

УДК 620.92

АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ БІОЕНЕРГЕТИКИ ТА СКОРОЧЕННЯ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ В ЄС

Желєзна Т.А.¹, канд. техн. наук, **Драгнєв С.В.²**, канд. техн. наук

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, провідний науковий співробітник, zhelyezna@secbiomass.com, <https://orcid.org/0000-0002-9607-3022>

²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, старший науковий співробітник, dragnev@secbiomass.com, <https://orcid.org/0000-0003-3754-4186>

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2025.9>

Проаналізовано основні тенденції розвитку біоенергетики в ЄС. Розглянуто зв'язок між сектором відновлюваної енергетики та досягненням цілей по скороченню викидів парникових газів. Розроблено рекомендації для розвитку біоенергетики і процесу декарбонізації в Україні.

The main trends in the development of bioenergy in the EU are analysed. The interconnect between the renewable energy sector and the achievement of goals for greenhouse gas emission reduction is considered. Recommendations for the development of bioenergy and the decarbonization process in Ukraine are developed.

Бібл. 25, табл. 3, рис. 4.

Ключові слова: відновлювана енергія, біоенергетика, біомаса, біогаз, біометан, біопаливо.

ВВЕ – валове внутрішнє енергоспоживання;

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;

ВКЕ – валове кінцеве енергоспоживання;

ПГ – парникові гази;

СВАМ – механізм вуглецевого коригування імпорту;

СТВ – система торгівлі квотами на викиди парникових газів;

ТЕ – тепла енергія;

ТПВ – тверді побутові відходи;

н.е. – нафтовий еквівалент.

Індекси:

екв. – еквівалент;

е – електричний.

Актуальність роботи обумовлена нагальною необхідністю зменшувати споживання викопних палив і скорочувати викиди парникових газів. Ці цілі можуть бути ефективно досягнуті за рахунок нарощування обсягів використання відновлюваних джерел енергії, зокрема біомаси. **Метою** роботи є розробка рекомендацій для розвитку пріоритетних напрямків біоенергетики в Україні та прискорення процесу декарбонізації. **Методи дослідження** включають проведення розрахунків, вивчення та аналіз літературних, статистичних та інших даних.

Трансформація структури енергоспоживання ЄС з розвитком відновлюваної енергетики

Аналіз енергетичних показників ЄС за останні десятиріччя показує сталі тенденції скорочення загального енергоспоживання і роста частки ВДЕ в ньому. Протягом 2005-2022 рр. кінцеве споживання енергії в ЄС зменшилося майже на 10% до 902 млн т н.е./рік, з яких 562 млн т н.е./рік (62%) забезпечує власне ви-

робництво. По відношенню до валового внутрішнього енергоспоживання (1354 млн т н.е. у 2022 р.) власне виробництво становить лише 41,5%, а решта покривається імпортованими енергоносіями. За даними 2022 р., чистий імпорт нафти і нафтопродуктів в ЄС сягнув 503 млн т н.е., природного газу – 287 млн т н.е. (табл. 1) [1]. Основними складовими ВВЕ за видами палива є нафта/нафтопродукти (близько 35% у 2022 р.) і природний газ (22%); внесок ВДЕ – 18%, у тому числі біомаси – 10,7%.

З 2005 року обсяг відновлюваної енергії у валовому внутрішньому енергоспоживанні майже подвоївся і сягнув 244 млн т н.е./рік, включаючи 144 млн т н.е./рік з біомаси (рис. 1). Найбільші частки біомаси у ВВЕ мають зараз Латвія (39%), Фінляндія (31%), Данія (28%), Швеція (27%), Литва (24%). У кінцевому енергоспоживанні країн ці частки ще вищі із середнім показником для ЄС-27 – 12,8% (табл. 2). Поточний рівень використання енергії з біомаси

дає можливість щорічно уникати емісії парникових газів обсягом 300 млн т $CO_{2екв.}$, у тому числі 166 млн т $CO_{2екв.}$ – в секторі теплової енергії, 95 млн т $CO_{2екв.}$ – в електроенергетиці, 39 млн т $CO_{2екв.}$ – на транспорті.

Біомаса залишається найбільшою складовою ВДЕ в Євросоюзі і забезпечує близько 55% загального об'єму виробництва відновлюваної енергії (рис. 2). Поступове скорочення відносної частки біомаси у загальній структурі ВДЕ пов'язане з активним розвитком в Європі вітрової енергетики, сонячної

енергетики і теплових насосів [1-3]. Так, наприклад, споживання електроенергії, виробленої вітровими електростанціями, збільшилося з близько 6 млн т н.е. у 2005 р. до 37 млн т н.е. у 2022 р. Важливо, що фактичні обсяги виробництва та споживання енергії з біомаси в ЄС стало зростають. При цьому, частина біомаси є імпортованою: у 2022 році сумарний імпорт біомаси склав 7 млн т н.е., у тому числі більше 2 млн т н.е. – в Італії, 1,9 млн т н.е. – в Данії, 1,7 млн т н.е. – у Франції (див. табл. 1).

Табл. 1. Чистий імпорт основних палив в країнах ЄС у 2022 р., тис. т н.е. [1]

Table 1. Net imports of main fuels in selected EU Member States in 2022, ktoe [1]

| Країни ЄС (вибрані) | Тверді викопні палива | Природний газ | Нафта і нафтопродукти | Біомаса | Електроенергія |
|---------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|---------|----------------|
| Бельгія | 2723 | 13069 | 28133 | 1026 | -647* |
| Німеччина | 27757 | 70700 | 98470 | -64 | -2344 |
| Данія | 1135 | 402 | 3788 | 1869 | 117 |
| Франція | 6089 | 36232 | 69453 | 1678 | 1285 |
| Італія | 7591 | 55674 | 50179 | 2027 | 3696 |
| Латвія | 22 | 690 | 1677 | -878 | 199 |
| Нідерланди | 5643 | 15156 | 42020 | 604 | -367 |
| Швеція | 1552 | 645 | 11899 | 1425 | -2856 |
| ЄС-27 | 74156 | 287275 | 502564 | 7018 | 1115 |

* Мінус означає, що експорт перевищує імпорт, оскільки чистий імпорт є різницею між обсягами фактичних імпорту та експорту певного палива/енергоносія.

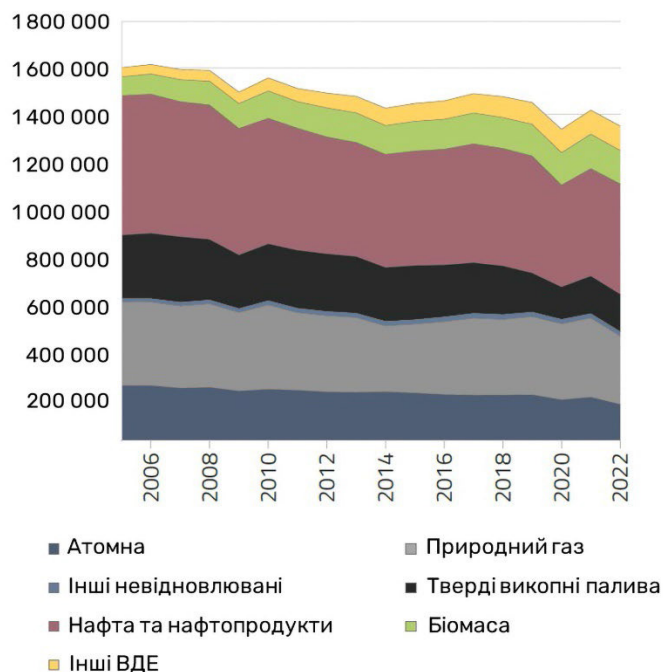


Рис. 1. Трансформація структури валового внутрішнього енергоспоживання ЄС-27, тис. т н.е. [1]

Fig. 1. Gross inland consumption evolution by fuel in the EU-27, ktoe [1]

Тверда біомаса традиційно робить найбільший внесок (майже 70% у 2022 р.) у загальне виробництво енергії з біомаси. Порівняно з 2006 р. (87%) цей показник помітно знизився, що пояснюється нарощуванням обсягів виробництва біогазу/біометану, рідких біопалив, а також розширенням енергетичного використання твердих побутових відходів [1, 4-6]. Найбільш активно біомаса, в першу чергу тверда, використовується для отримання теплової енергії (рис. 3, табл. 3) [7-9]. В Латвії і Естонії практично

все відновлюване тепло виробляється саме з біомаси; в Хорватії, Литві, Польщі, Словаччині цей показник більше 90%, а в середньому по ЄС він становить 81% (див. табл. 2).

В електроенергетиці біомаса відіграє менш значну роль порівняно з сектором теплової енергії та з іншими ВДЕ. Частка біомаси у загальному обсязі виробництва електроенергії в ЄС-27 у 2022 р. склала лише 6%, тоді як основний внесок робила атомна енергія (22%), природний газ (19%), а серед ВДЕ – вітрова енергія

Табл. 2. Біомаса в кінцевому енергоспоживанні та інші показники біоенергетики в ЄС-27 у 2022 р. [1]

Table 2. Share of bioenergy in the final energy consumption and other bioenergy shares in the EU-27 in 2022 [1]

| Країни ЄС (вибрані) | Частка біомаси у ВКЕ, % | Частка біомаси у ВДЕ, % | Частка відновлюваної ТЕ, % | Частка біомаси у відновлюваній ТЕ, % |
|---------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| Латвія | 40 | 85 | 61 | 100 |
| Фінляндія | 38 | 74 | 62 | 89 |
| Естонія | 34 | 90 | 62 | 100 |
| Швеція | 33 | 53 | 74 | 83 |
| Литва | 28 | 83 | 51 | 93 |
| Данія | 26 | 61 | 46 | 83 |
| Австрія | 20 | 52 | 40 | 86 |
| Хорватія | 19 | 64 | 37 | 97 |
| Польща | 13 | 75 | 23 | 92 |
| Словаччина | 14 | 75 | 22 | 92 |
| ЄС-27 | 12,8 | 55 | 26 | 81 |

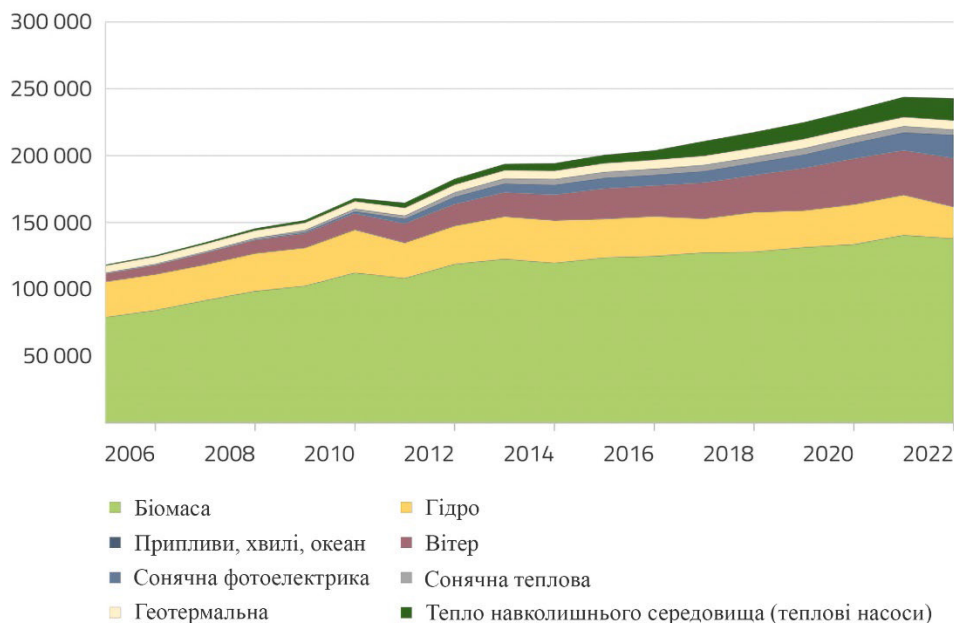


Рис. 2. Розвиток виробництва відновлюваної енергії в ЄС-27, тис. т н.е. [1]

Fig. 2. Evolution of the renewable energy production in the EU-27, ktoe [1]

(15%). Тим не менш, за останні десятиріччя генерація електроенергії з біомаси зростає більш ніж у п'ятеро – з 2,5 млн т н.е. у 2000 р. до 14,2 млн т н.е. у 2022 р. Більше половини обсягу 2022 року отримувалося з твердої біомаси, близько третини – з біогазу, решта – з ТПВ і рідких біопалив.

Із загальних майже 37 ГВтє, найкрупніші генеруючі потужності на біомасі встановлено в Німеччині (10,8 ГВтє), Швеції (4 ГВтє), Італії (3,8 ГВтє), Фінляндії (3 МВтє). Найбільшим джерелом біопалива для цих потужностей є біогаз в Німеччині (5,6 млн т н.е./рік) та Італії (1,6 млн т н.е./рік) і тверда біомаса в Швеції (3,7 млн т н.е./рік) та Фінляндії (2,7 млн т н.е. рік).

Установки на біомасі характеризуються високим коефіцієнтом навантаження виробництва електроенергії – 53%. Більше значення серед інших ВДЕ мають тільки геотермальні установки – 84%, а середній показник для ВДЕ в цілому становить 32%. Основна роль електрогенерації на біомасі в ЄС вбачається у забезпеченні базового навантаження і гнучкості енергетичної системи [1, 10, 11]. В Данії, Латвії, Литві і Люксембургу вся електроенергія з біомаси генерується режимі комбінованого виробництва з тепловою енергією. Рівень комбінованого виробництва є також високим в Польщі (96%), Хорватії (69%), Естонії (61%) і Австрії (60%).

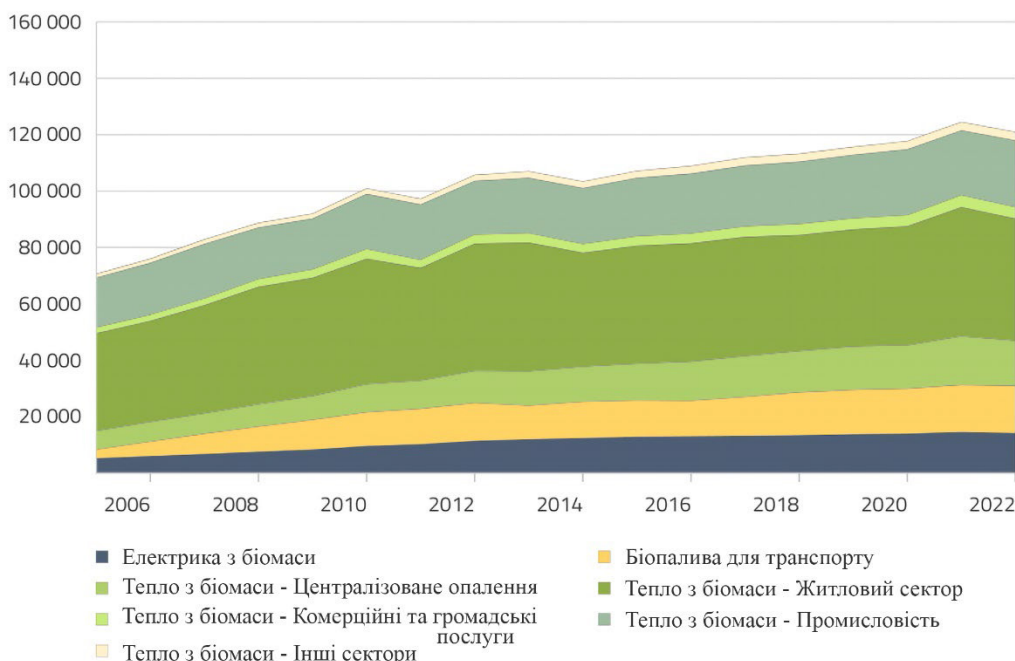


Рис. 3. Динаміка споживання енергії з біомаси кінцевими споживачами в ЄС-27, тис. т н.е. [1]

Fig. 3. Evolution of bioenergy consumption by end-use in the EU-27, ktoe [1]

Табл. 3. Структура споживання теплової енергії з біомаси за секторами в ЄС-27 у 2022 р., тис. т н.е. [1]

Table 3. Breakdown of biomass used for heat by fuel and sector in the EU-27 in 2022, ktoe [1]

| Види біомаси, біопалива | Промисловість | Житло | Централізоване опалення | Комерційний та сектор послуг | Інші сектори | Всього |
|--------------------------|---------------|-------|-------------------------|------------------------------|--------------|--------|
| Тверда біомаса | 21812 | 43000 | 10453 | 3045 | 1563 | 79872 |
| Відновлювана частина ТПВ | 793 | 0 | 2555 | 225 | 2 | 3575 |
| Біогаз | 578 | 267 | 507 | 754 | 927 | 3034 |
| Рідкі біопалива, у т.ч.: | 434 | 35 | 82 | 117 | 643 | 1311 |
| - Біобензин у суміші | 4 | 13 | 0 | 5 | 23 | 45 |
| - Біодизель чистий | 23 | 2 | 0 | 8 | 33 | 67 |
| - Біодизель у суміші | 319 | 19 | 0 | 80 | 556 | 974 |
| - Інші рідкі біопалива | 88 | 1 | 82 | 24 | 31 | 225 |

Кінцеве споживання енергії в транспортному секторі ЄС є доволі стабільним на рівні близько 350 млн т н.е./рік, з яких більше 70% припадає на дорожній транспорт. Два піки споживання по 375 млн т н.е. спостерігалися у 2007 р. і 2019 р., а падіння до 240 млн т н.е. – у 2020 р. через вплив Covid-19. Частка біопалив на транспорті зростає практично з нуля у 2000 р. до 6% (16,8 млн т н.е.) у 2022 р. Основним видом моторного біопалива є біодизель із обсягом споживання більше 13,4 млн т н.е./рік. Крупними споживачами біодизелю в ЄС є Франція (2220 тис. т н.е./рік), Німеччина (2192 млн т н.е./рік), Швеція (1447 млн т н.е./рік) й Італія (1354 млн т н.е./рік) [1]. При цьому Франція і Німеччина використовують також доволі великі обсяги біоетанолу – 850 та 748 млн т н.е./рік, відповідно. Оскільки декарбонізація транспорту є складнішою задачею порівняно з секторами теплової та електричної енергії, цьому напрямку приділяється особлива увага в Євросоюзі з урахуванням питань сталості [12, 13].

Розвиток виробництва та споживання біогазу/біометану є особливо важливим для ЄС з точки зору досягнення повної незалежності від російського природного газу [14, 15]. Протягом 2006-2014 рр. річний ріст споживання біогазу в ЄС становив близько 1 млн т н.е. з певним сповільненням після 2014 р. За даними 2022 р., валове внутрішнє споживання біогазу складало 15,8 млн т н.е./рік, з яких 64% було використано для виробництва електроенергії і тепла. Частина біогазу (15% загального обсягу споживання) була доведена до якості біометану і використана у суміші з природним газом. У період 2022-2023 рр. спостерігався значний ріст біогазового сектору ЄС: виробництво біогазу досягло рекордних 22 млрд м³/рік, біометану – 4,9 млрд м³/рік. На початок 2024 р. встановлена потужність біометанових установок досягла 6,4 млрд м³/рік. Найбільшим виробником біогазу/біометану в Європі є Німеччина (13 ТВт·год у 2022 р.), за якою з доволі великим відривом слідують Франція (7 ТВт·год/рік), Об'єднане Королівство (6,9 ТВт·год/рік) і Данія (6,5 ТВт·год/рік).

Роль відновлюваних джерел енергії у досягненні кліматичних цілей ЄС і підвищенні безпеки енергопостачання

Скорочення викидів парникових газів є однією з основних задач кліматичної політики Євросоюзу. Порівняно з 1990 р. емісія ПГ в ЄС зменшилася на 34% і складала близько 3,3 млрд т CO_{2екв.}/рік у 2022 р. Основними джерелами парникових газів є енергетичний сектор (26% від загального обсягу), транспорт (24%), промисловість та будівництво (20%) [1]. Європейський «зелений» курс, прийнятий у 2019 р., поставив за мету

досягти кліматичної нейтральності Європи до 2050 р. Законодавчий пакет «Fit for 55», який є складовою Європейського «зеленого» курсу, визначає проміжну ціль 2030 р. – скорочення емісії ПГ принаймні на 55% відносно рівня 1990 р. [16-18]. Європейські експерти постійно відслідковують і аналізують прогрес окремих країн та ЄС в цілому у досягненні поставлених кліматичних цілей [19-22]. Це дає можливість приймати правильні рішення, і у разі необхідності вживати додаткові заходи та стимули.

Пріоритетний розвиток ВДЕ є ефективним інструментом для досягнення кліматичних цілей ЄС і для вирішення іншої важливої задачі – підвищення енергетичної безпеки через диверсифікацію джерел енергопостачання. Ще у травні 2022 р. в ЄС розпочала роботу програма REPowerEU [23], спрямована на повну відмову від імпорту енергоносіїв з Росії, а також на енергозбереження і розвиток «зеленої» енергетики. Одним з важливих напрямків, зазначених у програмі, є збільшення сталого виробництва біометану до 35 млрд м³ до 2030 р. Пріоритетні завдання цього напрямку включають заохочення виробників біогазу до його збагачення до якості біометану, збільшення обсягів транспортування біометану через газову мережу, вирішення актуальних науково-практичних проблем та деякі інші.

Важливо зазначити, що ЄС послідовно проводить узгоджену кліматичну та енергетичну політику, що сприяє успішному досягненню цілей в обох сферах. Так, кожна країна-член ЄС має Національний кліматичний та енергетичний план на 2021-2030 рр. Ці плани спрямовані на декарбонізацію енергетичної системи ЄС у відповідності до цілей і задач Європейського «зеленого» курсу [24].

Потужним інструментом для підвищення енергоефективності та скорочення викидів парникових газів є Система торгівлі квотами на викиди парникових газів, яка функціонує в ЄС з 2005 року. На сьогодні СТВ ЄС охоплює енергетичні установки зі спалюванням палива (крім небезпечних і побутових відходів) номінальною тепловою потужністю більше 20 МВт, промислові установки енергоємних секторів (виробництво чавуну, сталі, цементного клінкеру, вапна, скла, кераміки, паперу, картону та ін.), авіацію і морський транспорт (з 2024 р.). Установки для спалювання побутових відходів номінальною тепловою потужністю більше 20 МВт з 2024 р. повинні здійснювати моніторинг і звітувати про свої викиди в СТВ ЄС. Це означає, що у найближчому майбутньому вони також будуть включені до меж цієї системи.

Загальний принцип функціонування СТВ ЄС полягає в тому, що кожна установка в межах системи має річну квоту на викиди парникових газів. Обсяг квот щорічно зменшується, що спонукає власників установок самостійно скорочувати емісію ПГ або купляти додаткові квоти на викиди на вуглецевому ринку. Одним із засобів скорочення викидів парникових газів є перехід на низьковуглецеві палива та відновлювані джерела енергії. Вже сьогодні в ЄС біомаса як паливо робить значний внесок в енергозабезпечення целюлозно-паперової і деревообробної промисловості, тоді як в інших галузях (хімічна, текстильна, промисловість, будівництво, металургія та ін.) її споживання поки є невеликим (рис. 4). Таким чином, нарощування споживання енергії з біомаси може суттєво скоротити викиди парникових газів у багатьох енергоємних галузях промисловості, що покращить їх становище у СТВ ЄС.

Для підсилення ефекту декарбонізації, у 2023 р. ЄС запровадив механізм вуглецевого коригування імпорту (СВАМ) [25]. СВАМ – перший у світі транскордонний тариф на викиди вуглецю. Цей механізм покликаний допомогти Євросоюзу виконати цілі по досягненню кліматичної нейтральності до 2050 р., запобігти витокам вуглецю і заохотити до чистішого промислового виробництва країни-експортери поза ЄС. На сьогодні СВАМ охоплює імпорт електроенергії, водню, цементу,

хімічних добрив, виробів з чавуну, сталі, алюмінію, тобто стосується секторів з інтенсивними викидами парникових газів. Більш екологічне, тобто із меншими викидами ПГ виробництво продукції із секторів СВАМ для експорту в ЄС може бути досягнуто, у тому числі, за рахунок використання ВДЕ.

Висновки та рекомендації для України

Послідовна кліматична і енергетична політика Європейського Союзу сприяє динамічному розвитку відновлюваної енергетики та планомірному скороченню викидів парникових газів. Регулярний аналіз досягнутих результатів і розгляд проблем, що виникали, дає можливість корегувати поставлені цілі та запроваджені механізми підтримки. Важливим фактором успіху є поєднання цілей з розвитку відновлюваної енергетики із цілями по декарбонізації, що відображено у Національних кліматичних та енергетичних планах країн ЄС. Функціонування СТВ ЄС також сприяє як скороченню викидів парникових газів, так і збільшенню обсягів споживання відновлюваної енергії, у тому числі енергії з біомаси.

Для України видається доцільним запроваджувати кращі практики ЄС у сферах ВДЕ та декарбонізації. Ці практики вже перевірені часом і мають передбачуваний й зрозумілий ефект. Позитивним фактором є схвалення у 2024 р. Національного плану з енергетики та клімату на період до 2030 року й Стратегії

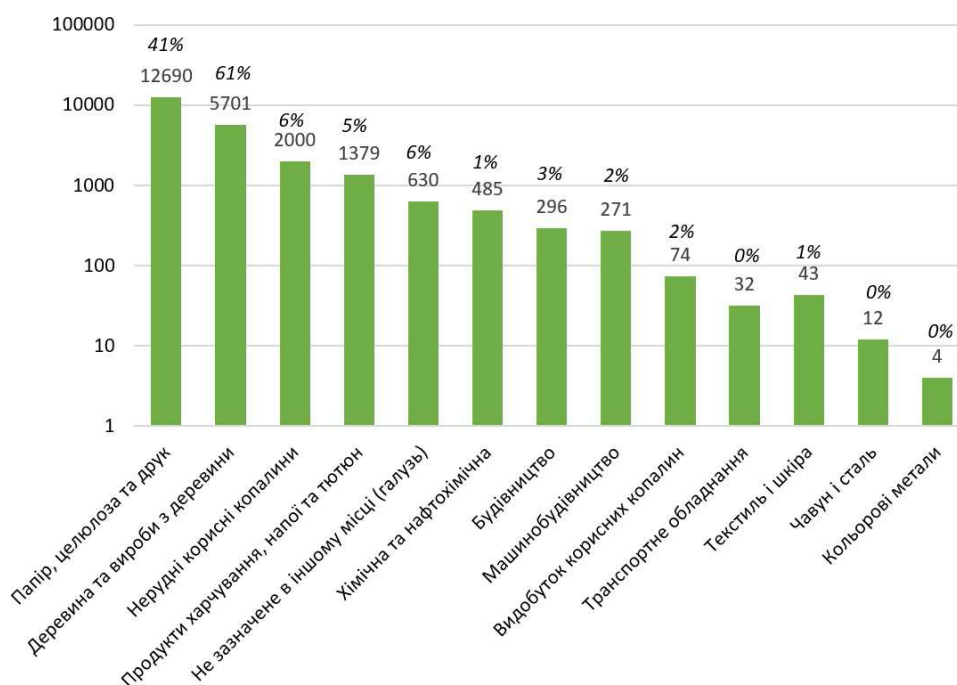


Рис. 4. Внесок біомаси до споживання енергії у різних секторах промисловості в ЄС-27, тис. т н.е. [1]

Fig. 4. Biomass contribution to energy consumption in different industry sectors in the EU-27 in 2022, ktoe [1]

формування та реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2035 року. Також іде процес розробки національної системи торгівлі квотами на викиди парникових газів за прикладом СТВ ЄС. Так, у лютому 2025 р. затверджено план впровадження національної СТВ у три етапи. Ця система може стати потужним інструментом для скорочення викидів ПГ і подальшого розвитку біоенергетики в Україні за умови її правильно організованих підготовки, впровадження і функціонування. Крім того, Україні треба готуватися до повноцінної участі у механізмі СВAM для можливості експорту своєї продукції в ЄС. Одним із інструментів зменшення вуглецевого сліду є використання відновлюваної енергії для виробництва продукції у секторах, охоплених СВAM.

Позитивною подією початку 2025 року стало започаткування експорту біометану з України в ЄС. Доведення біогазу до якості біометану, нарощування обсягів виробництва біометану відповідає пріоритетам розвитку біоенергетики Євросоюзу і сприяє підвищенню енергетичної безпеки як України, так і Європи в цілому. Цей сегмент біоенергетики обов'язково треба продовжувати розвивати в Україні, а також шукати шляхи для розширення сировинної бази виробництва біогазу/біометану. Перспективним напрямком може бути використання біомаси проміжних і покривних культур, що потребує окремих досліджень.

З 01.05.2025 набуває чинності вимога Закону України «Про альтернативні види палива» щодо нормативно визначеної обов'язкової частки вмісту рідкого біопалива (біокомпонентів) в обсягах автомобільних бензинів в Україні. Починаючи із зазначеного терміну, ця частка повинна бути не менш як 5% об'ємних, за абсолютної похибки визначення $\pm 1\%$. Необхідність виконання вимоги стосовно обов'язкової частки рідкого біопалива (біокомпонентів) в автомобільних бензинах сприятиме розвитку вітчизняного виробництва біоетанолу. Однак, це навряд чи вплине на ринок біодизелю, враховуючи що цей вид рідкого біопалива в Україні практично не виробляється вже протягом більше десяти років.

Виробництво відновлюваного дизелю, гідрочищеної рослинної олії, передових рідких біопалив, біопалив для авіації і морського транспорту є перспективними напрямками біоенергетики, які потребують аналізу міжнародного досвіду, визначення стратегій розвитку та впровадження раціональних механізмів підтримки в Україні. Загальною рекомендацією для України є розробка і прийняття національного «зе-

леного» курсу з усіма його складовими за прикладом європейського для забезпечення зваженого розвитку відновлюваної енергетики та планомірної декарбонізації промисловості, енергетики і транспорту.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Geelen J., Canon J. Bioenergy Landscape. Bioenergy Europe Statistical Report, 2024. <https://bioenergyeurope.org/statistical-reports/>
2. Bórawski P., Beldycka-Bórawska A., Jankowsk K.J. et al. Development of wind energy market in the European Union // Renewable Energy. – 2020, v. 161, p. 691-700. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.081>
3. Carty C., Claveria O. A synergistic analysis of solar and wind energy deployment in Europe // Environmental Development. – 2024, v. 49, 100967. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2024.100967>
4. Bumharter C., Bolonio D., Amez I. et al. New opportunities for the European biogas industry: a review on current installation development, production potentials and yield improvements for manure and agricultural waste mixtures // Journal of Cleaner Production. – 2023, v. 388, 135867. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135867>
5. Bórawski P., Beldycka-Bórawska A., Szymańska E.J. et al. Development of renewable energy sources market and biofuels in the European Union // Journal of Cleaner Production. – 2019, v. 228, p. 467-484. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.242>
6. Tsekeris G., Anastassakis G.N. Municipal solid waste-to-energy in EU-27 towards a circular economy // Recycling and Sustainable Development. – 2022, v. 15, N 1, p. 83-96. DOI: 10.5937/ror2201085T
7. Banja M., Sikkema R., Jégard M. et al. Biomass for energy in the EU – The support framework // Energy Policy. – 2019, v. 131, p. 215-228. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.04.038>
8. Panoutsou C. The role of sustainable biomass in the heat market sector for EU27 // Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment. – 2016, v. 5, N 4. <https://doi.org/10.1002/wene.197>
9. Желєзна Т.А., Драгнев С.В., Баишовий А.І. Аналіз успішних прикладів виробництва теплової енергії з агробіомаси в Європі // Теплофізика та теплоенергетика. – 2022, т. 44, № 2, с. 38-46. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2022.5>

10. Nagel N.O., Kirkerud J.G., Bolkesjø T.F. The economic competitiveness of flexibility options: A model study of the European energy transition // *Journal of Cleaner Production*. – 2022, v. 350, 131534. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131534>
11. Chyong C.K., Pollitt M., Reiner, D, Li C. Modelling flexibility requirements in deep decarbonisation scenarios: The role of conventional flexibility and sector coupling options in the European 2050 energy system // *Energy Strategy Reviews*. – 2024, v. 52, 101322. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101322>
12. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А., Драгнев С.В., Баитовий А.І. Основні тенденції та перспективи розвитку ринку моторних біопалив в ЄС та в Україні // *Теплофізика та теплоенергетика*. – 2020, т. 42, № 1, с. 69-76. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2020.8>
13. Железна Т.А., Баитовий А.І. Поточний стан та перспективи використання відновлюваної енергії у транспортному секторі // *Теплофізика та теплоенергетика*. – 2022, т. 44, № 1, с. 37-44. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2022.5>
14. Marconi P., Rosa L. Role of biomethane to offset natural gas // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2023, v. 183, 113697. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113697>
15. Sulewski P., Ignaciuk W., Szymańska M., Wąs A. Development of the Biomethane Market in Europe // *Energies*. – 2023, v. 16, N 4, 2001. <https://doi.org/10.3390/en16042001>
16. García Álvarez M.T., Pineiro Villaverde G., Soares I. Renewables, taxes and competitive markets: the role of energy policies on the EU's sustainable energy consumption // *Environment, Development and Sustainability*. – 2023. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03891-w>
17. Железна Т.А. Європейський «зелений» курс і нові можливості для розвитку відновлюваної енергетики // *Теплофізика та теплоенергетика*. – 2021, т. 43, № 1, с. 75-81. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.9>
18. Domorenok E., Graziano P. Understanding the European Green Deal: A Narrative Policy Framework Approach // *European Policy Analysis*. – 2023, v. 9, N 1, p. 9-29. <https://doi.org/10.1002/epa2.1168>
19. Gontkovičová B., Duřová Spišáková E. Climate and energy targets under Europe 2020 strategy and their fulfilment by member states // *Front. Environ. Sci.* – 2023, v. 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1264770>
20. Palmisano G.O. et al. Evaluating the Progress of the EU Countries Towards Implementation of the European Green Deal: A Multiple Criteria Approach // *Land*. – 2025, 14 (1), 141. <https://doi.org/10.3390/land14010141>
21. Bluszcz A., Manowska A., Mansor N.S. Assessment of the Potential of European Union Member States to Achieve Climate Neutrality // *Sustainability*. – 2024, v. 16, N 3, 1311. <https://doi.org/10.3390/su16031311>
22. Kattelmann F., Siegle J., Cunha Montenegro R. et al. How to Reach the New Green Deal Targets: Analysing the Necessary Burden Sharing within the EU Using a Multi-Model Approach // *Energies*. – 2021, 14 (23), 7971. <https://doi.org/10.3390/en14237971>
23. *REPowerEU Plan*. COM/2022/230 final, Brussels, 18.5.2022. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A230%3AFIN&qid=1653033742483>
24. Maris G., Flouros F. The Green Deal, National Energy and Climate Plans in Europe: Member States' Compliance and Strategies // *Administrative Sciences*. – 2021, v. 11, N3, 75. <https://doi.org/10.3390/admsci11030075>
25. Bellora C., Fontagné L. EU in search of a Carbon Border Adjustment Mechanism // *Energy Economics*. – 2023, v. 123, 106673. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106673>

ANALYSIS OF TRENDS FOR BIOENERGY DEVELOPMENT AND REDUCTION OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN THE EU

Zheliezna T.A.¹, Drahnev S.V.²

¹PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0002-9607-3022, e-mail: zheliezna@secbiomass.com

²PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0003-3754-4186, e-mail: dragnev@secbiomass.com

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2025.9>

The aim of the work is to prepare recommendations for the development of priority areas of bioenergy in Ukraine and acceleration of the decarbonization process. In general, it seems advisable for Ukraine to implement the best EU's strategies and practices for the development of renewable energy and the reduction of greenhouse gas emissions. These mechanisms have already been tested by time and have a predictable and understandable effect. An analysis of the EU's energy performance over the past decades shows consistent trends in reducing total energy consumption and increasing the share of renewable energy sources in it. Biomass remains the largest component of renewable energy sources in the European Union and provides more than half of the total renewable energy production. Solid biomass traditionally makes the largest contribution (almost 70% in 2022) to the total production of energy from biomass. Biomass, primarily solid one, is most actively used to obtain heat. In Latvia and Estonia, almost all renewable heat is produced from biomass; in Croatia, Lithuania, Poland, and Slovakia, this figure is more than 90%, and on average in the EU it is 81%. Reducing greenhouse gas emissions is one of the main tasks of the European Union's climate policy. The European Green Deal adopted in 2019 set the goal of achieving climate neutrality in Europe by 2050. The priority development of renewable energy sources is an effective mechanism for achieving the EU's climate goals, as well as for solving another important task – increasing energy security through diversification of energy supply sources. A powerful tool for increasing energy efficiency and reducing greenhouse gas emissions is the Greenhouse Gas Emissions Trading System, which has been operating in the EU since 2005. Ukraine is in the process of developing and preparing for the implementation of a similar national system following the example of the European one. A

positive event in early 2025 was the launch of biomethane exports from Ukraine to the EU. The production of biomethane must be further developed in Ukraine, and ways to expand the feedstock base must be sought. A promising direction may be the use of biomass of intermediate and cover crops, which requires separate study. The production of renewable diesel, hydrotreated vegetable oil, advanced biofuels, biofuels for aviation and maritime transport are promising areas of bioenergy for Ukraine which require the analysis of international experience, determination of development strategies and implementation of reasonable support mechanisms. A general recommendation for Ukraine is to elaborate and adopt a national green deal with all its components following the example of the European Green Deal to ensure balanced development of renewable energy and systematic decarbonization of industry, energy and transport.

References 25, tables 3, figures 4.

Key words: renewable energy, bioenergy, biomass, biogas, biomethane, biofuel.

1. *Geelen J., Canon J.* Bioenergy Landscape. Bioenergy Europe Statistical Report, 2024.

<https://bioenergyeurope.org/statistical-reports/>

2. *Bórawski P., Beldycka-Bórawska A., Jankowsk K.J.* et al. Development of wind energy market in the European Union // *Renewable Energy*. – 2020, v. 161, p. 691-700. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.081>

3. *Carty C., Claveria O.* A synergistic analysis of solar and wind energy deployment in Europe // *Environmental Development*. – 2024, v. 49, 100967. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2024.100967>

4. *Bumharter C., Bolonio D., Amez I.* et al. New opportunities for the European biogas industry: a review on current installation development, production potentials and yield improvements for manure and agricultural waste mixtures // *Journal of Cleaner Production*. – 2023, v. 388, 135867. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135867>

5. *Bórawski P., Beldycka-Bórawska A., Szymańska E.J.* et al. Development of renewable energy sources market and biofuels in the European Union // *Journal of Cleaner Production*. – 2019, v. 228, p. 467-484. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.242>

6. *Tsekeris G., Anastassakis G.N.* Municipal solid waste-to-energy in EU-27 towards a circular economy // *Recycling and Sustainable Development*. – 2022, v. 15, N 1, p. 83-96. DOI: 10.5937/ror2201085T

7. *Banja M., Sikkema R., Jégard M.* et al. Biomass for energy in the EU – The support framework // *Energy Policy*. – 2019, v. 131, p. 215-228. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.04.038>

8. *Panoutsou C.* The role of sustainable biomass in the heat market sector for EU27 // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*. – 2016, v. 5, N 4. <https://doi.org/10.1002/wene.197>
9. *Zheliezna T.A., Drahniev S.V., Bashtoyvi A.I.* Analiz uspishnykh prykladiv vyrobnytstva teplovoi enerhii z ahrobiomasy v Yevropi [Analysis of successful cases of heat production from agrobiomass in Europe.]. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. – V. 44, № 2 (2022), P. 38-46. (Ukr.) <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2022.5>
10. *Nagel N.O., Kirkerud J.G., Bolkesjø T.F.* The economic competitiveness of flexibility options: A model study of the European energy transition // *Journal of Cleaner Production*. – 2022, v. 350, 131534. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131534>
11. *Chyong C.K., Pollitt M., Reiner, D, Li C.* Modelling flexibility requirements in deep decarbonisation scenarios: The role of conventional flexibility and sector coupling options in the European 2050 energy system // *Energy Strategy Reviews*. – 2024, v. 52, 101322. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101322>
12. *Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Drahniev S.V., Bashtoyvi A.I.* Osnovni tendentsii ta perspektyvy rozvytku rynku motornykh biopalyv v YeS ta v Ukraini [Main trends and prospects for the development of transport biofuels market in the EU and Ukraine.]. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. – V. 42, № 1 (2020), P. 69-76. (Ukr.) <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2020.8>
13. *Zheliezna T.A., Bashtoyvi A.I.* Potochnyi stan ta perspektyvy vykorystannia vidnovliuvanoi enerhii u transportnomu sektori [Current situation and prospects of renewable energy use in the transport sector.]. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. – V. 44, № 1 (2022), P. 37-44. (Ukr.) <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2022.5>
14. *Marconi P., Rosa L.* Role of biomethane to offset natural gas // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2023, v. 183, 113697. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113697>
15. *Sulewski P., Ignaciuk W., Szymańska M., Wąs A.* Development of the Biomethane Market in Europe // *Energies*. – 2023, v. 16, N 4, 2001. <https://doi.org/10.3390/en16042001>
16. *García Álvarez M.T., Pineiro Villaverde G., Soares I.* Renewables, taxes and competitive markets: the role of energy policies on the EU's sustainable energy consumption // *Environment, Development and Sustainability*. – 2023. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03891-w>
17. *Zheliezna T.A.* Yevropeyskyi «zelenyi» kurs i novi mozhlyvosti dlia rozvytku vidnovliuvanoi enerhetyky [European Green Deal and new opportunities for the development of renewable energy.]. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. – V. 43, № 1 (2021), P. 75-81. (Ukr.) <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.9>
18. *Domorenok E., Graziano P.* Understanding the European Green Deal: A Narrative Policy Framework Approach // *European Policy Analysis*. – 2023, v. 9, N 1, p. 9-29. <https://doi.org/10.1002/epa2.1168>
19. *Gontkovičová B., Duřová Spišáková E.* Climate and energy targets under Europe 2020 strategy and their fulfilment by member states // *Front. Environ. Sci.* – 2023, v. 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1264770>
20. *Palmisano G.O. et al.* Evaluating the Progress of the EU Countries Towards Implementation of the European Green Deal: A Multiple Criteria Approach // *Land*. – 2025, 14 (1), 141. <https://doi.org/10.3390/land14010141>
21. *Bluszcz A., Manowska A., Mansor N.S.* Assessment of the Potential of European Union Member States to Achieve Climate Neutrality // *Sustainability*. – 2024, v. 16, N 3, 1311. <https://doi.org/10.3390/su16031311>
22. *Kattelman F., Siegle J., Cunha Montenegro R. et al.* How to Reach the New Green Deal Targets: Analysing the Necessary Burden Sharing within the EU Using a Multi-Model Approach // *Energies*. – 2021, 14 (23), 7971. <https://doi.org/10.3390/en14237971>
23. *REPowerEU Plan.* COM/2022/230 final, Brussels, 18.5.2022. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A230%3AFIN&qid=1653033742483>
24. *Maris G., Flouros F.* The Green Deal, National Energy and Climate Plans in Europe: Member States' Compliance and Strategies // *Administrative Sciences*. – 2021, v. 11, N 3, 75. <https://doi.org/10.3390/admsci11030075>
25. *Bellora C., Fontagné L.* EU in search of a Carbon Border Adjustment Mechanism // *Energy Economics*. – 2023, v. 123, 106673. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106673>

Отримано 18.03.2025

Received 18.03.2025

Прийнято до друку 10.05.2025

Accepted for publication 10.05.2025