

А.А. Лісовал, О.Ф. Говоров, В.Л. Пукас, М.П. Волинкін

ОБГРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ СИНТЕЗОВАНИХ Е-ПАЛИВ У ТРАНСПОРТНИХ ДИЗЕЛЯХ

В статті на основі закордонних джерел систематизовано та узагальнено результати досліджень останніх років щодо можливостей застосування синтезованих електронних палив (е-палив) на наземному транспорті для поетапного процесу декарбонізації галузі. Увага зосереджена на рідких е-паливах для транспортних дизелів. Дизелі як об'єкт досліджень залишаються актуальними для сьогодення України, бо забезпечують у складі транспортних засобів не тільки перевезення вантажів, а й мобільність оборонного сектора, технологічні процеси виробництва продовольства. Країни ЄС планують скоротити викиди парникових газів на 55 % до 2030 р. та досягти вуглецевої нейтральності до 2050 р. У цьому контексті е-палива стали перспективним рішенням для зменшення викидів парникових газів на транспорті. Класичне е-паливо синтезують з уловленого з повітря CO₂ та відновлюваного водню, який отримують електролізом води. Енергія для електролізу надходить від відновлюваних джерел вітрової, сонячної, геотермальної, припливної або гідро електроенергії. Головні переваги е-палив – це виробництво із відновлюваних джерел енергії та використання існуючої паливної інфраструктури з мінімальними змінами. Виробництво е-палив ще не доступне у великих масштабах. Його використання буде поступово зростати завдяки поетапному збільшенню їх концентрацій у сумішевих видах палива. Паралельно з цим на транспорті будуть впроваджуватися інші подібні вуглецево-нейтральні технології. Перший крок до вуглецево-нейтральних е-палив – це впровадження парафінових палив, отриманих з біосировини із залученням відновлюваних джерел енергії. Таке впровадження на транспортних дизелях забезпечує скорочення викидів CO₂, сажі та інших шкідливих викидів. Це проміжний етап, доки не буде масового виробництва суто синтетичних парафінових е-палив. Використання в дизелях синтезованих е-ефірів OME_x і DME, як низьковуглецевого палива, є можливим в короткостроковій та середньостроковій перспективі. Це другий крок до поширення вуглецево-нейтральних е-палив і технологій на транспорті. Перед впровадженням таких палив необхідні додаткові дослідження щодо сумісності їх з матеріалами дизеля. Україна має застарілий автопарк транспортних засобів, який не може бути миттєво замінений на новий, більш ефективний. Реалізація досліджень і розробок, які направлені на поетапне впровадження вуглецево-нейтральних е-палив на транспорті, повинні мінімізувати шкідливий вплив існуючого автотранспорту на навколишнє середовище.

Ключові слова: транспорт; дизельний двигун; вантажний автомобіль; парникові гази; синтез палива; е-паливо; життєвий цикл палива.

Вступ

Протягом останніх декількох десятиліть глобальні зміни клімату спонукали уряди всього світу запровадити суворі закони щодо викидів парникових газів. Паризька кліматична угода (2015 р.) поставила за мету перед світовими економіками держав до 2050 р. досягти «нульового балансу» викидів CO₂, як основного парникового газу для забезпечення стабілізації та утримання кліматичних змін. Вченими встановлено, що для цього необхідно забезпечити значення середнього глобального підвищення температури нижче 2 °C порівняно з до індустріальним рівнем. Паризька угода направлена на прискорення декарбонізації світової економіки і транспортної галузі включно.

Автомобілі з двигунами внутрішнього згорання (ДВЗ) становлять понад 90 % світового транспортного парку. ДВЗ постійно удосконалюються, щоб відповідати все більш суворим нормам щодо викидів шкідливих речовин у атмосферне повітря. За прогнозами/результатами праці [1] у 2022 р. викиди CO₂ від транспортного сектору становили близько 8 Гт. Причому понад 70 % цих викидів припадає на наземний транспорт.

Електромобілі з живленням від акумуляторної батареї вважаються перспективним варіантом декарбонізації, особливо для сектору легкових автомобілів. Подальше нарощування кількості електромобілів для зменшення викидів парникових газів безпосередньо залежить від виду електроенергії, яка використовується для заряджання акумуляторів. При живленні від електромережі, яка з часом має декарбонізуватися, електромобілі можуть забезпечити скорочення викидів парникових газів на 50 % порівняно із традиційними автомобілями з ДВЗ [2]. Тому важливо вже зараз застосовувати підхід повного життєвого циклу палива при порівнянні альтернативних видів палива та конструкційних новацій у силових енергоустановках. Враховувати всі витрати енергії та шкідливі викиди починаючи із створення сировини, транспортування, далі виробництво палива, перетворення в енергію з подальшою утилізацією або захороненням.

Потужним конкурентом на шляху до загальної електрифікації і подальшої декарбонізації транспорту можуть стати конвертовані або нові ДВЗ для роботи на біопаливах, або альтернативних низьковуглецевих (або безвуглецевих) видах палива, синтезованих із залученням електроенергії від суто

відновлювальних джерел. Через чітке електронне управління хімічно-технологічними процесами виробництва палива та подальше застосування електронного управління в системах паливоподачі конвертованих ДВЗ або в нових двигунах, синтезовані/синтетичні моторні палива набули терміну – електронні палива (e-паливо або e-fuel).

Альтернативним газоподібним моторним паливам біометану і водню були присвячені праці [3, 4] в попередніх номерах журналу.

Мета статті – на основі закордонних джерел систематизувати та узагальнити результати досліджень останніх років щодо можливостей застосування синтезованих електронних палив на наземному транспорті для поетапного процесу декарбонізації галузі. В статті увага зосереджена на рідких e-паливах для транспортних дизелів. Дизелі як об'єкт досліджень залишаються актуальними для сьогодення України, бо забезпечують у складі транспортних засобів не тільки перевезення вантажів, а й мобільність оборонного сектора, технологічні процеси виробництва продовольства.

Шляхи та проблеми декарбонізації транспортної галузі

Глобальний план електрифікації транспортних засобів зіткнувся з низкою перешкод. Це повільна розбудова або відсутність (для деяких країн) інфраструктури для заряджання електромобілів, особливо за містом та в сільській місцевості. При нарощуванні виробництва електромобілів зростають потреби і відповідно ускладнюється доступ до критично важливих матеріалів для виробництва акумуляторів та електродвигунів.

Крім того, виробництво акумуляторів у всьому світі може бути пов'язане з інтенсивними викидами. У праці [5] ці додаткові викиди (від виробництва акумуляторів) перерахували у еквівалент CO₂ і спрогнозували, що щорічні викиди до 2050 р. у всьому світі можуть перевищити 600 млн т.

Інші аспекти, які можуть перешкоджати поширенню електромобілів – це все ще обмежений пробіг транспортних засобів, тривалий час заряджання. Особливо це актуально для вантажних перевезень через великі відстані та зростання ваги, через використання акумуляторів значно більшого розміру.

Деякі з цих проблем можна частково подолати за допомогою транспортних засобів на паливних елементах (ПЕ). Це теж електромобілі, але електроенергія виробляється на борту в ПЕ. В ПЕ відбувається зворотний процес електролізу водного розчину. Паливом в ПЕ для вироблення електроенергії є водень. Але як і електромобілі на акумулято-

рах, електромобілі з ПЕ також потребують розбудови інфраструктури для заправки.

Незважаючи на міжнародні зусилля, спрямовані на популяризацію електромобілів, продажі автомобілів з ДВЗ прогнозуються багатьма дослідниками відносно високими протягом декількох десятиліть, особливо в країнах з економіками, які розвиваються. В цих країнах, до яких відноситься і Україна, темпи оновлення автопарків залишаються повільними.

Наземний транспорт може отримати значну вигоду від впровадження низьковуглецевих видів палива для декарбонізації існуючого автопарку, а також від впровадження нових поколінь ДВЗ. Цей напрям доповнює електрифікацію автомобілів та може забезпечити умови здорової конкуренції.

Відновлювальні низьковуглецеві або безвуглецеві палива, як альтернатива електромобілям і засіб декарбонізації транспорту, можуть бути газоподібними або рідкими. Головна умова – сировина, виробництво та подальше використання палив повинні бути з відновлюваних джерел, забезпечувати короткий (бажано річний) циркуляційний технологічний цикл кругообігу CO₂. Окрім скорочення викидів парникових газів, відновлювані види палива можуть зменшити утворення інших забруднюючих речовин у циліндрах ДВЗ, зменшити залежність від вичерпаного палива.

Відновлювальні палива можуть бути створені з біологічної сировини або синтезовані. Головна перевага обох видів відновлювальних палив – це можливість: зробити їх хімічно схожими на традиційні види палива, використовувати існуючу інфраструктуру заправних станцій, проводити поетапну модернізацію і оновлення транспортних засобів та розробку нових двигунів.

Існують проблеми, пов'язані з виробництвом біо відновлюваних видів палива: більш інтенсивне використання земельних угідь, ризики зменшення і погіршення якості використання традиційних сільськогосподарських посівних площ, збільшені потреби у використанні прісної води в технічних цілях. Крім того, при нарощуванні темпів використання біомаси додаткові витрати на її виробництво теж зростають. Це може призвести до зростання потреб і відповідно витрат на інші додаткові види палива, з інших відновлюваних джерел.

Перспективним, додатковим варіантом декарбонізації транспортної галузі за даними праці [6] можуть бути синтезовані електронні палива (e-палива).

Електронні рідкі палива

Про синтез рідких (бензин, дизельне паливо, авіаційний гас, метанол) і газоподібних (водень,

аміак, метан) палив від теорії до виробництва відомо вже більше ста років. Набули поширення два методи, які базуються на хімічних перетвореннях Фішера-Тропша (англійська аббревіатура FT) і з метанолу в бензин (англійська аббревіатура MtG) [6, 7]. Для хімічних перетворень потрібні каталізатори, додаткова енергія для підтримання певних температур і тисків, великий об'єм води.

Класичною первинною сировиною для синтезованих палив за методом FT є вугілля, природний газ і біомаса, в результаті газифікації яких утворюється синтез-газ. Другим необхідним компонентом для синтезу є водень, який отримують електролізом водних розчинів. За методом FT можна синтезувати не лише бензини, а й дизельне паливо, парафіни і таке інше. Основний результат синтезу MtG – це бензин.

Хіміки постійно удосконалюють класичні методи синтезу. Застосовують нові каталізатори, змінюють умови синтезу (температуру, тиск) для покращення фізико-хімічних властивостей або отримання нових властивостей палив, мастильних матеріалів, синтетичних спиртів, складних ефірів, добавок до традиційних нафтових продуктів.

Галузь синтезованих палив набуває інших стимулів і значень у забезпеченні декарбонізації транспорту в глобальних масштабах. Відокремлюється напрям/галузь відновлювальних електронних палив. За світовою концепцією використання циркуляційних вуглецево-нейтральних технологій е-паливо потрібно синтезувати з уловленого CO₂ (від технологічних об'єктів, процесів або безпосередньо з повітря) та відновлюваного водню, який отримують електролізом води. Енергія для електролізу повинна надходити від відновлюваних джерел вітрової, сонячної, геотермальної, припливної або гідроенергії.

Проекти уловлювання CO₂ на промислових і енергетичних об'єктах вже мають комерційне впровадження. Технології уловлювання CO₂ з атмосферного повітря знаходяться на стадіях розробки або демонстраційних проектів. Перспективним напрямом є уловлювання атмосферного CO₂ і подальша його довгострокова утилізація – закачування під землю у розроблені нафтові горизонти.

Синтезовані е-дизельні палива можуть мати високі значення цетанового числа і малий вміст сірки.

За використання відновлюваних джерел енергії у виробництві біодизельних палив другого покоління, їх теж можна вважати е-паливами. Для цього в країнах ЄС введена сертифікація відновлюваних палив з урахуванням життєвого циклу пали-

ва на предмет викидів парникових газів у атмосферне повітря.

Відновлювальне е-паливо може слугувати корисним хімічним накопичувачем електроенергії під час низького попиту. Як рідкий носій енергії, е-паливо є зручним і ефективним засобом транспортування та постачання відновлюваної електроенергії в усьому світі.

Економічне обґрунтування перспектив застосування е-палив

Реальність сьогодення така, що виробництво е-палива ще не доступне у великих масштабах. Ймовірно, що його використання буде поступово зростати завдяки поетапному збільшенню їх концентрацій у сумішевих видах палива. Темпи зростання будуть залежати від вартості та доступності компонентів для змішування е-палива з традиційними паливами, цілей та законодавчих стимулів щодо скорочення викидів CO₂.

Більшість науковців у своїх дослідженнях, вважають, що вартість е-палив залежить від світових цін на нафту. В деяких дослідженнях навіть називають ціну 55 – 65 доларів за барель і вище, за якої буде доцільно інвестувати у виробництво е-палив. Однак, детальні економічні розрахунки у публікаціях не наводяться.

Щодо величини інвестицій і прогнозованої ціни на е-палива є цікавими результати дослідження опубліковані у праці [8]. Це було комплексне дослідження, в якому прийняли участь колективи вчених з 4 європейських країн (Іспанія, Італія, Німеччина, Сполучене Королівство), Японії, Саудівської Аравії та Індії.

Однією із задач роботи [8] було – на прикладі Німеччини фінансово оцінити інфраструктуру, для забезпечення енергією всього парку легкових автомобілів, визначити об'єм довгострокових інвестицій при переході на суто електромобілі. Для порівняння із стратегію впровадження е-палива отримане значення інвестицій умовно прирівняли до інвестицій у виробництво е-палива і визначили ціну е-палива на заправках без податків, акцизів та субсидій.

У 2024 р. у Німеччині було зареєстровано 49 млн легкових автомобілів. Із них 1,41 млн це електромобілі на акумуляторах і 3,3 млн гібридів. Було визначено необхідний обсяг інвестицій у розмірі 53 – 80 млрд євро для парку, який складається виключно із електромобілів на акумуляторах. З них приблизно 20 – 26 млрд євро необхідно буде вкласти на заміщення автопарку, а 33 – 54 млрд євро — на розширення відповідної зарядної інфраструктури.

У випадку запровадження е-палив можна використовувати існуючий автопарк і заправну інфраструктуру, але інвестиції необхідно буде спрямувати на виробництво.

Для отримання е-палив розглядалися такі процеси та етапи виробництва: система прямого уловлення CO_2 з повітря, опріснення морської води, електроліз, проміжне зберігання технологічних газів та установки для синтезу е-палива. Розмір заводу розрахований на виробництво 550 млн л е-палива на рік і має термін експлуатації 20 років. В дослідженнях прийнято, що для будівництва та обслуговування установок використовуються найсучасніші технології. Завод з виробництва е-палива працює повністю в енергетично ізольованому режимі, тобто всі процеси живляться від конкретного типу електростанції, що використовує відновлювані джерела енергії. Прийнято три варіанти відновлювальних джерел для живлення технологічних процесів заводу: фотоелектричні установки в Марокко, вітроенергетика в Чилі та геотермальна енергетика в Ісландії.

Також досліджувалися заводи з двома можливими методами виробництва – це синтез за Фішером-Троппшем або процеси перетворення метанолу в бензин.

У першому випадку (FT) в Німеччину танкерами доставляється синтезована е-сира нафта, яка далі перероблялась в е-бензин, е-дизельне паливо, е-авіаційний гас або мастильні матеріали. Прийнято, що для переробки та транспортування використовується існуюча інфраструктура.

У другому випадку (MtG) танкерами доставляється вже готовий е-бензин. Паливо, що використовується для транспортування, вважається викопним, оскільки дослідження проводяться виключно для легкових автомобілів.

Дослідники [8] розраховували очікувані витрати на виробництво 1 л е-палива на заправній станції в Німеччині. Для е-дизельного палива за методом FT це значення від 1,10 до 2,10 євро, а для е-бензину за методом MtG від 0,83 до 1,59 євро. Ціна залежить від місця розташування заводу та виду відновлювального джерела енергії. Виробництво з використанням фотоелектричних систем є найдорожчим, а виробництво з використанням геотермальної енергії – найдешевшим. Вітрова енергетика забезпечує проміжні значення вартості е-палива.

Найбільшими факторами витрат у організацію виробничих процесів є вартість установок відновлюваної енергії та електролізери, які разом становлять понад 75 % загальних витрат. Для обраного розміру заводу, щорічні експлуатаційні та транспо-

ртні витрати очікуються на рівні 3 – 5 % від загальних інвестиційних витрат [8].

Екологічне обґрунтування перспектив застосування е-палив

Потенціал е-палива щодо зменшення викидів CO_2 значною мірою залежить від джерела електроенергії та постачання CO_2 . Існує поняття – потенціал глобального потепління, який пропорційний прямим і опосередкованим викидам компонентів, що сприяють парниковому ефекту на планеті. Потенціал глобального потепління вимірюється в питомих масових одиницях приведених до еквіваленту CO_2 ($\text{г CO}_2\text{eq} / \text{МДж}$).

Оцінювання життєвого циклу (англійська аббревіатура LCA) — це комплексна методика, яка дозволяє провести більш цілісне порівняння різних технологій палива та силових енергоустановок. Це особливо корисно для альтернативних видів палива та джерел енергії, де більшість викидів відбувається на ранніх етапах циклу.

Життєвий цикл традиційних транспортних палив зазвичай визначається термінами «від свердловини до бака», «від бака до коліс» або «від свердловини до коліс».

Для е-палив життєвий цикл повинен включати всі основні операції: виробництво електроенергії, уловлювання вуглецю та виробництво H_2 . Етапи синтезу е-палива, транспортування до автозаправних станцій, а далі до паливного бака транспортного засобу аналогічні терміну «від свердловини до бака». Авторами дослідження [8] для життєвого циклу е-палива запропоновано новий термін «від зародження до захоронення», який враховуватиме викиди під час будівництва інфраструктури, необхідної для виробництва палива або його сировинних потоків. Тобто життєвий цикл е-палива повинен враховувати викиди від виробництва сонячних панелей, вітрових турбін, електролізерів, реакторів для синтезу, газових сховищ тощо.

В дослідженнях [9], на прикладі автопарку легкових автомобілів США, було кількісно оцінено необхідне зниження інтенсивності викидів вуглецю протягом життєвого циклу бензину за період з 2021 по 2050 рік щоб виконати умови Паризької кліматичної угоди.

Встановлено, що при існуючих темпах поширення електромобілів з акумуляторами у США, викиди вуглецю від бензину повинні зменшуватися на 2 $\text{г CO}_2\text{eq} / \text{МДж}$ щороку. Тобто з 90 $\text{г CO}_2\text{eq} / \text{МДж}$ у 2021 р. досягти значення 31 $\text{г CO}_2\text{eq} / \text{МДж}$ у 2050 р. Інтенсивність викидів вуглецю для е-палива становить 10 $\text{г CO}_2\text{eq} / \text{МДж}$. Було розглянуто два сценарії подій для досягнення

значення 31 г CO₂eq / МДж і відповідно виконання квоти викидів вуглецю для стабілізації клімату.

Перший сценарій – це лінійне поступове збільшення концентрації е-палива у суміші з бензином. Розраховано, що у 2050 р. концентрація е-палива у бензині повинна бути не менше 75 %.

Другий сценарій – перейти примусово до 100-відсоткової заміни легкового автопарку електромобілями з акумуляторами. За такого сценарію, на думку авторів аналогічні результати можна буде вже досягти до 2035 р. Однак, дослідники у висновках розглядають е-паливо та електромобілі як взаємодоповнюючі сценарії.

Поступовий перехід дизелів на е-паливо

В Україні з початку 2024 р. діє аналог європейського регламенту на синтезовані е-палива середньої дистиляції – ДСТУ EN 15940:2022 «Автомобільні палива. Парафінове дизельне паливо синтезу або гідроочищення. Вимоги та методи випробувань» (EN 15940:2016 + A1:2018 + AC:2019, IDT). Парафінові дизельні палива, в основному, отримують удосконаленим методом Фішера-Троппа.

Формально біодизельні палива не відносяться до е-палив, бо виробляються з біологічної сировини. Біодизельні палива другого покоління, які виробляються гідрогенізацією рослинної олії, можуть залучати для виробництва водню низьковуглецеві відновлювальні палива та відновлювану електроенергію. В такому випадку їх теж можна вважати е-паливами (англійською Hydrogenated Vegetable Oil або HVO).

На думку авторів праці [8], HVO може бути впроваджено як тимчасове додаткове парафінове паливо для зменшення викидів CO₂ до налагодження масового виробництва чистих е-парафінових палив. Навіть після масового виходу е-палив на ринок, HVO може також існувати як довгострокове додаткове паливо з низькою вуглецевою інтенсивністю викидів.

Синтезовані парафінові е-палива переважно не містять ароматичних сполук. Ця особливість приводить до зменшення утворення сажі, СО та сумарних вуглеводнів при згоранні у порівнянні з традиційним дизельним паливом. Викиди NO_x знаходяться приблизно на однаковому рівні. Однак, деякі дослідження [10, 11] повідомляють про збільшення викидів сажі за певних умов експлуатації при використанні парафінового е-палива та HVO.

Ще однією альтернативою дизельному паливу є поліоксиметилендиметилловий ефір (англійська аббревіатура OME_x), який має хімічну формулу [CH₃O(–CH₂O) *x* CH₃]. Позначка «*x*» виділяє різні за складом метильні групи у молекулі. Молекуляр-

на структура OME_x характеризується відсутністю прямих вуглець-вуглеводневих зв'язків, натомість між атомами вуглецю зв'язаний кисень. Така хімічна будова забезпечує практично безсажове згорання, зменшуючи викиди твердих частинок дизелем. Застосування OME_x пропонує шляхи вирішення проблеми постійного компромісу між викидами сажею та викидами NO_x [11–13].

Цікаві результати описано у праці [13], де досліджено згорання і заміряні концентрації відпрацьованих газів одноциліндрової установки та 6-циліндрового дизеля при роботі на: чистому OME_x, сумішевих паливах: з традиційним дизельним паливом, сумішевих паливах з біодизельним паливом HVO. Зазначимо, що для збереження фазової однорідності сумішевих палив (у більшості випробувань) дослідники додавали у паливо стабілізатори. Для стримування викидів NO_x перелаштовували систему рециркуляції відпрацьованих газів (EGR), значення останніх досягало 44 % для деяких режимів.

Традиційне дизельне паливо демонструє значне збільшення викидів сажі з підвищенням частки EGR. HVO демонструє подібну тенденцію, але вже значно нижчі значення сажі у порівнянні з дизельним паливом через відсутність ароматичних сполук у паливі. Робота дизеля на чистому OME_x повністю була без викидів сажі, навіть при рівні EGR 44 %. Робота дизеля на чистому HVO приводить до зниження викидів сажі приблизно на 50 % при рівні викидів NO_x до 1 г/кВт·год. Цей ефект зберігається при невеликих добавках – до 10 % об'ємних часток OME_x. Подальше збільшення частки OME_x у сумішевому паливі продовжує зменшувати викиди сажі і, одночасно, зменшує викиди NO_x, що можливо через наявність кисню у паливі та відповідно кращій сумісності з системою EGR.

Зазначимо, що OME_x має серйозний недолік щодо сумісності з деякими існуючими (ущільнюючими) матеріалами систем дизелів, навіть у сумішевому паливі. Необхідно модифікувати обладнання для впорскування палива новим еластомерним матеріалом. Крім того, OME_x є потенційним забруднювачем навколишнього середовища, бо при захороненні не піддається розкладанню бактеріями.

Наступним перспективним синтезованим паливом для дизелів є диметилловий ефір (англійська аббревіатура DME). Цей ефір, як і OME_x, має меншу теплотворну здатність. Диметилловий ефір має меншу в'язкість і відповідно гірші мастильні властивості у порівнянні з дизельним паливом. Тому найпростіше використовувати його у сумішах з парафіновим, дизельним паливом та HVO.

В багатьох публікаціях зазначено, що перехід дизельного двигуна на суто DME забезпечує більш м'яке згорання і зменшення масових викидів CO_2 (не менше 10 %). Це пов'язано з високими значеннями прихованої теплоти випаровування ефіру, що дозволяє знизити максимальні значення температури і тиску в циліндрі. Але для забезпечення сучасних норм на викиди NO_x , лише налаштування системи EGR недостатньо. Необхідно встановлювати додатковий нейтралізатор-накопичувач NO_x .

За нормальних атмосферних умов DME є газоподібним. При тиску вище 0,5 МПа він переходить із газоподібного стану в рідкий. Ця особливість палива вимагає удосконалення або спеціальної розробки системи паливоподачі, системи EGR.

До наступної групи синтезованих палив для дизельного двигуна можна віднести спирти легкої (метанол і етанол) та середньої (з кількістю атомів вуглецю більше 6) дистиляції і безпосередньо е-бензин. Результати досліджень при використанні цих палив у дизелях на предмет зменшення викидів NO_x або еквіваленту CO_2 дуже суперечливі.

Головна загальна проблема щодо використання цих спиртових палив – мале цетанове число і відповідно великий період затримки самозаймання. Тому існує два варіанти організації процесу згорання в двигунах із запалюванням від стискання.

Перший варіант – це використання суміші спиртів (або е-бензину) з паливом, яке має високі значення цетанового числа. До останніх відносимо парафінові е-палива, біологічні HVO або традиційне дизельне паливо. Для такого сумішевого палива необхідні добавки/присадки для компенсації зменшення в'язкості та його мастильних властивостей, для забезпечення фракційної стабілізації при тривалому використанні. Також можливе додавання у суміш третього компонента для збереження необхідної величини цетанового числа для полегшення самозаймання суміші при стисканні.

Другий варіант – це робота дизеля одночасно на двох паливах (Dual-fuel), паливні системи яких рознесені у просторі і ці палива не мають зовнішнього змішування. Одна із систем впорскує спиртові е-палива або е-бензин у впускний колектор під час процесу впуску або в кінці стискання і забезпечує добре сумішоутворення з повітрям. Друга система паливоподачі традиційна – впорскує запальну дозу палива із великим цетановим числом, яке самозаймається і запалює вже горючу суміш спиртів з повітрям. Такий принцип запалювання метану або пропану від запальної дози дизельного палива добре відпрацьовано у газодизелях.

Незалежно від варіанту організації згорання е-спиртів, необхідні додаткові дослідження щодо

сумісності таких палив з матеріалами двигуна та на надійність дизеля в цілому.

Висновки

Країни всього світу зобов'язуються скоротити викиди парникових газів. Лідирують країни ЄС, які планують скоротити ці викиди на 55 % до 2030 р. та досягти вуглецевої нейтральності до 2050 р. У цьому контексті е-палива стали перспективним рішенням для зменшення викидів парникових газів на транспорті. Головні їх переваги – це виробництво із відновлюваних джерел енергії та використання існуючої паливної інфраструктури з мінімальними змінами.

Успішне поширення е-палива в транспортній галузі можливе лише за стабільного динамічного розвитку глобальних економічних процесів та залежить від балансу економічних, екологічних та соціальних пріоритетів для кожної країни учасниці Паризької угоди. Реалізація таких глобальних планів потребує скоординованих зусиль між галузями промисловості, урядами та дослідницькими установами.

Щоб повністю оцінити вплив електронного палива на навколишнє середовище, необхідно враховувати весь ланцюжок життєвого циклу палива, від сировини та вибору джерел відновлюваної енергії до ефективності виробництва, логістики, до експлуатації транспортного засобу. Це допоможе уникнути потенційних ризиків – погіршення якості використання земельних угідь, невинуватене зростання потреб у прісній воді для технологічних цілей.

Виробництво е-палива ще не доступне у великих масштабах. Його використання буде поступово зростати завдяки поетапному збільшенню їх концентрацій у сумішевих видах палива. Паралельно з цим на транспорті будуть впроваджуватися інші подібні вуглецево-нейтральні технології.

Перший крок до вуглецево-нейтральних е-палив – це впровадження парафінових палив, отриманих з біосировини із залученням відновлюваних джерел енергії. Таке впровадження на транспортних дизелях забезпечує скорочення викидів CO_2 , сажі та інших шкідливих викидів. Це проміжний етап, доки не буде масового виробництва суто синтетичних парафінових е-палив.

Використання в дизельних двигунах синтезованих е-ефірів OME_x і DME, як низьковуглецевого палива або їх добавок у сумішеві палива, є можливим в короткостроковій та середньостроковій перспективі. Це другий крок до поширення вуглецево-нейтральних е-палив і технологій на транспорті. Перед впровадженням таких палив необхідні

додаткові дослідження щодо сумісності їх з матеріалами дизеля.

Україна має застарілий автопарк транспортних засобів. Це стосується і вантажного автотранспорту, який не може бути миттєво замінений на новий, більш ефективний.

Реалізація наукових досліджень і конструкторських розробок, які направлені на поетапне впровадження вуглецево-нейтральних е-палив на транспорті, повинні мінімізувати шкідливий вплив існуючого автотранспорту на навколишнє середовище.

Список літератури:

1. Reitz RD, Ogawa H, Payri R, et al. IJER editorial: the future of the internal combustion engine / R. Reitz, H. Ogawa, R. Payri, et al. // *International J of Engine Research*. – 2020. – Vol.21(1). – pp. 3-10. <https://doi.org/10.1177/1468087419877990>.
2. IEA. Global EV outlook 2024. Paris: IEA. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024> (2024, accessed 26 November 2024).
3. Лісовал А.А. Використання біогазу як сировини і моторного палива в енергетиці і на транспорті / А.А. Лісовал // *Двигуни внутрішнього згоряння*. – 2022. – №2. – С.13-19. DOI: 10.20998/0419-8719.2022.2.02.
4. Лісовал А.А. Перспективи використання водню в Україні в енергетичній та автомобільній галузях / А.А. Лісовал // *Двигуни внутрішнього згоряння*. – 2023. – №1. – С.11-17. DOI: 10.20998/0419-8719.2023.1.02.
5. Llamas-Orozco JA, Meng F, Walker GS, et al. Estimating the environmental impacts of global lithium-ion battery supply chain: a temporal, geographical, and technological perspective / JA Llamas-Orozco, F. Meng, GS Walker, et al. // *PNAS Nexus*. – 2023. – Vol. 2(11): 361. DOI: 10.1093/pnasnexus/pgad361.
6. IEA. The role of e-fuels in decarbonising transport. Paris: IEA. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-e-fuels-in-decarbonising-transport> (2023, accessed 26 November 2024).
7. Ishaq H and Crawford C. CO₂-based alternative fuel production to support development of CO₂ capture, utilization and storage / H. Ishaq and C. Crawford // *Fuel*. – 2023. – Vol. 331(2): 125684. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125684.
8. Uchida1 N, Onorati A, Novella R, et al. E-fuels in IC engines: A key solution for a future decarbonized transport / N. Uchida1, A. Onorati, R. Novella, et al. // *International J of Engine Research*. – 2025. – Vol. 1. – p. 1-28. <https://doi.org/10.1177/14680874251325296>.
9. Alzaghrini N, Milovanoff A, Roy R, et al. Closing the GHG mitigation gap with measures targeting conventional gasoline light-duty vehicles – a scenario based analysis of the US fleet / N. Alzaghrini, A. Milovanoff, R. Roy, et al. // *Appl Energy*. – 2024. – Vol. 359: 122734. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122734>.
10. Sugiyama K, Goto I, Kitano K, Mogi K and Honkanen M. Effects of hydrotreated vegetable oil (HVO) as renewable diesel fuel on combustion and exhaust emissions in diesel engine / K. Sugiyama, I. Goto, K. Kitano, K. Mogi and M. Honkanen // *SAE Int J Fuels Lubr*. – 2012. – Vol. 5(1). – pp. 205–217. DOI: <https://doi.org/10.4271/2011-01-1954>.
11. Pollmann S, Hartl M. and Wachtmeister G. Potential of miller timing with synthetic diesel fuels on a single cylinder heavy-duty engine / S. Pollmann, M. Hartl and G. Wachtmeister // *Int J Engine Res*. – 2022. – Vol. 23(5). – pp. 769–780. <https://doi.org/10.1177/14680874211043649>.
12. Gelner A, Beck H, Pastoetter C, Hartl M and Wachtmeister G. Ultra-low emissions of a heavy-duty engine powered with oxymethylene ethers (OME) under stationary and transient driving conditions / A. Gelner, H. Beck, C. Pastoetter, M. Hartl and G. Wachtmeister // *Int J Engine Res*. – 2023. – Vol. 23(5). – pp. 738–753. <https://doi.org/10.1177/14680874211047922>.
13. Holzer A and Guenther M. Investigation of the emission reduction potential of HVO-OME fuel blends in a single-cylinder diesel engine / A. Holzer and M. Guenther // *SAE Technical Paper* / – 2021. – Vol. 01-0556, 2021. <https://doi.org/10.4271/2021-01-0556>.

meister G. Potential of miller timing with synthetic diesel fuels on a single cylinder heavy-duty engine / S. Pollmann, M. Hartl and G. Wachtmeister // *Int J Engine Res*. – 2022. – Vol. 23(5). – pp. 769–780. <https://doi.org/10.1177/14680874211043649>.

12. Gelner A, Beck H, Pastoetter C, Hartl M and Wachtmeister G. Ultra-low emissions of a heavy-duty engine powered with oxymethylene ethers (OME) under stationary and transient driving conditions / A. Gelner, H. Beck, C. Pastoetter, M. Hartl and G. Wachtmeister // *Int J Engine Res*. – 2023. – Vol. 23(5). – pp. 738–753. <https://doi.org/10.1177/14680874211047922>.

13. Holzer A and Guenther M. Investigation of the emission reduction potential of HVO-OME fuel blends in a single-cylinder diesel engine / A. Holzer and M. Guenther // *SAE Technical Paper* / – 2021. – Vol. 01-0556, 2021. <https://doi.org/10.4271/2021-01-0556>.

Bibliography (transliterated):

1. Reitz RD, Ogawa H, Payri R, et al. (2020), "IJER editorial: the future of the internal combustion engine International", *J of Engine Research*, Vol. 21(1). – pp. 3-10. <https://doi.org/10.1177/1468087419877990>.
2. IEA (2024), "Global EV outlook 2024", Paris: IEA. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024> (2024, accessed 26 November 2024).
3. Lisoval, A.A. (2022), "Use of biogas as raw material and motor fuel in energy and transport", [*Використання біогазу як сировини і моторного палива в енергетиці і на транспорті*]. *Internal combustion engines*, Vol. 2, pp. 13-19. DOI: 10.20998/0419-8719.2022.2.02.
4. Lisoval, A.A. (2023), "Prospects for the use of hydrogen in Ukraine in the energy and automotive industries", [*Перспективи використання водню в Україні в енергетичній та автомобільній галузях*]. *Internal combustion engines*, Vol. 1, pp. 11-17. DOI: 10.20998/0419-8719.2023.1.02.
5. Llamas-Orozco JA, Meng F, Walker GS, et al.(2023), "Estimating the environmental impacts of global lithium-ion battery supply chain: a temporal, geographical, and technological perspective", *PNAS Nexus*, Vol. 2(11): 361. DOI: 10.1093/pnasnexus/pgad361.
6. IEA (2024), "The role of e-fuels in decarbonising transport", Paris: IEA. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-e-fuels-in-decarbonising-transport> (2023, accessed 26 November 2024).
7. Ishaq H and Crawford C. (2023), "CO₂-based alternative fuel production to support development of CO₂ capture, utilization and storage", *Fuel*, Vol. 331(2): 125684. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125684.
8. Uchida1 N., Onorati A., Novella R., et al. (2025), "E-fuels in IC engines: A key solution for a future decarbonized transport", *International J of Engine Research*, Vol.1, pp. 1-28. <https://doi.org/10.1177/14680874251325296>.
9. Alzaghrini N, Milovanoff A, Roy R, et al.(2024), "Closing the GHG mitigation gap with measures targeting conventional gasoline light-duty vehicles – a scenario based analysis of the US fleet", *Appl Energy*, Vol. 359: 122734. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122734>.
10. Sugiyama K, Goto I, Kitano K, Mogi K and Honkanen M. (2012), "Effects of hydrotreated vegetable oil (HVO) as renewable diesel fuel on combustion and exhaust emissions in diesel engine", *SAE Int J Fuels Lubr*, Vol. 5(1), pp. 205–217. DOI: <https://doi.org/10.4271/2011-01-1954>.
11. Pollmann S, Hartl M. and Wachtmeister G. (2022), "Potential of miller timing with synthetic diesel fuels on a single cylinder heavy-duty engine", *Int J Engine Res*, Vol. 23(5), pp. 769–780. <https://doi.org/10.1177/14680874211043649>.
12. Gelner A, Beck H, Pastoetter C, Hartl M and Wachtmeister G. (2023), "Ultra-low emissions of a heavy-duty engine powered with oxymethylene ethers (OME) under stationary and transient driving conditions", *Int J Engine Res*, Vol. 23(5), pp. 738–753. <https://doi.org/10.1177/14680874211047922>.
13. Holzer A and Guenther M. (2021), "Investigation of the emission reduction potential of HVO-OME fuel blends in a single-cylinder diesel engine", *SAE Technical Paper*, Vol. 01-0556, 2021. <https://doi.org/10.4271/2021-01-0556>.

Надійшла до редакції 07.07. 2025 р.

Лісовал Анатолій Анатолійович – доктор техн. наук, професор, професор кафедри двигунів і теплотехніки, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: li-dvz@bigmir.net . [https:// orcid.org/0000-0001-6168-4010](https://orcid.org/0000-0001-6168-4010).

Говоров Олександр Федорович – канд. техн. наук, стар. наук. співроб, доцент кафедри тракторів, автомобілів та енергетичних засобів, Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна, e-mail: Aleksandr_Govorov@ukr.net . [https:// orcid.org/0000-0002-1645-1725](https://orcid.org/0000-0002-1645-1725).

Пукас Віталій Леонідович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри тракторів, автомобілів та енергетичних засобів, Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна, e-mail: pukasvital@gmail.com . [https:// orcid.org/ 0000-0002-0083-7359](https://orcid.org/0000-0002-0083-7359).

Волинкін Микола Петрович – асистент кафедри тракторів, автомобілів та енергетичних засобів, Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна, e-mail: mykolavolynkin@gmail.com . [https:// orcid.org/ 0009-0006-4960-8537](https://orcid.org/0009-0006-4960-8537).

JUSTIFICATION FOR USING SYNTHESISED E-FUELS IN THE DIESEL ENGINES OF VEHICLES

A.A. Lisoval, O.F. Hovorov, V.L. Pukas, M.P. Volynkin

Based on foreign sources, the article systematises and summarises the results of recent studies on the possibilities of using synthesised electronic fuels (e-fuels) in land transport for the gradual decarbonisation of the industry. The article focuses on liquid e-fuels for transport diesel engines. Diesel engines remain a relevant subject of research for Ukraine today, as they are used in vehicles not only for transporting goods, but also for the mobility of the defence sector and technological processes in food production. EU countries plan to reduce greenhouse gas emissions by 55 % by 2030 and achieve carbon neutrality by 2050. In this context, e-fuels have become a promising solution for reducing greenhouse gas emissions in transport. Classic e-fuels are synthesized from CO₂ captured from the air and renewable hydrogen obtained by electrolysis of water. The energy for electrolysis comes from renewable sources of wind, solar, geothermal, tidal, or hydroelectric power. The main advantages of e-fuels are that they are produced from renewable energy sources and use existing fuel infrastructure with minimal changes. E-fuel production is not yet available on a large scale. Its use will gradually increase thanks to a phased increase in its concentration in blended fuels. At the same time, other similar carbon-neutral technologies will be introduced in transport. The first step towards carbon-neutral e-fuels is the introduction of paraffin fuels obtained from bio-raw materials using renewable energy sources. Such introduction in transport diesel engines ensures a reduction in CO₂, soot and other harmful emissions. This is an intermediate stage until the mass production of purely synthetic paraffin e-fuels. The use of synthesised OME_x and DME e-esters in diesel engines as low-carbon fuels is possible in the short and medium term. This is the second step towards the spread of carbon-neutral e-fuels and technologies in transport. Before introducing such fuels, additional research is needed on their compatibility with diesel materials. Ukraine has an outdated fleet of vehicles that cannot be instantly replaced with new, more efficient ones. Research and development aimed at the phased introduction of carbon-neutral e-fuels in transport should minimise the harmful impact of existing motor vehicles on the environment.

Key words: transport; diesel engine; truck; greenhouse gases; fuel synthesis; e-fuel; fuel life cycle.