_{ш}}, \quad (7)$$

де  $u_{kv}$  – передатне число коробки передач, за якого досягається максимальна швидкість руху автомобіля.

Допустиме погонне навантаження на зуб  $[q]$  вибирають залежно від типу автомобіля та навантажувального режиму.

Для першого та другого навантажувального режиму:

$$[q] = \begin{cases} 0,9 \text{ кН/мм} - \text{для легкових автомобілів;} \\ 1,5 \text{ кН/мм} - \text{для вантажних автомобілів;} \\ 1,0 \text{ кН/мм} - \text{для автобусів;} \\ 0,6 \text{ кН/мм} - \text{для автомобілів підвищеної} \\ \text{прохідності.} \end{cases}$$

Для третього режиму навантаження:

$$[q] = \begin{cases} 0,35 \text{ кН/мм} - \text{для легкових автомобілів;} \\ 0,3 \text{ кН/мм} - \text{для вантажних автомобілів і} \\ \text{автобусів;} \\ 0,6 \text{ кН/мм} - \text{для автомобілів підвищеної} \\ \text{прохідності.} \end{cases}$$

Після розрахунку значень радіусу середнього ділильного кола конічного колеса за формулою (4) для трьох режимів вибирають розрахункове значення за пропонуваною методикою. Вибір значення радіуса середнього ділильного кола конічного колеса проходить у два етапи, що наведено нижче.

Етап №1.

$$r_{\omega k(1-2)} = \begin{cases} r_{\omega k(1)} & \text{якщо } r_{\omega k(1)} \leq r_{\omega k(2)} \\ r_{\omega k(2)} & \text{якщо } r_{\omega k(1)} > r_{\omega k(2)} \end{cases}.$$

Етап №2.

$$r_{\omega k} = \begin{cases} r_{\omega k(1-2)} & \text{якщо } r_{\omega k(1-2)} \geq r_{\omega k(3)} \\ r_{\omega k(3)} & \text{якщо } r_{\omega k(1-2)} < r_{\omega k(3)} \end{cases},$$

де  $r_{\omega k(1)}$ ,  $r_{\omega k(2)}$ ,  $r_{\omega k(3)}$  – значення радіусів ділительного кола, що розраховані для відповідних режимів;

$r_{\omega k(1-2)}$  – значення радіусу ділительного кола, що обрано на етапі №1.

Відповідно середній розрахунковий радіус ділительного кола шестерні визначають за виразом:

$$r_{\omega ш} = \frac{r_{\omega k}}{u_0} \cdot k_{гш}. \quad (8)$$

Початкові конуси шестерні та колеса кінчного зачеплення є дотичними один одного по всій довжині їхніх утворюючих. У гіпоїдного зачеплення початкові конуси шестерні та колеса є дотичними тільки в одній точці « $p$ » – точці перетину їхніх утворюючих, яка є полюсом зачеплення (рис. 3). Причому вісь шестерні та

полюс зачеплення  $p$  належать площині, яка нахилена до горизонтальної площини колеса під кутом  $\eta$ . Визначення кутів спіралей зубців шестерні й колеса та їхніх торцевих модулів і ширини зубчатих вінців базується на геометричних залежностях, що описують взаємне розташування утворюючих їхніх початкових конусів та полюса зачеплення  $p$ .

Кут нахилу  $\eta$  площини, де лежать полюс зачеплення та вісь шестерні (рис. 3):

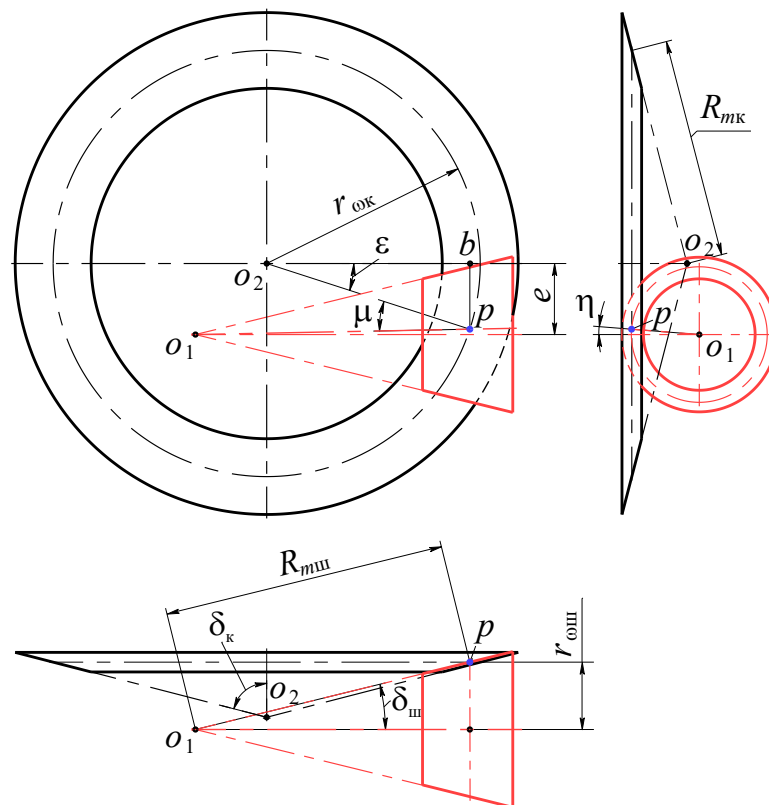
$$\eta = \arctg \left( \frac{e}{r_{\omega k} \cdot \operatorname{tg} \delta_k + r_{\omega ш}} \right). \quad (9)$$

Значення кута  $\varepsilon$  між проекцією утворюючої початкового конуса колеса, яка проходить через полюс зачеплення, на вертикальну площину і горизонтальної осі колеса розраховується за виразом

$$\varepsilon = \arcsin(\operatorname{tg} \eta \cdot \operatorname{tg} \delta_k). \quad (10)$$

Кут ділительного конуса шестерні визначає формула:

$$\delta_{ш} = \arcsin(\cos \varepsilon \cdot \cos \delta_k). \quad (11)$$



**Рис. 3.** Схема розташування початкових конусів шестерні та колеса гіпоїдної передачі

Конусні відстані колеса та шестерні дорівнюють:

$$R_{mK} = \frac{r_{\omega K}}{\sin \delta_K}; R_{mШ} = \frac{r_{\omega Ш}}{\sin \delta_{Ш}}. \quad (12)$$

Перевірка відповідності вибраних та розрахованих параметрів гіпоїдної передачі виконується за умовою:

$$\frac{R_{mШ}/R_{mK} - k_{ГіП}}{k_{ГіП}} \cdot 100 \leq 5\%. \quad (13)$$

Відмінність  $\mu$  кутів нахилу зубців шестерні та колеса визначає залежність:

$$\mu = \beta_{Ш} - \beta_K = \arcsin \left( \frac{\sin \varepsilon}{\cos \delta_{Ш}} \right). \quad (14)$$

Кут нахилу зубців колеса розраховують за формулою:

$$\beta_K = \arctg \left( \frac{\cos \mu - 1/k_{ГіП}}{\sin \mu} \right), \quad (15)$$

а кут нахилу зубців шестерні розраховують за формулою:

$$\beta_{Ш} = \arctg \left( \frac{k_{ГіП} - \cos \mu}{\sin \mu} \right). \quad (16)$$

Нормальний модуль зачеплення у середній площині дорівнює:

$$m_n = \frac{2r_{\omega K}}{z_K} \cdot \cos \beta_K = \frac{2r_{\omega Ш}}{z_{Ш}} \cdot \cos \beta_{Ш}. \quad (17)$$

Довжина зуба колеса за утворюючою конуса (ширина зубчатого вінця колеса)  $b_{\omega K}$  визначається як менше із двох значень:

$$b_{\omega K} \leq 0,35R_{mK}; b_{\omega K} \leq 10m_n. \quad (18)$$

Довжина зуба шестерні за утворюючою конуса (ширина зубчатого вінця шестерні)  $b_{\omega Ш}$  визначається за формулою:

$$b_{\omega Ш} = b_{\omega K} \cdot \frac{\sin \delta_K}{\cos \varepsilon \cdot \cos \delta_{Ш}} + 4. \quad (19)$$

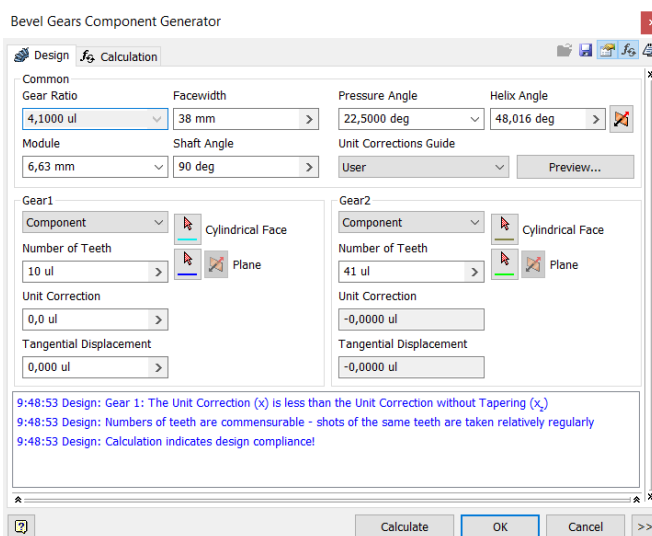
Значення торцевого модуля колеса розраховують за виразом:

$$m_{tK} = \frac{m_n \cdot (R_{mK} + 0,5b_{\omega K})}{R_{mK} \cdot \cos \beta_K}, \quad (20)$$

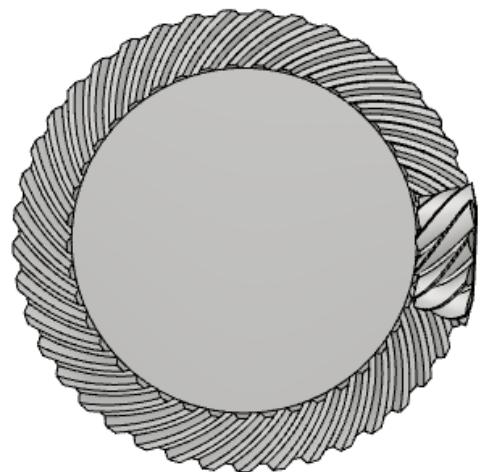
а шестерні:

$$m_{tШ} = \frac{m_n \cdot (R_{mШ} + 0,5b_{\omega Ш})}{R_{mШ} \cdot \cos \beta_{Ш}}. \quad (21)$$

Для побудови 3D-моделей зубчатих коліс гіпоїдної передачі необхідно виконати моделювання двох конічних зачеплень з однаковими значеннями числа зубців  $z_1$  і  $z_2$  та кутом зачеплення  $\alpha$ , але з різними значеннями (рис. 4):

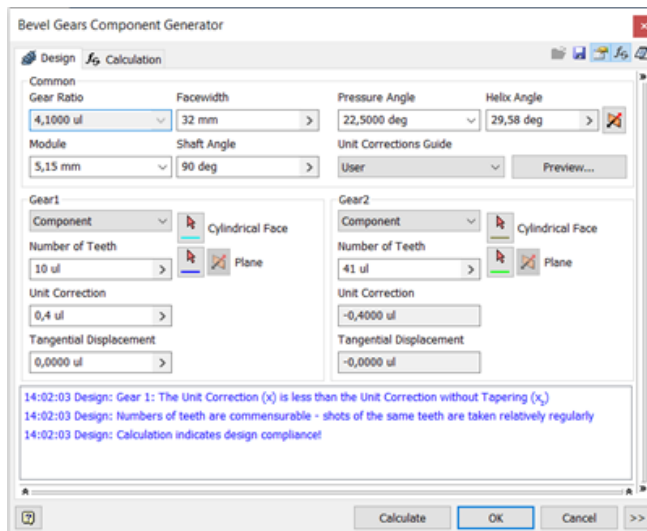


а

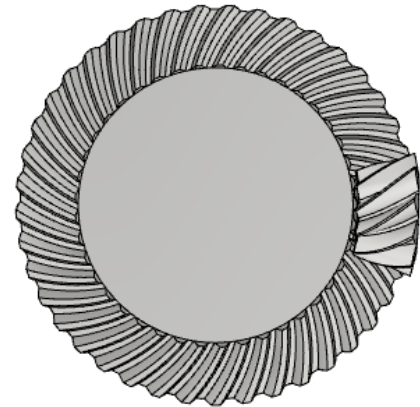


б





В



Г

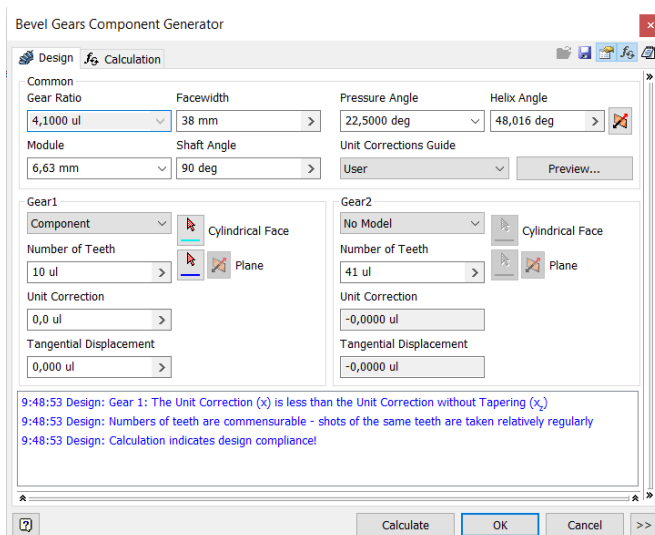
**Рис. 4.** Діалогові вікна генератора зубчастого зачеплення та 3D-моделі конічних передач: а, б – з параметрами гіпоїдної шестерні; в, г – з параметрами гіпоїдного колеса

- кутів нахилу зубців відповідно  $\beta_k$  та  $\beta_{ш}$ ;
- торцевих модулів зубців відповідно  $m_{tk}$  та  $m_{tш}$ ;
- шириною зубчастого вінця відповідно  $b_{ок}$  та  $b_{ош}$ .

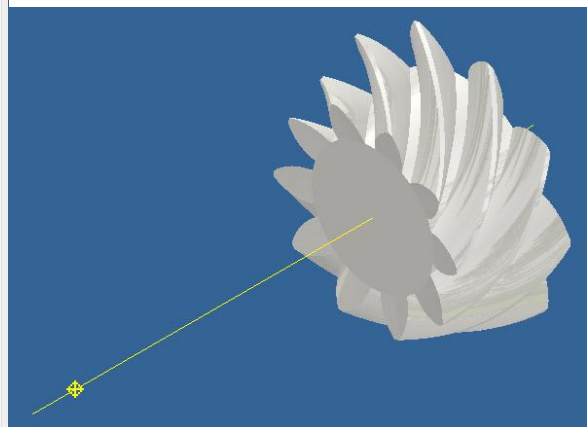
Середній кут зачеплення гіпоїдної передачі різний для протилежних сторін зубів. У генераторі зубчатих зачеплень Inventor кут профілю задається однаковим для обох сторін

зуба, тому як припущення можна прийняти його значення рівним 22,5 градусів.

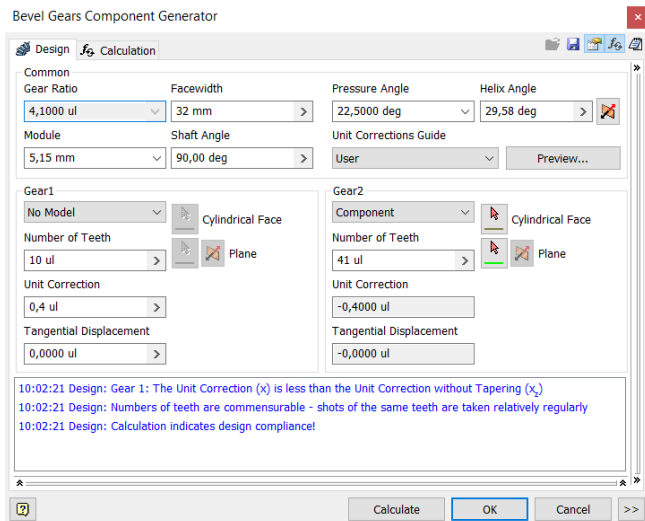
Для отримання окремих 3D-моделей шестерні та колеса з розрахунковими параметрами гіпоїдної передачі в діалоговому вікні відповідної 3D-моделі зубчастого зачеплення треба вказати, що «Gear 2» і «Gear 1» не мають моделі (**рис. 5**).



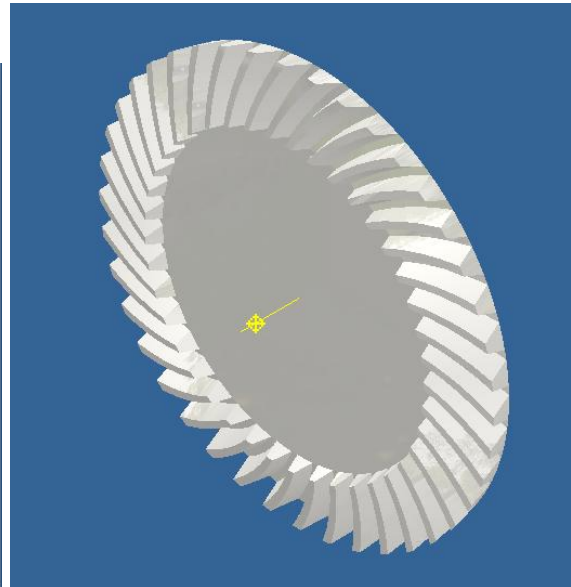
а



б



В



Г

**Рис. 5.** Побудова 3D-моделі конічних шестерень: а, б – з параметрами гіпоїдної шестерні; в, г – з параметрами гіпоїдного колеса

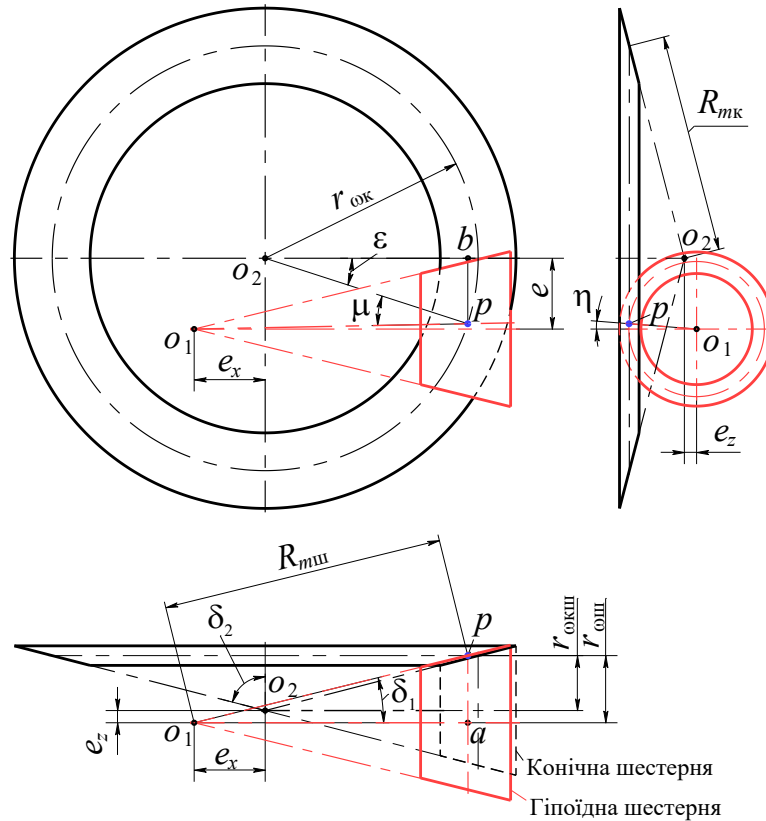
Зазвичай для взаємного орієнтування у процесі складання гіпоїдної передачі визначаються базові торці шестерні та колеса. Для цього треба визначити конструктивні елементи шестерні та колеса й добудувати їх на отриманих моделях у форматі «.apt». У Autodesk Inventor є можливість орієнтування моделей шестерні та колеса у процесі складання гіпоїдного зачеплення за ординатами вершин їхніх початкових конусів. Для цього треба визначити відмінність координат вершин початкових конусів шестерні та колеса гіпоїдної передачі порівняно з конічною передачею.

#### **Визначення координат відносного зміщення вершин початкових конусів гіпоїдних шестерні та колеса**

Inventor будує моделі конічних шестерні та колеса в зачепленні так, що вершини їхніх початкових конусів збігаються, при цьому зачеплення відбувається у полюсі  $p$ . Побудовані, окремо одна від одної, моделі шестерні та ко-

леса у процесі складання з них гіпоїдної передачі треба розташувати так, щоб зачеплення відбувалося у полюсі  $p$ . Для цього необхідно забезпечити взаємне розташування шестерні та колеса, так щоб їх ділильні кола були дотичними в полюсі зачеплення. Як уже зазначалося, гіпоїдна передача, на відміну від конічної, має зміщення початкових конусів шестерні та колеса у трьох площинах, тому вершини їх початкових конусів також зміщені одна відносно другої. Крім цього, в гіпоїдній передачі шестерня та колесо мають різні значення конусних відстаней та сума кутів їхніх ділильних конусів не дорівнює куту між їх осями. Для визначення відносних координат вершин початкових конусів шестерні та колеса гіпоїдної передачі скористаємось **рис. 6**.

Зміщення осі шестерні у вертикальній площині від горизонтальної площини колеса характеризує відстань гіпоїдного зміщення « $e$ », яке є функціональним параметром гіпоїдної передачі.



**Рис. 6.** Схема для визначення координат відносного зміщення вершин початкових конусів гіпоїдних шестерні та колеса

Зміщення вершини конуса гіпоїдної шестерні відносно осі колеса у повздовжній площині  $e_x$  відбувається завдяки збільшенню її конусної відстані та зміщенню полюса зачеплення. Відносна повздовжня координата вершини конуса шестерні визначається з рис. 6 як різниця відрізків  $o_1a$  та  $o_2b$ .

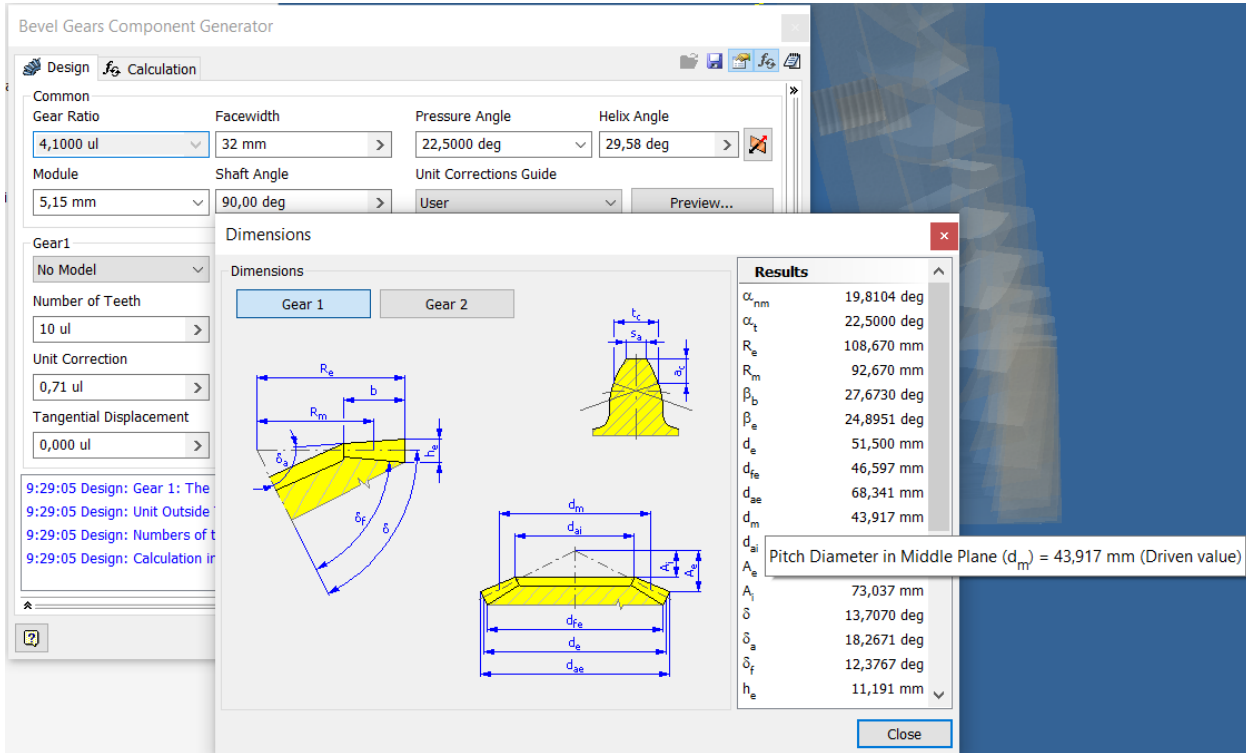
$$\begin{aligned} e_x &= o_1a - o_2b = \\ &= r_{ок} \cdot \cos \varepsilon - R_{мш} \cdot \cos \delta_{ш} \end{aligned} \quad (22)$$

Завдяки гіпоїдному збільшенню радіуса зачеплення шестерні вісь її валу зміщується від полюса зачеплення в поперечній площині на відстань  $e_z$ . Відносна поперечна координата вершини конуса шестерні визначається з рис.

6 як різниця радіусів зачеплення гіпоїдної та конічної шестерень.

$$e_z = r_{ош} - r_{окш}. \quad (23)$$

Радіус зачеплення гіпоїдної шестерні  $r_{ош}$  визначено у функціональному розрахунку гіпоїдного зачеплення. Значення радіуса зачеплення конічної шестерні  $r_{окш}$  визначають, як половину діаметра у середній площині зачеплення  $d_m$ , який розраховано у Inventor за моделювання конічних шестерень із параметрами гіпоїдного колеса (рис. 5в). У вкладці «Огляд» (Preview) у результатах розрахунку для колеса 1 (Gear 1) знаходять його значення, як це видно з **рис. 7**.



**Рис. 7.** Визначення діаметра  $d_m$  конічної шестерні у середній площині зачеплення

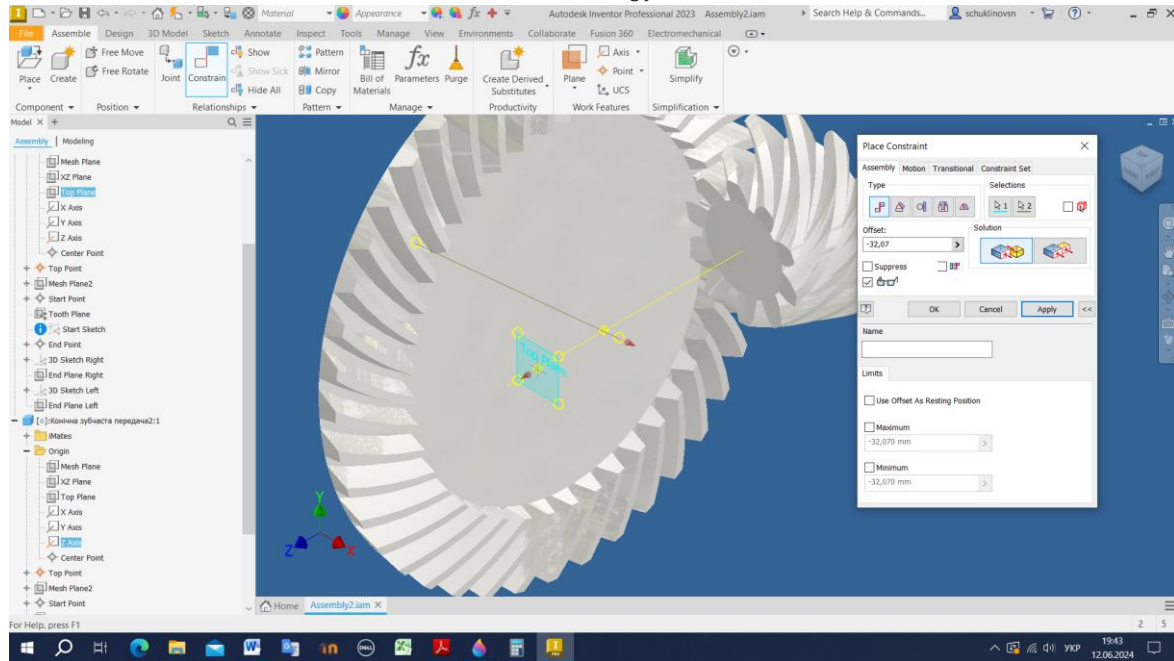
Для побудови 3D-моделі гіпоїдного зачеплення створюється новий файл із розширенням «.iam» (рис. 8). У цьому файлі складаються моделі гіпоїдної шестерні та гіпоїдного колеса, які треба поєднати так, щоб полюс їхнього зачеплення перебував у розрахунковому місці. Поєднання моделей гіпоїдної шестерні та гіпоїдного колеса у Inventor виконується командою «суміщення» (Constrain) у такий спосіб (рис. 8а). За допомогою вкладки «Залежності» у збиранні задаємо тип залежності та:

- відносну координату  $e_x$ , значення якої розраховано за формулою (22), шляхом зміщення між верхньою площиною (Top Plane)

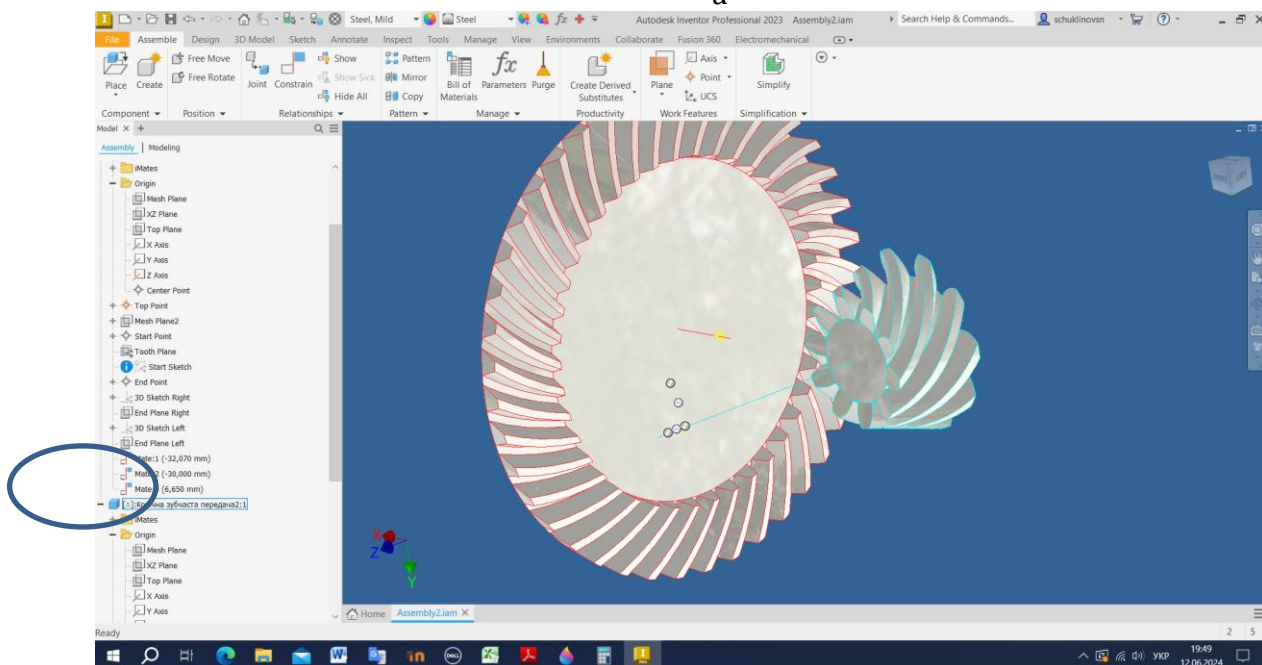
шестерні та віссю обертання колеса, тобто віссю  $Z$  колеса (**рис. 8-а**);

- гіпоїдне зміщення  $e$  осі вала шестерні відносно осі обертання колеса у вертикальній площині шляхом зміщення між площиною  $XZ$  шестерні та віссю обертання колеса, тобто його осі  $Z$ ;

- відносну координату  $e_y$ , значення якої розраховано за формулою (23), шляхом зміщення між верхньою площиною (Top Plane) колеса та вертикальною площиною  $XY$  шестерні.



а



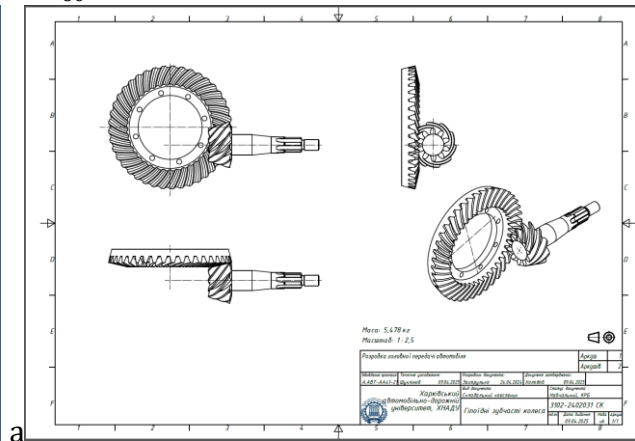
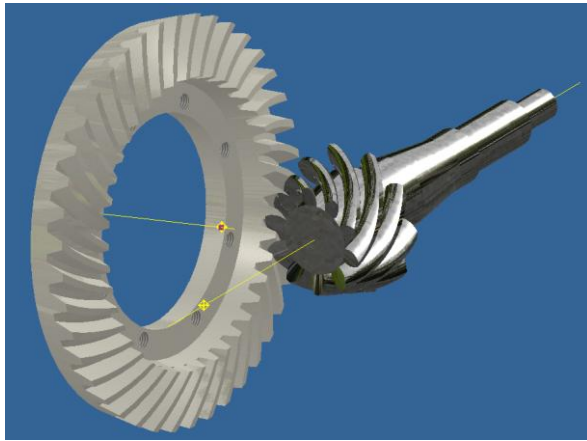
б

**Рис. 8.** Завдання параметрів суміщення та результат суміщення у трьох площинах

Результатом відносного орієнтування шестерні та колеса є 3D-модель гіпоїдного зачеплення, яка дає можливість компонування і побудови 3D-моделі гіпоїдної головної передачі та

автоматизованого оформлення конструкторської документації. Для цього на моделях шестерні й колеса добудовують їхні конструктивні елементи відповідно до компонувальної схеми головної передачі (рис. 9).





б

**Рис. 9.** Проектування гіпоїдної передачі у Autodesk Inventor: а – 3D-модель; б – креслення

### Висновки

Варто зазначити, що параметри профілю зубця шестерні та колеса в побудованій 3D-моделі відповідають конічному зачепленню, а не гіпоїдному. Тому цю модель не можна застосовувати для 3D-друку або для керування верстатом із ЧПУ у процесі виготовлення шестерні і колеса. Але геометричні параметри побудованих зубчастих коліс відповідають геометричним параметрам коліс гіпоїдного зачеплення [2], тому є можливість 3D-компонувати не тільки елементів гіпоїдного зачеплення, а також і решти компонентів головної передачі – підшипників, картера тощо. Для надання можливості виготовлення зубчастих коліс за робочими кресленнями, побудованих у Autodesk Inventor, необхідно в таблицю параметрів внести значення параметрів профілів зубців шестерні та колеса, які визначено аналітичним шляхом [2].

Отже, запропонована методика дозволяє побудувати 3D-модель гіпоїдного зачеплення у програмі Autodesk Inventor, що надає змогу 3D-компонувати елементів гіпоїдної головної передачі та автоматизованого оформлення її конструкторської документації. Це підвищує рівень продуктивності проектування в конструкторському бюро, а в навчальному процесі – рівень компетентності здобувачів та їхню зацікавленість у навчанні.

### References

1. Autodesk. (2025). Autodesk Inventor Professional 2025. Retrieved from: <https://help.autodesk.com/view/INVNTOR/2025/ENU/?guid=GUID-FCD9C1F6-7110-4AF3-9F06-17E3AB0AB5FC>
2. ТК 47. (2010). DSTU ISO 23509:2010. Peredachi zubchasti konichni ta hipoyidni. Rozrakhunok heometriyi (ISO 23509:2006, IDT). [Bevel and Hypoid Gears. Geometry Calculation (ISO 23509:2006, IDT)].



© О. В. Купіна, PhD, викладач,  
ORCID: 0000-0002-0847-0002,  
e-mail: kupina.okssana.khgpa@gmail.com  
(Комунальний заклад «Харківська  
гуманітарно-педагогічна академія»  
Харківської обласної ради)

© О. В. Нестеренко, кандидат технічних наук,  
доцент, старший викладач,  
ORCID: 0009-0009-1003-7126,  
e-mail: nesterenko.knu@gmail.com

© Н. Ю. Швагер, доктор технічних наук,  
професор кафедри,  
ORCID: 0000-0002-9986-8605,  
e-mail: knu.shwager@gmail.com

© О. Ю. Блізнюкова, кандидат технічних наук,  
асистент кафедри,  
ORCID: 0009-0001-9884-998X,  
e-mail: bliznyukova@knu.edu.ua  
(Криворізький національний університет)

© Oksana Kupina, PhD, Lecturer at the  
Department, ORCID: 0000-0002-0847-0002,  
e-mail: kupina.okssana.khgpa@gmail.com  
(Municipal establishment «Kharkiv  
Humanitarian-Pedagogical Academy»  
of the Kharkiv Regional Council)

© Oksana Nesterenko, Candidate of Technical  
Sciences, Senior Cashier,  
ORCID: 0009-0009-1003-7126,  
e-mail: nesterenko.knu@gmail.com

© Nataliia Shvager, Doctor of Technical Sciences,  
Professor, Professor at the Department,  
ORCID: 0000-0002-9986-8605,  
e-mail: knu.shwager@gmail.com

© Olga Bliznyukova, Candidate of Technical  
Sciences, Assistant,  
ORCID: 0009-0001-9884-998X,  
e-mail: bliznyukova@knu.edu.ua  
(Kryvyi Rih National University)

## ЗАВДАННЯ І РОЛЬ СИСТЕМИ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ В УМОВАХ СУЧАСНИХ ВИКЛИКІВ

### TASKS AND ROLE OF THE CIVIL DEFENSE SYSTEM OF UKRAINE IN THE CONDITIONS OF MODERN CHALLENGES

**Анотація.** Система цивільного захисту України є важливим елементом забезпечення національної безпеки, яка спрямована на захист населення, територій, майна та довкілля від надзвичайних ситуацій природного, техногенного та воєнного характеру. Її основою є закони, нормативні акти та організаційні структури, які забезпечують оперативне реагування та запобігання загрозам. У статті розглянуто основні напрями та результати досліджень, представлених у наукових виданнях. Основними завданнями системи є: профілактика надзвичайних ситуацій – комплекс заходів, спрямованих на попередження можливих ризиків; оперативне реагування – організація та проведення рятувальних та інших невідкладних робіт; забезпечення готовності органів влади та населення до дій у надзвичайних ситуаціях. Система цивільного захисту України є ключовою складовою національної безпеки, що забезпечує захист населення та територій від надзвичайних ситуацій. Транспортний комплекс України є ключовим елементом у системі цивільного захисту, забезпечуючи оперативне реагування на надзвичайні ситуації та підтримку життєдіяльності населення. Його роль визначається як практичними прикладами, так і законодавчими актами. З початку повномасштабного вторгнення Росії в Україну у 2022 році транспортний комплекс забезпечував масову евакуацію населення з небезпечних регіонів. Залізничний транспорт, зокрема, відіграв ключову роль у перевезенні мільйонів громадян по Україні та за кордон. Транспортні засоби використовуються для оперативного постачання гуманітарної допомоги, зокрема продуктів харчування, медикаментів та інших необхідних ресурсів, до постраждалих регіонів. Це забезпечує підтримку життєдіяльності населення в умовах надзвичайних ситуацій. В умовах сучасних викликів, таких як війна, кліматичні зміни, пандемії, а також техногенні ризики, ефективність цієї системи набуває критичного значення. У статті розглянуто передумови, ключові напрями трансформації, здобутки та виклики, з якими стикається система цивільного захисту в Україні.

**Ключові слова:** цивільний захист, національна безпека, надзвичайні ситуації, захист населення, виклики, безпекова ситуація.

**Abstract.** The civil defense system of Ukraine is an important element of ensuring national security, which is aimed at protecting the population, territories, property and environment from emergencies of a natural, man-made and military nature. Its basis is laws, regulations and organizational structures that ensure prompt response and prevention of threats. The article examines the main directions and results of such research presented in scientific publications. The main tasks of the system are: prevention of emergencies - a set of measures aimed at preventing possible risks; prompt response – organization and conduct of rescue and other emergency work; ensuring the readiness of authorities and the population to act in emergency situations. The civil defense system of Ukraine is a key component of national security, ensuring the protection of the population and territories from emer-

*gencies. The transport complex of Ukraine is a key element in the civil defense system, ensuring prompt response to emergencies and supporting the vital activities of the population. Its role is determined by both practical examples and legislative acts. Since the beginning of Russia's full-scale invasion of Ukraine in 2022, the transport complex has provided mass evacuation of the population from dangerous regions. Railway transport, in particular, has played a key role in transporting millions of citizens to safer regions and abroad. Vehicles are used for the prompt delivery of humanitarian aid, including food, medicines and other necessary resources, to the affected regions. This ensures the support of the population's vital activities in emergency situations. In the face of modern challenges such as war, climate change, pandemics, as well as man-made risks, the effectiveness of this system is of critical importance. The article examines the prerequisites, key areas of transformation, achievements and challenges faced by the civil protection system in Ukraine.*

**Keywords:** civil protection, national security, emergencies, population protection, challenges, emergency situation.

## Вступ

Сучасний світ стикається з безпрецедентними викликами, що потребують ефективної організації системи цивільного захисту (ЦЗ). В Україні ця тема особливо актуальна через складну безпекову ситуацію, техногенні ризики, природні катастрофи та соціально-економічні виклики. Забезпечення захисту населення, зменшення негативних наслідків надзвичайних ситуацій (НС) та своєчасне реагування є невід'ємною складовою національної безпеки. Серед чинників актуальності сьогодення такі:

### 1. Збройна агресія проти України.

Постійна загроза з боку агресора вимагає посилення спроможності системи ЦЗ у сфері реагування на наслідки бойових дій, евакуації населення та відновлення критичної інфраструктури. За даними Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС), з 2022 року кількість операцій із розмінування збільшилася у десятки разів [1].

**2. Кліматичні зміни та природні катастрофи.** Зміна клімату значно підвищує частоту паводків, лісових пожеж, буревіїв та інших природних катастроф. Наприклад, у 2021 році паводки на заході України завдали значних збитків економіці та створили загрозу для життя тисяч громадян. З метою забезпечення своєчасної підготовки до реагування на можливі надзвичайні ситуації, пов'язані з пропуском льодоходу, повені та паводків у 2021 році, ДСНС розроблено План заходів центральних і місцевих органів виконавчої влади та органів місцевого самоврядування щодо підготовки та пропуску льодоходу, повені і паводків у 2021 році, який розглянуто та затверджено на засіданні Державної комісії з питань техногенно-екологічної безпеки та надзвичайних ситуацій 12 січня 2021 року (доручення Кабінету Міністрів України від 12.01.2021 р. №1094/1/1-21) [2].

**3. Техногенні ризики.** Висока щільність промислових об'єктів та їхній технічний

стан створюють ризики аварій. Пожежі, вибухи на виробництвах та транспортні катастрофи залишаються постійною загрозою, що потребує дієвої системи попередження та реагування. 4. Соціально-економічні виклики. Економічна нестабільність обмежує можливості фінансування системи ЦЗ. Водночас важливим залишається питання інформування та підготовки населення до дій у НС.

## Основна частина

Система цивільного захисту України є об'єктом численних наукових досліджень, спрямованих на її вдосконалення та адаптацію до сучасних викликів. Р. Яковчук та А. Пузанова у своїй роботі дослідили засади розвитку Єдиної державної системи цивільного захисту (ЄДСЦЗ). Вони обґрунтували теоретико-методологічні основи та розробили практичні рекомендації щодо вдосконалення механізмів розвитку ЄДСЦЗ в сучасних умовах [3]. Зокрема, автори акцентують увагу на необхідності інтеграції європейського досвіду та вдосконалення нормативно-правової бази у сфері цивільного захисту.

Проблемі вдосконалення системи цивільного захисту в територіальних громадах присвячена стаття, опублікована в науковому віснику Державного університету інфраструктури та технологій, у якій розглядається функціонування системи цивільного захисту в територіальних громадах. Автори обґрунтують доцільність внесення змін до Кодексу цивільного захисту України з метою упорядкування повноважень органів місцевого самоврядування та конкретизації їхньої діяльності як суб'єктів забезпечення цивільного захисту [4].

О. Баріло у своїй статті аналізує наукові дослідження, присвячені державному управлінню у сфері цивільного захисту. Вона виявляє основні напрями досліджень та проблемні питання, розглянуті в наукових працях, і пропонує шляхи вдосконалення системи цивільного захисту держави. Зокрема, авторка наго-

лошує на необхідності реформування Державної служби України з надзвичайних ситуацій для підвищення її ефективності [5].

У статті, опублікованій у «Віснику Західноукраїнського національного університету», досліджується суть та зміст Єдиної державної системи цивільного захисту України. Автор обґрунтовує пропозиції щодо її поліпшення, акцентуючи увагу на необхідності чіткого визначення функцій та завдань системи, а також на вдосконаленні нормативно-правового забезпечення її діяльності [6].

Аналіз наукових досліджень свідчить про активну роботу вчених над удосконаленням системи цивільного захисту України. Основними напрямками є реформування державного управління у цій сфері, адаптація європейського досвіду, вдосконалення нормативно-правової бази та підвищення ефективності функціонування системи на місцевому рівні.

Система цивільного захисту в Україні регулювалась Законом України «Про правові засади цивільного захисту» від 24 червня 2004 року №1859-IV. На сьогодні закон втратив чинність згідно з Кодексом цивільного захисту України від 02.10.2012 № 5403-VI [7]. Цей документ визначав правові та організаційні основи захисту населення, територій та інфраструктури від надзвичайних ситуацій.

Система управління захисту України спрямована на забезпечення безпеки населення, територій та інфраструктури від різноманітних загроз, включаючи надзвичайні ситуації природного, техногенного та воєнного характеру. Основними завданнями цієї системи є:

1. Реалізація державної політики у сфері цивільного захисту: забезпечення виконання законодавчих та нормативних актів, спрямованих на захист населення і територій від надзвичайних ситуацій.

2. Забезпечення готовності органів управління та сил цивільного захисту: підтримка постійної готовності до оперативного реагування на можливі надзвичайні ситуації, включаючи проведення навчань та тренувань.

3. Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій: Розробка та реалізація заходів, спрямованих на зниження ризику виникнення надзвичайних ситуацій та мінімізацію їх наслідків.

4. Оповіщення та інформування насе-

лення: своєчасне інформування громадян про загрози та порядок дій у разі виникнення надзвичайних ситуацій, забезпечення ефективною системи оповіщення.

5. Організація та проведення рятувальних робіт: координація дій спеціалізованих служб та підрозділів для оперативної ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій та надання допомоги постраждалим.

6. Захист населення від наслідків надзвичайних ситуацій: реалізація заходів щодо евакуації, надання медичної та психологічної допомоги, забезпечення життєдіяльності постраждалих.

7. Створення та використання резервів ресурсів: формування та підтримка резервів матеріальних і фінансових ресурсів, необхідних для запобігання та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

8. Навчання населення діям у надзвичайних ситуаціях: проведення освітніх програм та тренінгів для підвищення обізнаності громадян щодо правил поведінки та використання засобів захисту.

9. Міжнародне співробітництво: взаємодія з міжнародними організаціями та іноземними державами у сфері цивільного захисту для обміну досвідом та ресурсами.

Ефективна реалізація цих завдань сприяє підвищенню рівня національної безпеки та забезпеченню стійкого розвитку України.

Управління системою здійснюється на всіх рівнях: державному, регіональному та місцевому. Основні елементи системи цивільного захисту є:

1. Державна служба України з надзвичайних ситуацій (ДСНС). ДСНС є головним органом у системі цивільного захисту, який забезпечує координацію дій органів влади та спеціалізованих служб [1].

2. Місцеві органи влади. Вони відповідають за реалізацію заходів цивільного захисту на місцевому рівні, зокрема, евакуацію населення, підготовку сховищ, проведення навчань [8].

3. Організаційні структурні утворення цивільного захисту. Це аварійно-рятувальні служби, спеціалізовані формування та добровільні об'єднання, які забезпечують виконання завдань на місцях [9].

4. Освітні та наукові заклади. Їх завданням є підготовка фахівців з цивільного захисту та розробка нових методів запобігання й

ліквідації надзвичайних ситуацій [10].

Одним із ключових елементів у системі цивільного захисту є транспортний комплекс, що забезпечує оперативне реагування на надзвичайні ситуації та підтримку життєдіяльності населення. Його роль визначається і закріплена такими законодавчими актами: Кодексом цивільного захисту України (№5403-VI від 02.10.2012) [11], цей документ регламентує організацію та функціонування системи цивільного захисту. Зокрема, стаття 6 визначає основні заходи у сфері цивільного захисту, зокрема евакуацію населення, що безпосередньо пов'язана з використанням транспортних засобів.

Закон України «Про транспорт» (№232/94-ВР від 10.11.1994)[12] встановлює правові та організаційні основи діяльності транспорту. Стаття 15 визначає порядок організації роботи транспорту в надзвичайних умовах, а стаття 16 – заходи безпеки на транспорті.

З початку повномасштабного вторгнення Росії в Україну у 2022 році транспортна інфраструктура забезпечувала масову евакуацію населення з небезпечних регіонів. Залізничний транспорт, зокрема, відіграв ключову роль у перевезенні мільйонів громадян по Україні та за кордон.

Транспортно-комунікаційна система України відіграє критично важливу роль у забезпеченні функціонування системи цивільного захисту, зокрема в таких аспектах, як евакуація населення: організація та реалізація евакуаційних заходів під час надзвичайних ситуацій, а саме природних катастроф, техногенних аварій та військових конфліктів. Транспортні засоби забезпечують швидке переміщення людей до безпечних зон. Транспортування гуманітарної допомоги та матеріальних ресурсів, тобто доставка продуктів харчування, медикаментів, води, будівельних матеріалів та інших необхідних ресурсів до постраждалих регіонів. Залучення різних видів транспорту (автомобільний, залізничний, авіаційний, водний) для оперативного реагування. Логістичне забезпечення рятувальних та аварійно-відновлювальних робіт: перевезення рятувальних команд, спеціалізованої техніки та обладнання до місць надзвичайних ситуацій; транспортування мобільних госпіталів та спеціальних бригад для надання медичної допомоги.

Транспортна система України забезпечує мобільність сил цивільного захисту, його мета – організація перевезень особового складу ДСНС, Національної гвардії, ЗСУ та інших служб до місць виконання завдань та координація транспорту для переміщення особового складу та техніки. Також здійснюється використання транспортної інфраструктури для організації зв'язку та передачі інформації про стан транспортних шляхів, аварійні ситуації та маршрути евакуації.

Отже, транспортний комплекс є ключовою складовою системи цивільного захисту, забезпечуючи оперативність, мобільність та ефективність реагування на надзвичайні ситуації. Хочете детальніше розглянути будь-який із цих аспектів?

Загалом, в умовах сучасних викликів, таких як війна, кліматичні зміни, пандемії, а також техногенні ризики, ефективність системи цивільного захисту набуває критичного значення. До основних викликів сучасності відносять:

1. Військові дії та їхні наслідки. Збройна агресія проти України спричинила значне навантаження на систему цивільного захисту. Це стосується як реагування на наслідки обстрілів, так і проведення евакуацій, розмінування територій та ліквідації руйнувань інфраструктури. За даними Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС), кількість вибухонебезпечних предметів, що підлягають знешкодженню, зросла в рази [1].

2. Кліматичні зміни. Зміна клімату збільшує частоту і масштаб природних катастроф, таких як паводки, лісові пожежі, буревії [13]. Наприклад, у 2021 році Україна зазнала значних втрат через паводки на заході країни, що вимагало залучення значних ресурсів для ліквідації наслідків [14].

3. Пандемії та біологічні загрози. COVID-19 показав слабкі сторони системи охорони здоров'я та цивільного захисту в умовах біологічних загроз. Питання забезпечення медичних засобів, координації дій та інформування населення стали актуальними як ніколи [15].

4. Недостатність фінансування та застарілі технології. Брак фінансування, застаріле обладнання та низький рівень автоматизації процесів є додатковими проблемами. Для ефективної роботи системи цивільного захисту необхідне впроваджен-

ня сучасних технологій моніторингу, прогнозування та реагування.

5. Координація та міжнародне співробітництво. З огляду на транскордонний характер багатьох викликів важливою є співпраця з міжнародними організаціями, такими як ООН, НАТО, та Європейський Союз. Однак наразі існують труднощі з адаптацією міжнародного досвіду до українських реалій [16].

Війна в Україні створила безпрецедентні виклики для системи цивільного захисту (СЦЗ). Система, яка раніше орієнтувалася переважно на реагування на природні й техногенні катастрофи, змушена була адаптуватися до нових умов, таких як масовані ракетні удари, евакуація мільйонів людей, відновлення інфраструктури та протидія гібридним загрозам.

До початку воєнного конфлікту система цивільного захисту в Україні була побудована відповідно до радянських стандартів, згодом реформованих у незалежній Україні. Основними завданнями були:

- ліквідація наслідків природних катастроф (повеней, пожеж, землетрусів);
- реагування на техногенні аварії (наприклад, вибухи, хімічні чи радіаційні аварії);
- координація рятувальних служб та служб екстреної допомоги [7].

Однак система не враховувала специфіки сучасних воєнних конфліктів, таких як: тотальна руйнація об'єктів критичної інфраструктури; тривалі бойові дії на території країни; масова міграція цивільного населення; психологічна, інформаційна й кібернетична війна. Недоліки, виявлені у цей період, стимулювали реформування системи.

Головними викликами в умовах воєнного конфлікту є:

1. Ракетні та авіаційні удари. З 2022 року українські міста та об'єкти інфраструктури регулярно піддаються ракетним обстрілам. Це поставило нові вимоги до системи оповіщення, укриттів та евакуації населення.

2. Масова внутрішня та зовнішня міграція. За оцінками ООН, у 2022 році понад 8 мільйонів людей стали внутрішньо переміщеними особами, а ще кілька мільйонів виїхали за кордон. Це вимагало створення системи для евакуації, забезпечення житлом, медичною та гуманітарною допомогою [17].

3. Мінна небезпека. Україна є однією з найбільш замінованих країн у світі. Розмінування стало пріоритетом для системи цивільного захисту, що потребує великих людських, технічних і фінансових ресурсів.

4. Психологічна допомога населенню. Масштабні воєнні дії спричинили кризу психічного здоров'я серед населення. Важливим завданням стало впровадження програм психологічної допомоги.

У 2023 році ухвалено зміни до нормативно-правових та законодавчих актів України, що регулюють питання цивільного захисту населення та передбачають: адаптацію законодавства до стандартів НАТО та ЄС; розширення повноважень місцевих органів влади щодо цивільного захисту; запровадження механізмів партнерства держави з волонтерськими організаціями.

Завдяки співпраці з мобільними операторами запроваджено систему SMS-оповіщення про повітряні тривоги, яка забезпечує оперативне інформування громадян навіть у найвіддаленіших регіонах. У великих містах встановлено сучасні сирени з високою гучністю та охопленням. Станом на 2023 рік у багатьох регіонах було модернізовано наявні укриття та створено нові. Вперше в Україні розроблено стандарти щодо облаштування укриттів у школах, лікарнях та житлових будинках. Україна активно співпрацює з Європейським Союзом у рамках Механізму цивільного захисту ЄС, отримуючи допомогу у вигляді техніки, фінансування та експертної підтримки. Проведення масштабних інформаційних кампаній, навчання першої допомоги та правил безпеки під час обстрілів [18]. Також організовано спеціальні тренінги для працівників освітніх і медичних установ [1]. З 2022 року проведено понад 15 000 тренінгів для населення щодо безпеки під час обстрілів, а також навчань з надання першої медичної допомоги (табл. 1)

**Таблиця 1**

Навчання та підготовка населення  
з питань безпекових заходів

| Тип навчання                              | Кількість учасників, осіб |
|-------------------------------------------|---------------------------|
| Тренінги з безпеки                        | 500 000                   |
| Навчання з першої допомоги                | 200 000                   |
| Спеціальні навчання для рятувальних служб | 50 000                    |

Джерело: ДСНС України, Міністерство охорони здоров'я України

За підтримки міжнародних партнерів Україна отримала сучасне обладнання для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій: дрони для розвідки, засоби розмінування, спецтранспорт тощо.

Трансформація системи цивільного захисту України є безпрецедентною за масштабом і важливістю. Виклики, з якими зіткнулася країна, стимулювали зміни, що наблизили систему цивільного захисту до стандартів провідних країн світу. Подальший розвиток залежить від стабільного фінансування, впровадження сучасних технологій та ефективної співпраці з міжнародними партнерами (табл. 2).

**Таблиця 2**

Трансформація системи цивільного захисту

| Трансформаційні заходи               | Характеристика                                                                                                                                                                                                                                                |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Зміна законодавчої бази              | У відповідь на нові виклики було внесено зміни до законодавства. Прийнято низку нормативних актів, спрямованих на інтеграцію міжнародного досвіду, зокрема стандартів НАТО та ЄС                                                                              |
| Посилення матеріально-технічної бази | Одним із важливих аспектів стало оновлення обладнання для рятувальників, забезпечення спеціалізованим транспортом, засобами зв'язку та індивідуального захисту. Активну роль у цьому відіграли міжнародні партнери, зокрема через програми технічної допомоги |
| Організація системи оповіщення       | Розроблено та впроваджено сучасні системи оповіщення, які використовують мобільні технології. Зокрема, мобільні оператори запустили послуги масового SMS-інформування про повітряні тривоги та інші загрози                                                   |
| Навчання та підготовка населення     | Особливий акцент було зроблено на проведенні інформаційних кампаній щодо правил поведінки під час повітряних тривог, обстрілів та евакуації. Введено обов'язкові тренінги для працівників критичної інфраструктури                                            |
| Децентралізація управління           | Передача частини повноважень на місцевий рівень дала змогу оперативніше реагувати на локальні виклики, особливо в прифронтових районах. Створено регіональні координаційні центри цивільного захисту                                                          |

Джерело: Офіційний сайт ДСНС України. URL: <https://dsns.gov.ua>

Європейська Комісія. Механізм цивільного захисту ЄС. URL: <https://ec.europa.eu>

Трансформація системи цивільного захисту України в умовах воєнного конфлікту є необхідним кроком для забезпечення безпеки населення та мінімізації наслідків бойових дій. Впровадження нових підходів, використання міжнародного досвіду та залучення сучасних технологій сприяють підвищенню стійкості

держави до кризових ситуацій.

У результаті аналізу і моніторингу сучасної проблематики системи цивільного захисту України сформульовано й обґрунтовано такі шляхи їхнього вирішення:

1. Підвищення фінансування. Розробка програм модернізації технічного обладнання



та систем моніторингу є ключовим завданням. Державний бюджет має передбачати достатнє фінансування для реалізації цих заходів.

## 2. Інформаційна підготовка населення.

Проведення тренувань та навчальних програм для громадян сприятиме підвищенню рівня готовності до надзвичайних ситуацій.

## 3. Використання сучасних технологій.

Впровадження геоінформаційних систем, дронів для моніторингу та аналізу ситуацій, а також автоматизованих систем оповіщення підвищить оперативність та ефективність реагування.

## 4. Розвиток міжнародної співпраці.

Участь у спільних тренуваннях, обмін досвідом та залучення міжнародної допомоги сприятиме посиленню потенціалу системи цивільного захисту України.

Система цивільного захисту України стикається з низкою викликів, зокрема:

- необхідністю модернізації обладнання та техніки;
- посиленням підготовки населення до дій у надзвичайних ситуаціях;
- інтеграцією з міжнародними структурами для обміну досвідом та ресурсами.

У перспективі пріоритетами розвитку залишаються автоматизація процесів реагування, вдосконалення системи раннього оповіщення та залучення інноваційних технологій. Ефективно організована система ЦЗ є запорукою зменшення людських втрат, матеріальних збитків та збереження стабільності в умовах надзвичайних ситуацій. Головними завданнями є: створення та підтримання сучасних засобів моніторингу та прогнозування НС; розробка планів евакуації та реагування; координація між різними органами влади та екстреними службами; модернізація матеріально-технічної бази.

Україна активно інтегрує європейські стандарти у сфері ЦЗ. Наприклад, співпраця з НАТО у межах ініціативи «Цивільний захист та реагування на катастрофи» сприяє розвитку професійної підготовки фахівців та обміну досвідом [16].

## Висновки

Система цивільного захисту України відіграє ключову роль у забезпеченні безпеки населення та територій. Її ефективність залежить від злагодженої роботи органів влади, громадськості та міжнародної співпраці. Су-

часні виклики ставлять перед системою цивільного захисту України завдання адаптації до нових реалій. Необхідно застосувати комплексний підхід до реформування цієї сфери, що передбачає фінансову підтримку, технологічну модернізацію, освітні ініціативи та міжнародну співпрацю. Транспортний комплекс України є невід'ємною складовою системи цивільного захисту, забезпечуючи ефективне реагування на надзвичайні ситуації, евакуацію населення, доставку гуманітарної допомоги та підтримку мобільності рятувальних служб. Його діяльність регламентується низкою законодавчих актів, що визначають порядок функціонування транспорту в умовах надзвичайних ситуацій.

Для гарантування стабільної роботи системи ЦЗ необхідно збільшити фінансування на державному та місцевому рівнях, залучаючи міжнародну допомогу. Проведення освітніх кампаній, навчань і тренінгів з основ ЦЗ сприятиме підвищенню готовності громадян до дій у НС. Впровадження сучасних інформаційних систем, дронів для моніторингу та автоматизованих систем оповіщення підвищить оперативність реагування. В подальшому необхідно вдосконалювати міжвідомчу взаємодію та запроваджувати єдині стандарти дій у надзвичайних ситуаціях.

Організація системи цивільного захисту в Україні є питанням національної безпеки. В умовах сучасних викликів ця система потребує подальшого реформування, ширшого впровадження сучасних технологій, посилення фінансової підтримки, поглиблення міжнародного співробітництва. Лише за умови комплексного підходу можна гарантувати захист населення та зменшення негативних наслідків надзвичайних ситуацій.

## References

1. Derzhavna sluzhba Ukrayiny z nadzvychaynykh sytuatsiy. [SES of Ukraine]. (2025). Ofitsiynyy sayt. [Official website]. Retrieved from <https://dsns.gov.ua/> [in Ukrainian].
2. Derzhavna sluzhba Ukrayiny z nadzvychaynykh sytuatsiy. [SES of Ukraine]. (2021). Zahalni tendentsiyi perebihu stykhiynykh meteorolohichnykh yavlyshch v Ukrayini ta sviti. [General trends in the course of natural meteorological phenomena in Ukraine and the world]. Retrieved from <https://kr.dsns.gov.ua/upload/1/3/1/5/6/5/2021-7-26-0000-informac-stixiini-yavishha.pdf> [in Ukrainian]
3. Yakovchuk, R. S. & Puzanova, A. V. (2022). Doslidzhennya mekhanizmiv rozvytku Yedynoyi derzhavnoyi systemy tsyvilnoho zakhystu ta rozrobka

shlyakhiv yiui udoskonalennya [Research on the mechanisms of development of the Unified State Civil Protection System and development of ways to improve it]. Retrieved from <https://sci.lidubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/11715> [in Ukrainian]

4. Korobkin, V. & Yakovleva, Ya. (2022). Udoskonalennya systemy tsyvilnoho zakhystu v terytorialnykh hromadakh. [Improving the civil protection system in territorial communities]. *Naukovyy visnyk Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohiy* [Scientific Bulletin of the State University of Infrastructure and Technology], 1(11). DOI: [https://doi.org/10.33269/2618-0065-2022-1\(11\)-42-60](https://doi.org/10.33269/2618-0065-2022-1(11)-42-60) [in Ukrainian]

5. Barylo, O. G. (2018). Analiz doslidzhen problem derzhavnoho upravlinnya u sferi tsyvilnoho zakhystu [Analysis of research on public administration problems in the field of civil protection]. *Teoriya ta praktyka derzhavnoho upravlinnya i mistsevoho samovryaduvannya*, 9, 120–125. [Theory and practice of public administration and local self-government] [in Ukrainian]

6. Masley, V. (2020). Sutnist ta zmist yedynoyi derzhavnoyi systemy tsyvilnoho zakhystu [The essence and content of the unified state civil protection system]. *Visnyk Zakhidnoukrayinskoho natsionalnoho universytetu* [Bulletin of the Western Ukrainian National University], 1, 58–68. [in Ukrainian]

7. Verkhovna Rada of Ukraine. (2024). Zakon Ukrayiny «Pro pravovi zasady tsyvilnoho zakhystu» vid 24 chervnya 2004 roku №1859-IV. [Law of Ukraine "On the Legal Principles of Civil Protection" dated June 24, 2004 No. 1859-IV.]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text> [in Ukrainian]

8. Kabinet Ministriv Ukrayiny. [Cabinet of Ministers of Ukraine]. (2014). Postanova Kabinetu Ministriv Ukrayiny «Pro zatverdzhennya Polozhennya pro yedynu derzhavnu systemu tsyvilnoho zakhystu» vid 9 sichnya 2014 roku №11. [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine "On Approval of the Regulations on the Unified State System of Civil Protection" dated January 9, 2014 No. 11]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/11-2014-%D0%BF#Text> [in Ukrainian]

9. Derzhavna sluzhba Ukrayiny z nadzvychaynykh sytuatsiy. [SES of Ukraine]. (2025). Navchalno-metodychni materialy DSNS shchodo diy u nadzvychaynykh sytuatsiyakh. [Educational and methodological materials of the State Emergency Service on actions in emergency situations]. Retrieved from <https://www.dsns.gov.ua/education> [in Ukrainian]

10. Naukovo-doslidnyy tsentr tsyvilnoho zakhystu ta tekhnohennoyi bezpeky. [Scientific and Research Center for Civil Protection and Technogenic Safety]. (2025). Retrieved from <https://www.nucz.com.ua/> [in Ukrainian]

11. OON. [UN]. (2023). Zvit pro zminu klimatu, 2023 rik. [Climate Change Report, 2023]. Retrieved from <https://un.org.> [in Ukrainian]

12. LB. (2021). Zbytky vid pavodku na Zakarpatti otsynly u 160 mln hryven. [Flood damage in Transcarpathia was estimated at 160 million hryvnias]. Retrieved from

[https://lb.ua/society/2021/07/21/489894\\_zbitki\\_vid\\_pavodku\\_zakarpatti.html](https://lb.ua/society/2021/07/21/489894_zbitki_vid_pavodku_zakarpatti.html) [in Ukrainian]

13. Instytut sotsiologii NAN Ukrainy. [Institute of Sociology of the National Academy of Sciences of Ukraine]. Pandemiya COVID-19 v Ukrayini: sotsialni naslidky / za nauk. red. V. P. Stepanenka. Kyiv: TOV NVP «Interservis». [COVID-19 pandemic in Ukraine: social consequences / edited by V.P. Stepanenko. Kyiv: LLC NVP "Interservice"]. 406 c. Retrieved from <https://isnasu.org.ua/assets/files/books/2021/covid.socialni-naslidki-fin-2021.pdf> [in Ukrainian]

14. NATO. (2025). Civil Protection and Emergency Planning. Official NATO website. Retrieved from <https://nato.int> [in Ukrainian]

15. OON. [UN]. (2021). UN Policy Paper on In-Out Migration\_FINAL COR UKR.pdf. Retrieved from [https://ukraine.un.org/sites/default/files/2021-03/UN%20Policy%20Paper%20on%20In-Out%20Migration\\_FINAL%20COR%20UKR.pdf](https://ukraine.un.org/sites/default/files/2021-03/UN%20Policy%20Paper%20on%20In-Out%20Migration_FINAL%20COR%20UKR.pdf)

16. Kabinet Ministriv Ukrayiny. [Cabinet of Ministers of Ukraine]. (2024). Rozporyadzhennya Kabinetu Ministriv Ukrayiny "Pro zatverdzhennya planu osnovnykh zakhodiv tsyvilnoho zakhystu Ukrayiny na 2024 rik" vid 12 sichnya 2024 r. № 29-r. [Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine "On Approval of the Plan of Main Measures of Civil Protection of Ukraine for 2024" dated January 12, 2024 No. 29-r]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/29-2024-%D1%80#Text> [in Ukrainian]

© І. С. Мурований, канд. техн. наук, доцент, декан факультету транспорту та механічної інженерії, ORCID: 0000-0002-9749-980X, e-mail: igor\_intu@ukr.net (Луцький національний технічний університет);  
© В. П. Сахно, докт. техн. наук, професор, завідувач кафедри автомобілів, ORCID: 0002-5144-7131, e-mail: svp\_40@ukr.net;  
© В. М. Поляков, канд. техн. наук, доцент, професор кафедри автомобілів, ORCID: 0000-0001-7042-3066, e-mail: poljakov\_2006@ukr.net;  
© С. М. Шарай, канд. техн. наук, доцент, професор кафедри міжнародних перевезень та митного контролю, ORCID: 0000-0001-6568-4990, e-mail: Svetasharai@gmail.com;  
© В. М. Босенко, канд. техн. наук, доцент кафедри автомобілів, ORCID: 0000-0002-9654-949X, e-mail: bosia4ok@ukr.net;  
© О. В. Паламарчук, магістр, аспірант кафедри автомобілів, ORCID: 0009-0003-9782-1015 e-mail: alex-magtrans@ukr.net (Національний транспортний університет)

© Igor Murovanyi, PhD in Engineering, Assoc. Professor, Dean of the Faculty of Transport and Mechanical Engineering, ORCID: 0000-0002-9749-980X, e-mail: igor\_intu@ukr.net, (Lutsk National Technical University);  
© Volodymyr Sakhno, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Automobiles Department, ORCID: 0000-0002-5144-713, e-mail: sakhno@ntu.edu.ua;  
© Victor Poljakov, Ph.D in Engineering, Associate Professor, Professor of the Department of Automobiles, ORCID: 0000-0001-7042-3066, e-mail: poljakov\_2006@ukr.net;  
© Svitlana Sharai, PhD in Engineering, Associate Professor, Professor of the Department of International Transportation and Customs Control, ORCID: 0000-0001-6568-4990, e-mail: svetasharai@gmail.com;  
© Volodymyr Bosenko, Ph.D in Engineering, Associate Professor of the Department of Automobiles, ORCID: 0000-0002-9654-949X, e-mail: bosia4ok@ukr.net;  
© Oleksii Palamarchyk, Post-Graduate Student of the Department of Automobiles, e-mail: alex-magtrans@ukr.net ORCID: 0009-0003-9782-1015 (National Transport University)

## ДО ВИЗНАЧЕННЯ СТІЙКОСТІ РУХУ ТРИЛАНКОВОГО ПРИЧІПНОГО АВТОПОЇЗДА-КОНТЕЙНЕРОВОЗА

### TO DETERMINE THE MOVEMENT STABILITY OF A THREE-LINK TRAILER CONTAINER TRAIN

**Анотація.** За останні роки широкого розповсюдження набули автопоїзди для перевезень контейнерів. Підвищити ефективність перевезень контейнерів можна шляхом застосування триланкових автопоїздів, здатних перевозити два контейнери, здебільшого один – 20-футовий, інший – 40-футовий. Або чотириланкових автопоїздів, здатних перевозити два 20-футових та один 40-футовий контейнер. У разі застосування триланкових автопоїздів загальна маса автопоїзда *Gap* збільшується до 60 т, а чотириланкових – до 100 т. У роботі розглянуто автопоїзд, що складається із тягового автомобіля і двох причепів, один із яких тривісний із передньою керованою віссю, а другий – двовісний з осями тандемного типу. За обраних вихідних даних для тягового автомобіля і причепів критична швидкість прямолінійного руху автопоїзда склала 31,75 м/с. У неусталених режимах про стійкість автопоїзда можна судити і за величинами бічної і кутової швидкості, а також бічного прискорення, що діють у центрі мас окремих ланок. Бічна і кутова швидкість якісно характеризують стійкість окремих ланок автопоїзда, а величина бічних прискорень – кількісно. У процесі виконання маневру «переставка» обмежувальним фактором за стійкістю є другий причіп, бічна і кутова швидкість якого перевищує на 20% бічну і на 12,5% кутову швидкість автомобіля. У процесі виконання маневру «ривок керма» найбільше прискорення має місце для другого причепа. Маневр «вхід у поворот» і подальший коловий рух передбачають найбільші бічні прискорення для тягового автомобіля. Тобто однозначної відповіді про обмежувальні фактори для ланок автопоїзда у процесі виконання ним різних маневрів отримати не можливо. Крім того, виконуючи маневр «переставка» за швидкості руху 10 м/с, автопоїзд вписується у нормований коридор руху, проте за швидкості до 15 м/с уже спостерігаються коливання, які перевищують допустимі, що свідчить про втрату стійкості руху автопоїзда. Це необхідно враховувати під час створення й експлуатації багатоланкових автопоїздів.

**Ключові слова:** автопоїзд, причіп, причіп на підкатному візку, контейнер, рівняння, швидкість, маневр, прискорення, стійкість руху.

**Abstract.** In recent years, road trains for container transportation have become widely distributed. The efficiency of container transportation can be increased by using three-link road trains which capable to transported 2 containers, usually - one 20-

foot, the second - 40-foot, or four-link road trains which capable to transported two 20-foot and one 40-foot container. In the case of using three-link road trains, the total mass  $G_{an}$  of the thus road train increases to 60 tons, and of four-link road train - to 100 tons. The work considers a road train consisting of a towing vehicle and two trailers, one of which is three-axle with a front steered axle, and the second is two-axle with tandem-type axles. Based on the selected initial data for the towing vehicle and trailers, the critical speed of the straight-line movement of the road train was 31.75 m/s. In unstable modes, the stability of a road train can be judged by the magnitude of side and angular speed, as well as side acceleration, which are acting at the center of mass of individual links. Side and angular speed qualitatively characterize the stability of individual links of a road train, and the magnitude of side accelerations - quantitatively. When executing the "lane change" maneuver, the limiting factor in terms of stability is the second trailer, whose side and angular speed exceeds by 20% the side speed and by 12.5% the angular speed of the vehicle. When executing the "steering jerk" maneuver, the greatest acceleration occurs for the second trailer, and during the "turn entry" maneuver and with further circular motion, the greatest side accelerations take place for the towing vehicle, to wit it is not possible to obtain a unambiguous answer about the limiting factors for the links of the road train when execution the various maneuvers by him. In addition, when executing the «rearrangement» maneuver at a speed of 10 m/s, the road train fits into the normalized traffic corridor, but at a speed up to 15 m/s, oscillations are already observed that exceed the permissible ones, which indicate about a loss of stability of the road train movement. This must be taken into account when creating and operating multi-link road trains.

**Keywords:** road train, trailer, trailer "dolly", container, equation, speed, maneuver, acceleration, stability of motion.

### Вступ

За останні роки потужним імпульсом для збільшення довжини АТЗ, особливо автопоїздів, послужив розвиток перевезень вантажів у контейнерах, що змусило ці довжини погоджувати з розмірами універсальних контейнерів ISO (ДСТУ ISO 668:2015). Так, стандартний 20-футовий контейнер має прямокутну форму зі стінками із рифленого металу та дерев'яною підлогою довжиною 6 м, обсягом 33 м<sup>3</sup> і загальною масою 23...24 т, 40-футовий контейнер довжиною 12 м, обсягом вантажу 76 м<sup>3</sup> і загальною масою 30..31 т [1]. Ці контейнери перевозять здебільшого дволанковими автопоїздами у складі автомобіля-тягача з напівприцепом або причепом. Підвищити ефективність перевезень контейнерів можна шляхом застосування триланкових автопоїздів, здатних перевозити 2 контейнери, переважно один 20-футовий, інший – 40-футовий, або чотириланкових автопоїздів, здатних перевозити два 20-футових і один 40-футовий контейнер. У разі застосування триланкових автопоїздів загальна маса автопоїзда  $G_{an}$  збільшується до 60 т, а чотириланкових – до 100 т. Цим пояснюється те, що багато країн та автомобільних виробників по всьому світу проявляють інтерес до триланкових автопоїздів через їхні численні переваги порівняно з дволанковими [1]. Зокрема збільшена питома площа кузова, зменшений коефіцієнт тари, менша вартість виробництва причепів і напівпричепів порівняно з автомобілями, менша трудомісткість обслуговування й ремонту, економія на будівництві складських приміщень, оскільки причепам не потрібно критого простору та гнучкість у плануванні перевезень відповідно до потреб. Проте можливість використання таких автопоїздів

має бути підтверджена не тільки транспортним законодавством країни, а й вирішенням певних технічних проблем, спрямованих на забезпечення передусім безпеки руху, що пов'язана зі стійкістю їхнього руху. У роботах [2-9] розглянуті окремі питання стійкості триланкових сидельно-причіпних, причіпних на підкатному візку DoLLy автопоїздів і автопоїздів типу B-DOUBLE, проте результати цих робіт не можуть бути перенесені на чотириланкові автопоїзди без додаткових досліджень.

З розвитком автомобільної комп'ютерної інженерії, автомобільної електронної технології управління і технології інтелектуальних транспортних засобів, а також вивченням факторів, що впливають на дорожньо-транспортні процеси, шарнірно-зчленовані важкі автотранспортні засоби (АТЗ) також швидко розвиваються у зв'язку з потребою в ефективних перевезеннях вантажів в останні роки [10]. Звичайні АТЗ зазвичай оснащені некерованими причепами, які демонструють складання, розкачування причепа, перекидання, вихід причепа за межі смуги руху, що призводить до поганої бокової стійкості на високій швидкості і поганої маневреності – на низькій швидкості [11-14]. Бокову стійкість і маневреність зазвичай оцінюють за допомогою критерію RWA. Це відношення пікового бокового прискорення центру мас причепа до пікового бокового прискорення центру мас тягача у процесі виконання маневру зміни смуги руху [13].

У роботі [15] досліджено активне рульове управління тягача і причепа для шарнірно-сполученого важкого транспортного засобу задля підвищення його поперечної стійкості на високих швидкостях та слідування причепа по траєкторії тягача на низьких швидкостях.

Результати моделювання показали, що динамічні характеристики та стійкість проти крену можуть бути ефективно покращені за умови застосування активного керування крутним моментом на колесах тягача або рульовим керуванням останнього причепа [15]. Для тягача з трьома повними причепами управління їхніми передніми осями прийнято пропорційним куту складання. При цьому показано, що активне рульове управління причепом може підвищити курсову стійкість і зменшити бокову силу під час рівномірного повороту. Бажані значення швидкості повороту вантажівки та причепа розраховуються за допомогою лінійної моделі автомобіля. Отримані результати свідчать про ефективність системи активного управління рульовим керуванням для покращення бічних характеристик вантажівки та причепа [15-18].

У роботі [19] показано, що раптова зміна смуги руху все ще залишається складною для важких зчленованих транспортних засобів, таких як тягачі та напівпричепа, особливо на дорогах із низьким коефіцієнтом зчеплення. Різні бічні прискорення, що діють на тягач і напівпричіп, можуть спричинити втрату стійкості, що призведе до удару, розгойдування причепа, перекидання або бічного ковзання. Результати показали, що втрати стійкості руху у процесі раптової зміни смуги руху можна успішно запобігти за допомогою активного рульового керування заднім колесом тягового автомобіля на основі розробленого алгоритму [19-22].

Аналіз розглянутих робіт показує, що питання маневреності і стійкості руху шарнірно-зчленованих транспортних засобів перебувають у полі зору дослідників. Для поліпшення показників цих властивостей застосовуються різноманітні контролери, робота яких заснована на результатах математичного моделювання переважно усталених режимів руху таких транспортних засобів. У більш загальних випадках руху дослідження показників маневреності та стійкості руху шарнірно-сполучених транспортних засобів є актуальним на сьогодні.

*Метою роботи* є аналіз показників поперечної стійкості автопоїзда у складі тягового автомобіля і двох причепів для перевезення контейнерів.

## Основна частина

Відома система рівнянь, що описує рух триланкового автопоїзда із двома причепами, один із яких – тривісний із передньою керованою віссю, а другий – двовісний з осями тандемного типу [5]. Ця система рівнянь узятя за основу і доповнена рівняннями причепа на підкатному візку Dolly, замість рівнянь, що описують плоскопаралельний рух першого причепа з керованою віссю. Рівняння руху такого автопоїзда, що може перевозити два 20-футові контейнери, один із яких на автомобілі, а другий на причепі з осями тандемного типу і один 40-футовий контейнер на п'ятивісному причепі, що складається з тривісного напівпричепа і двовісного візка, рис. 1, записані у вигляді:

$$\begin{aligned} -m(\ddot{u} + \omega v) + Y_2 + Y_{21} + YA - YB \cos \phi_1 + XB \sin \phi_1 &= 0; \\ -m(\ddot{v} - \omega u) - X_2 - X_{21} + XA - XB \cos \phi_1 + YB \sin \phi_1 &= 0; \\ -I_1 \dot{\omega} + aYA - bY_2 - bbY_{21} + c(YB \cos \phi_1 + XB \sin \phi_1) &= 0; \\ -I_1 \dot{\omega}_1 + \lambda YAc \cos \theta + XA \lambda \sin \theta &= 0; \\ -I_2 \ddot{\omega}_2 + d_1 YB - b_1 Y_3 + b_{11} Y_{31} + c_1 (YC \cos \phi_2 + XC \sin \phi_2) &= 0; \\ -I_3 \ddot{\omega}_3 + d_2 YC - b_2 Y_4 - b_{21} Y_{41} - b_{22} Y_{42} &= 0; \\ -I_4 \ddot{\omega}_4 + d_3 YD - b_{31} Y_{51} - b_{32} Y_{52} &= 0; \end{aligned}$$

У системі рівнянь (1) зусилля в шарнірах керуючого колісного модуля і з'єднання ланок автопоїзда записані у вигляді:

$$\begin{aligned} XC &= m_3 \dot{v}_3 - m_3 \omega_3 u_3 + X_{41} + X_{42}; \\ YC &= m_3 \dot{u}_3 + m_3 \omega_3 v_3 - Y_{41} - Y_{42}; \\ XD &= m_4 \dot{v}_4 - m_4 \omega_4 u_4 + X_{51} + X_{52}; \\ YD &= m_4 \dot{u}_4 + m_4 \omega_4 v_4 - Y_{51} - Y_{52}; \\ XB &= m_2 \dot{v}_2 - m_2 \omega_2 u_2 + m_3 \dot{v}_3 \cos \phi_2 - m_3 \omega_3 u_3 + \\ &\quad \cos \phi_2 X_{41} + \cos \phi_2 X_{42} + X_3 \cos \theta_2 - Y_3 \sin \theta_2 - \\ &\quad - \sin \phi_2 m_3 \dot{u}_3 - \sin \phi_2 m_3 \omega_3 v_3 + \sin \phi_2 Y_{41} + \sin \phi_2 Y_{42}; \\ YB &= m_2 \dot{u}_2 + m_2 \omega_2 v_2 + \sin \phi_2 m_3 \dot{v}_3 - \sin \phi_2 m_3 \omega_3 u_3 \\ &\quad + \sin \phi_2 X_{41} + \sin \phi_2 X_{42} + \cos \phi_2 m_3 \dot{u}_3 + \cos \phi_2 m_3 \omega_3 v_3 - \\ &\quad - \cos \phi_2 Y_{41} - \cos \phi_2 Y_{42}; \\ XA &= -\cos \theta m_1 \dot{v}_1 + \cos \theta m_1 \omega_1 u_1 - \cos \theta X_1 + \\ &\quad + m_1 \dot{u}_1 \sin \theta - Y_1 \sin \theta; \\ YA &= -\sin \theta m_1 \dot{v}_1 + \sin \theta m_1 \omega_1 u_1 - \sin \theta X_1 - \\ &\quad - m_1 \dot{u}_1 \cos \theta - m_1 \omega_1 v_1 \cos \theta + Y_1 \cos \theta. \end{aligned} \quad (2)$$

У рівняннях (1-2) прийняті такі позначення:

$\lambda$  (*lambda*) – винос керованого колеса автомобіля-тягача;  $a$ ;  $b$  – відстань від центру мас тягача до точок кріплення передньої (керованої) осі й середньої осі тягача;  $bb$  – відстань від

центру мас тягача до задньої осі;  $c$  – відстань від центра мас тягача до керованої осі першого причепа;  $d_1$  – відстань від центра мас першого причепа (другої ланки) до точки зчипки з тягачем;  $d_2$  – відстань від центра мас другого причепа (третьої ланки) до точки зчипки з першим причепом;  $b_{31}, b_{32}$  – відстані від центра мас другого причепа до передньої і задньої осі відповідно;

$J, m_1, J_1, m_2, J_2, m_3, J_3, m_4, J_4$  – маса й центральний момент інерції тягача, керуючого колісного модуля тягача, підкатного возика, першого і другого причепа;

$v, u, v_1, u_1, v_2, u_2, v_3, u_3, v_4, u_4$  – поздовжня й поперечна проєкції вектора швидкості центра мас тягача, керуючого колісного модуля тягача, підкатного візка, першого і другого причепа;

$\omega, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$  – кутова швидкість щодо вертикальної осі тягача, керуючого колісного модуля тягача, підкатного візка, першого і другого причепа;

$\theta, \theta_2$  – кут повороту коліс керованого модуля автомобіля і підкатного візка;

$\varphi_1, \varphi_2$  – кут складання між автомобілем тягачем і дишлом першого причепа і кістком першого і другого причепа;

$X_1, X_{2i}, X_3, X_{4i}, X_{5i}; Y_1, Y_{2i}, Y_3, Y_{4i}, Y_{5i}$  – поздовжні та бічні сили на колесах осей автопоїзда.

Центральний момент ланок автопоїзда відносно поперечної осі визначався у відповідності до роботи [5] через радіус інерції відносно поперечної осі

$$\rho_{yi} = \sqrt{\frac{1}{2}a_i b_i + \frac{1}{3}(H_i - h_i)h_i \pm \frac{1}{6}a_i b_i} \quad (3)$$

де  $a_i, b_i$  – координати центра мас ланки, м;  
 $H_i$  – висота ланки, м;

$h_i$  – відстані від центра мас ланки до площини дороги.

Момент інерції ланок автопоїзда визначалися за відомою формулою:

$$I_i = \rho_{yi}^2 \times m_i \quad (4)$$

Поздовжні сили на колесах осей автопоїзда визначалися як:

$$X_1, X_3, X_{4i}, X_{5i} = f \times Z_i, \quad X_{2i} = \gamma \times X_{2i}, \quad (5)$$

де  $f$  – коефіцієнт опору кочення керованих коліс тягача і коліс причепів;

$\gamma$  – питома тягова сила на ведучих колесах автомобіля-тягача;

$Z_i$  – нормальна реакція опорної поверхні на колеса осей автопоїзда.

Нормальні реакції опорної поверхні на колеса осей автопоїзда:

$$Z_1 = m_1 \times g + m \times g \times b s / l; \quad Z_2 = 0.5 \times m \times g \times a / l;$$

$$Z_3 = m_2 \times g + m_3 \times g \times b_{2s} / (d_2 + b_{2s});$$

$$Z_4 = 0.5 \times m_3 \times g \times d_2 / (d_2 + b_{2s}); \quad Z_5 = 0.5 \times m_4 \times g;$$

$$G_{an} = Z_1 + 2 \times Z_2 + Z_3 + 2 \times Z_4 + 2 \times Z_5, \quad (6)$$

$$\text{де } b s = (b + b b) / 2; \quad b_{2s} = (b_{21} + b_{22}) / 2; \quad L_1 = b_1 + d_1;$$

$$l = a + b s - \lambda.$$

Бічні реакції на колеса осей автопоїзда:

$$Y_1 = \frac{k_1 \delta_1}{\sqrt{1 + \frac{k_1^2 \delta_1^2}{(\varphi Z_1)^2}}}; \quad Y_2 = \frac{k_2 \delta_2}{\sqrt{1 + \frac{k_2^2 \delta_2^2}{(\varphi Z_2)^2}}};$$

$$Y_{21} = \frac{k_2 \delta_{21}}{\sqrt{1 + \frac{k_2^2 \delta_{21}^2}{(\varphi Z_2)^2}}}; \quad Y_3 = \frac{k_3 \delta_3}{\sqrt{1 + \frac{k_3^2 \delta_3^2}{(\varphi Z_3)^2}}};$$

$$Y_{41} = \frac{k_4 \delta_{41}}{\sqrt{1 + \frac{k_4^2 \delta_{41}^2}{(\varphi Z_4)^2}}}; \quad Y_{42} = \frac{k_4 \delta_{42}}{\sqrt{1 + \frac{k_4^2 \delta_{42}^2}{(\varphi Z_4)^2}}};$$

$$Y_{51} = \frac{k_5 \delta_{51}}{\sqrt{1 + \frac{k_5^2 \delta_{51}^2}{(\varphi Z_5)^2}}}; \quad Y_{52} = \frac{k_5 \delta_{52}}{\sqrt{1 + \frac{k_5^2 \delta_{52}^2}{(\varphi Z_5)^2}}}, \quad (7)$$

де  $k_i$  – коефіцієнт опору відведення коліс і-ої осі автопоїзда;

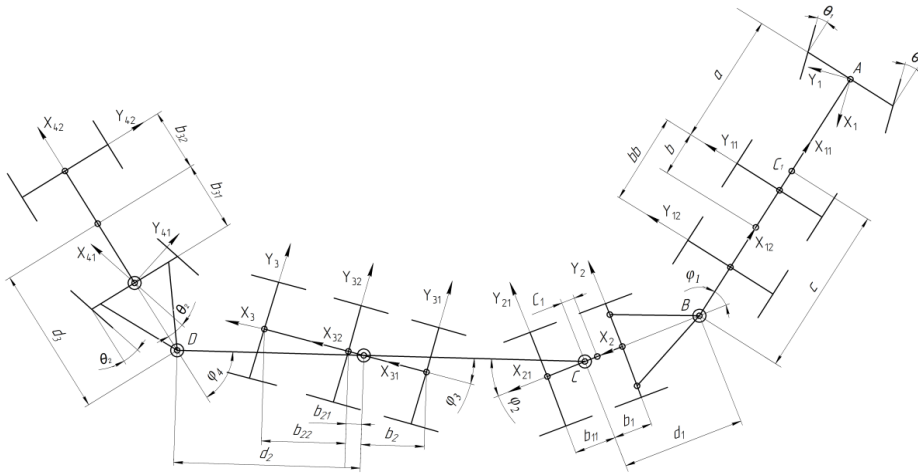
$\varphi$  – коефіцієнт зчеплення коліс автопоїзда з опорною поверхнею (приймається однако-вим для всіх коліс);

$\delta_1, \delta_2, \delta_{21}, \delta_3, \delta_{41}, \delta_{42}, \delta_{51}, \delta_{52}$  – кути відведення коліс осей автопоїзда:

$$\delta_1 = \theta_1 - \arctg \frac{u_1}{v_1}; \quad \delta_2 = \arctg \frac{(-u + b \omega)}{v};$$

$$\delta_{21} = \arctg \frac{(-u + b b \omega)}{v}; \quad \delta_3 = \theta_2 + \arctg \frac{(-u_2 + b_1 \omega_2)}{v_2};$$





**Рис. 1.** Розрахункова схема автопоїзда на неусталеному повороті

$$\begin{aligned}\delta_{41} &= \arctg \frac{(-u_3 + b_{21}\omega_3)}{v_3}; \\ \delta_{42} &= \arctg \frac{(-u_3 + b_{22}\omega_3)}{v_3}; \\ \delta_{51} &= \arctg \frac{(-u_4 + b_{31}\omega_4)}{v_4}; \\ \delta_{52} &= \arctg \frac{(-u_4 + b_{31}\omega_4)}{v_4}.\end{aligned}\quad (8)$$

Отримана система рівнянь дозволяє досліджувати поведінку триланкового автопоїзда в різних режимах руху. Для визначення критичної швидкості руху автопоїзда систему рівнянь (1) необхідно лінеаризувати, знайти її визначник і корені характеристичного рівняння [6]. За лінійності сил бічного відведення з урахуванням виразів, що визначають бічні сили і кути відведення осей автопоїзда, розв'язками лінеаризованої системи рівнянь (1) будуть значення змінних, що відповідають стаціонарним режимам, а саме:

$$U = \frac{\Delta_U}{\Delta}; \quad \omega = \frac{\Delta_\omega}{\Delta}; \quad \varphi_1 = \frac{\Delta_{\varphi 1}}{\Delta}; \quad \varphi_2 = \frac{\Delta_{\varphi 2}}{\Delta}, \quad (9)$$

де  $\Delta$  – головний визначник системи,  $\Delta_U$ ,  $\Delta_\omega$ ,  $\Delta_{\varphi 1}$ ,  $\Delta_{\varphi 2}$  – визначники системи для знаходження відповідних змінних.

Стійкість руху автопоїзда буде забезпечена, якщо всі корені мають від'ємні дійсні частини [6].

Ця умова виконується в разі додатності знаменника  $\omega$  (9), тобто додатності знаменника головного визначника системи, що має

вигляд:

$$V < V_{kp} = \beta / (-\alpha) \quad (10)$$

Якщо представити головний визначник у вигляді суми двох визначників

$$\|a_{ij}\|_1^6 = V^2 \times \|\beta_{ij}\|_1^6 + \|\alpha_{ij}\|_1^6, \quad (11)$$

де  $\beta_{ij} = \alpha_{ij} = a_{ij}$  ( $i = \overline{1,6}; j = \overline{1,3,4,5,6}$ )

Якщо  $j=2$ , то  $\beta_{12} = m + m_1 + m_2 + m_3 + m_4$ ;

$\beta_{22} = -c(m_1 + m_2 + m_3 + m_4)$ ;  $\beta_{42} = m_2 d_2$ ;

$\beta_{52} = m_3 d_4 + m_4 l_3$ ;  $\beta_{62} = m_4 d_4$ ;

$\alpha_{12} = k_1 a - \sum_{i=1}^2 k_{1i} b_{1i} - \sum_{j=1}^3 k_{2j} (c + l_1 + d_2 + b_{2j}) -$   
 $-\sum_{\rho=1}^3 k_{4\rho} (c + l_2 + l_3 + d_4 + b_{4\rho})$ ;

$\alpha_{22} = k_1 a^2 + \sum_{i=1}^2 k_{1i} b_{1i}^2 + c \sum_{j=1}^3 k_{2j} (c + l_1 + d_2 + b_{2j}) +$

$c \sum_{\rho=1}^3 k_{4\rho} (c + l_2 + l_3 + d_4 + b_{4\rho})$ ;

$\alpha_{62} = -\sum_{\rho=1}^3 k_{4\rho} (d_4 + b_{4\rho}) (c + l_2 + l_3 + d_4 + b_{4\rho})$ ,

то  $\alpha$  і  $\beta$  у (11) будуть визначатися як

$$\beta = \|\beta_{ij}\|_1^6; \quad \alpha = \|\alpha_{ij}\|_1^6. \quad (12)$$

Розв'язок рівняння (12) здійснено за допомогою програмного забезпечення Maple. Розрахунки виконані для триланкового автопоїзда за таких вихідних даних:

$V:=0; X1:=0; X2:=0; X21:=0; X3:=0; X31:=0; X4:=0; X41:=0; X42:=0; X51:=0; X52:=0; g:=9.81; a:=4.127; b:=1.373; bb:=2.753; d1:=3.880; b1:=-0.355$ ;

$b_{11}=0.955; d_2=5.233; c=4.193; c_1=0.0;$   
 $b_2=1.157; b_{21}=2.467; b_{22}=3.777; \lambda=-$   
 $0.0023; b_{31}=0.8; b_{32}=0.8; m_1=400; m=23600;$   
 $k_f=0; m_2=600; m_3=36000; k_1=160000;$   
 $k_2=252000; k_3=165000; k_4=165000;$   
 $k_5=165000; k_f=0.0; v=10; \phi_{10}=0.; \phi_{20}=0.;$   
 $\theta_{10}=0.0; \theta_{20}=0.; J_1=12.22; J=88395.39;$   
 $J_2=1711.89; J_3=569233.18; s=(b+bb)/2=2.063;$   
 $l=a+bs-\lambda=6.192;$   
 $Z_1=m_1*g+m*g*bs/l=80400.2;$   
 $Z_2=0.5*m*g*a/l=78457.19;$   
 $b_{1s}=(b_1+b_{11})/2=0.3; L_1=b_{1s}+d_1=4.18;$   
 $b_{2s}=b_{21}=2.47; L_2=b_{2s}+d_2=7.70;$   
 $Z_3=0.5*(m_2*g+m_3*g*b_{2s}/L_2)=59517.40;$   
 $Z_4=m_3*g*d_2/(3*L_2)=80003.74;$   
 $Z_5=m_4*g*(b_{31}+b_{32})/2=78480;$   
 $Z_1+2*Z_2+2*Z_3+3*Z_4+2*Z_5=753320.55.$

За обраних вихідних даних критична швидкість прямолінійного руху триланкового автопоїзда склала 31,75 м/с. Ця швидкість суттєво зменшується під час повороту керма автомобіля, рис. 2. Так, за кута повороту керованих коліс на кут 0,3 рад критична швидкість зменшується майже втричі. Разом із тим, як показали проведені раніше дослідження [6], критична швидкість обмежується насамперед швидкістю появи коливальної нестійкості. Ця швидкість знаходилася шляхом розв'язку характеристичного рівняння системи за поступового збільшення швидкості руху автопоїзда. При цьому визначалися корені характеристичного рівняння і перевірялися умови стійкості стаціонарних режимів.



**Рис. 2.** Залежність критичної швидкості автопоїзда від кута повороту керованих коліс автомобіля

Так, для прямолінійного руху автопоїзда за швидкості  $v=28$  м/с корені рівняння склали:  
 $eigv=-16.41809828, -4.441559939,$   
 $-3.521848973, -3.012625077,$

$-2.742636821, -1.754278429$   
 $-1.473229314*I,$   
 $-1.754278429+1.473229314*I,$   
 $-1.136926153, -1.136048077-14.12161941*I,$   
 $-1.136048077+14.12161941*I,$  тобто режим стійкий.

За швидкості 28,5 м/с з'явився перший додатний корінь, що свідчить про появу коливальної нестійкості автопоїзда:

$eigv=-2.247999564, -1.788537912,$   
 $-1.220303622-14.22903788*I,$   
 $-1.220303622+14.22903788*I,$   
 $-1.025543841-2.998512335*I,$   
 $-1.025543841+2.998512335*I,$   
 $-3.980204418-1.171375874*I,$   
 $-3.980204418+1.171375874*I, .1723617412e-1-$   
 $1.956270841*I, 1723617412e-1+1.956270841*I,$   
 тобто критичною швидкістю прямолінійного руху автопоїзда слід вважати 28 м/с.

Тепер розглянемо показники стійкості автопоїзда в неусталених режимах руху, зокрема «вхід у поворот», рух по колу, маневр «переставка», «ривок керма» тощо. При цьому кожний із режимів моделювався тим чи іншим законом повороту рульового колеса автомобіля.

Так, для найбільш типового маневру «вхід у поворот» закон управління керованими колесами автомобіля задається у вигляді [5]:

$$\theta = \begin{cases} \text{Onpu} & 0 \leq t \leq t_0 \\ \beta t n_{put_0} & t_0 < t \leq t_1 \\ \beta t_1 n_{put_1} & t_1 \leq t \leq t_2 \\ -\beta t n_{put_2} & t_2 < t \leq t_3 \\ \text{Onput} & t > t_3 \end{cases}, \quad (13)$$

де  $[0; t_0]$  і  $[t_3; t_k]$  – час руху автопоїзда по прямій відповідно до входу в поворот і після виходу із повороту;

$[t_0; t_1]$  – інтервал часу входження в поворот, керовані колеса автомобіля-тягача рівномірно повертаються зі швидкістю  $\beta=0,05$  с<sup>-1</sup>;

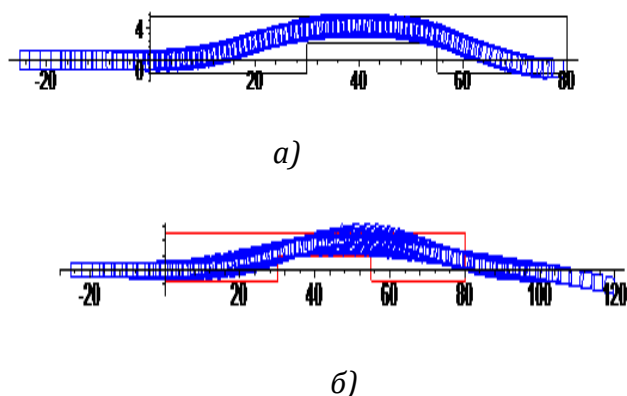
$[t_1; t_2]$  – інтервал часу руху автопоїзда по колу (може бути відсутнім);

$[t_2; t_3]$  – інтервал часу виходу автопоїзда із повороту (керовані колеса автомобіля-тягача рівномірно повертаються у нейтральне положення).

Для виконання таких маневрів як «переставка» та «ривок керма» кут повороту керованих коліс тягача задавався у вигляді [2]:

$$\theta_0 := \begin{cases} \frac{\pi t}{10} & -t < 0 \text{ and } t < \frac{10}{3} \\ \frac{\pi}{3} & -t < \frac{-10}{3} \text{ and } t < 7 \\ \frac{\pi}{3} - \frac{\pi(t-7)}{10} & -t < -7 \text{ and } t < \frac{41}{3} \\ -\frac{\pi}{3} & -t < \frac{-41}{3} \text{ and } t < \frac{52}{3} \\ -\frac{\pi}{3} + \frac{\pi(t-\frac{52}{3})}{10} & -t < \frac{-52}{3} \text{ and } t < \frac{62}{3} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

На **рис. 3** наведені результати моделювання руху автопоїзда для виконання ним маневру «переставка». За швидкості руху 10 м/с автопоїзд вписується у нормований коридор руху. За швидкості 15 м/с уже спостерігаються коливання автопоїзда, які перевищують допустимі, що свідчить про втрату стійкості руху автопоїзда.

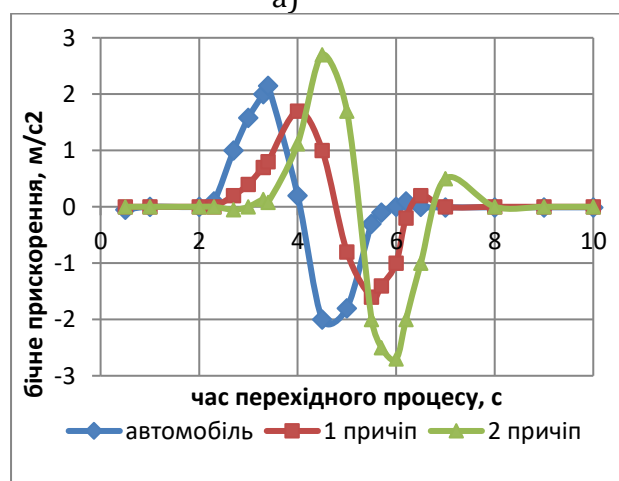
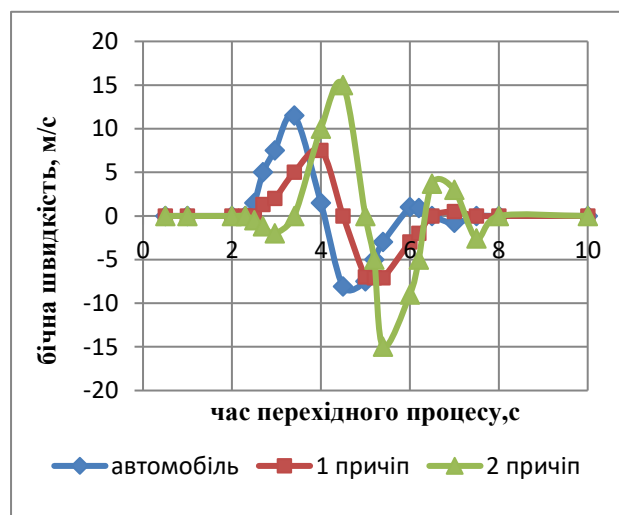


**Рис. 3.** Траєкторії руху автопоїзда у процесі виконання маневру «переставка» за швидкості руху 10 м/с (а) і 15 м/с (б)

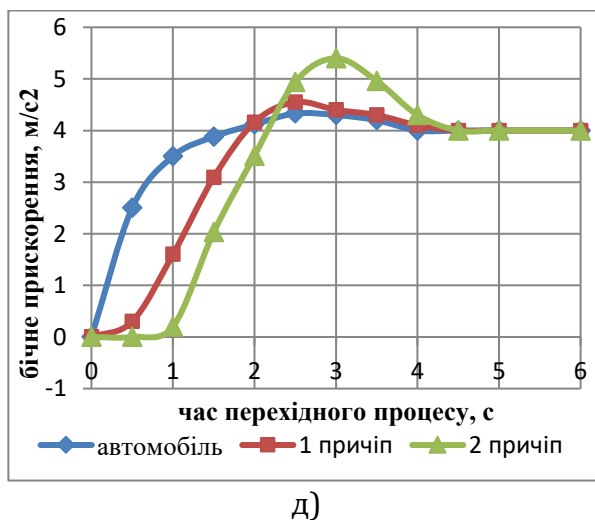
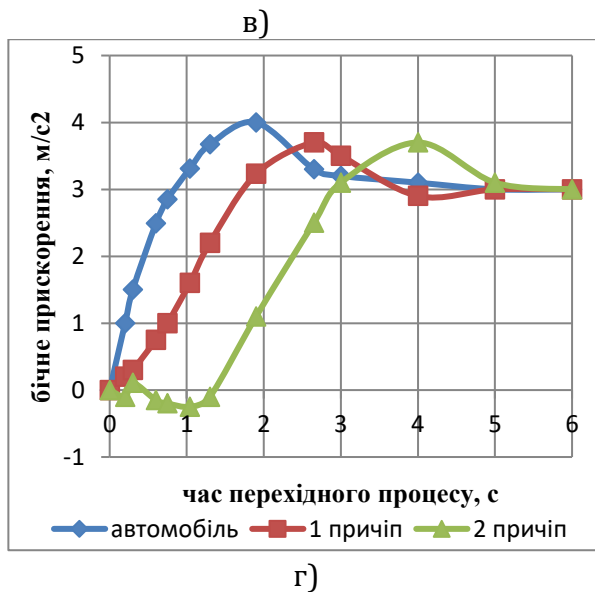
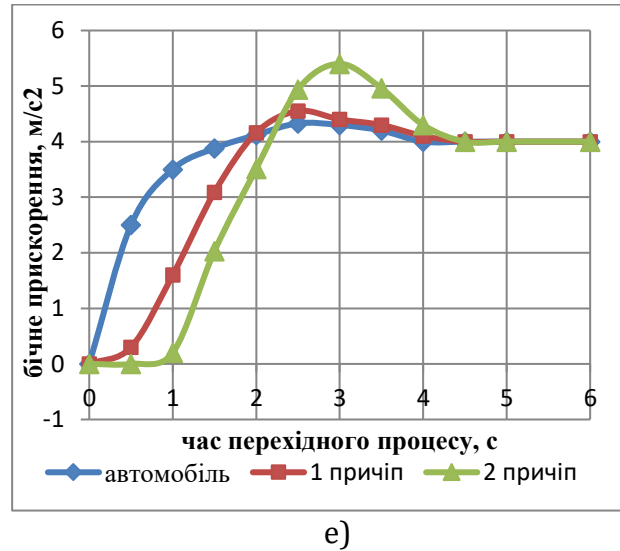
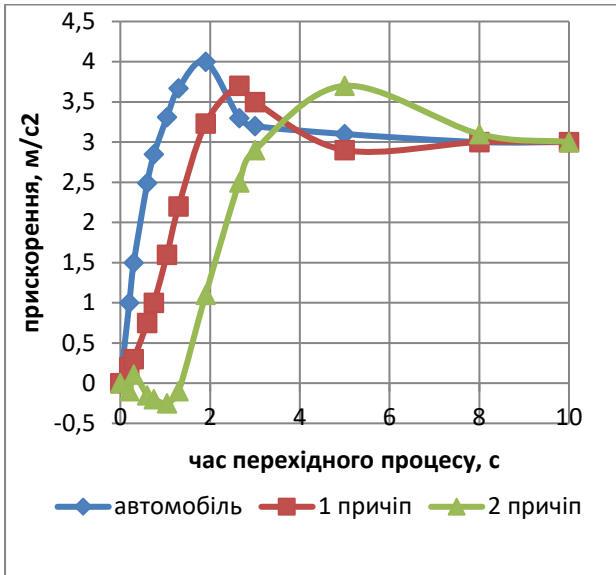
Про стійкість автопоїзда в неусталених режимах можна судити і за величинами бічної та кутової швидкості, а також бічного прискорення, що діють у центрі мас окремих ланок. Ці параметри визначалися шляхом розв'язку вихідної нелінійної системи диференціальних рівнянь (1). Бічна і кутова швидкість якісно характеризують стійкість окремих ланок автопоїзда, а величина бічних прискорень – кількісно. Режим руху вважався стійким, якщо прискорення будь-якої ланки автопоїзда не перевищували 4,5 м/с<sup>2</sup>.

На **рис. 4 а, в** наведена зміна у часі бічної і кутової швидкості ланок автопоїзда у процесі виконання маневру «переставка». Як бачимо з

наведених графіків, обмежувальним фактором у виконанні цього маневру є другий причіп, бічна і кутова швидкість якого перевищує на 20% бічну і на 12,5% кутову швидкість автомобіля. Проте за величинами цих швидкостей не можна повною мірою судити про стійкість автопоїзда. На **рис. 4-б**, з наведеними результатами розрахунку бічного прискорення ланок автопоїзда.



б)



**Рис. 4.** Бічна швидкість (а) і бічне прискорення (б) ланок автопоїзда у процесі виконання маневру «ривок керма», кутова швидкість riskання (в) і прискорення (г) ланок

автопоїзда у процесі виконання маневру «вхід у поворот» за швидкості 10 м/с, бічне прискорення ланок автопоїзда під час руху по колу за швидкості 10 м/с (д) і 15 м/с (е)

Якщо у процесі виконання маневру «ривок керма» найбільше прискорення має місце для другого причепа, то маневр «вхід у поворот» і подальший коловий рух передбачають найбільші бічні прискорення для автомобіля. Тобто однозначної відповіді про обмежувальні фактори для ланок автопоїзда під час виконання ним різних маневрів отримати неможливо. Тому розглянемо більш детально такий маневр, як об'їзд перешкоди, рис. 4 д, е. За швидкості 10 м/с характер зміни бічних прискорень у центрах мас ланок автопоїзда майже аналогічний тому, що для маневру «вхід у поворот» з урахуванням зміни часу виконання маневру від 10 до 6 с. Максимальні прискорення, що діють у центрах мас ланок не перевищують 0,45 g, тобто рух автопоїзда є стійким. При збільшенні швидкості до 15 м/с максимальні прискорення у центрі мас автомобіля і першого причепа знаходяться на рівні допустимих, а для другого причепа значно перевищують максимальні значення і рух автопоїзда стає нестійким.

## Висновки

1. За допомогою отриманої систем рівнянь визначені показники стійкості руху триланкового автопоїзда у складі тривісного автомобіля, п'ятивісного першого і двовісного другого причепа як у стаціонарних, так і нестаціонарних рухах. Так, критична швидкість  $v_{кр}$  автопоїзда склала 31,75 м/с, а швидкість появи коливальної нестійкості – 28 м/с.

2. Виконуючи маневр «переставка» за швидкості руху 10 м/с, автопоїзд вписується в нормований коридор руху, проте за швидкості 15 м/с уже спостерігаються коливання автопоїзда, які перевищують допустимі. Це свідчить про втрату стійкості руху автопоїзда.

3. У процесі виконання маневрів «ривок керма», «вхід у поворот і рух по колу» за швидкості 10 м/с максимальні прискорення, що діють у центрах мас ланок, не перевищують 0,45 g, тобто рух автопоїзда є стійким. За умови збільшення швидкості до 15 м/с максимальні прискорення у центрі мас автомобіля і першого причепа перебувають на рівні допустимих, а для другого причепа значно перевищують максимальні значення і рух автопоїзда стає нестійким. Це необхідно враховувати під час створення й експлуатації багатоланкових автопоїздів.

## References

1. Containers of Ukraine. (2025). Retrieved from <https://containers.ua>
2. Sakhno, V. P., Kuznetsov, R. M., Murovanyi, I. S., Glinchuk, V. M. (2007). Study of the critical speed of movement of the B-Dauble three-link road train//Project management, system analysis and logistics: Scientific journal, 4, 166-173.
3. Sakhno, V. P., Anglesey, O. A., Bondarenko, A. Yu, Yashchenko, D. M. (2007). Study of the stability of the movement of a three-link trailer train// Bulletin of the East Ukrainian National University named after V. Dahl, 6 (112), 7-10.
4. Sakhno, V. P., Verbytskyi, V. G., Anglesey, O. A., Bondarenko, A. E. (2008). Stability of a three-link semi-trailer truck train with a controlled semi-trailer in curvilinear motion // Bulletin of the East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl. Scientific journal, 7(125), 10-13.
5. Sakhno, V. P., Verbytskyi, V. G., Anglesey, O. A., Bondarenko, A. E. (2008). To determine the indicators of the stability of the movement of a three-link road train with a semi-trailer on a dolly //Autoshlyahovyk Ukrainy. Installment. Bulletin of the Northern Scientific Center of TAU, 11, 140-146.
6. Sakhno, V. P. (2019). To a comparative evaluation of three-link passenger road trains in terms of traffic stability/V. P. Sakhno, I. S. Murovanyi, V. M. Polyakov, E. M. Misko//Modern technologies in engineering and transport.

- Scientific journal. Lutsk National Technical University, 2(13), 146-155.
7. Marchuk, R., Marchuk, N., Sakhno, V., Poliakov, V. (2021). The Archives of Automotive Engineering. Archiwum Motoryzacji, 91(1):63 DOI:0.14669/AM.VOL91.AR.
8. Sakhno, V. P., Sharay, S. M., Murovanyi, I. S., Chovcha, I. IN. (2022). To determine the stability of the movement of three-link road trains. Modern technologies in mechanical engineering and transport. Scientific journal. Lutsk, 1(18). 155-166.
9. Sakhno, V., Murovanyi, I., Poliakov, V., Dembitskyi, V. (2022). Issue on Movement Stability of Three Sections Trailer Bus Train // TRANSBALICA XII: Transportation Science and Technology. DOI: 10.1007/978-3-030-94774-3\_14.
10. Tian, J., Zeng, Q., Wang, P., Wang, X. (2021). Active steering control based on review theory for articulated heavy vehicles DOI: 10.1371/journal.pone.0252098
11. Odhams, A. M. C.; Roebuck, R. L.; Cebon, D.; Winkler, C. B. (2008). Dynamic safety of active trailer steering systems, 222(4), 367–380.
12. Fancher, P., Winkler, C. (2007). Directional performance issues in evaluation and design of articulated heavy vehicles. Vehicle Syst Dyn. 45(7–8), 607–647.
13. El-Gindy, M., Mrad, N., Tong, X. (2001). Sensitivity of rearward amplification control of a truck/full trailer to tyre cornering stiffness variations. P I Mech Eng D-J, 215:579–588.
14. Huang, B., Yuan, Z., Peng, D., Wei, X., Wang, Y. (2023). Coordination Control of Active Steering and Direct Yaw Control for the Articulated Steering Vehicle/The University of Melbourne, Australia DOI: 10.1155/2023/5577119.
15. Tian, J., Zeng, Q., Wang, P., Wang, X. (2021). Active steering control based on preview theory for articulated heavy vehicles. DOI: 10.1371/journal.pone.0252098.
16. Emheisen, M. A. (2018). Active Steering Control of Articulated Heavy Vehicles for Improving Lateral Performance. Conference: 9th International Automotive Technologies Congress (OTEKON 2018).
17. Emheisen, M. A., Emirler, M. T., Ozkan, B. (2018). Active Steering Control of Articulated Heavy Vehicles for Improving Lateral Performance [https://www.researchgate.net/publication/324862156\\_](https://www.researchgate.net/publication/324862156_)
18. Tian, J., Zeng, Q., Wang, P., Wang, X. (2021). Active steering control based on preview theory for articulated heavy vehicles, 16(5). DOI: 10.1371/journal.pone.0252098.
19. Sahin, H., Akalin, O. (2020). Articulated Vehicle Lateral Stability Management via Active Rear-Wheel Steering of Tractor Using Fuzzy Logic and Model Predictive Control. SAE International Journal of Commercial Vehicle, 13, 2.
20. Emheisen, M. A., Mümin Tolga Emirler, M. T., Ozkan, B. (2022). Lateral Stability Control of Articulated Heavy Vehicles Based on Active Steering System // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research 11, 8, 575-582.
21. Yuping, He. (2012). An Automated Design Method for Active Trailer Steering Systems of Articulated Heavy Vehicles //J. Mech. Des, 134(4). DOI:10.1115/1.4006047.
22. Odhams, A. M. C., Roebuck, R. L., [...], Cebon, D. (2012). Active steering of a tractor–semi-trailer //Proceedings of the Intitution of Mechanical Enginiring, 225, 7. DOI: 10.1177/0954407010395680.

© В. О. Золотарьов, докт. техн. наук,  
професор кафедри,  
ORCID: 0000-0003-2132-9289,  
e-mail: kafedratdsm@gmail.com  
(Харківський національний  
автомобільно-дорожній університет)

© Viktor Zolotaryov, Doctor of Technical Sciences,  
Engineering (Dr.),  
Professor of the Department  
ORCID: 0000-0003-2132-9289,  
e-mail: kafedratdsm@gmail.com  
(Kharkiv National Automobile and Highway  
University)

## ПРО ДОЦІЛЬНІСТЬ ЗАМІНИ ІНДЕКСУ ПЕНЕТРАЦІЇ БІТУМІВ КОЕФІЦІЄНТОМ ЇХ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ЧУТЛИВОСТІ

### ABOUT THE EXPEDIENCY OF REPLACING THE PENETRATION INDEX OF BITUMEN WITH THE COEFFICIENT OF ITS TEMPERATURE SENSITIVITY

**Анотація.** Бітум є типовим термопластичним в'язучим, яке залежно від температури може бути текучим або крихким. Критерієм його текучості є температура розм'якшеності ( $T_{розм}$ ) за кільцем і кулю, а крихкості ( $T_{кр}$ ) відповідна низька температура, що визначається за методом Фрааса. Інтервал пластичності за цими показниками змінюється в широких межах залежності від пенетраційної марки та типу бітумів. Для оцінки такої зміни майже 100 років використовується індекс пенетрації, що нормується стандартами різних країн залежності від кліматичних умов та категорій доріг.

Недоліками цього умовного показника є: обмеження температурної зони його визначення інтервалом зміни пенетрації від 25 °C до температури розм'якшеності та неможливість оцінки опору зсуву бітуму в межах: температура від розм'якшеності – температура 25 °C і тим більш, від температури розм'якшеності – температура крихкості. Заміна цього критерія фізичним показником температурної чутливості бітумів дає можливість визначити опір зсуву будь-яких бітумів в будь-яких температурних умовах і передбачити їхній вплив на зсувостійкість та тріщиностійкість асфальтобетонів. Показник, що пропонується, базується на попередньо встановлених закономірностях, а саме: пенетрація бітуму є характеристикою опору його зсуву. Цей опір однаковий для всіх дорожніх бітумів: за температури розм'якшення він становить 0,015 МПа, а за температури крихкості – 31 МПа. Температурні залежності опору зсуву та пенетрації є ідентичними. Це дає змогу визначати опір зсуву бітумів у діапазоні температур  $T_{кр}$  та  $T_{розм}$ . Температурні залежності пенетрації для різних бітумів мають різний нахил і перетинаються за середньої температури, що відповідає напруженню 0,21 МПа або пенетрації  $31 \times 0,1$  мм.

Встановлення температур, що відповідають пенетрації  $1,25 \times 0,1$  мм,  $31 \times 0,1$  мм та  $800 \times 0,1$  мм, дає змогу визначити напруження зсуву бітумів за будь-якої температури в межах індексу пенетрації від -2,0 до +2,0.

Про дієздатність встановлених закономірностей свідчить результат обробки літературних даних, що стосуються бітумів типів «золь» та «золь-гель».

**Ключові слова:** температурна чутливість, індекс пенетрації, інтервал пластичності, критичні температури, крихкість, розм'якшеність, напруження зсуву, надійність.

**Abstract.** Bitumen is a typical thermoplastic binder, which can be fluid or brittle depending on the temperature. The criterion for its flowability is the softening point ( $T_{s.p.}$ ) according to the ring and ball experiment, and the brittleness ( $T_{br}$ ) which is the corresponding to the low temperature determined by the Fraas method. The plasticity interval for these parameters varies widely depending on the penetration grade and type of bitumen. To assess this change, the penetration index has been used for almost 100 years, which is normalised by the standards of different countries depending on climatic conditions and road categories.

The disadvantages of this conditional indicator are: limiting the temperature zone of its definition to the interval of change in penetration from 25 °C to the softening point and the impossibility of assessing the shear resistance of bitumen within the range: from temperature of the softening to the temperature of 25 °C, and even more so, from softening to brittleness temperature. Replacing this criterion with a physical indicator of the temperature sensitivity of bitumen makes it possible to determine the shear resistance of any bitumen under any temperature conditions and to predict their effect on the shear resistance and crack resistance of asphalt concrete. The proposed indicator is based on regularities, namely: the penetration of bitumen which is a characteristic of its shear resistance. This resistance is the same for all road bitumen: at the softening point it is 0.015 MPa, and at the brittle point it is 31 MPa. The temperature dependence of the shear resistance and penetration is identical. It makes possible to determine the shear resistance of bitumen in the temperature range from  $T_{br}$  to  $T_{s.p.}$ . The temperature dependences of penetration for different bitumen have different slopes and intersect at the average temperature corresponding to a stress of 0.21 MPa or a penetration of  $31 \times 0.1$  mm.

Setting the temperatures corresponding to the penetration of  $1.25 \times 0.1$  mm,  $31 \times 0.1$  mm and  $800 \times 0.1$  mm makes it possible to determine the shear stress of bitumen at any temperature within the penetration index from -2.0 to +2.0.



*The validity of the established regularities is evidenced by the result of processing the literature data concerning bitumen of the 'sol' and 'sol-gel' types.*

**Keywords:** temperature sensitivity, penetration index, plasticity interval, critical temperatures, brittleness, softening, shear stress, reliability.

Індекс пенетрації бітумів є одним із найважливіших показників їхньої якості, що характеризує температурну залежність пенетрації в межах від 25 °С до температури розм'якшення ( $T_p$ ). J.Ph Pfeiffer'om [1] була доведена напівлогарифмічна сутність цієї залежності: у зв'язку з труднощами визначення в той час пенетрації за температури крихкості температурна чутливість була обмежена наведеним вище інтервалом. Водночас практичної цінності набував «інтервал пластичності» в межах від температури крихкості ( $T_{кр}$ ) до температури розм'якшеності. Коефіцієнт температурної чутливості в прийнятому діапазоні для використаних у 30-ті роки минулого століття бітумів коливався у межах 0,015-0,06. Для зручності використання J.Ph Pfeiffer і Van Doormaal P.M. [2] запропонували штучний індекс пенетрації (IP), що розраховують за формулою:

$$IP = \frac{20 - 500A}{1 + 50A}, \quad (1)$$

У ній температурну чутливість (A) визначають за формулою:

$$A = \frac{\lg \Pi_{T_p} - \lg \Pi_{25}}{T_p - T_{25}} \quad (2)$$

При цьому вперше було визнано, що температура розм'якшеності відповідає пенетрації 800х0,1 мм. Однією з причин надання переваги  $T_p$  були складнощі з визначенням температури  $T_{800}$  у виробничих лабораторіях та недостатньою дослідженістю цього показника щодо його ідентичності температурі розм'якшеності за «кільцем та кулею».

Як показав накопичений за багато десятиліть досвід кількісна однаковість цих температур не завжди виправдовувалась особливо щодо бітумів структурного типу «гель», (I-го структурного типу за А. С. Колбановською), які наразі практично не використовуються для виробництва дорожніх асфальтобетонів. Першими, хто повернувся до  $T_{800}$  через багато років були французькі науковці-бітумники [2]. Нещодавно до цього приєдналися українські фахівці [3]. Така тенденція пов'язана з меншою розбіжністю IP, визначеного за  $T_{800}$ , та з однотипністю методів випробування бітумів.

Практичне використання діючого індексу пенетрації дозволяє лише якісно оцінити «умовну» температурну чутливість бітуму, ідентифікувати його структурний тип (золь, золь-гель, гель) та орієнтовно прогнозувати його реологічну поведінку (зокрема, аномалію в'язкості), а також здатність бітумів до старіння [4]. Тим не менш, не можна бути певним у результатах оцінки якості бітумів у такий спосіб, зважаючи на обмеженість температурного діапазону вимірювань (25 °С -  $T_p$ ). В такому разі близько 60 % температурного інтервалу від 25 °С до  $T_{кр}$  залишається поза оцінкою. Крім того, головною хвилюючою індекс пенетрації, що використовується майже 90 років, є його непридатність для кількісного прогнозування властивостей бітумів, (зокрема міцнісних і реологічних показників) та відповідно і асфальтобетонів.

Метою цієї роботи є відтворення первинного призначення індексу пенетрації, а саме прогнозування механічних властивостей бітумів за будь-яких температур у межах від температури розм'якшення до температури крихкості. Існує багато робіт, в яких стверджується про тотожність в'язкості та пенетрації [4, 5, 6]. Але під час прискіпливого аналізу це не можна вважати коректним, бо в'язкість є суто технологічною характеристикою, а не консистентною. Вже за температури 25 °С бітум переходить у більш-менш твердий стан, а з наближенням до температури крихкості він стає склоподібним. Ближчим до пенетрації за своєю сутністю можна було б вважати модуль зсуву, який Van der Poll використав для розробленої ним номограми [7].

Водночас, щоб оцінити ступінь наближення бітуму до певного температурно-реологічного стану доцільно скористатись температурними залежностями саме пенетрації бітуму, виходячи з того, що пенетрація, як в текучому так і в твердому стані, характеризує опір середовища зсуву – проникненню в нього голочного індентора. В роботі [8] доведено, що перехід бітуму до текучого стану відповідає пенетрації 800х0,1 мм, а до крихкого – 1,25х0,1 мм. Звідси витікає, що інтервал між цими

температурами доцільно кваліфікувати як реальний інтервал пластичності бітуму.

У [8] також показано, що в межах цього діапазону температурна залежність пенетрації бітумів є степеневою прямолінійною. Знання температури, що відповідає пенетрації 1,25х0,1 мм, дає можливість прогнозувати тріщиноутворення на асфальтобетонному покритті. Подібний цьому підхід до  $T_{800}$  може бути критерієм прогнозування колієутворення на покриттях з врахуванням кліматичного фактору. Але така інтерпретація є опосередкованою і не вирішує проблеми.

Вочевидь, що температури  $T_{800}$  і  $T_{1,25}$  своєю чергою відповідають пенетрації ( $P_{800}$  та  $P_{1,25}$ ), але цього недостатньо, щоб враховувати їх під час проєктування складу та для передбачення властивостей асфальтобетону. Більш плідним може бути підхід, що базується на міцнісних характеристиках. Щоб обґрунтувати та реалізувати такий перехід необхідно знайти шлях, який би дав змогу об'єктивно ідентифікувати умовні характеристики: (пенетрації, температури розм'якшення та крихкості) такими, що використовуються та адаптовані до існуючої системи SI-вимірювань. Передовсім доцільно перевести показник глибини проникнення голки пенетрометра (пенетрацію) в напруження зсуву [9]. Аргументом в цьому може слугувати той факт, що пенетрація вже використовується в якості критерію оцінки реологічного стану бітуму в межах від крихкості до розм'якшеності. Температурний діапазон між цими температурами сприймається як справжній інтервал пластичності: високотемпературна його межа характеризується пенетрацією, яка досягає 800х0,1 мм; а низькотемпературна – 1,25х0,1 мм. Ці загальновизнані показники беруть до уваги під час аналізу можливостей використання тих чи тих бітумів у різних дорожньо-кліматичних регіонах. Саме ці показники дають змогу диференціювати та стандартизувати різноманітні бітуми за марками. Однак цього замало, щоб визначити, який внесок в міцність асфальтобетону вносить певний бітум.

Першими, хто теоретично обґрунтував можливість трансформації цих показників в механо-реологічні характеристики були Carre G. та Laurent D. [6], які перевели пенетрацію у в'язкість, не звернувши увагу, як і всі інші, на те, що пенетрація за своєю сутністю є очевидною характеристикою опору бітуму зсуву під

час проникнення в нього індентора. Ця прикра необачність через 50 років була виправлена в роботах [9].

У ній автори не врахували аномалії опору (в'язкості) залежно від глибини проникнення голки. Робота [9] призвела до усвідомлення і сприйняття науковцями того факту, що глибина проникнення голки може бути трансформована в напруження зсуву. У ній була наведена перша кореляційна залежність між напруженням зсуву при зануренні голки та когезією бітуму, визначеною методом одноплщинного зсуву за швидкості  $1\text{с}^{-1}$  в діапазоні температур від  $5^\circ\text{C}$  до  $25^\circ\text{C}$ . Пряма залежність опору зсуву, визначеного двома методами, засвідчила, що пенетрацію можна і треба сприймати, як характеристику напруження зсуву. Дослідженнями багатьох послідовників Carre G. та Laurent D. [5, 8, 10] було визнано, що напруження за температури розм'якшення ( $T_{800}$ ) близьке до 0,0015 МПа, а за температури крихкості ( $T_{1,25}$ ) – близька до 2,2 МПа. Відомості про граничні значення напружень обмежують можливості щодо прогнозування поведінки в бітуму та його консистенції лише «полюсними» точками. Вочевидь, така інформація є неповною і недостатньою.

Більш повне уявлення про зміну консистенції бітуму з температурою дає номограма зображена на рис. 1-а, та 1-б. Її особливість полягає в тому, що вона охоплює температурні залежності напружень зсуву в повному температурному діапазоні від крихкості до розм'якшення. На ній можна виділити чотири зони напружень зверху до низу: еквінапруження до температури крихкості  $T_{1,25}$ ; цією температурою та між цією температурою та розм'якшеності  $T_p$  або  $T_{800}$ . В якості ілюстративних об'єктів прийнято 3 структурних типи бітумів з різними інтервалами пластичності.

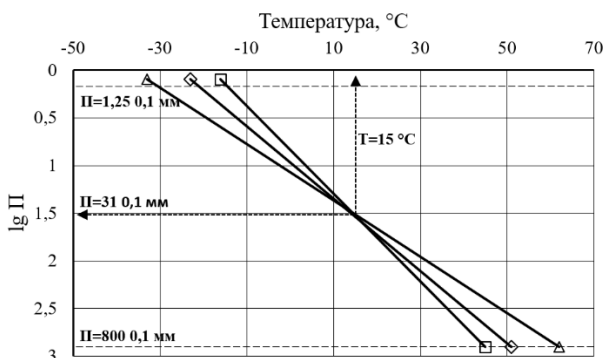
Бітум гель має найширший інтервал пластичності  $92^\circ\text{C}$ ; золь-гель –  $70^\circ\text{C}$ , золь –  $60^\circ\text{C}$ . Прямі між полюсними точками пересікаються за температури, близькій до  $(14-17)^\circ\text{C}$ . Цій температурі відповідає напруження, близьке 0,21 МПа. Отже, прямолінійна логарифмічна залежність напруження від температури проходить через знакові напруження: близько 31 МПа за температури крихкості: 0,21 МПа за умови середньої температури  $T_{31}$ , що відповідає пенетрації 31х0,1 мм; 0,0015 МПа, що відповідає пенетрації 800х0,1 мм за температури розм'якшення.

Напруження на зсув, що відповідають пенетрації за 25 °С, визначені за методом Carre G. та Laurent D. для бітумів трьох структурних типів становлять золь – 0,05 МПа, золь-гель – 0,063 МПа, гель – 0,089 МПа. Отже, наведені дані свідчать про можливість переведення показника пенетрації в напруження зсуву. Більше того, для будь-якого бітуму можна визначити його напруження зсуву (міцність на зсув) за температури, притаманній будь-якій порі року, або температурі покриття. У [10] було доведено, що кожний із розглянутих тут температур відповідає властиве їм напруження зсуву. Згідно з [10] за температури  $T_{800}$  воно дорівнює 0,0015 МПа, а за  $T_{1,25}$  його значення близькі 31 МПа. Згідно з літературними джерелами воно може коливатись в межах 5 %. У [11] також показано, що на прямолінійній логарифмічній залежності між цими крайніми температурами існує серединна температура, за якої пенетрація дорівнює  $31 \times 0,1$  мм. Саме за

цієї пенетрації пересікаються прямі бітумів однієї пенетрації при 25 °С, але різних структурних типів.

За експериментальними даними цій пенетрації відповідає напруження одноплщинного зсуву близько до 0,21 МПа під час швидкості одноплщинного зсуву  $\approx 1 \text{ с}^{-1}$ . Таким чином, встановлена W.Heukelom'ом [8] прямолінійна залежність, що названа ним DRB (діаграма репрезентації бітуму), доповнена температурою  $T_{31}$ , яка може вважатись узагальненою еквіпенетраційною температурою бітумів різних типів структури ( $T_{31}$ ). Її можна визначити за рекомендацією Б. С. Радовського за формулою  $T_{31} = (T_p + T_{кр}) / 2$ . Виходячи з наведених вище співвідношень, напруження зсуву у цій точці можна визначити за формулою

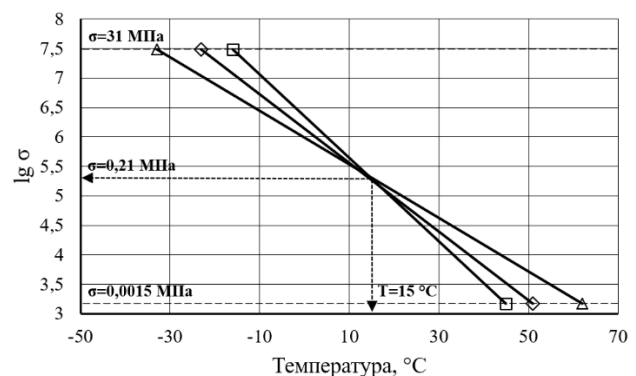
$$\tau_{31} = \sqrt{\tau_{1,25} \cdot \tau_{800}}.$$



**Рис. 1-а.** Визначення еквіпенетраційної температури  $T_{31}$  за показниками температур крихкості ( $\Pi=1,25 \times 0,1$ ) за розм'якшеності ( $\Pi=800 \times 0,1$  мм бітумів трьох структурних типів

Отримані розрахункові результати з наведеною вище похибкою погоджуються з експериментальними даними: принаймні бітумам золь та золь-гель відповідає температура зсувного напруження 0,21 МПа. Таким чином, фундаментальна залежність DRB доповнена третьою фундаментальною точкою, в якій напруження зсуву названих бітумів у межах індексу пенетрації від  $-2,0$  до  $+2,0$  дорівнює 0,21 МПа.

Із викладеного вище витікає, що існують теоретично обґрунтовані та експериментально достатньо достовірні показники якості бітумів, які дозволяють визначити опір зсуву бітуму в межах критичних температур від



**Рис. 1-б.** Визначення еквіпенетраційної температури  $T_{31}$  за показниками напружень зсуву при температурі крихкості (31 МПа) та розм'якшеності (0,0015 МПа) бітумів трьох структурних типів

крихкості до розм'якшення ( $T_{800}$ ,  $T_{31}$ , та  $T_{1,25}$ ), а також відповідні їм напруження зсуву: 0,0015; 0,21; 31 (МПа). На разі найменш надійним серед наведених вище напружень зсуву є напруження, яке відповідає  $T_{1,25}$ , тобто крихкому стану. Аналіз різних джерел та результатів досліджень автора зі співробітниками відносно цього свідчать, що воно може коливатись значною мірою в залежності від методу випробування.

Крім того, причиною цього є також недостатнє та поверхневе вивчення переходу бітуму в крихкий чи засклований стани. Існує, принаймні, п'ять більш менш поширених

методів таких випробувань: традиційний Фрааса; кінетика зміни лінійних розмірів при розтязі зразків за методом TSRST; BBR-критерій SHRP за згином та ABCD за критичними деформаціями та напруженнями тріщиноутворення в бітумному кільці; класичний метод ділатометрії за зміною вільного об'єму. Умовні температури тріщиностійкості, визначені за цими методами наведені в табл. 1. [12, 13, 14].

Згідно з цими даними, найвищими є температури крихкості з Фраасом та BBR. Найнижчими, порівняно з результатами за Fraas'ом є температури, визначені методом ABCD та методом ділатометрії (різниця між цими групами коливається в межах (14-16) °C. Показники, визначені за ABCD та методом ділатометрії, відрізняються в межах похибки. Для конкретного висновку наведена вибірка звісно недостатня. Але на користь та про об'єктивність двох цих методів свідчить факт фізичної сутності обох. Існує ще один метод ймовірного визначення температури тріщиноутворення. Це метод механічного склування, який полягає у визначенні температури, за якої модуль пружності за її зниження виходить на плато, що свідчить про механічне склування бітуму. Однак, у цьому випадку результат залежить від багатьох факторів, зокрема від схеми напруженого стану та швидкості деформування.

В історичному аспекті треба підкреслити, що спроби придати пенетрації фундаментальний характер були здійснені R.N Saall [15] та G.Care і D.Lorent [6] у зв'язку її (пенетрації) з в'язкістю [6], Van der G. Poll'e відносно модуля жорсткості [7]. Випробування, щодо взаємозв'язку пенетрації з в'язкістю, модулем жорсткості та індексом пенетрації стали стартовим аргументом на користь прямого співвідношення пенетрації з напруженням.

Крім цього, на користь використання такого підходу (принципу), існує пряма аналогія з визначення опору зсуву за глибиною проникнення конічного індентора в різноманітні суміші та матеріали. Жодних досліджень щодо інтерпретації пенетрації як показника напруження зсуву довгий час не було здійснено, бо такий зв'язок навіть не передбачався.

Викладені вище аргументи на користь заміни традиційного індексу пенетрації таким, що охоплює інтервал пластичності від  $T_{кр}$  до  $T_{розм}$  спонукають до порівняння в цій роботі залежностей коефіцієнтів ТЧБ, отриманих за традиційним методом та методом, що охоплює інтервал від температури розм'якшеності до температури крихкості.

Таблиця 1

Температури тріщиностійкості бітумів за даними Груднікова Б. І.

| Бітуми | Пенетрація при 25 °C, 0,1 мм | Метод визначення, °C |       |       |             |              |
|--------|------------------------------|----------------------|-------|-------|-------------|--------------|
|        |                              | Фрааса               | TSRST | ABCD  | BBR-300 E/m | Ділатометрія |
| 20/30  | 23                           | -11                  | -18,6 | -24,8 | -12,3/-13,3 | -22,5        |
| 35/50  | 43                           | -11                  | -23,4 | -26,7 | -16,6/-18,2 | -27,5        |
| 50/70  | 54                           | -14                  | -24,2 | -27,6 | -16,5/-19,2 |              |

Примітка: Е – за модулем жорсткості; m – за коефіцієнтом пластичності.

Для з'ясування цієї проблеми були використані літературні дані, за якими можна порівняти сходиність двох показників температурної чутливості, які визначали за наведеними формулами:

$$TЧБ_{25} = \frac{\lg \Pi_p - \lg \Pi_{25}}{T_p - T_{25}} \quad (3)$$

$$TЧБ_{кр} = \frac{\lg \Pi_p - \lg \Pi_{кр}}{T_p - T_{кр}} \quad (4)$$

У випадку невідповідності цих результатів будь-яка заміна існуючої системи оцінки температурної чутливості бітумів була б неможливою, бо це означало б повну дискредитацію знань, накопичених за останні 90 років науками та практиками.

Узагальнений графік (рис. 2) показує, що температурна чутливість з достатньою надійністю (стандартне відхилення становить 0,884) відповідає рівнянню  $y = -0,043x + 0,0413$ .

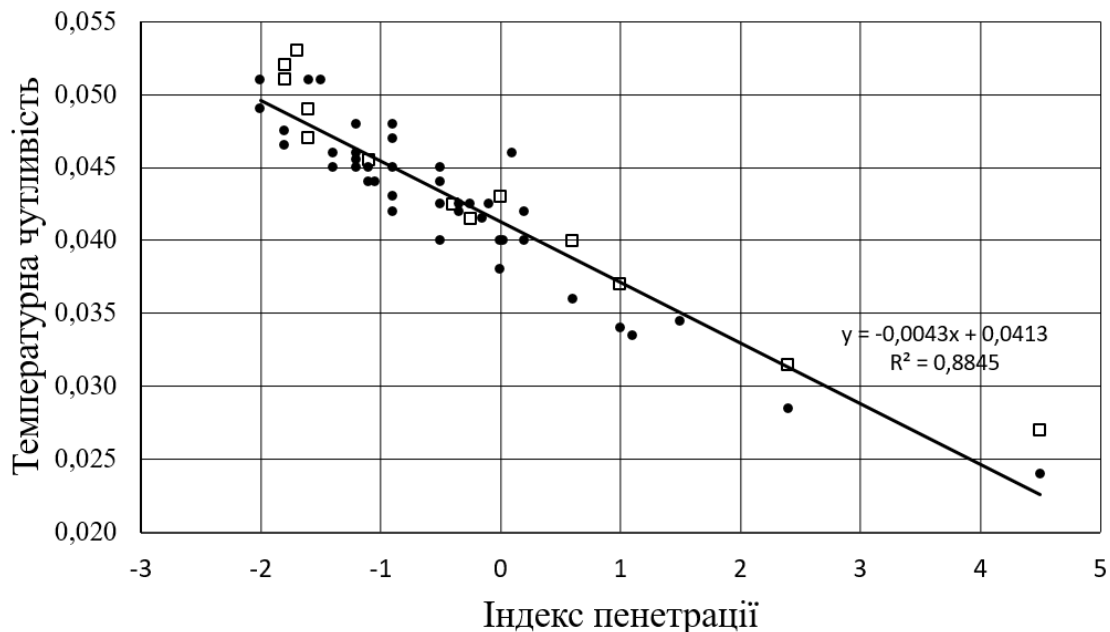
Загальна кількість винесених на рисунок об'єктів становить 53, з них інтервалу 25 °C –  $T_p$  відповідає 41 бітум. Їхня залежність

описується рівнянням  $y = -0,044x + 0,48$  зі стандартним відхиленням 0,87. Аналізуючи **рис. 1**, можна зазначити, що узагальнена залежність розташовується в межах індексу penetрації рівній нулю  $-2,0 \dots +2,2$ , тобто вона охоплює діапазон бітумів, близька до нормованих стандартами EN та ДСТУ.

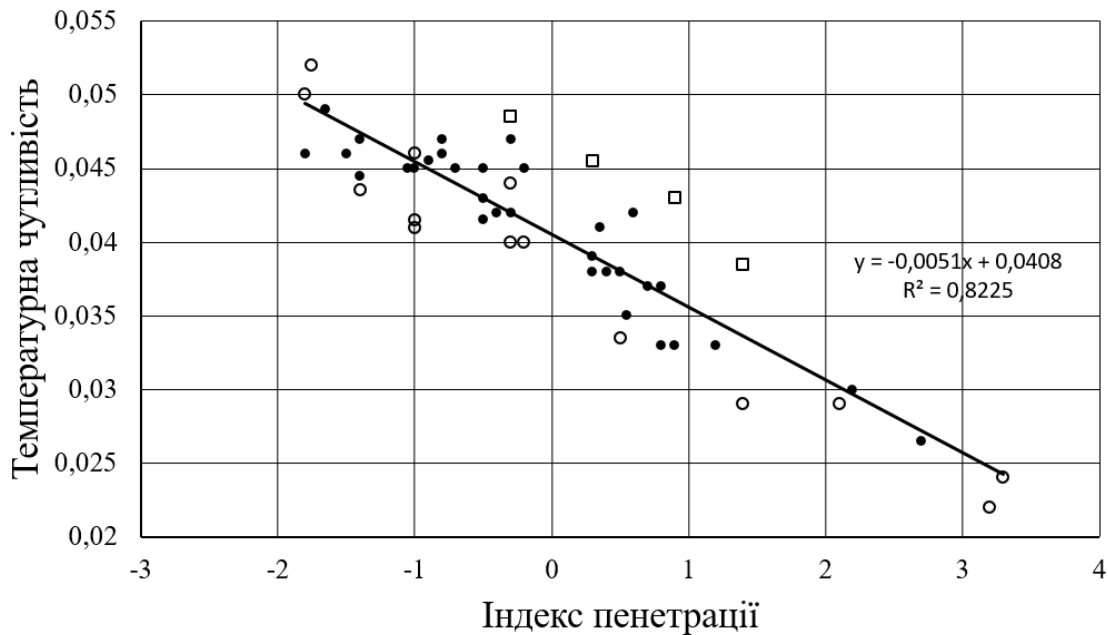
На графіку відзначається одна точка з індексом penetрації нуль та відповідною температурою чутливості, близькою 0,04. Про цю особливу точку у [8] сказано наступне: «індекс penetрації рівній нулю, відповідає температурній чутливості, рівній 0,04». Там також підкреслено, що значення коефіцієнта температурної чутливості коливається в межах 0,015-0,06.

Друга характерна деталь проблеми полягає у тому, що винахідники методу оцінки ТЧБ визнали за необхідне замінити температуру

«КіК» температурою, що відповідає penetрації 800x0,1 мм [2]. На перший погляд, це не є принциповим і необхідним. Однак, під час більш глибокого розгляду сутності ТЧБ треба визнати, що такий підхід дає можливість використовувати подібний за сутністю показник – опір бітуму зсуву. Бо в цьому випадку стає можливим перевести penetрацію в напруження зсуву [9] та описати ТЧБ узагальненою степеневію прямолінійною залежністю. Крім того, як уже підкреслено, не можна нехтувати тим експериментальним фактом, що ця залежність (**рис. 3**), близька до наведеної на **рис. 2**, названа W. Hekelom'ом DRB- діаграмою презентації бітуму. У [8] вона розповсюджується на область високих технологічних температур (перемішування).



**Рис. 2.** Залежність розрахункових коефіцієнтів температурної чутливості (ТЧБ) від індексів penetрації (PI) для діапазону температур:  $25^{\circ}\text{C} - T_{\text{кін}}$  та  $T_{\text{кр}} - T_{\text{кін}}$  (за даними: Van Der Poll [7], F. Corte [16]; F. Migliori [17]; B. Eckman [14], V. Zolotarev [19]).



**Рис. 3.** Залежність температурної чутливості (ТЧБ) від індексу пенетрації дистиляційних бітумів, компаундованих і з низькою пенетрацією за даними [7], [16], [17], [18], [19].

Із метою встановлення прийнятності цієї залежності щодо бітумів, отриманих за різними технологіями, були розглянуті бітуми: дистиляційні, компаундовані та низькопенетраційні. Відповідна залежність температурної чутливості від індексу пенетрації наведена на **рис. 3**. Серед 50 бітумів звертають на себе увагу 12 бітумів, досліджених у [7], та 4 бітуми, використаних у J. F. Corte. Ці бітуми здебільшого тверді з пенетрацією від 13х0,1 мм до 22х0,1 мм. У випадку таких бітумів температури  $T_p$  та  $T_{800}$ , зазвичай, можуть істотно відрізнятися, бо їхня структура і склад (тип «гель») не є прийнятними для дорожніх бітумів і за іншими ознаками. Саме для них характерне найбільше відхилення коефіцієнту температурної чутливості від загальної лінійної залежності. Наразі важко пояснити, чому такі бітуми, маючи однаковий темп зниження ТЧБ, притаманний бітумам: золь-гель, золь однаково відрізняються від генеральної залежності по обидві її сторони. Посилаючись на W. Nekeleom'a [8], можна припустити, що це викликано значним вмістом у них парафіну. Ця залежність (**рис. 2**) близька до наведеної на **рис. 1**:  $y = 0,051x + 0,04$ . Вона характеризується стандартним відхиленням  $R^2 = 0,82$ . Як і попередня, вона проходить через нульове значення індексу пенетрації за умови мінімального відхилення від значення коефіцієнта температурної чутливості, рівного 0,04, про важливість якого було наголошено вище.

Характер залежностей, наведених на **рис. 1** та **2**, свідчить на користь необхідності визначення коефіцієнту ТЧБ, базуючись на дійсному інтервалі, на відміну від  $T_p$  до  $T_{25}$ , як було раніше, та залишається до цього часу в діючих стандартах всіх країн світу.

Вище було показано на реальних прикладах, що температурні залежності, визначені за пенетрацією та критичними напруженнями зсуву  $\tau_{1,25}$ , близьким до 31-32 МПа,  $\tau_{31}$  – (0,21 МПа) та  $\tau_{800}$  – (0,0015 МПа), є практично ідентичними такій же пенетраційній залежності, отриманій з використанням  $P_{1,25}$ ,  $P_{31}$ , і  $P_{800}$  та коефіцієнту ТЧБ. Це відкриває можливості визначати напруження зсуву або пенетрації за будь-якої температури в межах температур розм'якшення ( $T_p$ ) та крижкості ( $T_{кр}$ ).

$$TЧБ = \frac{\lg \tau_{1,25} - \lg \tau_x}{T_x - T_{1,25}} \quad (5)$$

Так стає можливим враховувати вклад бітуму у міцність на зсув асфальтобетону в будь-якому кліматичному регіоні за будь-якої температури. Опір бітуму зсуву може також бути визначеним графічно за діаграмою (DRB) (**рис. 1**).

Встановлені в [10] залежності дають змогу визначити серединну міцність бітуму на зсув за формулою:  $\tau_{cp} = \sqrt{\tau_{1,25} \cdot \tau_{800}}$ .



Вона практично однакова для всіх серединних температурних зон і відповідає напруженню 0,20-0,22 МПа. Це підтверджується експериментальними даними.

Викладений вище математично-графічний спосіб визначення стандартних властивостей бітумів може бути поглиблений аналізом впливу складових на їхні технічні характеристики. Щоб розкрити цей вплив можна скористатись принципом М. Гордона та Дж. Тейлора [12], який полягає у врахуванні впливу кожної складової (її величини та дольового вмісту) на показники кінцевого продукту. Отже, для реалізації цього принципу необхідно знати показники властивостей кожної складової, що входить до бітуму (табл. 2).

Тоді температура крихкості чи розм'яшеності може бути розрахована за формулою:

$$T_{кр(p)} = \frac{C_1 \times T_{кр}^1 + C_2 \times T_{кр}^2 + \dots + C_n \times T_{кр}^n}{C_1 + C_2 + \dots + C_n} \quad (6),$$

де  $C_1, C_2 \dots C_n$  частка компонентів у мальтеновій складності бітуму;  $T_{кр}^1, T_{кр}^2, T_{кр}^n$  – температура крихкості складових (ПНУ, МЦА, БЦА, ПБС, СБС – парафіно-нафтових моноциклічних, біциклічних, поліциклічних, ароматичних, ароматичні вуглеводнів, смоли петролейно-бензольні, смоли спиртобензольні).

Користуючись принципом адитивності, були розраховані температури розм'яшеності та крихкості бітумів трьох структурних типів, виготовлених Львівським інститутом «МАСМА» (табл. 3) під керівництвом О. М. Бодана.

**Таблиця 2**

Властивості компонентів мальтенової складової бітумів (за даними [12])

| Показники властивостей        | Складові |     |     |     |       |     |
|-------------------------------|----------|-----|-----|-----|-------|-----|
|                               | масла    |     |     |     | смоли |     |
|                               | ПНВ      | МЦА | БЦВ | ПЦВ | ПСБ   | СБС |
| Температура розм'яшеності, °С | 39       | 20  | 10  | 11  | 37    | 73  |
| Температура крихкості, °С     | -70      | -50 | -30 | -32 | 1     | 2   |

**Таблиця 3**

Експериментальні та розраховані за принципом адитивності температури розм'яшення та крихкості бітумів типів

| Бітуми типів | Температура розм'яшеності, °С |       |       | Бітум               | Температура крихкості, °С |       |       | Бітум                |
|--------------|-------------------------------|-------|-------|---------------------|---------------------------|-------|-------|----------------------|
|              | асфальтени                    | оливи | смоли |                     | асфальтени                | оливи | смоли |                      |
| Гель         | 21,6                          | 21    | 13,3  | <u>56,9</u><br>63,0 | 14,0                      | -41,3 | 1,8   | <u>-25,5</u><br>-33  |
| Золь-гель    | 13,2                          | 16,6  | 21,8  | <u>51,6</u><br>54,0 | 10,5                      | -33,7 | 4,7   | <u>-18,5</u><br>-24  |
| Золь         | 7,8                           | 19,8  | 25,8  | <u>44,0</u><br>46,0 | 6,5                       | -23,8 | 4,6   | <u>12,7</u><br>-14,0 |

*Примітка: У знаменнику наведені експериментально визначені температури бітумів*

Показаний тут зв'язок між температурами крихкості, розм'якшеності із залученням еквіпенетраційної температури (що відповідає пенетрації 31х0,1 мм) фактично свідчить про принципову обумовленість стандартних показників діапазоном інтервалу пластичності між температурою крихкості та розм'якшеності, власно значенням індексу пенетрації в його класичній трактовці. Логічно, що це призвело до виявлення кількісного зв'язку між критеріями температурного стану [20].

$$T_{кр} = 2T_{31} - T_p \quad (7)$$

$$T_{31} = \frac{T_{кр} + T_p}{2} \quad (8)$$

До того ж температура  $T_{31}$  може розглядатись як температура рівних комплексних модулів, а головне – значень когезійної міцності бітумів. Особливо це стосується бітумів типу «золь» [18]. Водночас такі співвідношення, як і будь-які інші показники, безумовно мають ґрунтуватись на врахуванні групового складу бітумів. Бо саме він зумовлює структурний тип (золь, золь-гель, гель) в трактуванні європейських дослідників або 1-го, 2-го та 3-го структурних типу в інтерпретації А. С. Колбановської.

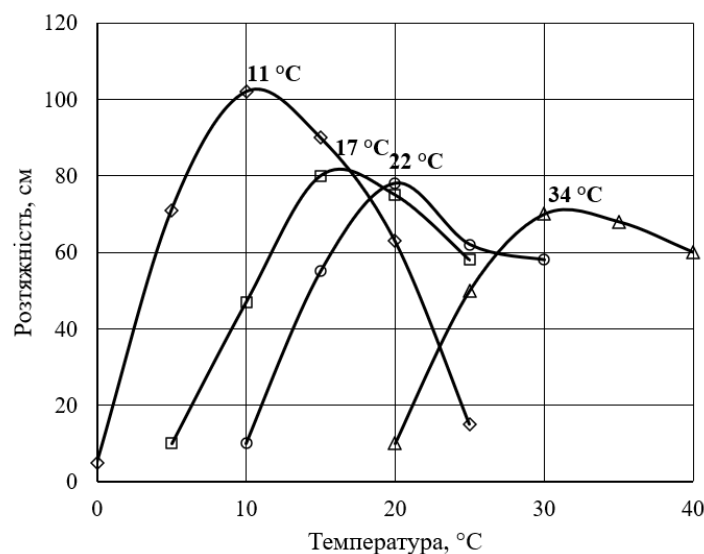
Зважаючи на це, є сенс викласти початкові передбачення щодо розтяжності. Вони базуються на тому, що за температури розм'якшеності ( $T_p$ ) та крихкості ( $T_{кр}$ ) розтяжність не є вимірюваною. Отже, необхідно звести діапазон вимірювань до рівня максимальної розтяжності. Температурна залежність (рис. 4)

розтяжності (дуктильності) має куполоподібний симетричний характер. Максимальне значення розтяжності за 25 °С відповідає рівнянню:

$$T_g^{max} = T_p + T_{кр} \quad (9)$$

Вона коливається у межах (32-11) °С для бітумів типу «золь» з пенетрацією від 90х0,1 мм до 224х0,1 мм. Із переходом від бітуму «золь» до бітуму «гель» вона знижувалась на (16-22 °С). При цьому отримано практично повний збіг між розрахунковою температурою та експериментально визначеною в діапазоні від 11 °С до 37 °С.

Виявлений зв'язок між розтяжністю та інтервалом пластичності дає підставу щодо його обумовленості груповим складом. Для підтвердження цього передбачення було проаналізовано властивості 31 бітуму із різних джерел. Зміна вмісту смол від 15 до 40 % супроводжувалась прямолінійним зростанням розтяжності з коефіцієнтом кореляції 0,92. Виходячи з аналізу впливу складових на зміну структурного типу бітумів, було проведено порівняльний аналіз із врахуванням ролі ароматичних вуглеводнів, які не забезпечують розтяжність, але сприяють набряканню асфальтенів, переводячи їх в еластичний стан. Більш того, у випадку ліофільних асфальтенів утворюється розчин, згідно з Л. М. Гохманом, близький за властивостями до смол. Це підтверджується залежністю наведеною на **рис. 4** ( $\tau_{xy}=0,88$ ). Наявність такої залежності була доведена в роботі [7].



**Рис. 4.** Температурна залежність розтяжності бітумів із пенетрацією за температури 25 °С (0,1 мм): Δ – 74; о – 78; □ – 167; ◇ – 224

На разі також встановлено, що збільшення індексу колоїдної нестабільності за умови зниження вмісту смол та ароматичних вуглеводнів супроводжується зменшенням розтяжності бітуму. Цей приклад є ще одним аргументом на користь того, що механічні (реологічні) властивості бітумів, як і будь-яких матеріалів, залежить від їхнього складу.

Внесок асфальтенової складової в температуру крихкості та розм'якшеності враховується за методикою, запропонованою Б. Г. Печеним. Вона базується на тому, що кожний відсоток асфальтенів (після 10 %) підвищує температуру розм'якшеності на 1,2 °С, а температуру крихкості на 0,5 °С.

Результати, отримані завдяки використанню принципу адитивності, дають змогу прослідкувати тенденції, які мають місце в формуванні ключових показників якості бітумів. Асфальтени залежно від структурного типу бітумів (золь, золь-гель) підвищують температуру розм'якшеності на (20-40) %, вклад смол для тих же типів бітумів становить (60-25) %; вклад олив становить (23-35) %. Керуючись цим та накопиченим досвідом, можна регулювати властивості бітумів в заданому напрямі, тобто згідно з термінологією акад. П. А. Ребіндера «із наперед заданими властивостями»

для конкретних кліматичних і транспортних умов їхнього використання.

Виходячи з розглянутого вище принципу адитивності, були розраховані температури розм'якшеності та крихкості бітумів однієї пенетрації, отриманих з різної сировини **табл. 3**. Метою експерименту був пошук сировини, з якої можна було б виготовити бітум типу «золь-гель», тобто 3-го структурного типу. Це досягається завдяки збільшенню ваги сировини через підвищення вмісту смол. Отримано низку бітумів від типу «гель» до типу «золь-гель». При цьому: індекс пенетрації зменшувався від +0,3 до -1,3, інтервал пластичності зменшувався від 78 °С до 59 °С, вміст смол зростав від 20 % до 33,8 %, а асфальтенів знижувався від 24 % до 16,2 %.

Наведені в **табл. 3** та **4** дані чітко показують, що груповий склад бітуму можна змінювати в заданому напрямі й так передбачити не лише стандартні, а й реологічні властивості, що вкрай необхідно для отримання довговічних асфальтобетонів.

Наведений тут приклад є істотним аргументом на користь уваги до первинної сировини – нафт, найбільш придатних для виготовлення бітумів із передбаченими можливостями. Цього принципу неухильно дотримуються ведучі виробники в Європі та США.

**Таблиця 4**

Керована зміна властивостей бітумів шляхом регулювання консистенції сировини за даними Груднокова І. Є.

| Показники                                   | Бітуми  |         |           |           |           |
|---------------------------------------------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
|                                             | 1       | 2       | 3         | 4         | 5         |
| Пенетрація 0,1 мм                           | 80      | 80      | 80        | 80        | 80        |
| Температура °С: розм'якшеності<br>крихкості | 51/49,8 | 49/50,2 | 48/47,5   | 47/46,6   | 46/45,2   |
|                                             | -24/-19 | -20/-16 | -17/-15,6 | -15/-14,4 | -13/-14,1 |
| Індекс пенетрації                           | +0,3    | -0,7    | -0,9      | -1,1      | -1,3      |
| Вміст % оливи<br>смол                       | 56      | 53      | 51,6      | 51,3      | 50,0      |
|                                             | 20      | 23,5    | 27        | 29,9      | 33,8      |
| Асфальтенів                                 | 24,0    | 23,5    | 20,8      | 18,8      | 16,3      |

*Примітка: В чисельнику наведені експериментальні дані, в знаменнику – розрахункові*

### Висновки

1. Прийнятий більше 80 років для оцінки температурної чутливості бітуму індекс пенетрації є безрозмірним показником, обмеженим температурним діапазоном (25°С–T<sub>p</sub>), непридатним для кількісного врахування зміни

властивостей бітумів при зміні температури. Замість нього пропонується кількісний показник зміни пенетрації та напруження зсуву бітумів у межах температур від температури розм'якшення до температури крихкості, названий коефіцієнтом температурної

чутливості бітумів ТЧБ. Цей показник дає змогу визначити penetрацію або опір бітуму зсуву в усьому визначеному вище діапазоні температур. Ідентичний показник ТЧБ може бути визначений за penetрацією або за опором бітуму зсуву. В основі такого збігу лежить один механізм – опір бітуму зсуву.

2. Визначено чотири стани деформування бітуму в межах інтервалу пластичності: крихкий нижче температури крихкості або вище напруження зсуву 31 МПа, чи penetрації меншій 1,25х0,1 мм; пружньо-в'язкий між напруженнями зсуву 31 МПа та 0,21 МПа або penetрацією 1,25х0,1 мм та penetрацією 31х0,1 мм; в'язко-пружний між напруженнями зсуву 0,21 МПа та 0,0015 МПа або penetрацією 31х0,1 мм та 800х0,1 мм, в'язкий під час напруження нижчого 0,0015 МПа або penetрації вищій 800х,1 мм.

3. Встановлено ідентичність показників температурної чутливості бітумів від -2,0 до +2,0 за діючою системою оцінки та 0,05 до 0,02 за пропонуємою системою. Експериментальні доведена відповідність нульового значення індексу penetрації (за старою системою) показнику ТЧБ рівному 0,04. Ця відповідність є основоположною в розробці індексу penetрації Pfeiffer'ом і Van Doormal'ем та його наукового обґрунтування Heukel'ом W.

4. Логарифмічна залежність penetрації від температури встановлена «батьками-розробниками» доповнена точкою еквіpenетраційної температури  $T_{31}$  та межею еквізсувної температури, що дорівнює 0,21 МПа. Співвідношення між межами температурних зон в обох випадках близьке до 2.5.

5. Практична цінність результатів досліджень підтверджується прийнятністю для розрахунку температур розм'якшення та крихкості бітумів принципу адитивності Гордона-Тейлора, що полягає у визначенні цих температур за співвідношенням вмісту та властивостей складових бітумів. Можливість прогнозування властивостей за цим принципом підтверджена розрахунками полюсних температур інтервалу пластичності бітумів різного групового складу та різних марок.

6. Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що співвідношення розрахункових та експериментальних даних виявляється краще для бітумів типів золь та золь-гель. Воно погіршується у випадку бітумів типу гель із великим індексом penetрації або малим індексом

температурної чутливості менше 0,025-0,03. Саме із цим пов'язано використання в країнах з розвинутою інфраструктурою важких смолих малопарафінових нафт.

## References

1. Pfeiffer J. Ph, Van Doormal P.M. (1936). The reological properties of asphaltic bitumens. Journal of the Institute of Petroleum Thechnologi USA, 22, 414-440.
2. Gerritsen A. (1995). Les liants hydrocarbonés. Bitume fabrication, caracteristiques et selection ENPCh, 19.
3. Zolotariev V. O., Pyrih Ya. I. (2018). Standartization of oil paving. Ving viscous bitumen in Ukraine. Dorogy i Mosty Journal, 91-105.
4. Mai Lan NGUYEN. (2009). Les enrobes bitumineux. Tom 1. Paris. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, RGRA, 228. Reterieved from [https://www.researchgate.net/profile/Mai-Lan-Nguyen-2/publication/38320624\\_Etude\\_de\\_la\\_fissuration\\_et\\_de\\_la\\_fatigue\\_des\\_enrobes\\_bitumineux/links/545c93620cf27487b44b34e6/Etude-de-la-fissuration-et-de-la-fatigue-des-enrobes-bitumineux.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Mai-Lan-Nguyen-2/publication/38320624_Etude_de_la_fissuration_et_de_la_fatigue_des_enrobes_bitumineux/links/545c93620cf27487b44b34e6/Etude-de-la-fissuration-et-de-la-fatigue-des-enrobes-bitumineux.pdf)
5. Molenaar J. M. M., Hagos E. T., Van Yen M. E. C. (2004). An investigation into the specification on rheological properties of polymer modified bitumen. Proceedings 3<sup>rd</sup> Europhalt & Eurobitume Congress. Vienna, 2, 2080-2087.
6. Carre G., Lorent D. (1964). Relation entre la penetration et la viscosite des bitumes. Bulletin de L'Association Francaise de Techniciens du Petrole, 157.
7. Van der Poel. (1954). A general system describing the viscoelastic proprieties of bitymens and ITS relation to routine test data. J. Appl. Chem, 4, 221.
8. Heukelom W. (1975). Une methode ameliee de caracterisation des bitumes pas leurs proprietes mecaniques. Bull. Liaison Labo. P.et Ch, 76, 55-63.
9. Zolotarev V. (2021). Bitumen penetration and shear resistance relation, IN: 7<sup>th</sup> Europhalt & Eurobitume Congress, 39.
10. Zolotarev V. (2022). Methods de termining stresses at key temperatures. Construction and Building Materials, 345, 128365.
11. Zolotarev V. (2001). Relations generalisees liant la penetration aux points de ramolissement et de fragilite des bitumes routiers RGRA, 794, 37-40.
12. Quedeveille A. (1972). La transition vitreuse du bitume. Bull. Liaison Labo. P.et Ch, 61, 125-135.
13. Sang-Soo Kim. A. (2018). New Test for Asphalt Quality: Asphalt Binder Cracking Device (ABCD). Ohio Asphakt Paving Conference, 6-2, 30.
14. Eckmann B. (2016). New bitumen performance indicators. A feasibility study. E&E Congres Prague. Czech Republique, 11.
15. Saal R.N.I. (1955). Mechanical testing of asphaetic bitumen. 4<sup>th</sup> World Petroleum Congress. Rome. Section V. A. Paper 3, 1-17.
16. Corte J.-F. Brosseud Y., Simoncelli J.-P., Caroff G. (1994). Ines-tigation rutting of asphalt surface layers: influence of binder and loading configuration. Transportation research Record. 1436.1, 28-37.
17. Migliori F., Daligault, A.Moginengo J-Ch (1996). Etude du comportement basse temperature des bitumes routiers. Application du Bending Beam Rheometer. Bulletin de liaison des laboratoires ponts et chaussées.
18. Zolotarev V. (2022). Methodes for determining stresses at key temperatures. Construction and Buildin Materials, 345, 128365.
19. Zolotarev V. O. (2024). On the convergence of quality indicators of road bitumen for penetration and Superpave Systems. Avtoshliakhovyk Ukrainy Journal, 77-90. DOI: 10.33868/0365-8392-2024-2-279-86-99
20. Chappat M., et Plaut, J. (1982). Bitume un peu de mathematiques. Revue General des routes et de l'amenagement, 765, 87-8.

