

© 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@khpі.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@khpі.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 CO₂ 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 CO₂ 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).

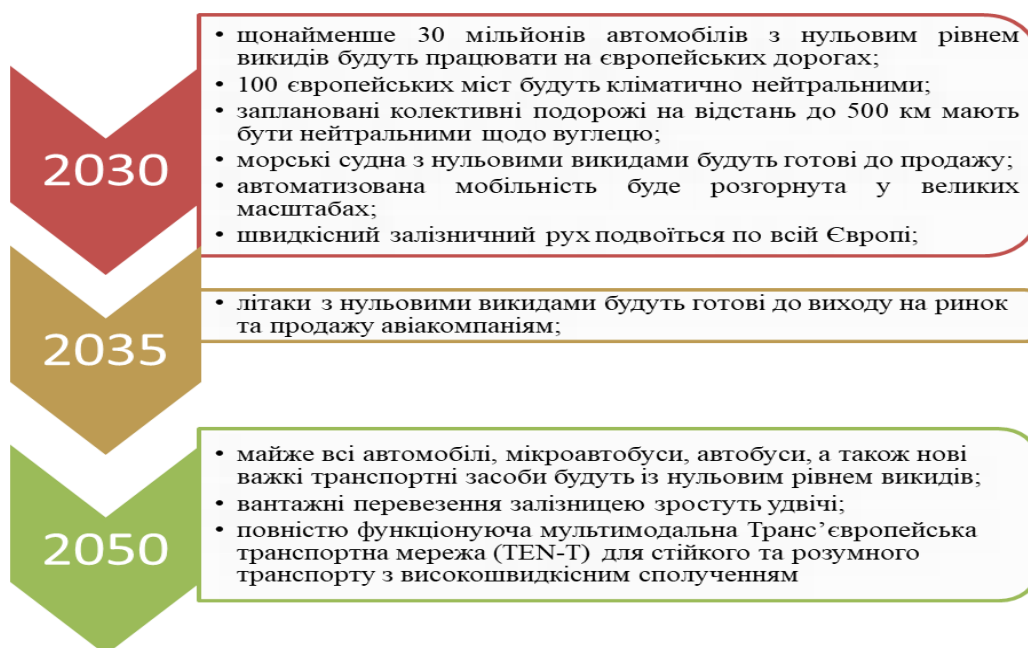


Рис. 1. Часові межі та визначені цілі руху Європейської транспортної системи до розумного та сталого майбутнього

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 IT-фахівців, яка отримала назву «Інноваційний кампус». Ця програма підготовки поїла друге місце міжнародного конкурсу QS-Wharton Reimagine Education Awards 2022. Загалом у ньому брали участь понад 1200 проєктів від компаній, інститутів та інших організацій із 70 країн світу. Освітній проєкт «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**).

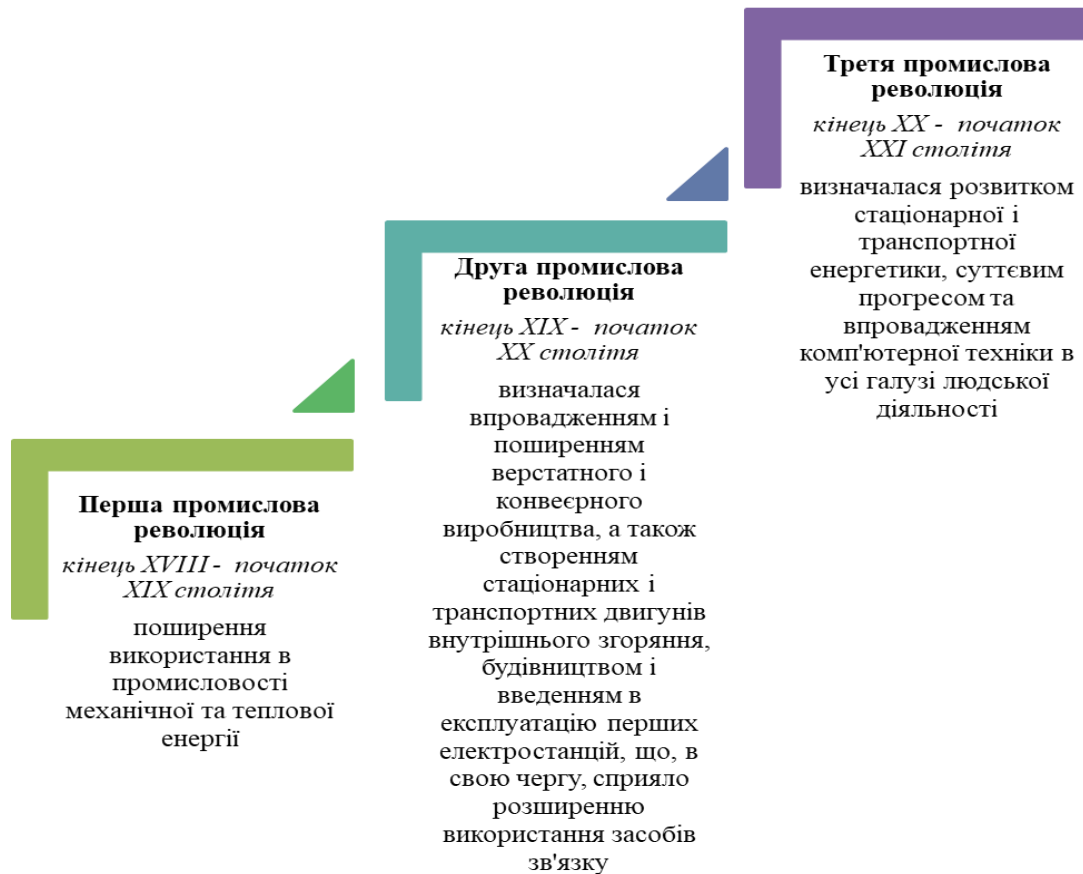


Рис. 2. Історичний поступ промислових революцій

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 CO₂ 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 CO₂, 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 CO₂. 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 (H₂) є унікальним паливом, яке не

утворює вуглекислого газу (CO₂) або чадного газу (CO) у процесі згоряння, також має низькі рівні викидів оксидів азоту (NO_x) та високу ефективність.

Завдяки високій енергетичній щільності водень є перспективним паливом для високо-температурних 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, H₂ 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 CO₂ у процесі застосування типового сучасного біодизельного палива супроводжується суттєвим зростанням емісії NO_x, 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 CO₂ 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 (H₂ 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 високоефективної силової установки для комерційного транспорту та важких вантажівок, здатної досягати показників ефективності, порівняних 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 CO₂ і мінімальні викиди NO_x, 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
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. Kryshtopa, S., Smigins, R., Kryshtopa, 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. Kyslovskiy, 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
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>