

УДК 504.3:629.3:620.9:629.2

DOI [https://doi.org/10.15589/znp2026.1\(503\).2.29](https://doi.org/10.15589/znp2026.1(503).2.29)

## ECOLOGICAL AND ECONOMIC CONSEQUENCES OF THE COMPLETE ELECTRIFICATION OF THE GLOBAL VEHICLE FLEET: ASSESSING ENERGY, MATERIAL, AND RECYCLING CHALLENGES

### ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНІ НАСЛІДКИ ПОВНОЇ ЕЛЕКТРИФІКАЦІЇ СВІТОВОГО АВТОПАРКУ: ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ, МАТЕРІАЛЬНИХ ТА УТИЛІЗАЦІЙНИХ ВИКЛИКІВ

**Yevheniia S. Tsiuman**

y.tsiuman@ntu.edu.ua

ORCID: 0000-0001-9677-4411

**Andrii O. Hlukhonets**

a.hlukhonets@ntu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-1183-6722

**Sviatoslav N. Tsiuman**

mechanicc270108@gmail.com

ORCID: 0009-0008-1385-6779

**Є. С. Цюман,**

канд. екон. наук, доцент

**А. О. Глухонець,**

канд. техн. наук, доцент

**С. М. Цюман,**

здобувач вищої освіти

*National Transport University, Kyiv**Національний транспортний університет, м. Київ*

**Abstract. Purpose.** The study evaluates ecological and economic consequences of a hypothetical scenario involving complete electrification of the global vehicle fleet, estimated at approximately 1.644 billion vehicles. The research focuses on additional electricity demand, critical raw material requirements for battery production, recycling challenges, and systemic environmental risks.

**Method.** The methodology combines deterministic quantitative modelling based on typical electric vehicle technical parameters with comparative analysis of global electricity production and resource availability, supported by synthesis of contemporary scientific and analytical publications.

**Results.** The results indicate that full fleet electrification would generate additional annual electricity demand of approximately 3.7–4.9 PWh, representing about 13–18% of global electricity production. Material demand for lithium, nickel, cobalt, and graphite could approach or significantly affect current global reserves and production capacity. Recycling infrastructure limitations and supply chain concentration create additional environmental and socio-economic risks.

**The scientific novelty** lies in providing an integrated ecological-economic assessment linking energy systems, material supply chains, and battery lifecycle constraints within a unified analytical framework.

**Practical importance.** The practical significance of the results supports policymaking regarding renewable energy investments, circular battery economy development, and sustainable critical resource governance.

**Key words:** electric fleet electrification; energy consumption; critical resource; battery recycling; environmental safety; sustainable transport.

**Анотація. Мета.** Оцінювання еколого-економічних та системних наслідків гіпотетичного сценарію повної електрифікації світового автопарку чисельністю близько 1,644 млрд транспортних засобів шляхом визначення додаткового попиту на електроенергію, потреб у критичних матеріалах для акумуляторних батарей, обсягів утилізації відпрацьованих батарей, ризиків для енергетичної інфраструктури, а також формування можливих напрямів екологічної та ресурсної політики.

**Методика.** Методика базується на комбінованому підході, що включає кількісні детерміновані розрахунки енергоспоживання з використанням типових технічних параметрів електромобілів, порівняльний аналіз глобального виробництва електроенергії та ресурсної бази критичних природних матеріалів, узагальнення сучасних наукових публікацій, якісний аналіз екологічних і політичних ризиків, а також елементи оцінки життєвого циклу транспортних засобів.

**Результати.** Встановлено, що повна електрифікація автопарку призведе до додаткового попиту на електроенергію в обсязі 3,7–4,9 ПВт•год на рік, що становить приблизно 13–18 % сучасного світового виробництва

електроенергії. Потреби у літій, нікелі, кобальті та графіті можуть суттєво вплинути на існуючі ресурси та виробничі потужності. Обмеження переробки батарей та концентрація ланцюгів постачання формують додаткові екологічні та соціально-економічні ризики.

*Наукова новизна* полягає в інтегрованому підході до оцінювання взаємозв'язку енергетичних систем, матеріальних ресурсів і життєвого циклу батарей.

*Практична значимість* полягає у формуванні рекомендацій для розвитку низьковуглецевої генерації, циркулярної економіки батарей та політики управління критичними ресурсами.

**Ключові слова:** електрифікація автопарку; енергоспоживання; критичні ресурси; переробка батарей; сталий транспорт.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Зростання частки електромобілів (electric Vehicle – EV) є ключовим елементом глобальних стратегій декарбонізації транспортного сектору [1, 2, 15]. Однак більшість досліджень аналізує поступові сценарії впровадження електротранспорту, тоді як комплексна оцінка наслідків повної електрифікації автопарку залишається недостатньо розробленою [3, 8]. Масштабна електрифікація транспорту може створювати нові навантаження на енергетичні системи, матеріальні ресурси та інфраструктуру утилізації, що потребує системного міжгалузевого аналізу [12, 14].

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ.

Останні роки характеризуються швидким розвитком електромобільності та збільшенням попиту на електроенергію. Згідно з даними Міжнародного енергетичного агентства, електроспоживання електромобілів у 2024 році становило близько 180 ТВт•год, демонструючи стійку тенденцію зростання [1].

Роботи з матеріалознавства та ресурсного менеджменту наголошують на значних потребах у літій, нікелі, кобальті та графіті для літій-іонних батарей [3, 7, 8]; одночасно огляди технологій переробки 2022–2025 рр. описують прогрес у гідрометалургії, пірометалургії й прямих методах відновлення катодних матеріалів, але підкреслюють обмеження за масштабом та енергетичними витратами процесів [5, 6].

Дослідження інтеграції EV в енергосистеми та технологій vehicle-to-grid (V2G) показують, що потенціал добровільного і керованого заряджання та двостороннього обміну енергією значно знижує пікові навантаження, але вимагає стандартизації, ринкових сигналів і масових інвестицій у зарядну інфраструктуру та накопичувачі [2, 12, 14].

Таким чином, можна стверджувати, що наукові дослідження в галузі матеріалознавства підтверджують значну потребу у критичних природних ресурсах для виробництва літій-іонних батарей. Паралельно розвиваються технології переробки батарей, проте їх промислові масштаби залишаються обмеженими. Дослідження інтеграції електромобілів в енергетичні системи показують потенціал керованого заряджання та технологій V2G, що дозволяють зменшити пікові навантаження.

Водночас геополітична концентрація видобутку критичних природних ресурсів (зокрема Китай

у ланцюгах рідкоземельних та акумуляторних матеріалів) створює додаткові ризики економічної залежності та екологічних порушень [7, 9].

### ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Аналіз наукових публікацій свідчить, що більшість досліджень присвячені окремим аспектам електрифікації транспортного сектору або поетапним сценаріям її впровадження. Водночас питання комплексного еколого-економічного оцінювання наслідків повної електрифікації світового автопарку з урахуванням енергетичних, матеріальних та утилізаційних обмежень залишаються недостатньо дослідженими.

### МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Оцінювання еколого-економічних та системних наслідків гіпотетичного сценарію повної електрифікації світового автопарку чисельністю близько 1,644 млрд транспортних засобів шляхом визначення додаткового попиту на електроенергію, потреб у критичних матеріалах для акумуляторних батарей, обсягів утилізації відпрацьованих батарей, ризиків для енергетичної інфраструктури, а також формування можливих напрямів екологічної та ресурсної політики.

### МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ

### ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методика базується на комбінованому підході, що включає кількісні детерміновані розрахунки енергоспоживання з використанням типових технічних параметрів електромобілів, порівняльний аналіз глобального виробництва електроенергії та ресурсної бази критичних природних матеріалів, узагальнення сучасних наукових публікацій, якісний аналіз екологічних і політичних ризиків, а також елементи оцінки життєвого циклу транспортних засобів.

**Об'єкт дослідження:** вплив повної електрифікації світового автомобільного парку на енергетичну систему, виробничі потужності та еколого-економічні показники.

**Предмет:** визначення обсягів енергетичного і ресурсного споживання, утилізації та ризиків за повної електрифікації світового автомобільного парку.

### ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Оцінювання додаткового енергоспоживання:

Середня енергоспоживання (таблиця 1) легкового EV: 15–20 кВт•год / 100 км ( $E_n$ ); середній річний пробіг: 15000 км ( $L_{дор}$ ) [16]; середня ємність батареї

(припущення для матеріалознавчих розрахунків): 75 кВт·год. (Вакум)

Отже, енергоспоживання електровантажівок залежить від моделі: ємність батареї може сягати 621 кВт·год для важких вантажівок, як-от Mercedes-Benz eActros (три акумуляторні блоки по 207 кВт·год), або 42 кВт·год для менших міських моделей, як-от Wuling Rongguang EV. Виробники наголошують, що рівень викидів CO<sub>2</sub> у eActros 600 значною мірою залежить від того, яким способом виробляється електроенергія для його заряджання. За нинішнього енергетичного міксу в Європі ця модель дозволяє зменшити викиди приблизно на 40% порівняно з аналогічним дизельним Actros. Якщо ж використовувати електроенергію виключно з відновлюваних джерел, скорочення може перевищувати 80% за весь десятирічний життєвий цикл вантажівки – це орієнтовно 370 та 775 тонн CO<sub>2</sub> відповідно. Таким чином, завдяки зменшенню викидів під час експлуатації eActros 600 здатний компенсувати вищі виробничі викиди, пов'язані з акумуляторами, вже на другий рік роботи, а за умов «зеленої» енергії – навіть протягом першого року далекомагістральних перевезень. Важливим фактором є ефективність використання енергії та можливість швидкої зарядки, яка може забезпечити до 80% заряду за 46 хвилин, як у випадку з Wuling Rongguang EV.

Таким чином, враховуючи дані табл. 1, при виконанні емпіричних розрахунків доречно орієнтуватися, що енергоспоживання міських розвізних вантажівок приблизно 70 кВт·год/100 км; далекобійних тягачів – 130–200 кВт·год/100 км при повному завантаженні.

Враховуючи зазначені дані, річне енергоспоживання на одне авто:

$$E_{\text{п легк. EV, кВт} \cdot \text{год}} \times \frac{L_{\text{рік, км}}}{100 \text{ км}}; \quad (1)$$

Отже, з урахуванням середнього річного пробігу – для 15 кВт·год/100 км:

$$15 \times (15000/100) = 2250 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік};$$

– для 20 кВт·год/100 км:  $20 \times 150 = 3000 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}$ .

2. Для всього автопарку  $1,644 \times 10^9$  авто [1, 2]:

– нижня оцінка:  $1,644 \times 10^9 \times 2250 = 3,699 \times 10^{12} \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік} = 3699 \text{ ТВт} \cdot \text{год} / \text{рік}$ ;

– верхня оцінка:  $1,644 \times 10^9 \times 3000 = 4,932 \times 10^{12} \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік} = 4932 \text{ ТВт} \cdot \text{год} / \text{рік}$ .

Отже, повна електрифікація автопарку створить додатковий річний попит, приблизно 3700–4930 ТВт·год ( $\approx 3.7\text{--}4.9 \text{ ПВт} \cdot \text{год}$ ). Цей порядок величини узгоджується з грубими масштабними оцінками відповідно літературним джерелам (порівняно: у 2024 р. електроспоживання від EV оцінювалось ІЕА близько 180 ТВт·год для існуючого парку EV; сценарії масової електрифікації прогнозують значно більші цифри до 2030–2035 рр.).

Порівняння із глобальним виробництвом електроенергії. За даними оглядів Ember та ІЕА, загальне виробництво електроенергії у 2023–2024 рр. було на рівні десятків тисяч ТВт·год (порядку 28–30 ПВт·год); тому додатковий попит від повної електрифікації автопарку становитиме приблизно 13–18% від поточного світового виробництва (порядкова оцінка) [1, 2]. Слід зауважити, що на сьогоднішній день багато автовиробників випускають електричні вантажівки, а також електроавтобуси, які є більш місткими споживачами енергоресурсів (рис. 1, 2).

Аналіз динаміки продажів EV в світі засвідчує швидкі темпи заповнення авторинку електрокарами. У всьому світі та в ЄС ринок електромобілів концентрується у відносно обмеженій кількості країн. У ЄС більшість нових електромобілів у 2023 році були зареєстровані в країнах із високою часткою «зелених» автомобілів, серед яких – Швеція, Данія, Фінляндія та Нідерланди.

Безперечним лідером за обсягами продажів електромобілів у світі залишається Китай – у 2024 році там було продано приблизно 11 млн електромобілів, що значно випереджає інші регіони. На другому місці – Європа (у складі ЄС + ЕФТА (Ісландія, Ліхтенштейн, Норвегія, Швейцарія) + Великої Британії) з приблизно 3,2 млн електромобілів, зареєстрованих у 2024 році. Сполучені Штати також значно наростили продажі і займають одну з провідних позицій серед «друге місце» в різних роках, але поки що не наздоганяють Китай за абсолютними обсягами.

Збереження нинішніх темпів поширення електромобілів дозволяє прогнозувати, що до 2030 року їхня

**Таблиця 1.** Орієнтовні показники за класами ТЗ

| Клас вантажного EV    | Типові приклади                                                                                      | Енергоспоживання (E <sub>п</sub> ), кВт·год/100 км | Середня ємність батареї, (Вакум), кВт·год |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| до 3,5 т              | електричні фургони (наприклад, Mercedes eSprinter, Ford E-Transit)                                   | 20–40                                              | 55–90                                     |
| 5–12 т                | міські дистриб'ютори, наприклад Volvo FL Electric, MAN eTGM                                          | 60–100                                             | 120–300                                   |
| понад 16 т            | магістральні тягачі (Tesla Semi, Volvo FH Electric, Scania 45 R)                                     | 110–180-                                           | 300–600 (залежно від конфігурації)        |
| Повна маса понад 40 т | далекобійні електровантажівки з великим причепом (Mercedes-Benz eActros, Tesla Semi, Nikola Tre BEV) | 180–250+                                           | 600–900+                                  |

частка перевищить 40% світових продажів автомобілів. У 2024 році реалізовано 17 млн електромобілів, уперше перевищено 20% глобального ринку [1, 10].

Реальні дані тестів ADAC (71 EV, 2023) показують, що ефективність (км/кВт·год) важливіша за розмір батареї [16].

Отже, найбільші батареї мають Mercedes EQS (~108 кВт·год) та BMW iX / i7 – преміум-сегмент. 90–95 кВт·год – характерно для великих седанів і спорткарів (EQS, Taycan, Audi e-tron).

77–80 кВт·год – «золота середина» для масових моделей (Hyundai, KIA, Skoda, VW). 60–65 кВт·год – компактні та міські EV (Tesla Model 3, Kona, e-Soul), рисунок 3.

Ефективність (км / кВт·год):

$$Eff\ EV = \frac{L_{real}, \text{ км}}{V_{акум}, \text{ кВт} \cdot \text{ год}}; \quad (2)$$

Відповідно до розрахунків, лідери за ефективністю є: Hyundai Ioniq 6 – ~7.2 км/кВт·год; Tesla Model 3 – ~6.9 км/кВт·год; Hyundai Kona Electric – ~6.8 км/кВт·год; KIA Niro EV – ~6.3 км/кВт·год, рисунок 4.

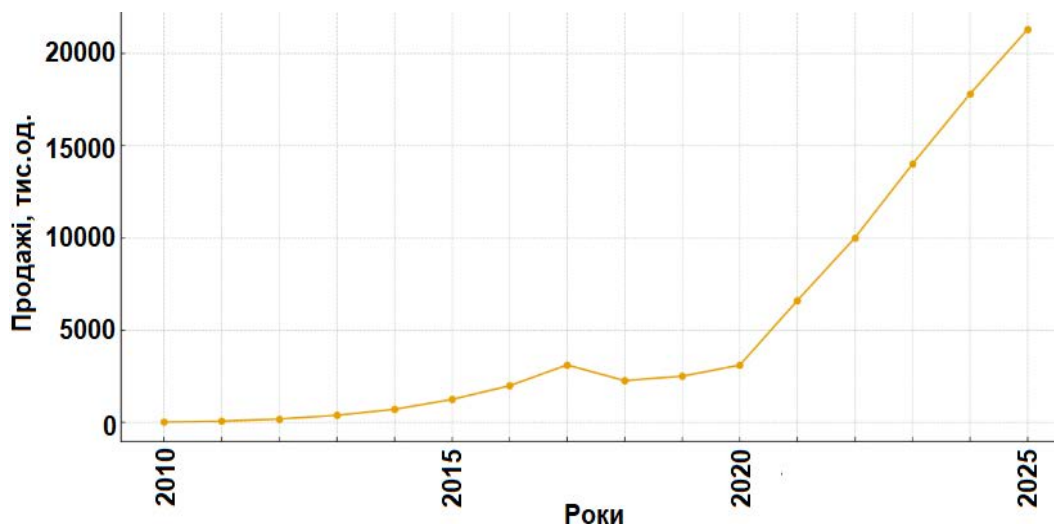


Рис. 1. Динаміка щорічних продажів електромобілів у світі

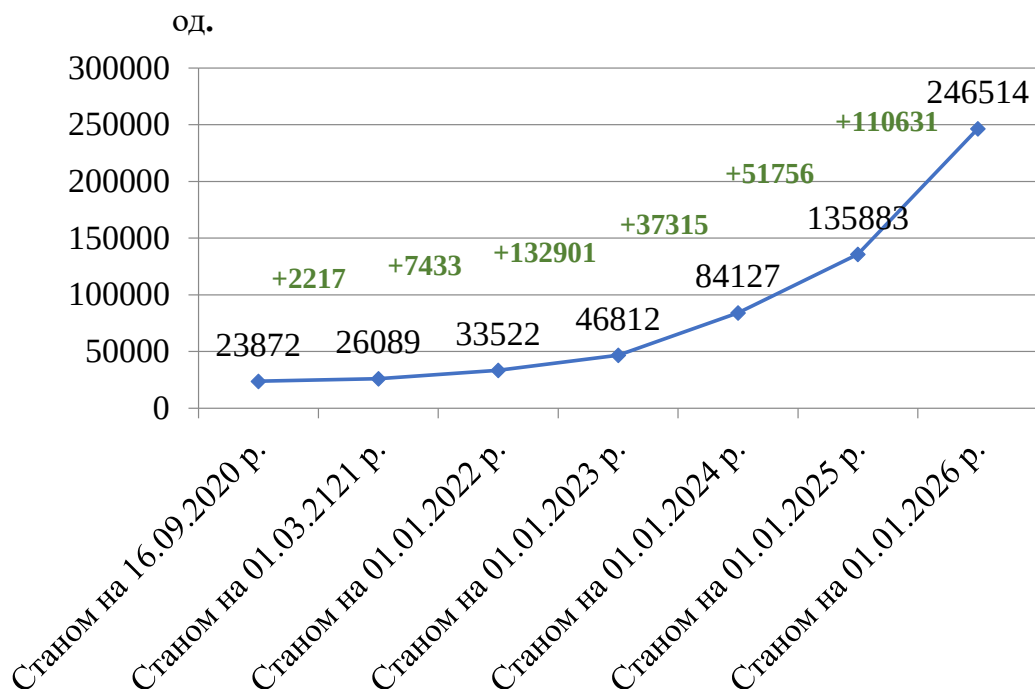


Рис. 2. Кількість зареєстрованих в сервісних центрах МВС України ТЗ (з типом палива «Е-електро»)

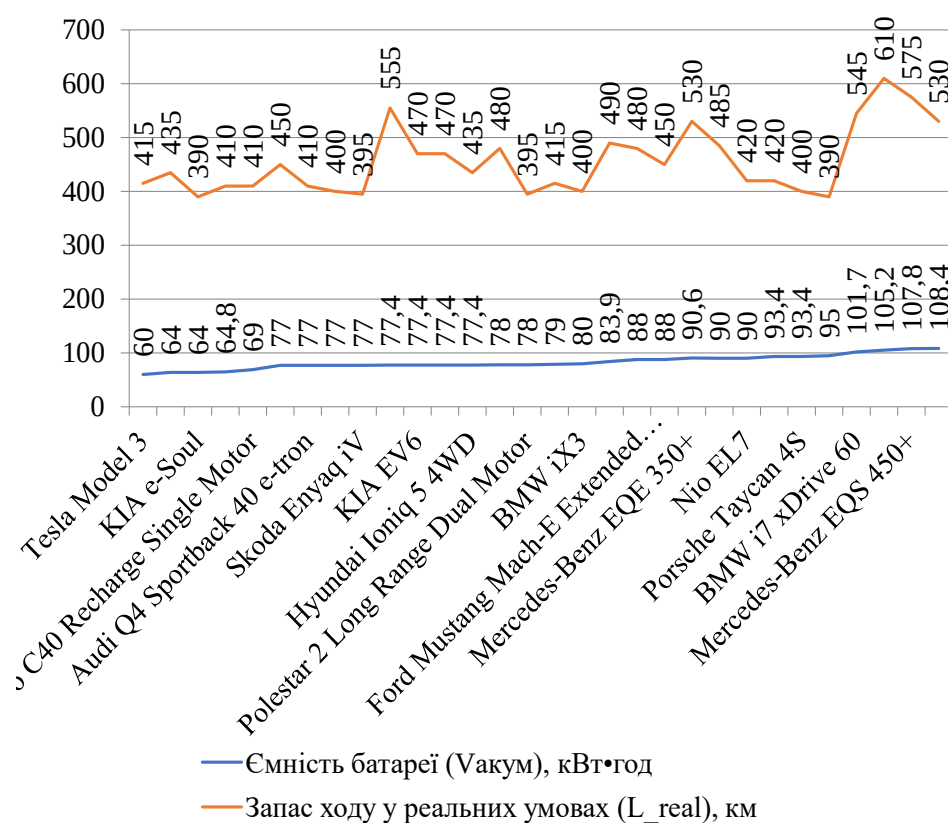


Рис. 3. Запас ходу електромобілів у реальних умовах

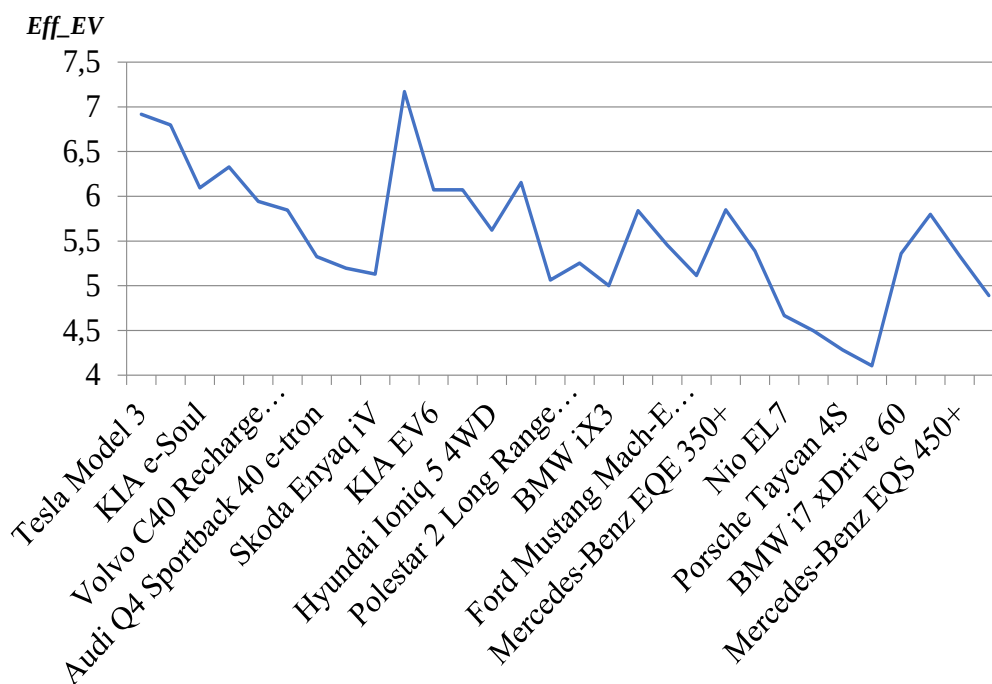


Рис. 4. Ефективність

Відповідно представленим дослідженням існують інфраструктурні виклики. Аналіз інфраструктурних вимог: генерування, мереж, накопичення. По-перше, необхідно розглянути можливості генерації енергії: додаткові 3–4.9 ПВт·год/рік вимагатимуть спорудження сотень–тисяч ГВт нових генеративних потужностей (у перерахунку на середньорічний коефіцієнт завантаження: 1 ГВт  $\approx$  8.76 ТВт·год/рік при 100% завантаженні; реалістично 0.2–0.5 фактор завантаження для деяких джерел багато ГВт). Масовий розвиток сонячних електростанцій і вітрових відіграє ключову роль згідно з IEA/IRENA, але для покриття вечірніх піків необхідні накопичувачі або база (ядерна/гідро) або гнучке керування зарядом [10, 12, 14]. По-друге, необхідно здійснити аналіз мереж та піків навантаження: ризик перевантаження локальних мереж під час одночасного вечірнього заряджання (коли також працює опалення/кондиціювання). Потрібна модернізація трансформаторів, підстанцій, впровадження тарифів часу доби і стимулів для нічного/денного заряджання, а також розгортання систем накопичення енергії (stationary battery storage) і V2G.

Отже, підсумовуючи, необхідно зауважити, що повна електрифікація автопарку потребує: нарощування генерації (сотні–тисячі ГВт нових потужностей (сонячні, вітрові, ядерні, гідро); накопичувачі енергії для пікових навантажень; модернізації електромереж (трансформаторів, підстанцій, розумних тарифів); поширення систем керованого заряджання (demand-side management, V2G).

Аналіз потреб в матеріалах для виготовлення акумуляторів, батарей. Розглядаючи ситуацію, при якій середня батарея 75 кВт·год. Для виробництва батарей часто орієнтуються на такі середні витрати матеріалів (узагальнено в оглядах і аналітиці, з декількох джерел, значення залежать від хімічного складу), приблизно: літій 0.1–0.2 кг/кВт·год; кобальт 0.02–0.04 кг/кВт·год (варіюється залежно від NMC/NCA/NFM тощо); нікель 1–1.5 кг/кВт·год; графіт – кілька кг/кВт·год (для анода) [3, 7, 8]. Отже, за розрахунками, лише літійу потрібно 12–25 млн т, кобальту 2–5 млн т, нікелю понад 120 млн т. Це створює загрозу перевищення поточних запасів [7, 8].

Розрахунок загальної батареино́ї ємності:

$$V_{\text{акумулятор, загальн}} = 1,644 \times 10^9 \text{ ТЗ} \times 75 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 123,300 \times 10^9 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 123,300 \cdot 10^9 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 123300 \text{ ГВт} \cdot \text{год} = \text{тобто } 123,3 \text{ ТВт} \cdot \text{год} \text{ загальної встановленої акумуляторної ємності для всього автопарку на старті}).$$

Потреби в матеріалах (приблизно, за діапазоном коефіцієнтів), таблиця 2:

$$\text{– літій: } 0,1\text{--}0,2 \text{ кг/кВт} \cdot \text{год} \times 123,300 \times 10^9 \text{ кВт} \cdot \text{год} \Rightarrow 12,330 \times 10^9\text{--}24,660 \times 10^9 \text{ кг} = 12,33\text{--}24,66 \text{ млн тонн.}$$

$$\text{– кобальт: (прибл. } 0,02\text{--}0,04 \text{ кг/кВт} \cdot \text{год}) \Rightarrow \approx 2,5\text{--}5,0 \text{ млн тонн; за деякими оцінками більш консервативно – до } 25\text{--}50 \text{ млн тонн за старими припущеннями, але сучасні хімії зменшують долю кобальту.}$$

$$\text{– нікель: } \approx 1\text{--}1,5 \text{ кг/кВт} \cdot \text{год} \Rightarrow \approx 123\text{--}185 \text{ млн тонн.}$$

$$\text{– графіт: «кілька кг/кВт} \cdot \text{год} \Rightarrow 247\text{--}500 \text{ млн тонн (залежно від припущення: } 2\text{--}4 \text{ кг/кВт} \cdot \text{год}).$$

Порівняння з запасами: за USGS (2024) оцінки резервів літійу змінюються, але ресурси та резерви у десятках мільйонів тонн (ресурсів близько 105 млн т, резервів – 30 млн т за різними джерелами), отже потреба в 12–25 млн тонн може значно впливати на існуючу базу запасів і потребуватиме інтенсифікації видобутку, рециркуляції й раціоналізації хімічного складу батарей. (Таблиця 3). Таким чином, існує потреба в диверсифікації та інноваціях у батареиних технологіях.

Огляд життєвого циклу батарей і утилізації. Середній термін служби батареї – 8–15 років; отже, щорічно утворюватимуться сотні мільйонів відпрацьованих батарей [5, 6]. При середньому терміні – 10 років, щороку виводитиметься з експлуатації приблизно:  $1,644 \times 10^9 \div 10 \approx 164,4 \times 10^6$  батарей (приблизно 164,4 млн батарей/рік). Це створює масштабні потоки відпрацьованих акумуляторів, які потребують переробки або, відповідно до принципів циркулярної економіки, повторного використання (second-life).

Відповідно до технологій переробки та їх обмеження, слід зазначити, що сучасні технології переробки (пірометалургія, гідрометалургія, direct recycling) розвиваються, але поки обмежені за масштабом [5], мають різну ефективність відновлення матеріалів.

Таблиця 2. Матеріальні потреби (середні оцінки на весь автопарк)

| Матеріал | Витрати на 1 кВт·год | Потреба для 123 ТВт·год | Примітки                                   |
|----------|----------------------|-------------------------|--------------------------------------------|
| Літій    | 0,1–0,2 кг/кВт·год   | 12–25 млн т             | Залежить від хімії батарей (NMC, LFP тощо) |
| Кобальт  | 0,01–0,04 кг/кВт·год | 2,5–5 млн т             | Сучасні хімії зменшують частку кобальту    |
| Нікель   | 1–1,5 кг/кВт·год     | 123–185 млн т           | Основний матеріал катода для NMC/NCA       |
| Графіт   | 2–4 кг/кВт·год       | 247–500 млн т           | Використовується для анода                 |

Таблиця 3. Порівняння з ресурсами та резервами

| Матеріал | Оцінка ресурсів (USGS 2024)                           | Коментар                                              |
|----------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Літій    | Ресурси $\sim$ 105 млн т<br>Резерви $\sim$ 30 млн т   | Потреба 12–25 млн т впливає на існуючі запаси         |
| Кобальт  | Ресурси $\sim$ 7–10 млн т<br>Резерви $\sim$ 1–2 млн т | Потреби 2,5–5 млн т створюють тиск на ринок           |
| Нікель   | Ресурси сотні млн. т                                  | Потреби в межах запасів, але залежність від видобутку |
| Графіт   | Великі ресурси, сотні млн. т                          | Потребує масштабування обробки                        |

Огляди 2022–2024 рр. показують, що можливо відновити значну частку літію/нікелю/кобальту при гідро-металургії, але промислові потужності наразі обмежені та енергоємні. Повна економічно-екологічно ефективна переробка в масштабі сотень млн бат. / рік поки що не забезпечена. Отже, технології переробки дозволяють відновлювати частку матеріалів, тому існує потреба масштабного розвитку, адже для сталого розвитку електромобілів критично важлива масштабна переробка батарей та диверсифікація джерел матеріалів.

Слід зауважити, що переробка енергоємна та має екологічні ризики. Аналіз енергетичних та екологічних витрат переробки свідчить, що навіть при високих коефіцієнтах відновлення переробка потребує енергії і створює відходи. Необхідно враховувати життєвий цикл батарей в цілому при оцінюванні чистого кліматичного ефекту електромобіля, особливо при використанні електроенергії з вуглецевою інтенсивністю, вуглецевим слідом (рисунки 5, 6). Таким чином, розглядаючи екологічну ефективність, необхідно зауважити:

1. викиди на етапі виробництва батарей можуть складати до 50% вуглецевого сліду EV;

2. «Вуглецевий борг» компенсується тривалою експлуатацією та використанням низьковуглецевої енергії;

3. без системних змін електрифікація може лише перерозподіляти навантаження між секторами економіки.

Аналіз соціально-політичних та екологічних ризиків свідчить, що відповідно геополітиці

і концентрації ланцюгів постачання, контроль над видобутком і переробкою (наприклад, велика частка ринку зосереджена в Китаї) створює ризики залежності і стратегічної вразливості. Окрім того, існують соціальні проблеми видобутку, а саме порушення прав людини, умови праці, вплив на водні ресурси при виробництві літію у тропічних і пустельних регіонах – це суттєвий виклик для етичної «зеленої» трансформації. Окрім того, зростання попиту на електроенергію з інших секторів (AI, промисловість, опалення) ускладнює реалізацію сценарію «всі авто – електричні»

### ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Здійснений аналітичний огляд продемонстрував, що повна електрифікація автопарку вимагатиме значного додаткового виробництва електроенергії та інвестицій у мережу і накопичення [2, 12, 14]. Навіть якщо значна частина додаткової генерації буде відновлюваною, для покриття піків потрібно або значне накопичення, або синхронізація заряджання (demand-side management), або використання V2G. Технічні дослідження підтверджують ефективність таких підходів, але зазначають потребу в стандартах та економічних мотивах.

Відповідно до оцінювання матеріальних обмежень, потреб у матеріалах, слід зазначити, що навіть при помірних припущеннях може виникнути суттєве навантаження на видобуток і ринки критичних природних ресурсів [3, 7, 8]. Водночас технологічний прогрес (зменшення долі кобальту, підвищення

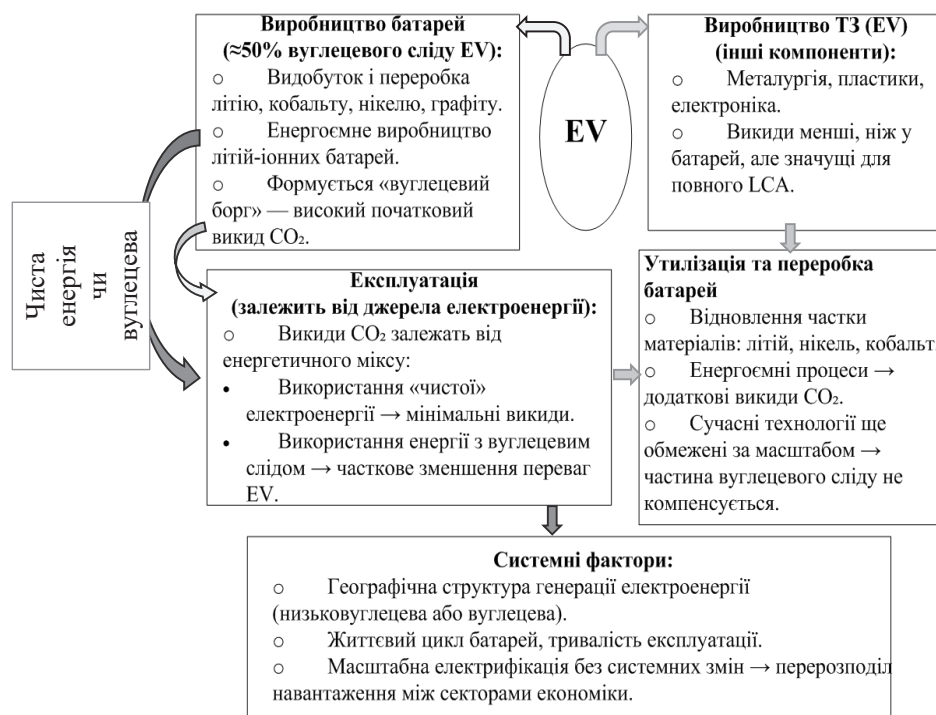


Рис. 5. Вуглецевий слід EV протягом життєвого циклу – Life-Cycle Assessment (LCA)



Рис. 6. Еколого-економічні наслідки повної електрифікації світового автопарку: Оцінювання енергетичних, матеріальних та утилізаційних викликів

енергощільності, твердоелектролітні батареї) та масштаби переробки можуть зменшити тиск [5, 6]. Політика має спрямовувати інвестиції у диверсифікацію джерел, розвиток переробки і наукові рішення для зниження інтенсивності використання рідкісних елементів.

Відповідно дослідженням екологічної еквівалентності, визначено, що заяви про «нульові викиди» на рівні експлуатації не означають «нульові життєві викиди». Повний LCA для EV залежить від джерела електроенергії і методів виробництва батарей

[4, 11, 13]. У регіонах з високою часткою вуглецевої генерації переваги EV щодо CO<sub>2</sub> можуть зменшуватися [4, 11].

Відповідно принципам соціальної справедливості та управління ризиками, необхідно зауважити, що концентрація ланцюгів постачання та проблеми видобутку ставлять питання про етику переходу. Отже, політики розвитку та управління повинні включати заходи з гарантування прав людини, екологічних стандартів та прозорості в ланцюгах постачання [7, 9].

Окрім зазначеного, визначено, що відбувається додаткове навантаження у майбутньому, мається на увазі паралельний зріст попиту на електроенергію з боку інших галузей (дата-центри/AI, електрифікація промисловості, опалення), що підсилює конкуренцію за мережеві ресурси та ускладнює реалізацію сценарію «всі авто – електричні» без комплексного планування енергосистеми.

### ВИСНОВКИ

Повна електрифікація світового автопарку (≈1,644 млрд авто) потребуватиме додатково ≈3700–4930 ТВт•год /рік електроенергії – еквівалент ≈13–18 % від порядку глобального виробництва електроенергії 2024 р. (приблизна порядкова оцінка). Цей масштаб вимагає швидкого і великомасштабного нарощення низьковуглецевої генерації та розбудови систем зберігання.

Потреби в літій, нікелі, кобальті й графіті для початкового оснащення такого автопарку будуть вимагати десятків мільйонів тонн відповідних матеріалів. Певні сценарії можуть наближатися до поточних запасів/ресурсів, що підкреслює потребу в диверсифікації джерел, інноваціях у хімічному складі батарей та масштабуванні переробки.

Система переробки батарей потребує істотного розширення. Щорічні потоки відпрацьованих батарей (порядку сотень млн одиниць у разі великого парку) вимагатимуть великих інвестицій у технології й інфраструктуру для запобігання токсичним і екологічним ризикам.

Реальні екологічні вигоди електрифікації залежать від «чистоти» електроенергії та ефективності життєвого циклу батарей. Без комплексних рішень (включно з регулюванням видобутку, переробкою,

стандартами і соціальними гарантіями) перехід може створити нові екологічні та соціальні проблеми.

Рекомендації також розроблено на основі огляду сучасних наукових праць. Визначено, що: по-перше, необхідні пріоритетні інвестиції в чисту генерацію і накопичення; по-друге, необхідною є модернізація мереж та механізмів стимулювання керованого заряджання; по-третє, потрібно впроваджувати масштабну і низькоенергетичну переробку батарей; останнє, міжнародні потрібно розробляти, удосконалювати та запроваджувати механізми контролю за видобутком критичних природних ресурсів і забезпечення соціальної відповідальності.

Підсумовуючи вищезазначене, до рекомендацій щодо політики програм сталого розвитку автотransпортного сектору та досліджень з ефективного їх впровадження доречно зазначити наступні: 1. створення національних та міжнародних програм з масштабної переробки акумуляторів з фінансуванням досліджень і розробок для прямих технологій рециркуляції. Дане фінансування може забезпечуватися з різних джерел, включаючи державні, місцеві бюджети, гранти, приватні інвестиції та власні фінансові ресурси самих компаній, корпоративні бюджети. Фінансування є ключовим інструментом для розвитку і впровадження інновацій, технологічного прогресу та підвищення конкурентоспроможності підприємств. 2. Впровадження стимулів для денного або нічного заряджання та динамічних тарифів, стандартів ISO15118, ISO 17409, а також інвестування в розумні мережі. 3. Розвивати диверсифікацію джерел постачання критичних природних ресурсів та міжнародні угоди щодо екологічних і соціальних стандартів видобутку.

### REFERENCES

- [1] International Energy Agency (IEA). (2024). Global EV Outlook 2024: Securing the future of electric mobility. Paris: IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>
- [2] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). World Energy Transitions Outlook 2023. Abu Dhabi: IRENA. URL: <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>
- [3] Li, M., Wang, X., Zhang, X., & Chen, L. (2023). Environmental impacts and resource challenges of global electric vehicle adoption. *Nature Communications*, 14(1), 1532. DOI: 10.1038/s41467-023-37105-9
- [4] Wang, S., Liu, Y., & Zhao, H. (2022). Life-cycle carbon emissions and economic assessment of electric vehicles. *Journal of Cleaner Production*, 366, 132895. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132895
- [5] Ziegler, M. S., et al. (2021). The role of battery recycling in the decarbonization of electric vehicles. *Nature Sustainability*, 4(7), 548–556. DOI: 10.1038/s41893-021-00707-8
- [6] Dunn, J. B., Gaines, L., Kelly, J. C., James, C., & Gallagher, K. G. (2020). The significance of battery manufacturing in decarbonizing transport. *Energy Policy*, 147, 111905. DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111905
- [7] Nansai, K., et al. (2020). Global supply chain analysis of battery materials. *Environmental Science & Technology*, 54(2), 1240–1250. DOI: 10.1021/acs.est.9b05878
- [8] Xu, C., Dai, Q., Gaines, L., Hu, M., Tukker, A., & Steubing, B. (2020). Future material demand for automotive lithium-based batteries. *Nature Communications*, 11(1), 3712. DOI: 10.1038/s41467-020-17992-9
- [9] Breetz, H. L., Mildenberger, M., & Stokes, L. C. (2018). The political logics of clean energy transitions. *Business and Politics*, 20(4), 620–650. DOI: 10.1017/bap.2018.23
- [10] International Energy Agency (IEA). (2022). Global EV Outlook 2022. Paris: IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>

- [11] Zhang, R., & Campana, P. E. (2021). The environmental footprint of electric mobility. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111651. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111651
- [12] Chang, D., & Lee, J. (2020). Energy demand and supply implications of full electrification of transportation. *Applied Energy*, 259, 114244. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114244
- [13] Pehl, M., Arvesen, A., Humpenöder, F., Popp, A., Hertwich, E. G., & Luderer, G. (2017). Understanding future emissions from low-carbon power systems by integration of life-cycle assessment and integrated energy modelling. *Nature Energy*, 2(12), 939–945. DOI: 10.1038/s41560-017-0032-9
- [14] Kittner, N., Lill, F., & Kammen, D. M. (2017). Energy storage deployment and innovation for the clean energy transition. *Nature Energy*, 2(9), 17125. DOI: 10.1038/nenergy.2017.125
- [15] Мітків, Б. В., & Шульга, О. В. (2020). Альтернативні види палива для транспортних засобів [Alternative fuels for vehicles]. *Наукowyi Visnyk TDAU*, 1(3), 144–152. DOI: 10.32750/tdatu.2020.3.144
- [16] ADAC. (2023). Elektroautos im ADAC Ecotest: Verbrauch und Reichweite. URL: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/auto-kaufen-verkaufen/kauf/elektroauto-reichweite/>

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] International Energy Agency (IEA). (2024). *Global EV Outlook 2024: Securing the future of electric mobility*. Paris: IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>
- [2] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). *World Energy Transitions Outlook 2023*. Abu Dhabi: IRENA. URL: <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>
- [3] Li, M., Wang, X., Zhang, X., & Chen, L. (2023). Environmental impacts and resource challenges of global electric vehicle adoption. *Nature Communications*, 14(1), 1532. DOI: 10.1038/s41467-023-37105-9.
- [4] Wang, S., Liu, Y., & Zhao, H. (2022). Life-cycle carbon emissions and economic assessment of electric vehicles. *Journal of Cleaner Production*, 366, 132895. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132895.
- [5] Ziegler, M. S., et al. (2021). The role of battery recycling in the decarbonization of electric vehicles. *Nature Sustainability*, 4(7), 548–556. DOI: 10.1038/s41893-021-00707-8.
- [6] Dunn, J. B., Gaines, L., Kelly, J. C., James, C., & Gallagher, K. G. (2020). The significance of battery manufacturing in decarbonizing transport. *Energy Policy*, 147, 111905. DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111905.
- [7] Nansai, K., et al. (2020). Global supply chain analysis of battery materials. *Environmental Science & Technology*, 54(2), 1240–1250. DOI: 10.1021/acs.est.9b05878.
- [8] Xu, C., Dai, Q., Gaines, L., Hu, M., Tukker, A., & Steubing, B. (2020). Future material demand for automotive lithium-based batteries. *Nature Communications*, 11(1), 3712. DOI: 10.1038/s41467-020-17992-9.
- [9] Breetz, H. L., Mildenerger, M., & Stokes, L. C. (2018). The political logics of clean energy transitions. *Business and Politics*, 20(4), 620–650. DOI: 10.1017/bap.2018.23.
- [10] IEA. (2022). *Electric Vehicle Outlook 2022*. Paris: International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>
- [11] Zhang, R., & Campana, P. E. (2021). The environmental footprint of electric mobility. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111651. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111651.
- [12] Chang, D., & Lee, J. (2020). Energy demand and supply implications of full electrification of transportation. *Applied Energy*, 259, 114244. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114244.
- [13] Pehl, M., Arvesen, A., Humpenöder, F., Popp, A., Hertwich, E. G., & Luderer, G. (2017). Understanding future emissions from low-carbon power systems by integration of life-cycle assessment and integrated energy modelling. *Nature Energy*, 2(12), 939–945. DOI: 10.1038/s41560-017-0032-9.
- [14] Kittner, N., Lill, F., & Kammen, D. M. (2017). Energy storage deployment and innovation for the clean energy transition. *Nature Energy*, 2(9), 17125. DOI: 10.1038/nenergy.2017.125.
- [15] Мітків, Б. В., & Шульга, О. В. (2020). Альтернативні види палива для транспортних засобів. *Науковий вісник ТДАУ*, 1(3), 144–152. DOI: 10.32750/tdatu.2020.3.144.
- [16] ADAC (2023). Elektroautos im ADAC Ecotest: Verbrauch und Reichweite. URL: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/auto-kaufen-verkaufen/kauf/elektroauto-reichweite/>

© Цюман Є. С., Глухонець А. О., Цюман С. М.

Дата першого надходження статті до видання: 06.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)