

А. П. Марченко, В. В. Пильов, В. О. Пильов

ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ ОРГАНІЗАЦІЇ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ НА ЗАСАДАХ ЗАЛУЧЕННЯ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Головний напрямок подальшого розвитку ДВЗ в умовах глобальної проблеми зміни клімату спирається на інтеграцію силових установок, які матимуть вуглецевий слід ще певний період часу, до циркулярної вуглецевої економіки з нульовим рівнем викидів вуглецю в повному життєвому циклі при інтенсивному впровадженні відновлюваних джерел енергії. В даній публікації проаналізовано існуючі глобальні тенденції, виклики і запропоновані перспективні шляхи відповідної трансформації. На прикладах статистичних даних, аналітичних звітів дослідницьких установ і відомостей щодо проєктів, в які відбуваються інвестиції, розглянуто три питання, на ефективне вирішення яких мають бути спрямовані зусилля фахівців. Вони полягають у пошуку можливих шляхів досягнення ефекту від комплексу узгоджених заходів циркулярної вуглецевої економіки, проблематиці використання відновлювальних джерел, генерації електричної енергії за допомогою яких власна добава та сезонна аперіодична циклічність, а також пошуку науково обґрунтованих напрямів подальшого розвитку ДВЗ в окреслених умовах. Показано, що використання ДВЗ в умовах циркулярної економіки слід розглядати як вуглецево-нейтральні незалежно від наявності чи відсутності вуглецевого сліду. Наголошено, що вилучення ДВЗ з використання ускладнює досягнення вуглецевої нейтральності. Вуглецеві біо- та синтетичні і безвуглецеві палива ДВЗ можна і потрібно розглядати як способи накопичення енергії від відновлювальних джерел енергії та переведення її у інші форми, придатні для ефективного зберігання, транспортування і використання. Розглянуто п'ять незалежних напрямів розвитку ДВЗ в умовах циркулярної економіки: заміни традиційного палива в існуючих ДВЗ на вуглецево-нейтральне, удосконалення конструкцій з метою підвищення їх економічності, застосування додаткових бортових систем і пристроїв, перехід на застосування безвуглецевих палив, мінімізацію викидів парникових газів протягом життєвого циклу ДВЗ. Доведено, що подальше удосконалення ДВЗ безпосередньо сприяє забезпеченню вимог сталого розвитку в умовах переходу до кліматично нейтрального господарювання.

Ключові слова: циркулярна вуглецева економіка; викиди парникових газів; декарбонізація; відновлювальні джерела енергії; двигун внутрішнього згорання; зелений перехід.

Вступ

Можна вважати, що дискусії щодо розвитку транспортної галузі та перспектив використання двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) в світовому енергетичному комплексі, які тривали серед науковців і громадськості щонайменше десятиріччя та супроводжувались далекосяжними законодавчими рішеннями, добігли етапу свого вичерпання. Результатом таких дискусій стало усвідомлення фахівцями необхідності збалансованого використання акумуляторних силових установок, агрегатів з ДВЗ та рушіїв на базі водневих паливних елементів, гібридизації силових агрегатів. Наслідком цього, наприклад, є зміна Німеччиною свого попереднього курсу і заблокування Угоди ЄС про заборону нових продажів автомобілів на вичерпаному паливі з 2035 року [1]. В Україні з 2036 року до перевезень пасажирів на міських автобусних маршрутах у містах районного та обласного упорядкування допускатимуться автобуси з ДВЗ, що працюють на метані або біогазі [2]. Ринкові прогнози в світі у цілому передбачають, що до 2030 року сумарні річні темпи зростання кількості ДВЗ складатимуть 6-9%; попит на ДВЗ зростатиме експоненційно в галузях сільськогосподарства, будівництва, гірничодобувної промисловості, виробництва електроенергії тощо; потреби в ДВЗ є суттєво вагомими у важких позашляхових застосуваннях; електричні силові агрега-

ти все частіше поєднуюватимуться з ДВЗ; світовий ринок ДВЗ досягне понад 90000 мільярдів доларів США [3, 4]. При цьому при зростанні споживання нафти до кінця цього десятиліття, в довгостроковій перспективі очікується зменшення світового попиту [5]. Вказане однозначно впливає на загальну ситуацію у світовій енергетиці через темпи впровадження інновацій та темпи адаптації до кліматичних змін [6, 7].

Головний напрямок подальшого розвитку ДВЗ спирається на прагматичну концепцію використання нових двигунів, які матимуть вуглецевий слід ще певний період часу, з тенденцією до поступових зменшення викидів вуглецю та застосування безвуглецевих палив. Цей підхід передбачає обов'язкову інтеграцію силових установок до рамкової платформи циркулярної вуглецевої економіки з нульовим рівнем викидів вуглецю в повному життєвому циклі (ЖЦ) отримання і використання механічної, електричної та теплової енергії [8-14].

Ідея створення циркулярної вуглецевої економіки пов'язана з наступним. На сьогодні заходи щодо мінімізації зміни клімату та наслідків цього пов'язують з інтенсивним впровадженням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та зменшеному використанні вуглеводнів. Існують оцінки, що для утримати зростання глобальної температури нижче 1,5 °C необхідним є скорочення викидів CO₂ з

0,88 т (у 2019 році) до 0,2 т на душу населення, тобто у понад 4 рази [15]. Однак, глобальні викиди парникових газів (ПГ) все ще суттєво зростають. Наприклад, глобальний вміст CO₂ в атмосфері у 2020 р. становив 413 ppm, а у 2024 – 420 ppm, тобто зростання складає понад 1,5% [16]. Тому для додання показаного протиріччя між необхідністю скорочення викидів CO₂ та реальним станом зростання викидів потрібен узгоджений комплекс заходів, націлений на штучне відновлення збалансованого потоку вуглецю між атмосферою, гідросферою, літосферою, природними екосистемами та процесами енерговиробництва та енергоспоживання. В даній публікації додання цього протиріччя розглянуто з позицій наявного подвійного інвестування у вуглеводневі та відновлювані джерела енергії, доки безвуглецева енергетика не зможе повністю задовольняти світові потреби у споживанні [5].

Звернемо увагу, що при розгляді глобальної проблеми зміни клімату можна виділити три важливі питання, які розглядаються в цій публікації.

Перше питання передбачає розгляд можливих шляхів досягнення ефекту від комплексу узгоджених заходів циркулярної вуглецевої економіки. Цей ефект повинен проявлятися через мінімізацію кліматичного забруднення довкілля.

Друге питання пов'язане з проблематикою використання ВДЕ, яким властива добова та сезонна аперіодична циклічна генерація електричної енергії. Означена нестабільність електрогенерації викликана суттєвою залежністю ВДЕ від погодних умов, що створює невідповідність рівнів можливої електрогенерації і потреб споживачів.

Третє питання стосується пошуку науково обґрунтованих напрямів подальшого розвитку ДВЗ, залучених до технологічних циклів підтримки кліматично нейтральної економіки майбутнього.

Аналіз стану трьох сформульованих питань в даній публікації спирається на ствердження роботи [13], в якій наголошується, що політика, яка односторонньо віддає перевагу одному технологічному рішенню, може виявитися дуже неефективною і, можливо, навіть вести до хибного кінцевого рішення. З цього виходить, що розгляд кожного з означених трьох питань повинен бути різностороннім, не може вважатися вичерпним та завжди буде відкритим для подальшого розвитку.

Можливий комплекс заходів з мінімізації кліматичного забруднення довкілля

Кліматичне забруднення відносять до фізичного виду забруднення, що характеризується привнесенням в екосистему надлишку енергії, яка є причиною температурного дисбалансу в природі та призводить до погрозових змін клімату. До сукупності

чинників зміни клімату відносять коливання сонячної радіації, біотичні, геологічні та антропогенні процеси. Саме антропогенні процеси вважають вагомими чинниками зміни клімату останніх десятиріч та такими, на які може впливати людство.

До найбільш вагомих чинників теплового забруднення в сучасній системі джерел енергії відносять теплові електростанції (ТЕС і ТЕЦ) та транспортні і стаціонарні установки з ДВЗ [12, 17]. При цьому порушення природного теплового балансу планети відбувається через застосування викопних палив з неприйнятно великою кількістю викидів вуглецю, зв'язаного на протязі історично великого терміну часу. Саме тому в [12] усунення антропогенної складової теплового дисбалансу планети розглядається через впровадження циклічного накопичення та звільнення енергії вуглецевих палив з періодом замкненого циклу до року і менше. Реальна можливість такого скорочення циклу здійснення при застосуванні ВДЕ, а очікуваним ефектом від всеосяжного використання ВДЕ є кліматична нейтральність діяльності людства [18].

У 2019 році Європейська Комісія ЄС оприлюднила «Європейську зелену угоду» як комплекс ініціатив, націлених на досягнення кліматичної нейтральності континенту до 2050 року [19, 20]. Цим документом оговорено, що під кліматичною нейтральністю розуміють такий стан економіки, коли сумарні викиди ПГ є не більшими за можливе їх поглинання природними та антропогенними поглиначами. При цьому зменшення викидів ПГ спирається на принципи циркулярної економіки [21,22] та першочергово розглядається через декарбонізацію енергетичного сектору.

Принципове звуження проблеми з комплексної мінімізації кліматичного забруднення до мінімізації викидів ПГ та далі до мінімізації викидів вуглецю спирається на екологічний стандарт ISO 14001 (та його національний аналог ДСТУ ISO 14001) [22]: стандарт впроваджується добровільно без юридичних зобов'язань; екологічні аспекти діяльності мають бути визначені на основі аналізу ЖЦ; повна оцінка ЖЦ не є обов'язковою; достатнім є розгляд частин ЖЦ, які можуть контролюватися та на які можна впливати. Вказане означає, що впровадження стандарту ISO 14001 може бути покроковим, вагомим етапом чого є реалізація циркулярної вуглецевої економіки як складової врахування усіх аспектів повного ЖЦ сукупності антропогенних процесів. У цілому врахування сукупності аспектів ЖЦ здійснюють на засадах циркулярної економіки та зеленої економіки [23].

Стратегічні плани щодо реалізації концепцій

зеленої, циркулярної та циркулярної вуглецевої економік, реальні проекти їх втілення розроблені, фінансуються та реалізуються практично в усіх розвинених країнах світу із заохоченням інших країн, наприклад, асоційованих з Програмою «Горизонт Європа», у т.ч. – України та окремих її міст (Харків, Рівне) [24].

Розглянемо плани, проекти і досвід щодо реалізації циркулярної вуглецевої економіки на прикладі національної нафтової компанії Саудівської Аравії – Saudi Arabian Oil Company (Saudi Aramco). Вибір цієї компанії було пов'язано з тим, що вона є однією з найбільших у світі посеред інтегрованих енергетичних та хімічних корпорацій та є одним зі світових лідерів за обсягами запасів та видобутку нафти.

Saudi Aramco в своїй діяльності спирається на такі основні тези [25]:

- з огляду на прогнозоване збільшення населення світу на два мільярди протягом наступних 25 років, для задоволення зростаючого попиту знадобиться ще більше енергії;

- для задоволення зростаючих потреб людства знадобляться всі доступні джерела енергії, як традиційні, так і альтернативні;

- щоб зробити ефективний внесок у загальне рішення, Saudi Aramco володіє винятковими кваліфікацією, експертними та інженерними знаннями щодо ключових світових ринків, включаючи сировинний, енергетичний та транспортний.

Компанія має власну глобальну дослідницьку мережу з установами в Саудівській Аравії, США, Європі, Азії. Для досягнення технологічних проривів вона активно співпрацює з партнерами в галузях перетворення енергії, транспорту, матеріалів. Це дозволяє їй здійснювати науковий пошук та реалізовувати амбітні проекти відповідно до системного підходу щодо просування ідей циркулярної вуглецевої економіки.

Аналіз схемних рішень щодо практичної реалізації ідей циркулярної вуглецевої економіки нами виконано на основі робіт фахівців Saudi Aramco з урахуванням візії King Abdullah Petroleum Studies and Research Center (KAPSARC) та International Energy Agency (IEA) [14, 26-28]. Такі проєктні рішення передбачають врахування циркуляції вуглецю в системі усунення його антропогенного впливу через баланс викидів та їх поглинання природними і антропогенними поглиначами. В такій системі рух енергії від стану отримання з традиційних та альтернативних джерел до стану використання сукупніс-

тю можливих споживачів розглядається сумарно, тобто незалежно від технології отримання механічної, електричної, теплової енергії (ТОМЕТЕ). Такий підхід дозволяє розглядати «критерій теплового забруднення» доквілля, залежний від конкретних реалізацій ТОМЕТЕ [29] та допомагає виробникам знайти найкращий «індекс циркулярності» для своєї продукції [30]. Тут, аналогічно до інших проєктів, наприклад [20], потік енергії від первинних джерел (викопних палив чи ВДЕ) до перетворення за певними ТОМЕТЕ не враховується. І не враховується інтегральне забруднення доквілля сукупністю можливих споживачів.

Пояснимо вказане на прикладі масового використання електромобілів. Відставання компенсації спожитої ними електричної енергії виробленням за рахунок ВДЕ неодмінно призводить до збільшення викидів CO₂ в атмосферу від ТЕС і ТЕЦ [12, 13]. З іншого боку, результати моделювання оптимізованого диспетчеризування енергосистеми України, що виконано міжнародною корпорацією Wärtsilä [31], засвідчують: сумісне застосування 4 ГВт потужностей ВДЕ та додаткових 4 ГВт регулюючих потужностей газових ДВЗ є у 9 разів ефективнішим заходом, ніж лише застосування 4 ГВт ВДЕ (27% зниження викидів CO₂ загалом). Це названо парадоксом «Green-Coal» [32].

Очевидно, що циркуляція енергії в господарській діяльності може контролюватись. Тому підходить стандарту ISO 14001, які сьогодні використовують щодо аналізу циркуляції вуглецю, можуть бути і повинні бути поширеними на сумісний аналіз циркуляції вуглецю та енергії.

Загальну схему циркуляції вуглецю, подану на рис. 1, нами розроблено на основі систематизації робіт [14, 26-28] та поширено на врахування потоку енергії в системі отримання її первинного виду – перетворення – скидання ПГ та теплоти.

На схемі суцільними лініями подано основні напрями руху вуглецю, точковими – напрями руху безвуглецевих речовин, штриховими – уловлювання енергії з атмосфери та викиди теплоти до атмосфери, штрих-подвійним пунктиром – потоки механічної, електричної та теплової енергії до кінцевих споживачів.

Особливістю композиції наведеної схеми є те, що, наприклад, для засобів транспорту функціонування ДВЗ віднесено до довільного з блоків 2,5,8,11, а самого транспортного засобу – до блоку 15.

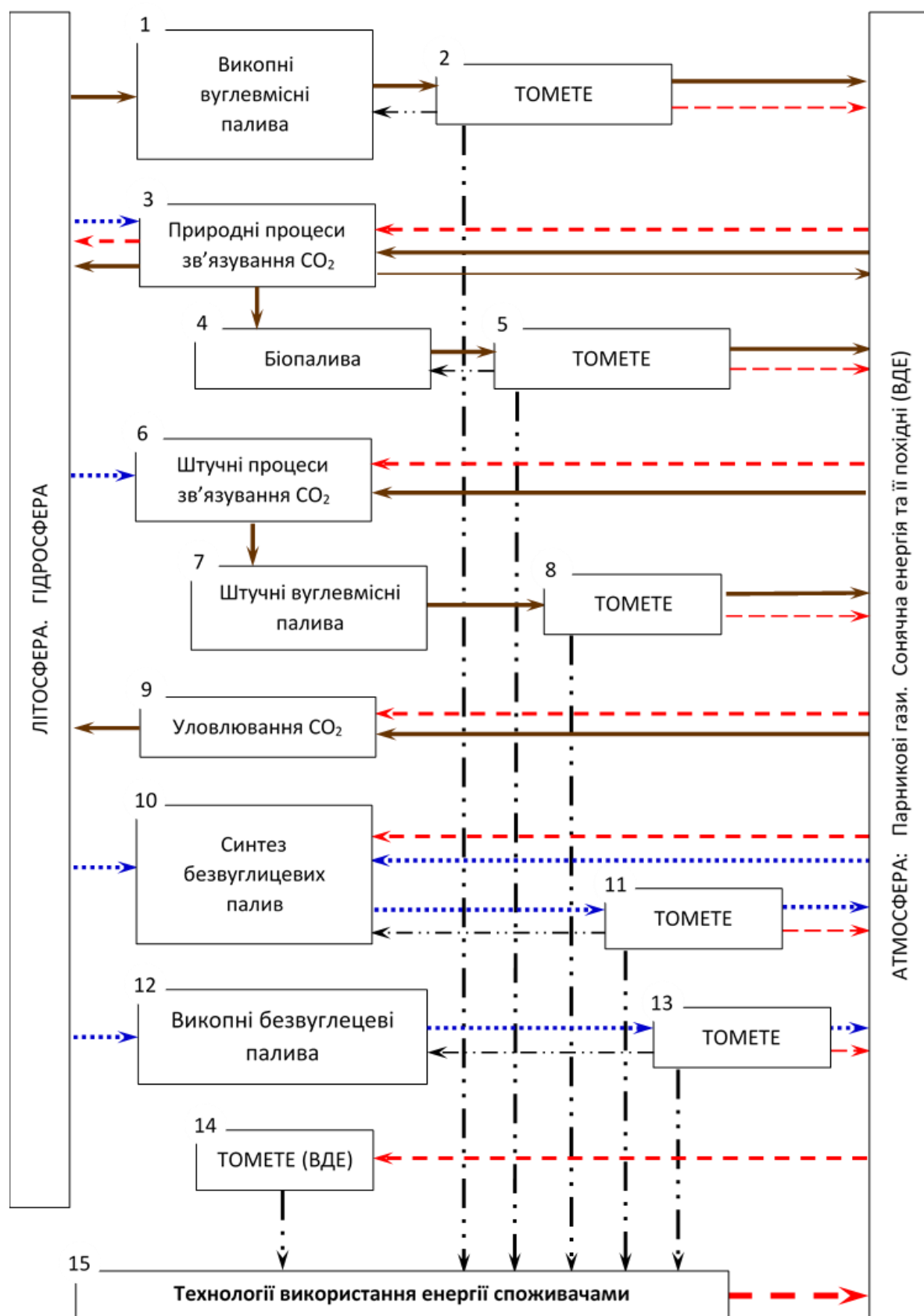


Рис. 1. Основні потоки руху речовини та енергії

Схема за рис.1 ілюструє наступну інформацію.

Блоки 1 і 2 та відповідний напрям руху вуглецю демонструють «традиційну» лінійну енергетичну систему, саме наявність якої і є антропогенним чинником порушення природного теплового балансу. При цьому кліматичне забруднення відбувається через інтенсивне звільнення енергії вуглецевих викопних палив, утворених приблизно від 50 до 350 мільйонів років тому.

Природним чинником, що протидіє промисловому звільненню CO₂, є фотосинтез рослин (блок 3). Цей чинник вважають за обов'язкову складову циркулярної вуглецевої економіки. Наприклад, Saudi Aramco станом на кінець 2024 р. висадила понад 43 мільйони мангрових дерев уздовж узбережжя Перської затоки та Червоного моря та понад 4 мільйони дерев материком (мангрові ліси є одним із найважливіших природних поглиначів CO₂ [14]). Водночас використання біопалив рослинного (і тваринного) походження дозволяє створити енергетичний цикл з малим періодом накопичення і звільнення енергії. Такий цикл фактично відтворює вуглецево-нейтральний процес (блоки 3-5) та концептуально є доцільним до реалізації в зонах наявної сировини без нанесення шкоди довкіллю. Паливо з вмістом до 10% біоетанолу (E10) дозволено до використання в більшості бензинових ДВЗ вже починаючи з 2010 р.

При наявності ВДЕ штучні процеси зв'язування CO₂, що подані блоками 6-8, є аналогами природних вуглецево-нейтральних процесів з малим періодом накопичення і звільнення енергії, але для синтетичних палив. Тут передбачається синтез вуглецево-нейтрального метанолу, сумісного з існуючими технологіями використання рідкого палива. Пілотними прикладами розвитку цього напрямку є роботи Saudi Aramco та Siemens Energy. Створення такого палива повністю відповідає концепції його синтезу в зонах з найбільшими відновлюваними ресурсами та транспортуванням в зони з найбільшими потребами в енергії та недостатніми просторами для її відновлюваної генерації. Так, за участі Siemens Energy та Porsche в Патагонії, Чилі, побудовано перший у світі інтегрований завод промислового масштабу для виробництва «електронного метанолу» [33]. На сьогодні за участі Siemens Energy в Данії будується найбільший у світі завод з виробництва метанолу потужністю 50 МВт, який щорічно вироблятиме 42000 т палива, синтезованого з водню та уловленого CO₂ [34].

Значної уваги сьогодні приділяється технологіям уловлювання CO₂ (блок 9). Проекти із захоплення, зберігання та секвестрації вуглецю сьогодні є реалізованими в Австралії, Великій Британії, Ка-

наді, Китаї, Норвегії, Саудівський Аравії, Швеції та інших країнах [35]. Наприклад, Saudi Aramco реалізувала проєкт секвестрації CO₂, згідно якого захоплений газ подається трубопроводом на відстань 85 км до нафтового родовища. З моменту першого закачування CO₂ у нафтовий пласт у 2015 р. завдяки підвищенню тиску фірма подвоїла темпи видобутку нафти з чотирьох таких свердловин. Saudi Aramco також реалізувала проєкт уловлювання вихлопних газів на борту автомобіля. Останній варіант цієї технології може уловлювати та зберігати до 40% виробленого транспортним засобом CO₂, перш ніж вивантажувати газ на заправних станціях для секвестрації або переробки в інші форми матеріалу чи енергії [8].

Останнього часу вагомою складовою декарбонізації економіки є розширене використання водню, що на рис.1 відповідає блокам 10, 11. Дорожні карти щодо включення цього палива до свого енергетичного балансу та реальні проєкти сьогодні реалізують країни Європи, Америки, Азії, Близького Сходу. Піонером у використанні водню як джерела енергії є Saudi Aramco. У 2024 р. в Саудівській Аравії завершено будівництво найбільшого у світі заводу з виробництва «зеленого» водню потужністю до 650 т щодня [6].

Saudi Aramco також є лідером у використанні «зеленого» аміаку, як речовини, здатної зберігати водень у зменшеному об'ємі та придатної до ефективного способу транспортування на великі відстані. У 2020 р. Saudi Aramco та Інститут енергетичної економіки Японії у партнерстві з SABIC продемонстрували виробництво та відвантаження аміаку з Саудівської Аравії до Південної Кореї і Японії [8]. Один з найбільших у світі проєктів з виробництва «зеленого» аміаку також здійснює австралійська компанія NH₃ Clean Energy [36]. Пілотними проєктами передбачено використання аміаку судновими ДВЗ, що відповідає новими кліматичними вимогам Міжнародної морської організації для великих суден, та на теплових електростанціях.

Слід звернути увагу, що впровадження систем з виробництва біо- та синтетичних палив, уловлювання вуглецю від викидів технологічних процесів і з атмосфери, зберігання і секвестрація вуглецю, а також розширення лісових масивів та інше озеленення територій, що розглядається як сукупність слушних заходів, при відставанні компенсації приросту потреб енергії за рахунок ВДЕ неодмінно приводить до збільшення викидів CO₂. Саме тому на рис. 1 енергетичні потоки до блоків 3, 6, 9, 10 подано виключно з атмосфери.

Зменшення світової залежності від використання викопних вуглецевих палив також покла-

дається на викопні безвуглецеві палива (блоки 12, 13), до яких в першу чергу відносять уран. Активізація розвитку атомної енергетики відбувається в Європі, США, Канаді, Китаї, Індії та інших країнах. Очікується, що у 2025 р. США, Китай та Канада введуть в експлуатацію перші комерційні малі модульні реактори (SMR) [6]. При цьому слід звернути увагу, що Франція отримує близько 70% своєї електроенергії з атомної енергії, Україна, Словаччина та Угорщина – близько половини, чотирнадцять країн – щонайменше чверть. При цьому за даними ІЕА світовий видобуток електроенергії з атомної ще становить тільки 9% проти 36% електроенергії, отриманої при спалюванні вугілля.

Масштабні інвестиційні проекти в світі націлені на максимальне використання ВДЕ для електрогенерації (блок 14). Щонайменше 30% бюджету ЄС на період 2021-2027 років виділено на ініціативи, пов'язані з кліматом, що є частиною Європейського зеленого курсу. Частка ВДЕ у багатьох країнах ЄС, включаючи Німеччину, Іспанію та Данію перевищила 50%. Німеччина вже завершила закриття останніх вугільних електростанцій, перейшовши на ВДЕ, газові потужності та імпорту електроенергії. Тільки у 2024 р. у світі реалізовано такі значущі проекти: в Бразилії запущено вітропарк потужністю 2 ГВт; у США запущено вітропарк потужністю 2,6 ГВт; Великобританія ввела в експлуатацію вітропарк потужністю 3,6 ГВт; в Марокко розширено сонячний комплекс до 5 ГВт; в Індії завершено проєкт сонячної генерації на 10 ГВт; у Китаї завершено будівництво найбільшого у світі сонячного парку потужністю 20 ГВт [6].

Таким чином, за усіма напрямками зеленого переходу виконуються практичні заходи щодо реалізації концепції циркулярної економіки. Цими заходами, окрім іншого, обумовлені перспективи розвитку транспортних засобів та їх енергетичних установок, у т.ч. – з ДВЗ. Використання останніх слід розглядати як вуглецево-нейтральні незалежно від наявності чи відсутності вуглецевого сліду. Такий підхід є заснованим на незворотних перспективах впровадження комплексу узгоджених заходів циркулярної вуглецевої економіки. При цьому є очевидним, що теплове забруднення довкілля від певної ТОМЕТЕ слід розглядати з урахуванням повної траєкторії ЖЦК, – від проєктування, через виробництво до експлуатації та утилізації і повторного використання ресурсів. Наприклад, оцінки Siemens Energy [33] засвідчують, що використання синтезованого метанолу зменшує викиди CO₂ не на 100%, а приблизно на 90%.

Проблематика та шляхи покращання використання ВДЕ

З наведеного вище є очевидним, що комплекс узгоджених заходів циркулярної вуглецевої економіки для досягнення вуглецевої нейтральності повинен спиратись на відповідність рівнів можливої генерації енергії та потреб споживачів. Основною вимогою до первинного виду енергії є її практична невичерпність та відсутність продукування ПГ. За значущі такі види на сьогодні приймається атомна (і термоядерна) енергія та ВДЕ. При цьому розвиток ВДЕ спирається на її основну властивість, що одержувана з природних джерел енергія поповнюється зі швидкістю, що перевищує швидкість споживання.

Але застосування ВДЕ як первинних джерел енергії для декарбонізації економіки само по собі не позбавлено викликів. На практиці вже чітко проявила себе і стала зрозумілою нестабільність рівня генерації ВДЕ відповідно до річних і добових змін, суттєво залежних від погодних умов. В першу чергу це стосується сонячної і вітряної енергетики. У сукупності з також циклічним, але за відмінною залежністю, характером споживання це постійно створює невідповідність генерації рівню потреб споживачів. Зараз цей ефект вже прийнятий як другу вагому властивість, якою потрібно керувати в міру змін рівня аперіодичної циклічної генерації ВДЕ.

Це керування зводиться до трьох принципів, що полягають у: компенсації нестабільності рівня генерації ВДЕ за рахунок інших джерел енергії; накопичення надлишків електричної енергії від ВДЕ чи переведення її у інші форми, придатні для зберігання з наступною віддачею споживачу за потреби; глобального перерозподілу енергоресурсів з транскордонними перетіканнями. Проілюструємо ці принципи типовим прикладом забезпечення добових потреб вироблення, споживання та перерозподілу енергії між енергогенеруючими засобами за даними «НЕК «Укренерго» до початку повномасштабної російської агресії в Україні. Такі дані подано на рис. 2 [37].

Видно, що загальний характер добової зміни споживання електричної енергії є наступним – приблизно в період з 0 до 6-ї години має місце просадка споживання, приблизно з 9-ї до 16-ї години має місце перше зростання споживання, а в період з 16-ї до 24-ї години має місце друге, із максимальним піком, що приходить на 21-у годину. При цьому електрогенерація за ВДЕ протягом доби є змінною, від максимальних 3768 МВт (27% від споживання) практично до незначущої величини. Розглянемо стан споживання та вироблення елект-

ричної енергії на 13-у годину, коли видобуток енергії за ВДЕ є найбільшим. Тут енергетичний баланс було досягнуто в основному шляхом зменшення навантаження ТЕС до 2078 МВт (що в 2,4 є меншою виробленою потужністю на 21-у годину та що відповідає впровадженню першого принципу керу-

вання), використанням потужності для закачування води в резервуар вище греблі на гідроакумуючій електричній станції (ГАЕС) величиною 832 МВт (другий принцип керування) та здійснення експорту електроенергії в обсязі 234 МВт (третій принцип).

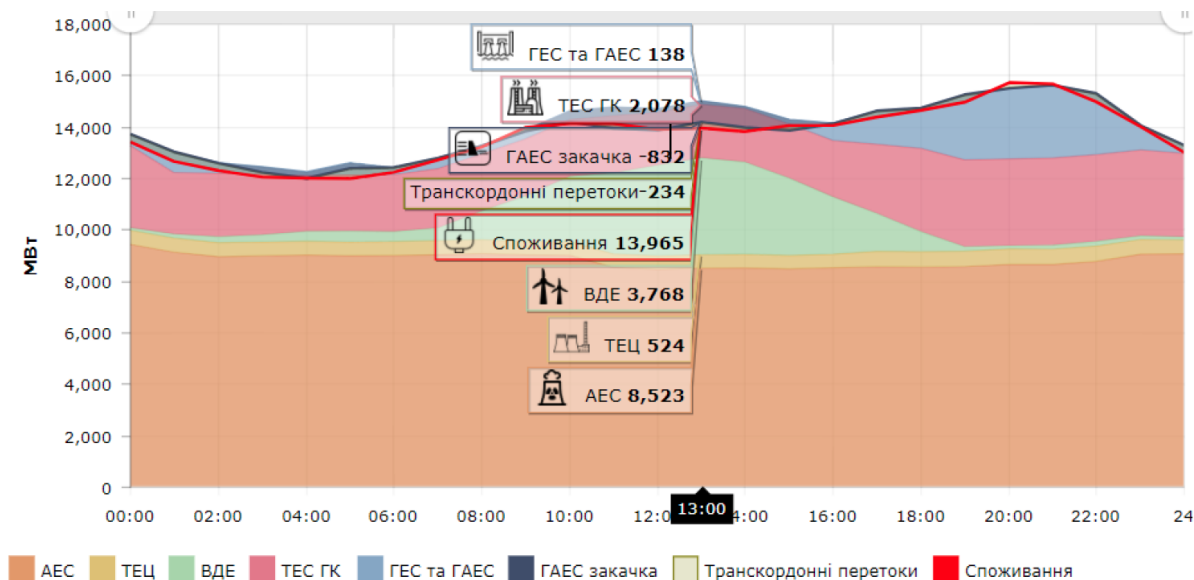


Рис. 2. Приклад добового виробництва та споживання електричної енергії в Україні стаціонарними енергогенеруючими засобами за 10.09.2021 р.

Повинно бути ясно, що відсутність роботи ГАЕС та транскордонних перетоків потребувало б або зниження потужності ТЕС до 20% від максимального добового навантаження (!), або часткового відключення ВДЕ. Так в Україні в лютому і березні 2024 р. в денні години утворювався профіцит електроенергії. Для збереження балансу між виробництвом та споживанням та операційною безпекою енергосистеми Польща аварійно імпортувала надлишки української електроенергії, а Україна все одно мала зупиняти роботу потужностей ВДЕ [38] (що свідчить про нестачу потужностей для накопичення надлишків електричної енергії). Навпаки, у вечірні години на максимальну потужність слід виводити енергію з ГАЕС (реалізація другого принципу керування) та здійснювати експорт електроенергії (третього принципу). Вказана проблема на сьогодні є характерною. Так у зв'язку зі збільшенням обсягу потужностей ВДЕ в Європі в періоди різкого посилення вітру навіть виникла тенденція вартості електричної енергії набувати від'ємних значень. Наприклад, у 2024 р. в Німеччині зафіксовано 468 годин з від'ємними цінами (у 2,3 рази більше, ніж середній показник з 2020 по 2023 роки), у Франції – 356 годин (зростання у 4,4 рази), у Великій Британії – 179 годин (зростання у понад 5 разів) [39]. І навпаки, наприклад, у першому квар-

талі 2024 року, через недостатній вітер для вітрових станцій в Німеччині та Польщі відбулися блекаути [6]. Таким чином, з огляду на нестабільність основних ВДЕ та суттєві добові зміни навантаження ТЕС і ТЕЦ, їх робота на далеких від оптимального та перехідних режимах призводить до погіршення критерію теплового забруднення та виникнення вище згаданого парадоксу Green-Coal. Напевно, ця ситуація загострюватиметься при збільшенні потреб в електроенергії промисловістю, дата-центрами і штучним інтелектом, тепловими насосами, електромобілями.

Пом'якшення вказаної проблеми, а фактично забезпечення енергетичної безпеки, вирішують через накопичення надлишків електричної енергії від ВДЕ шляхом розширеного застосування ГАЕС та ГЕС (що має об'єктивні обмеження), використанням в якості маневрової генерації газових ДВЗ [31], систем накопичення енергії на основі акумуляторів [6].

У 2019 р. загальна потужність світового парку акумуляторних систем складала 7,8 ГВт, а прогнозний показник на 2035 р. становить 600 ГВт [40]. Слід зазначити, про існування ряду недоліків у такому втіленні другого принципу керування нестабільністю рівня генерації. Літій-іонні акумулятори, які зараз повсюдно використовуються для збері-

гання електричної енергії, зазнають деградації з часом. Тому ведуться роботи щодо розробки акумуляторів інших видів. Новітні засновані на гравітації рішення, подібні до комплексів G-Vault в Китаї, реалізованого потужністю 25 МВт і трьох інших потужністю 87 МВт, що будуються [41], критикуються за поступки показникам традиційних ГАЕС та частково заміщені в подальших проєктах фірми-розробниками акумуляторними батареями, водневими паливними елементами та гібридними рішеннями [42]. У будь-якій реалізації вони потребують площ, інфраструктури обслуговування, капіталовкладень, порівняних із загальним обсягом існуючої світової енергетики та залучення до неї. Врахування можливих критичних ситуацій значно підвищує вартість і знижує практичність подібних систем. З огляду на це значного розвитку набули міжрегіональні проєкти з інтеграції державних енергосистем [6,38].

Окремого вагомого значення на сьогодні приділяється розвитку автономних ВДЕ для приватних господарств та зміни менталітету населення щодо зменшення витрат та свідомого корегування періодами підвищених витрат електричної енергії протягом доби [19,20].

У цілому можна відзначити, що властивість нестабільності рівня генерації ВДЕ через означені вище компенсатори в перспективі повинні привести до стану енергетичної безпеки економіки як достатньої кількості енергетичних ресурсів, що транспортуються через стабільну інфраструктуру та до яких має доступ споживач [6]. Вирішення вказаної проблеми ВДЕ є невід'ємною частиною сучасного енергетичного переходу з викопних вуглеводородних палив на відновлювальні джерела енергії.

З наведеного можна зробити наступні висновки щодо майбутнього транспортної галузі.

По-перше всеосяжне використання електромобілів є доречним лише після вирішення проблематики нестабільності ВДЕ та унеможливлення парадоксу Green-Coal.

По-друге, використання ДВЗ на будь-якому з розглянутих вище видів палива, що є залученими до технології циркулярної енергетики, можна і потрібно розглядати як способи накопичення енергії від ВДЕ та переведення її у інші форми, придатні для ефективного зберігання і транспортування з наступною віддачею споживачу (також реалізація другого принципу компенсації нестабільністю рівня генерації). Останнє пояснюється і є можливим внаслідок відсутності критичних залежностей часу (і місця) отримання палива, технологій доставки і зберігання, часу і місця його споживання в ДВЗ. Це повністю відповідає прогресивній концепції синте-

зу палива в зонах з найбільшими відновлюваними ресурсами та його транспортуванням в зони з найбільшими потребами.

Оцінка напрямів подальшого розвитку ДВЗ

Розглянемо технічну сторону інтеграції ДВЗ до циркулярної економіки майбутнього.

Виконаний нами аналіз засвідчує, що проблематика подальшого удосконалення ДВЗ є здійсненою у п'ятьох незалежних напрямках, які слугують загальної меті досягнення впорядкованого зеленого переходу.

Перший напрям передбачає використання в межах циркулярної вуглецевої економіки так званого drop-in палива. Напрямок передбачає, що нові палива можуть безперешкодно замінити традиційне паливо в існуючих ДВЗ.

Загальновідомим тут є підхід щодо змішування синтетичного палива з бензином, що може швидко покращити показники викидів протягом життєвого циклу транспортних засобів. Роботи цього напрямку інтенсивно продовжуються і представлені, наприклад, в [43].

Так, партнерство Saudi Aramco з Formula 2 і Formula 3 у 2023-2024 роках показало можливість використання 55% біопалива Aramco в існуючих двигунах. У 2025 р. планується використання 100 % біопалива.

Співпраця Saudi Aramco з транснаціональною автомобільною корпорацією Stellantis NV, яка включає такі бренди як Alfa Romeo, Chrysler, Citroën, Dodge, DS, Fiat, Jeep, Opel, Peugeot та ін., показала: 24 сімейства двигунів у проданих з 2014 року європейських автомобілях, що представлені у 28 мільйонах автомобілів на дорогах, готові до використання передового синтетичного палива без будь-якої модифікації силового агрегату.

У подальших планах Saudi Aramco в партнерстві з енергетичною компанією ENOWA значиться будівництва в Саудівській Аравії демонстраційного заводу з виробництва низьковуглецевого синтетичного бензину.

Співпраця Saudi Aramco з іспанською енергетичною та нафтохімічною компанією Repsol передбачає проведення досліджень щодо виробництва низьковуглецевого синтетичного дизельного палива та реактивного палива.

У цілому цей напрям робіт передбачає пряме залучення двигунів наземних транспортних засобів, суден та літаків до зеленого переходу без необхідності інвестувати в двигуни, які вже знаходяться в експлуатації.

Другий напрям в межах циркулярної вуглецевої економіки передбачає обов'язковість подальшого удосконалення конструкцій ДВЗ з метою

зменшення споживання палива на одиницю виконаної роботи і відповідного зменшення викидів CO₂. Це питання охоплює вкрай широкий набір науково-технічних рішень, якими займаються усі фірми двигунобудівної галузі. Тільки у напрямі покращання процесу спалювання палив провідні світові виробники мають понад 100 тис. патентів, з яких порядку 7000 мають Toyota і Bosch, близько 4000 – Ford, понад 2000 – Caterpillar, Nissan, Honda та ін. [44]. Значної уваги при цьому приділяється гібридним силовим установкам, щорічна кількість патентів за якими вже більше десятиріччя перевищує кількість патентів в галузі бензинових ДВЗ [45].

На наш погляд в ряду сукупності інноваційних рішень слід звернути увагу на третій напрям, що стосується пропозицій застосування додаткових бортових систем і відповідних пристроїв для покращення показників транспортних чи інших засобів з ДВЗ.

За пропозицією [46] здійснюють рекуперацію теплоти відпрацьованих газів ДВЗ в каталітичній системі, що повертає енергію до палива шляхом поділу його на ненасичені вуглеводні та водень. Останній може бути використаний для спалювання в ДВЗ або для інших потреб.

За технічним рішенням [47] запропоновано метод і пристрій для зменшення викидів CO₂ шляхом обробки частини або всього вуглеводневого палива, що використовується для живлення ДВЗ. Тут технологію декарбонізації використовують для розриву воднево-вуглецевого зв'язку палива. Отримані сполуки розділяють на порошок елементарного вуглецю, який зберігається на борту для подальшого промислового використання або секвестрації, та водень або потік газу, багатий на водень, який спалюється як паливо в ДВЗ з можливим перенаправленням на інші бортові енергетичні застосування.

Іншим способом зменшення викидів CO₂ є його уловлювання з вихлопних газів ДВЗ з використанням теплоти цих газів. За результатами досліджень, що супроводжувались удосконаленням системи, у 2011 р. було досягнуто уловлювання 10% викидів CO₂ (пікап Ford F-250), у 2013 р. – 30% (Toyota Camry), у 2019 р. – 40% (Volvo класу 8) [8].

Перспективним напрямом також є застосування бортових електролизерів, призначених для додавання частки водню до основного палива [48,49]. Це підвищує повноту згоряння палива, сприяє підвищенню ККД, зменшує нагароутворення в камері згоряння, зменшує емісію шкідливих викидів та CO₂.

Четвертий напрям в межах циркулярної еко-

номіки передбачає перехід на застосування безвуглецевих палив, таких як водень та аміак.

При використанні водню конкуренцію до ДВЗ складають енергетичні установки з водневими паливними елементами. Розвитку одних та інших сприяє наявність на ринку готових рішень щодо мобільного та стаціонарного застосування, до яких залучено установки електролізу, системи збору залишків електроліту та води в отриманому газоподібному водні та подачі електроліту назад до електролизеру, системи очищення водню, а також заправні станції. Фірми-виробники забезпечують технічне обслуговування обладнання, навчання персоналу, моніторинг якості водню [50,51]. Разом з цим слід відзначити, що паливні елементи зменшують ефективність при високих навантаженнях, а їх застосування вимагає високого рівня чистоти водню, що впливає на тривалість роботи каталізаторів та мембран [50, 52].

Щодо застосування аміаку, то поява дослідно-промислових проектів пов'язана з розробкою технології низькоенергетичного синтезу без вуглецевого сліду [53].

Пошук нових палив продовжується, наприклад, відомими є дослідження щодо застосування в ДВЗ діметилового ефіру.

П'ятий напрям, що також відповідає вимогам циркулярної економіки, передбачає мінімізацію витрат енергії та викидів ПГ протягом ЖЦ ДВЗ. Це означає, що в процесі проектування та виготовлення усіх компонентів двигунів необхідними є задача щонайменше мінімізації маси та вартості їх матеріалів. Відповідно, в експлуатації матеріали деталей повинні витримувати навантаження на межі механічних властивостей протягом заданого ресурсу.

Європейська комісія 22.03.2023 р прийняла «Директиву про екологічні претензії», що полегшить підтримку екологічного переходу. Заяви виробника повинні підтверджуватися кількісними та науково обґрунтованими цільовими показниками, бюджетом і розподілом ресурсів [54,55].

Загальна тенденція до підвищення питомих масогабаритних показників ДВЗ привела до розгляду двотактних двигунів як можливого напрямку удосконалення конструкцій з перспективою адаптації до використання водневого палива [8,52]. При цьому слід очікувати подальшого збільшення теплонапруженості деталей камери згоряння, як внаслідок відповідної організації циклу, так і внаслідок впливу особливостей згоряння водню на збільшення коефіцієнту тепловіддачі між робочим тілом і стінками камери згоряння [49,56]. З наведеного виходить, що також зростає актуальність робіт щодо забезпечення надійності теплонапруже-

них елементів ДВЗ.

Таким чином, перспективи подальшого удосконалення ДВЗ безпосередньо пов'язані із забезпеченням вимог сталого розвитку в умовах беззаперечних вимог зеленого переходу.

Обговорення та висновки

При виконанні розгляду проблематики подальшого сталого розвитку суспільства з урахуванням викликів зменшення антропогенного впливу світової економіки на довкілля в статті використано значну кількість відомостей щодо розробок і інвестицій національної нафтової компанії Саудівської Аравії – Saudi Arabian Oil Company (Saudi Aramco). Вона фактично є світовим лідером за обсягами запасів, розвідувань та видобутку нафти. Але останнього часу спостерігаються тенденції до зменшення прибутків компанії. Так при прибутку у 2024 р. 436,613 млрд. дол. США прибуток зменшився по відношенню до 2023 р. на 4,234 млрд. дол. США, та зменшився на 1,3 млрд. дол. США у 1 кварталі 2025 р. по відношенню до 1 кварталу 2024 р. [57,58]. Виконаний нами аналіз понад п'ятнадцятирічної діяльності компанії засвідчує про наукову та фінансову її спроможність щодо втілення передових трансформацій в енергетичному секторі, які вона активно втілює незважаючи на тренд зростання видобутку нафти останнього часу. Вочевидь компанія розраховує на отримання прибутків на якісному новому рівні при втіленні кращих технологій, розширенню робочих місць та покращенню майбутнього добробуту людини. На наш погляд, незважаючи на лідерство в нафтодобувній сфері, фахівці компанії в своїй діяльності спираються на висловлювання, яке приписують експерту нафти Саудівської Аравії Ахмеду Закі Ямані: «Кам'яна доба скінчилася не тому, що скінчилися камені; епоха нафти скінчиться до її вичерпання».

З огляду на зазначену активну прогресивну позицію Saudi Aramco, компанія де-факто намагається бути законодавцем процесів трансформації енергетичної сфери, включаючи і двигунобудівну. Компанія проводить активну політику виконання сумісних з іншими провідними суб'єктами енергетичного сектору пошукових та експериментально-дослідних проектів, націлених на їх подальше масштабування. Безумовно, така діяльність заслуговує приділення їй пильної уваги дослідниками.

Виконаний аналіз також спирається на положення Європейської зеленої угоди [19,20], інших законодавчих документів ЄС та України, а також розробок провідних світових виробників двигунобудівної галузі та енергетичної галузі в цілому.

Заходи щодо мінімізації зміни клімату та наслідків цього першочергово розглядають через до-

лання протиріччя між необхідністю скорочення викидів CO₂ та реальним антропогенним впливом процесів енерговиробництва та енергоспоживання. В даній публікації долаання цього протиріччя розглянуто з позицій циркулярної економіки в реаліях наявного інвестування як у відновлювані джерела енергії, так і у видобуток і використання вуглеводнів.

На основі системного підходу до проблематики науково-обґрунтованої інтеграції ДВЗ до циркулярної економіки в роботі виділено три важливі питання, які розглядаються сумісно.

Перше питання – можливий комплекс заходів з мінімізації кліматичного забруднення. Його розглянуто з позицій циркуляції вуглецю та енергії в системі отримання енергетичної сировини – перетворення енергії до потрібного виду – використання енергії зі скиданням теплоти в атмосферу. На цій основі показана можливість застосування енергетичних установок з ДВЗ як вуглецево-нейтральних незалежно від наявності чи відсутності вуглецевого сліду. Такий підхід є заснованим на незворотних перспективах впровадження комплексу узгоджених заходів з використання викопних вуглеводнів, біо- та синтетичних палив, а також секвестрації CO₂. При цьому важливо, що секвестрація CO₂ як продукту біо- та синтетичних палив приводить до подвійного уловлювання вуглецю. Ще більш важливим є розуміння, що зменшення викидів CO₂ при використанні біо-, синтетичних, а також і безвуглицевих палив можливо виключно при використанні ВДЕ в процесі отримання цієї енергетичної сировини.

Друге питання пов'язане з проблематикою використання ВДЕ. Тут вкрай важливим є факт, що розвиток ВДЕ спирається на її основну глобальну властивість, що енергія поповнюється зі швидкістю, що перевищує швидкість споживання. Але ВДЕ присутня і негативна властивість – нестабільність рівня генерації ВДЕ відповідно до річних і добових змін, суттєво залежних від погодних умов в локальному місці отримання енергії. Для долаання негативної властивості ВДЕ застосовують компенсатори у вигляді систем накопичення енергії та маневрової генерації. Тут важливо, що за відсутності достатніх потужностей компенсаторів при використанні регульованої потужності ТЕС і ТЕЦ можливим є парадокс Green-Coal як погіршення критерію теплового забруднення. З наведеного можна зробити два висновки:

- всеосяжне використання електромобілів є доречним лише після вирішення проблематики нестабільності ВДЕ та унеможливлення парадоксу Green-Coal;

- використання ДВЗ на будь-якому з видів па-

лива, залучених до технології циркулярної економіки, можна і потрібно розглядати як компенсатори накопичення енергії від ВДЕ та переведення її у інші форми, придатні для ефективного зберігання і транспортування з наступною ефективною віддачею споживачу.

Таким чином показано, що використання ДВЗ з урахуванням аспектів двох вище поданих питань сприяє долаанню протиріччя між необхідністю скорочення викидів CO₂ та реальним антропогенним впливом процесів енерговиробництва та енергоспоживання.

Третє питання проблематики науково-обґрунтованої інтеграції ДВЗ до циркулярної економіки повинне надавати відповідь щодо напрямів подальшого розвитку ДВЗ, залучених до технологічних циклів зеленого переходу. Розглянуто п'ять напрямів розвитку ДВЗ: заміни традиційного палива в існуючих ДВЗ на вуглецево-нейтральне; удосконалення конструкцій ДВЗ з метою підвищення їх економічності; застосування додаткових бортових систем і пристроїв; перехід на застосування безвуглецевих палив; мінімізацію витрат енергії та викидів ПГ протягом життєвого циклу ДВЗ, у т.ч. – з урахуванням покращення питомих масогабаритних показників ДВЗ за умови мінімізації вартості матеріалів та їх використання на межі механічних властивостей.

Подальше удосконалення ДВЗ за вказаними напрямками безпосередньо сприяє забезпеченню вимог сталого розвитку в умовах беззаперечних вимог переходу до кліматично нейтрального господарювання, відповідає «Директиві про екологічні претензії» ЄС.

У цілому стан трьох сформульованих в даній публікації питань спирається на глобальне бачення авторами ролі і місця ДВЗ у вирішенні проблеми зеленого переходу та є і завжди буде відкритим для подальшого розвитку цілісного енергетичного комплексу майбутнього.

Список літератури:

1. Німеччина розлутила ЄС після того, як заблокувала угоду про заборону продажів автомобілів на вичерпному паливі [Електронний ресурс] // УНН. – 07.03.2023. – Режим доступу: <https://www.unn.com.ua/uk/news/2018313-nimechchina-rozlyutila-yes-pislya-togo-yak-zablokuvala-ugodu-pro-zaboronu-prodazhiv-avtomobiliv-na-vikopnomu-palivi> (дата звернення: 11.06.2025). 2. Про деякі питання використання транспортних засобів, оснащених електричними двигунами, та внесення змін до деяких законів України щодо подолання паливної залежності і розвитку електрозарядної інфраструктури та електричних транспортних засобів [Електронний ресурс]: Закон України від 24.02.2023 № 2956-IX : станом на 27.07.2023 р. — Ре-

жим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2956-20#Text> (дата звернення: 11.06.2025). 3. Powering the Future: The role for Internal Combustion Engines in a Reduced Carbon World [Electronic resource] // Engine Technology Forum. – 29.07.2024, available at: <https://enginetechnologyforum.org/press-releases/posts/powering-the-future-the-role-for-internal-combustion-engines-in-a-reduced-carbon-world> (date of access: 11.06.2025). 4. Sutaria P. The Future of Internal Combustion Engine [Electronic resource] / P. Sutaria, N. Sikotra // Aranca. – 05.01.2023, available at: <https://www.aranca.com/knowledge-library/articles/investment-research/the-future-of-internal-combustion-engine> (date of access: 11.06.2025). 5. Iordache R. Global oil demand to peak before the end of the decade as energy transition gathers pace, IEA says / R. Iordache, S. Meredith // CNBC. – 14.06.2023, available at: <https://www.cnbc.com/2023/06/14/iea-global-oil-demand-to-peak-before-the-end-of-the-decade.html> (date of access: 11.06.2025). 6. Білявський М. Енергетична безпека світу: ТОП-25 прогнозів на 2025 рік / М. Білявський // АрміяInform. – 01.01.2025. – Режим доступу: <https://armyinform.com.ua/2025/01/01/energetychna-bezpeka-svitu-top-25-prognoziv-na-2025-rik/> (дата звернення: 11.06.2025). 7. Попов А. Нафтогазова "паралельна реальність" 2025-го: нафта, газ та пальне вирішать долю України, РФ та світу / А. Попов // УНІАН. – 23.12.2024. – Режим доступу: <https://www.unian.ua/economics/energetics/naftogazova-paralelna-realnist-2025-go-nafta-gaz-ta-palne-virishat-dolyu-ukrajini-rf-ta-svitu-12859410.html> (дата звернення: 11.06.2025). 8. Energy innovation [Electronic resource] // Aramco, available at: <https://www.aramco.com/en/what-we-do/energy-innovation> (date of access: 11.06.2025). 9. Nguyen D. Towards carbon-free mobility: The feasibility of hydrogen and ammonia as zero carbon fuels in spark ignition light-duty vehicles / D. Nguyen, J. W.G. Turner // International Journal of Engine Research. – 2024. – Vol. 25, is. 8. – P. 1588-1610, available at: <https://doi.org/10.1177/14680874241239479> (date of access: 11.06.2025). 10. Powering On: Internal Combustion Engines & the Clean Energy Future [Electronic resource] // Engine Technology Forum. – 01.05.2024. – 40 p, available at: https://enginetechnologyforum.egnyte.com/dl/REDEjll55t/Internal_Combustion_Engines_Engines_%26_the_Clean_Energy_Future ETF_White_Paper_Final.pdf (date of access: 11.06.2025). 11. Laget O. A comprehensive study for the identification of the requirements for an optimal H2 combustion engine / O. Laget, L. Rouleau, M. Cordier et al. // International Journal of Engine Research. – 2023. – Vol. 24, is. 10. – P. 4326-4342, available at: <https://doi.org/10.1177/14680874231167618> (date of access: 11.06.2025). 12. Парсаданов І.В. Двигуни внутрішнього згоряння і навколишнє середовище / І.В. Парсаданов, А.П. Марченко, О.П. Строков // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2022. – №2, – С. 3-12. – Режим доступу: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2022.2.01> (date of access: 11.06.2025). 13. Reitz R.D. IJER editorial: The future of the internal combustion engine / R.D. Reitz, H. Ogawa, R. Payri, T. Fansler et al. // International Journal of Engine Research. – 2020. – Vol. 21, is. 1. – P. 3-10, available at: <https://doi.org/10.1177/1468087419877990> (date of access: 11.06.2025). 14. The circular carbon economy [Electronic resource] // Aramco, available at: <https://korea.aramco.com/en/making-a-difference/planet/the-circular-carbon-economy> (date of access: 11.06.2025). 15. Tracking Trends in a Time of Change: The Need for Radical

- Action Towards Sustainable Transport Decarbonisation // SLOCAT. Transport and Climate Change Global Status Report. – 2nd edition. – 2021, available at: www.tcc-gsr.com (date of access: 11.06.2025). 16. WMO Greenhouse Gas Bulletins // World Meteorological Organization (WMO). Community Platform, available at: <https://community.wmo.int/en/wmo-greenhouse-gas-bulletins> (date of access: 11.06.2025). 17. Хільчевський В. К. Екологічна стандартизація та запобігання впливу відходів на довкілля / В. К. Хільчевський, М. Р. Забокрицька, Р. Л. Кравчинський; Київ. нац. ун-т ім. Т. Шевченка. – Київ : ВПЦ "Київський університет", 2019. – 191 с. 18. Крисоватий, А. І. Кліматично-нейтральна економіка : глобальна візія та цифрові механізми досягнення: монографія / А. І. Крисоватий, І. І. Максимова, В. Є. Куриляк. – Тернопіль: ЗВУН, – 2024. – 305 с. 19. European Commission. Communication from the commission. The European Green Deal. COM(2019) 640 final. – Brussels, 11.12.2019, available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019DC0640> (date of access: 11.06.2025). 20. The European Green Deal. Striving to be the first climate-neutral continent // European Commission, available at: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en (date of access: 11.06.2025). 21. Черевко Г. Циркулярна економіка: еволюція поняття / Г. Черевко // Аграрна економіка. – 2022. – Т. 15, № 3-4. – С. 51-58. – Режим доступу: <https://doi.org/10.31734/agrarecon2022.03-04.051> (доступ 11.06.2025). 22. Bethäuser L. Circular economy and the role of environmental standards / L. Bethäuser // DQS Holding GmbH. – 28.06.2024, available at: <https://www.dqsglobal.com/intl/learn/blog/circular-economy-norms-and-standards> (date of access: 11.06.2025). 23. Hope B. What makes a circular economy circular, rather than green? / B. Hope // Sustainability. – March 16.03.2022, available at: <https://sustainabilitymag.com/sustainability/what-makes-a-circular-economy-circular-rather-than-green-sustainability-supply-chain> (date of access: 11.06.2025). 24. Як ЄС прагне досягти кліматичної нейтральності у понад 100 містах до 2030 року та які можливості є для України? [Електронний ресурс] // Екодія. – Режим доступу: <https://is.gd/bR2q91> (дата звернення: 11.06.2025). 25. About Aramco. Energy security for a more-sustainable world [Electronic resource] // Aramco, available at: <https://www.aramco.com/en/about-us> (date of access: 11.06.2025). 26. Khowaiter A. O. Circular Carbon Economy / A. O. Khowaiter [Electronic resource] // Saudi Aramco, available at: https://www.ief.org/_resources/files/events/1st-ief-irena-seminar-on-renewable-and-clean-energy-technology-outlooks/ahmad-al-khowaiter.pdf (date of access: 11.06.2025). 27. Alqahtani N. B. Circular Carbon Economy. Research & Development / N. B. Alqahtani [Electronic resource] // KACST, available at: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/RD%20Poster%20T1%20Saudi%20Arabia.pdf> (date of access: 11.06.2025). 28. A holistic approach to carbon management [Electronic resource] // CCE. – Available at: <https://www.cceguide.org/> (date of access: 11.06.2025). 29. Marchenko A. P. Criteria for assessing the effectiveness of transport power plants decarbonisation in accordance with implementation of the sustainable development concept / A. P. Marchenko, I. V. Parsadanov // Internal Combustion Engines. – 2024. – № 1. – P. 3-11, available at: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2024.1.01> 30. Khan Md. Al-A. Optimal circular economy index policy in a production system with carbon emissions / Md. Al-A. Khan, L. E. Cárdenas-Barrón, G. Treviño-Garza, A. Céspedes-Mota // Expert Systems with Applications. – 2023. – Vol. 213. – P. 118684, available at: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118684> (date of access: 11.06.2025). 31. Flexibility to future-proof the Ukrainian power system. Solving the Ukrainian Green-Coal paradox [Electronic resource] // Wärtsilä, available at: <https://www.wartsila.com/insights/whitepapers/energy/flexibility-to-future-proof-the-ukrainian-power-system> (date of access: 11.06.2025). 32. Doronina I. Green-coal paradox in Ukraine and in the world as a challenge for state regulation in the energy industry / I. Doronina, N. Kryshtof, S. Moskalenko // European Journal of Economics and Management. – 2020. – Vol. 6, Is. 6. – P. 39-51, available at: <https://doi.org/10.46340/eujem.2020.6.6.4> 33. Bowman C. Haru Oni: eFuel plant of the future [Electronic resource] / C. Bowman // Siemens Energy, available at: <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/stories/haru-oni.html> (date of access: 11.06.2025). 34. Anner N. North Sea's blueprint for the energy transition [Electronic resource] / N. Anner // Siemens Energy, available at: <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/stories/the-north-sea.html> (date of access: 11.06.2025). 35. Mathilde Fajardy M. CCUS projects around the world are reaching new milestones [Electronic resource] / M. Fajardy, C. Greenfield, J. T. Koduah // IEA, available at: <https://www.iea.org/commentaries/ccus-projects-around-the-world-are-reaching-new-milestones> (date of access: 11.06.2025). 36. Australia's leading Clean Energy Ammonia. Powering the Energy Transition [Electronic resource] // NH3 Clean Energy, available at: <https://nh3cleanenergy.com> (date of access: 11.06.2025). 37. Національна енергетична компанія «Укренерго». [Електронний ресурс] // Ukrenergo. – Режим доступу <https://ua.energy/peredacha-i-dyspetcheryzatsiya/dyspetcherska-informatsiya/dobovyj-grafik-vyrobnytstva-spozhyvannya-e-e/> (доступ 12.02.2022). 38. В Україні екстрено продають електроенергію польщі та обмежують ВДЕ – УКРЕНЕРГО // ZN.UA. – Режим доступу <https://zn.ua/ukr/energetics/v-ukrajini-ekstrenoprodajut-elektroenerhiju-polshchi-ta-obmezhujuvt-vde-ukrenreho.html> (доступ 29.02.2024). 39. Brendel E. German Power Slips Below Zero as Negative-Price Phenomenon Grows [Electronic resource] / E. Brendel, E. Farhat // Bloomberg. – 02.01.2025, available at: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2025-01-02/german-power-slips-below-zero-as-negative-price-phenomenon-grows> (date of access: 11.06.2025). 40. Energy storage. Перспективи та особливості інтеграції BESS в українській енергосистемі [Електронний ресурс] // SlideShare from Scribd. – Режим доступу: <https://www.slideshare.net/slideshow/energy-storage-bess/204977770> (дата звернення: 11.06.2025). 41. Murray C. Energy Vault China gravity ESS project connected to grid; starts building three others [Electronic resource] / C. Murray // Energy storage news, available at: <https://www.energy-storage.news/energy-vault-china-gravity-ess-project-connected-to-grid-starts-building-three-others/> (date of access: 11.06.2025). 42. Spector J. Why Energy Vault went from disrupting batteries to selling them [Electronic resource] / J. Spector // Canary Media, available at: <https://www.canarymedia.com/articles/long-duration-energy-storage/why-energy-vault-went-from-disrupting-batteries-to-selling-them> (date of access: 11.06.2025). 43. Innovation in formulating lower-carbon fuels [Electronic resource] // Aramco, available at: <https://www.aramco.com/en/about-us/our-brand/powered->

by-how/synthetic-fuels (date of access: 11.06.2025). 44. Powering On: Internal Combustion Engines & the Clean Energy Future fuels [Electronic resource] // Engine Technology Forum. – 2024. – 40 p, available at: https://enginetechnologyforum.egnyte.com/dl/REDEjll55t/Internal_Combustion_Engines_Engines_%26_the_Clean_Energy_Future ETF_White_Paper_Final.pdf_ (date of access: 11.06.2025). 45. Mishchenko M. Defining innovative areas and prospects to develop the patenting of technological advances in the automotive power plant industry / // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2024. – Vol. 1/13 (127). – P. 92–102, available at: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298643> 46. System and method for on-board Waste heatrecovery: pat. 8920770 B2 USA. – Dec. 30, 2014. 47. Method for decarbonization of a fuel on board a vehicle: pat. 9937458 B2 USA. – Apr. 10, 2018. 48. Combustion-enhancing-gas delivery system and flow control: pat. 2007022637 A1 WO. – Mar. 01, 2007. 49. Авраменко А. Н. Перспективы применения микродобавок водорода для улучшения экологических показателей дизельного двигателя // А. Н. Авраменко, А. М. Левтеров, В. Н. Бганцев, Н. Ю. Гладкова, В. Н. Киреева // Проблемы машинобудування. – 2019. – Т. 22, № 2. 50. Green Hydrogen Production Solutions [Electronic resource] // Uestco Energy Systems, available at: https://www.uestco.com/hydrogen/production/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiA19e8BhCVARIsALpFMgEh8JHabdQddNcNsV8h1bJttD_NLEa8Y8i6OUNuSpr4lFaRBVYnjElaArLEALw_wcB (date of access: 11.06.2025). 51. Producing hydrogen in Canada [Electronic resource] // Government of Canada, available at: <https://natural-resources.canada.ca/energy-sources/clean-fuels/producing-hydrogen-canada> (date of access: 11.06.2025). 52. Future of Combustion Engines Promises Efficiency, Green Fuels [Electronic resource] // Transport Topics, available at: <https://www.ttnews.com/articles/future-combustion-engines> (date of access: 11.06.2025). 53. Song X. Making ammonia from nitrogen and water microdroplets / X. Song, C. Basheer, R. N. Zare // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. – 2023. – Vol. 120 (16). – e2301206120, available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.2301206120> 54. Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on substantiation and communication of explicit environmental claims (Green Claims Directive) [Electronic resource] // An official EU website, available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2023%3A0166%3AFIN> (date of access: 11.06.2025). 55. Segal M. EU Launches Green Claims Rules to Protect Consumers from Greenwashing [Electronic resource] // ESG Today, available at: <https://www.esgtoday.com/eu-launches-green-claim-rules-to-protect-consumers-from-greenwashing/> (date of access: 11.06.2025). 56. Goyal H. Design trends and challenges in hydrogen direct injection (H2DI) internal combustion engines – A review/ H. Goyal, P. Jones, A. Bajwa, D. Parsons at all // International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – Vol. 86. – P. 1179-1194, available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.08.284> 57. Saudi Aramco. Consolidated financial statements for the year ended December 31, 2024 // Saudi Aramco. – 2024. – 81 P. 58. Aramco announces first quarter 2025 results // Saudi Aramco. – 2025. – 34 P.

Bibliography (transliterated):

1. "Germany angers EU after blocking deal to ban fossil fuel car sales" [Nimechchyna rozliutyla YeS pislia toho, yak zablokuvala ugodu pro zaboronu prodazhiv avtomobiliv na vykopnomu palyvi] [Electronic resource] UNN, available at: <https://www.unn.com.ua/uk/news/2018131-nimechchina-rozlyutyla-yes-pislya-togo-yak-zablokuvala-ugodu-pro-zaboronu-prodazhiv-avtomobiliv-na-vikopnomu-palivi> (date of access: 11.06.2025). 2. "On some issues of the use of vehicles equipped with electric engines and amendments to some laws of Ukraine regarding overcoming fuel dependence and the development of electric charging infrastructure and electric vehicles" [Pro deaki pytannia vykorystannia transportnykh zasobiv, osnashchenykh elektrychnymy dvyhunamy, ta vnesennia zmin do deiakyykh zakoniv Ukrainy shchodo podolannia palyvnoi zalezhnosti i rozvytku elektrozariadnoi infrastruktury ta elektrychnykh transportnykh zasobiv] [Electronic resource]: Law of Ukraine of 24.02.2023 № 2956-IX. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2956-20#Text> (date of access: 11.06.2025). 3. "Powering the Future: The role for Internal Combustion Engines in a Reduced Carbon World" [Electronic resource] Engine Technology Forum. 29.07.2024, available at: <https://enginetechnologyforum.org/press-releases/posts/powering-the-future-the-role-for-internal-combustion-engines-in-a-reduced-carbon-world> (date of access: 11.06.2025). 4. Sutaria, P., Sikotra, N. (2023) The Future of Internal Combustion Engine [Electronic resource] Aranca, available at: <https://www.aranca.com/knowledge-library/articles/investment-research/the-future-of-internal-combustion-engine> (date of access: 11.06.2025). 5. Iordache, R., Meredith, S. (2023) "Global oil demand to peak before the end of the decade as energy transition gathers pace, IEA says". [Electronic resource] CNBC, available at: <https://www.cnbc.com/2023/06/14/iea-global-oil-demand-to-peak-before-the-end-of-the-decade.html> (date of access: 11.06.2025). 6. Bilyavsky, M. (2025) "World Energy Security: TOP-25 Predictions for 2025" [Enerhetychna bezpeka svitu: TOP-25 prohoziv na 2025 rik] [Electronic resource] АрміяInform, available at: <https://armyinform.com.ua/2025/01/01/enerhetychna-bezpeka-svitu-top-25-prohoziv-na-2025-rik/> (date of access: 11.06.2025). 7. Popov, A. (2024) "Oil and gas "parallel reality" of 2025: oil, gas and fuel will decide the fate of Ukraine, the Russian Federation and the world" [Naftohazova "paralelna realnist" 2025-ho: nafta, haz ta palne vyrishat doliu Ukrainy, RF ta svitu] [Electronic resource] UNIAN. Available at: <https://www.unian.ua/economics/energetics/naftogazova-paralelna-realnist-2025-go-nafta-gaz-ta-palne-virishat-dolyu-ukrajini-rf-ta-svitu-12859410.html> (date of access: 11.06.2025). 8. "Energy innovation" [Electronic resource] Aramco, available at: <https://www.aramco.com/en/what-we-do/energy-innovation> (date of access: 11.06.2025). 9. Nguyen, D., Turner, J. W.G. (2024) "Towards carbon-free mobility: The feasibility of hydrogen and ammonia as zero carbon fuels in spark ignition light-duty vehicles". International Journal of Engine Research. Vol. 25, is. 8. – P. 1588-1610, available at: <https://doi.org/10.1177/14680874241239479> 10. "Powering On: Internal Combustion Engines & the Clean Energy Future" [Electronic resource] Engine Technology Forum. – 01.05.2024. – 40 p, available at: https://enginetechnologyforum.egnyte.com/dl/REDEjll55t/Internal_Combustion_Engines_Engines_%26_the_Clean_Energy_Future ETF_White_Paper_Final.pdf_ (date of access: 11.06.2025). 11. Laget, O., Rouleau, L., Cordier, M. et al. (2023) "A comprehensive study for the identification of the requirements for an optimal H2 combustion engine". International Journal of Engine Research. Vol. 24, is. 10. – P. 4326-4342, available at: <https://doi.org/10.1177/14680874231167618> 12. Parsadanov, I.V., Marchenko, A.P., Stokov, O.P. (2022) "Internal combustion engines and the environment" [Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia i navkolyshnie seredovyshche] Internal combustion engines. №2, – P. 3-12, available at: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2022.2.01> 13. Reitz, R.D., Ogawa, H., Payri, R., Fansler, T. et al.(2020) "IJER editorial: The future of the internal combustion engine". International Journal of Engine Research. Vol. 21, is. 1. – P. 3-10, available at: <https://doi.org/10.1177/1468087419877990> 14. "The circular carbon economy" [Electronic resource] Aramco, available at: <https://korea.aramco.com/en/making-a-difference/planet/the->

- circular-carbon-economy (date of access: 11.06.2025). 15. "Tracking Trends in a Time of Change: The Need for Radical Action Towards Sustainable Transport Decarbonisation". [Electronic resource] SLOCAT. Transport and Climate Change Global Status Report. 2nd edition. 2021, available at: www.tcc-gsr.com (date of access: 11.06.2025). 16. "WMO Greenhouse Gas Bulletins". [Electronic resource] World Meteorological Organization (WMO). Community Platform, available at: <https://community.wmo.int/en/wmo-greenhouse-gas-bulletins> (date of access: 11.06.2025). 17. Khilchevsky, V. K. Zabokrytska, M. R., Kravchinsky, R. L. (2019) "Ecological standardization and prevention of waste impact on the environment" [Ekologichna standartyzatsiia ta zapobihannia vplyvu vidkhodiv na dovkillia] Kyiv. National University named after T. Shevchenko, Kyiv: VOC "Kyiv University", 191 p. 18. Krysovaty, A.I., Maksymova, I. I., Kurylyak, V. E. (2024) "Climate-neutral economy: global vision and digital mechanisms of achievement" [Klimatychno-neitralna ekonomika : hlobalna viziia ta tsyfovi mekhanizmy dosiahnennia] Ternopil, ZUNU, 305 p. 19. European Commission. "Communication from the commission. The European Green Deal. COM(2019) 640 final" [Electronic resource] Brussels, 11.12.2019, available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019DC0640> (date of access: 11.06.2025). 20. European Commission. "The European Green Deal. Striving to be the first climate-neutral continent". [Electronic resource] Available at: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en (date of access: 11.06.2025). 21. Cherevko, G. (2022) "Circular economy: evolution of the concept". Agrarian economy, Vol. 15, № 3-4, P.51-58, available at: <https://doi.org/10.31734/agrarcon2022.03-04.051> 22. Bethäuser, L. (2024) "Circular economy and the role of environmental standards" [Electronic resource] DQS Holding GmbH, available at: <https://www.dqsglobal.com/intl/learn/blog/circular-economy-norms-and-standards> (date of access: 11.06.2025). 23. Hope, B. (2022) "What makes a circular economy circular, rather than green?" [Electronic resource] Sustainability, available at: <https://sustainabilitymag.com/sustainability/what-makes-a-circular-economy-circular-rather-than-green-sustainability-supply-chain> (date of access: 11.06.2025). 24. "How does the EU strive to achieve climate neutrality in over 100 cities by 2030 and what opportunities are there for Ukraine?" [Yak YeS prahne dosiahty klimatychnoi neitralnosti u ponad 100 mistakh do 2030 roku ta yaki mozhyvosti ye dla Ukrainy?] [Electronic resource] Ecodia, available at: <https://is.gd/bR2q91> (date of access: 11.06.2025). 25. "About Aramco. Energy security for a more-sustainable world" [Electronic resource] Aramco, available at: <https://www.aramco.com/en/about-us> (date of access: 11.06.2025). 26. Khowaiter, A. O. "Circular Carbon Economy" [Electronic resource] Saudi Aramco, available at: https://www.ief.org/_resources/files/events/1st-ief-irena-seminar-on-renewable-and-clean-energy-technology-outlooks/ahmad-al-khowaiter.pdf (date of access: 11.06.2025). 27. Alqahtani, N. B. "Circular Carbon Economy. Research & Development" [Electronic resource] KACST, available at: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/RD%20Poster%20T1%20Saudi%20Arabia.pdf> (date of access: 11.06.2025). 28. "A holistic approach to carbon management" [Electronic resource] CCE, available at: <https://www.cceguide.org/> (date of access: 11.06.2025). 29. Marchenko, A. P., Parsadanov, I. V. (2024) "Criteria for assessing the effectiveness of transport power plants decarbonisation in accordance with implementation of the sustainable development concept". Internal Combustion Engines, № 1, P. 3-11, available at: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2024.1.01> 30. Khan, Md. Al-A., Cárdenas-Barrón, L. E., Treviño-Garza, G., Céspedes-Mota, A. (2023) "Optimal circular economy index policy in a production system with carbon emissions". Expert Systems with Applications. Vol. 213, P. 118684, available at: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118684> (date of access: 11.06.2025). 31. "Flexibility to future-proof the Ukrainian power system. Solving the Ukrainian Green-Coal paradox" [Electronic resource] Wärtsilä, available at: <https://www.wartsila.com/insights/whitepapers/energy/flexibility-to-future-proof-the-ukrainian-power-system> (date of access: 11.06.2025). 32. Doronina, I., Kryshof, N., Moskalenko, S. (2020) "Green-coal paradox in Ukraine and in the world as a challenge for state regulation in the energy industry". European Journal of Economics and Management, Vol. 6, Is. 6, P. 39-51, available at: <https://doi.org/10.46340/eujem.2020.6.6.4> 33. Bowman, C. "Haru Oni: eFuel plant of the future" [Electronic resource] Siemens Energy, available at: <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/stories/haru-oni.html> (date of access: 11.06.2025). 34. Anner, N. "North Sea's blueprint for the energy transition" [Electronic resource] Siemens Energy, available at: <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/stories/the-north-sea.html> (date of access: 11.06.2025). 35. Fajardy, M., Greenfield, C., Koduah, J. T. "CCUS projects around the world are reaching new milestones" [Electronic resource] IEA, available at: <https://www.iea.org/commentaries/ccus-projects-around-the-world-are-reaching-new-milestones> (date of access: 11.06.2025). 36. "Australia's leading Clean Energy Ammonia. Powering the Energy Transition" [Electronic resource] NH3 Clean Energy, available at: <https://nh3cleanenergy.com> (date of access: 11.06.2025). 37. "National Energy Company "Ukrenergo". [National Energy Company "Ukrenergo"] [Electronic resource] Ukrenergo, available at: <https://ua.energy/peredacha-i-dyspetcheryzatsiya/dyspetcherska-informatsiya/dobovyj-grafik-vyrobnystva-spozhyvannya-e-e/> (date of access: 12.02.2022). 38. "Ukraine urgently sells electricity to Poland and limits renewable energy sources – UKRENERGO" [V Ukraini ekstreno prodaiut elektroenerhiu polshchi ta obmezhuut VDE – UKRENERHO] [Electronic resource] ZN.UA, available at: <https://zn.ua/ukr/energetics/v-ukrajini-ekstreno-prodajut-elektroenerhiju-polshchi-ta-obmezhuut-vde-ukrenreho.html> (date of access: 11.06.2025). 39. Brendel, E., Farhat, E. (2025) "German Power Slips Below Zero as Negative-Price Phenomenon Grows" [Electronic resource] Bloomberg, available at: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2025-01-02/german-power-slips-below-zero-as-negative-price-phenomenon-grows> (date of access: 11.06.2025). 40. "Energy storage. Prospects and features of BESS integration in the Ukrainian energy system" [Energy storage. Perspektyvy ta osoblyvosti intehtatsii BESS v ukrainskii enerhohystemi] [Electronic resource] SlideShare from Scribd. – Available at: <https://www.slideshare.net/slideshow/energy-storage-bess/204977770> (date of access: 11.06.2025). 41. Murray, C. "Energy Vault China gravity ESS project connected to grid; starts building three others" [Electronic resource] Energy storage news, available at: <https://www.energy-storage.news/energy-vault-china-gravity-ess-project-connected-to-grid-starts-building-three-others/> (date of access: 11.06.2025). 42. Spector, J. "Why Energy Vault went from disrupting batteries to selling them" [Electronic resource] Canary Media, available at: <https://www.canarymedia.com/articles/long-duration-energy-storage/why-energy-vault-went-from-disrupting-batteries-to-selling-them> (date of access: 11.06.2025). 43. "Innovation in formulating lower-carbon fuels" [Electronic resource] Aramco, available at: <https://www.aramco.com/en/about-us/our-brand/powered-by-how/synthetic-fuels> (date of access: 11.06.2025). 44. "Powering On: Internal Combustion Engines & the Clean Energy Future fuels" [Electronic resource] Engine Technology Forum – 2024? – 40 p, available at: https://enginetechnologyforum.egnyte.com/dl/REDEj1l55t/Internal_Combustion_Engines_Engines_%26_the_Clean_Energy_Future ETF_White_Paper_Final.pdf (date of access: 11.06.2025). 45. 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, Vol. 1/13 (127), P. 92–102, available at: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298643> 46. Lehar, M.A., Michelassi, V., General Electric Company, 2014. System and method for on-board Waste heatrecovery. U.S. Pat. 8920770 B2. 47. Al-Dawood, A. M., Al-Muhaish, F. I., Saudi Arabian Oil Co, 2018. Method for decarbonization of a fuel on board a vehicle. U.S. Pat. 9937458 B2. 48. McNutt, S. G., Waicus, R. G., Canadian Hydrogen Energy Company Limited, 2007. Combustion-enhancing-gas delivery system and flow control, WO. Pat. 2007022637 A1. 49. Avramenko, A. N., Levterov, A. M., Bhantsev, V. N., Gladkova, N. Yu., Kireev, V. N. (2019) "Prospects for the use of hydrogen microadditives to improve the environmental performance of a diesel engine" [Perspektyvy prymerenyia mykrodobavok vodoroda dla uluchsheniia ekologicheskikh pokazatelei dyzelnoho dyvhatelia] Problems of mechanical engineering, Vol. 22, № 2. 50. "Green Hydrogen Production Solutions" [Electronic resource] Uestco Energy Systems, available at:

- https://www.uestco.com/hydrogen/production/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiA19e8BhCVARIsALpFMgEh8JHabdQddNcNsV8h1bJttt_NLEa8Y8i6OUuSpr4lFaRBVYnjEIaArLEEALw_wcB (date of access: 11.06.2025). 51. "Producing hydrogen in Canada" [Electronic resource] Government of Canada, available at: <https://natural-resources.canada.ca/energy-sources/clean-fuels/producing-hydrogen-canada> (date of access: 11.06.2025). 52. "Future of Combustion Engines Promises Efficiency, Green Fuels" [Electronic resource] Transport Topics, available at: <https://www.ttnews.com/articles/future-combustion-engines> (date of access: 11.06.2025). 53. Song X., Basheer C., Zare R. N. (2023) "Making ammonia from nitrogen and water microdroplets". *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, Vol. 120 (16), e2301206120, available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.2301206120>. 54. "Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on substantiation and communication of explicit environmental claims (Green Claims Directive)" [Electronic resource] An official EU website, available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2023%3A0166%3AFIN> (date of access: 11.06.2025). 55. Segal, M. "EU Launches Green Claims Rules to Protect Consumers from Greenwashing" [Electronic resource] ESG Today, available at: <https://www.esgtoday.com/eu-launches-green-claim-rules-to-protect-consumers-from-greenwashing/> (date of access: 11.06.2025). 56. Goyal, H., Jones, P., Bajwa, A., Parsons, D. et al. (2024) "Design trends and challenges in hydrogen direct injection (H2DI) internal combustion engines – A review". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 86, P. 1179-1194, available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.08.284>. 57. "Saudi Aramco. Consolidated financial statements for the year ended December 31, 2024". *Saudi Aramco*, 81 P. 58. "Aramco announces first quarter 2025 results". *Saudi Aramco*, 34 P.

Надійшла до редакції 08.07.2025 р.

Марченко Андрій Петрович – доктор техн. наук, проф., проректор з наукової роботи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: marchenko@kpi.kharkov.ua, orcid.org/0000-0001-9746-4634

Пильов Вячеслав Володимирович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теплотехніки та енергоефективних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: viacheslav.pylov@khp.edu.ua, orcid.org/0000-0002-1514-1020

Пильов Володимир Олександрович – доктор техн. наук, проф., професор кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «ХПІ», Харків, Україна, e-mail: volodymyr.pylov@khp.edu.ua, orcid.org/0000-0002-3185-1604

PROMISING WAYS OF ORGANIZING THE CIRCULAR ECONOMY BASED ON THE USE OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

A. P. Marchenko, V. V. Pylov, V. O. Pylov

The main direction for the further development of internal combustion engines (ICEs) in the context of the global climate change problem relies on integrating power units, which will still have a carbon footprint for a certain period, into a circular carbon economy with zero carbon emissions throughout their full life cycle, coupled with intensive implementation of renewable energy sources. This publication analyzes existing global trends, challenges, and proposed promising ways for this transformation. Using examples from statistical data, analytical reports from research institutions, and information on investment projects, three key problems are examined, towards whose effective resolution efforts of researchers has to be directed. They constitute finding feasible means to achieve the desired effect from an entirety of coordinated measures within a circular carbon economy, addressing the challenges of using renewable energy sources whose electricity generation is characterized by daily and seasonal non-periodic cycles, and identifying scientifically sound directions for the further development of ICEs under the outlined conditions. It is shown that the use of ICEs in a circular economy should be considered carbon-neutral, regardless of the presence or absence of a carbon footprint. Removing ICEs from use complicates the achieving carbon neutrality. Carbon-based bio- and synthetic fuels, as well as carbon-free fuels for ICEs, can and should be viewed as methods for accumulating energy from renewable sources and converting it into other forms suitable for efficient storage, transportation and use. Five independent directions for the development of ICEs in a circular economy are considered: replacing traditional fuels in existing ICEs with carbon-neutral ones, improving designs to enhance their efficiency, applying additional onboard systems and devices, transitioning to the use of carbon-free fuels, and minimizing greenhouse gas emissions throughout the ICE life cycle. It is proven that the continuous improvement of ICEs directly contributes to meeting sustainable development requirements amidst the undeniable demands of transitioning to a climate-neutral economy.

Keywords: circular carbon economy; emissions of greenhouse gases; decarbonization; renewable energy sources; internal combustion engine; green transition.