УДК 620.92

ГЛОБАЛЬНІ ПЕРСПЕКТИВИ СЕКТОРУ БІОЕНЕРГЕТИКИ

Гелетуха Г.Г., докт. техн. наук, Желєзна Т.А., канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, Київ, 03057, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2021.9>

Представлено аналіз сценаріїв розвитку світової біоенергетики, у тому числі по окремим секторам. Наведено приклади успішного впровадження потужних біоенергетичних проєктів із використанням сучасних технологій. Визначено пріоритетні напрямки розвитку біоенергетики України.

Представлен анализ сценариев развития мировой биоэнергетики, в том числе по отдельным секторам. Приведены примеры успешной реализации крупных биоэнергетических проектов с использованием современных технологий. Определены приоритетные направления развития биоэнергетики Украины.

Analysis of scenarios for the global bioenergy development, including the development in individual sectors is presented. Examples of successful implementation of large-scale modern bioenergy projects are given. Priority directions of bioenergy development in Ukraine are determined.

Бібл. 10, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: біоенергетика, біомаса, біопаливо, біогаз, біометан, відновлювані джерела енергії.

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;

ЗППЕ – загальне постачання первинної енергії;

ТЕС – теплова електростанція;

ТЕЦ – теплоелектроцентрально;

ТН – тепловий насос;

Актуальність роботи обумовлена необхідністю впровадження «зеленого» енергетичного переходу в Україні. Значний ріст частки відновлюваних джерел енергії в енергетичному балансі країни призведе до суттєвого скорочення споживання викопних палив та зменшення викидів парникових газів. Розвиток біоенергетичних технологій сприятиме прямому заміщенню природного газу і вуглецево-нейтральному балансуванню енергосистеми з високою часткою ВДЕ. Метою роботи є аналіз глобальних сценаріїв розвитку біоенергетики, у тому числі в окремих секторах, а також визначення пріоритетних напрямків розвитку біоенергетики в Україні. Методи дослідження включають вивчення літературних, статистичних та інших даних, проведення оцінок та розрахунків.

Сучасний стан розвитку біоенергетики та її глобальний потенціал

На сьогодні біоенергетика впевнено займає місце лідера світової відновлюваної енергетики, відіграючи значну роль у заміщенні викопних палив та скороченні викидів парникових газів. Протягом останніх двадцяти років постачання первинної енергії з біомаси та біопалив у світі збільшилося на третину і сягнуло понад 56000 ПДж/рік. Це становить більше 10% загального постачання первинної енергії або майже 70%

COP – коефіцієнт перетворення;

н.е. – нафтовий еквівалент.

Індекси нижні:

ел. – електричний;

т – тепловий.

ЗППЕ з відновлюваних джерел. Аналогічна ситуація в ЄС – близько 11% первинної енергії забезпечується біоенергетикою, що складає понад 65% загального внеску всіх відновлюваних джерел енергії.

За оцінкою незалежної консультативної компанії CE Delft (Нідерланди), у 2050 р. максимальний сталий потенціал біоенергетики в світі (1715 ЕДж) у три рази перевищуватиме ЗППЕ 2015 року (571 ЕДж) (табл. 1) [1]. Глобальне виробництво енергії з біомаси у 2050 р. може бути збільшено майже у 35 разів порівняно з 2015 р. (50 ЕДж).

Прогнозується можливість різкого (у вісім разів і більше) росту глобального потенціалу біоенергетики у період 2030-2050 рр. При цьому оцінений сталий потенціал становить приблизно половину технічного. Без врахування водної біомаси (водоростей), сталий потенціал біоенергетики складає близько 40% технічного потенціалу у 2030 році та 20% у 2050 році. Результати оцінки показують, що водна біомаса може зіграти важливу роль у 2050 році, суттєво зменшивши відносний внесок наземної біомаси у виробництво енергії – з 55...80% у 2030 році до 5...35% у 2050 році. Якщо розглядати лише сталий потенціал, частка наземної біомаси складе близько 60% у 2030 році та 15% у 2050 році.

Прогнози розвитку біоенергетики до 2050 року

Для ефективної боротьби з наслідками зміни клімату глобальна енергетична система повинна пройти через глибоку трансформацію – від системи, що значною мірою базується на викопних паливах, до такої, що підвищує енергоефективність і базується на ВДЕ. Процеси впровадження ВДЕ та підвищення енергоефективності мають розвиватися в усіх секторах економіки. Разом вони можуть забезпечити понад 90% скорочення викидів CO₂, пов'язаних з енергоспоживанням.

У період до 2050 року всі країни світу здатні істотно збільшити частку ВДЕ в своєму енергетичному балансі. Міжнародне агентство з відновлюваної енергетики (IRENA) прогнозує, що ВДЕ можуть становити 60% і більше від загального обсягу кінцевого споживання енергії багатьох країн. Наприклад, Китай може збільшити частку ВДЕ у споживанні енергії з 7% у 2015 р. до 67% у 2050 р. В ЄС ця частка може зрости від 17% до понад 70%. В Індії та США обсяги енергії з ВДЕ у загальному енергоспоживанні можуть досягти двох третин і більше. Біоенергетика

Табл. 1. Оцінка глобального потенціалу первинної енергії з біомаси у 2030 та 2050 роках (ЕДж) [1]

Вид біомаси	Потенціал у 2030 р., ЕДж		Потенціал у 2050 р., ЕДж	
	Технічний	Сталий	Технічний	Сталий
Енергетичні культури	25...90	25...40	25...330	25...110
Сільськогосподарські відходи та залишки	25...190	10...65	25...560	10...65
Лісові продукти та залишки	30...70	25...40	45...265	25...40
Водна біомаса (водорості*)	50...100	50...100	1000...2000	750...1500
Разом з водною біомасою	130...450	110...245	1095...3155	810...1715
Разом без водної біомаси	80...350	60...145	95...1155	60...215

* Включають макроводорості (виросшуються в морі) та мікроводорості (виросшуються у відкритих ставках або біореакторах).

Рис. 1. Структура постачання первинної енергії у світі, ЕДж [3]:

- 1 – атомна енергія; 2 – вугілля; 3 – природний газ; 4 – нафта; 5 – водорості; 6 – енергетичні рослини; 7 – відходи рубок; 8 – традиційна біомаса; 9 – відновлювана частина відходів; 10 – гідроелектроенергія; 11 – геотермальне тепло; 12 – геотермальна електроенергія; 13 – сонячна теплова енергія; 14 – геліотермічна (тепло); 15 – геліотермічна (електроенергія); 16 – геліоелектрична; 17 – енергія хвиль; 18 – енергія вітру (офшорні ВЕС); 19 – енергія вітру (наземні ВЕС)

відіграватиме ключову роль в реалізації «зеленого» енергетичного переходу і скороченні викидів парникових газів у світі. IRENA оцінює, що частка біомаси у кінцевому споживанні відновлюваної енергії складатиме майже половину у 2030 р. і 40% у 2050 р. Для утримання росту глобальної температури на Землі в межах 2 °С, серед іншого, необхідно подвоїти виробництво енергії з біомаси до 2050 р. [2].

Компанія Ecsfys (Нідерланди) розробила амбітний сценарій досягнення 95% світової потреби в енергії за рахунок ВДЕ до 2050 року. Згідно цього сценарію, як і в прогнозах IRENA, близько 40% всієї відновлюваної енергії буде забезпечено за рахунок біомаси (рис. 1) [3].

Важливо зазначити, що за прогнозами Міжнародного енергетичного агентства (ІЕА), починаючи з 2030 року очікується використання тільки сучасних біоенергетичних технологій із ростом обсягу споживання «сучасної» біомаси до близько 100 ЕДж у 2050 році (рис. 2) [4].

Європейський Союз прикладає максимальних зусиль для «озеленення» своєї енергетики та скорочення викидів парникових газів. В кінці 2019 р. в ЄС було запроваджено Європейський зелений курс – комплексну стратегію переходу Європи до сталої економіки, чистої енергетики і кліматичної нейтральності до 2050 р. За оцінками Єврокомісії, для досягнення амбітної мети по скороченню до нуля викидів пар-

никових газів, частка біоенергетики у загальному енергетичному міксі має становити принаймні 20% (близько 30% всіх ВДЕ) у 2050 р. [5].

Прогнози розвитку біоенергетики в окремих секторах до 2050 року

Міжнародне агентство з відновлюваної енергетики розробило прогноз впровадження ВДЕ до 2050 року в усіх ключових секторах [6]. Згідно оцінкам IRENA, виробництво електроенергії у світі протягом 2015-2050 рр. зросте майже вдвічі із забезпеченням 85% загального обсягу за рахунок ВДЕ. Внесок біомаси – 5% всіх відновлюваних або 4% загального обсягу виробництва. Компанія Ecsfys прогнозує, що у 2050 році близько 12% глобального виробництва електроенергії буде забезпечено за рахунок біомаси (рис. 3).

В електроенергетичному секторі ЄС, згідно різних сценаріїв (80...100% «зеленої» електроенергії до 2050 р.), частка біомаси у виробництві електроенергії складатиме 10...12% [7].

На сьогодні біомаса забезпечує близько 17% загальної потреби ЄС в теплі і холоді, що відповідає 87% внеску всіх ВДЕ. За останні двадцять років обсяг споживання тепла з біомаси в Європі збільшився в 1,7 разів – з 52 до 90 млн т н.е./рік. Прогнозується, що значний внесок біоенергетики у виробництво тепла з ВДЕ залишиться у довготривалій перспективі. Європейською платформою з відновлюваного тепла і

Рис. 2. Структура постачання первинної енергії з біомаси у світі, ЕДж/рік [4]:

1 – традиційне використання біомаси; 2 – втрати енергії при перетворенні; 3 – біогаз; 4 – рідкі біопалива; 5 – використання біомаси у будівлях та сільському господарстві; 6 – використання біомаси у промисловості; 7 – електроенергія; • – частка сучасної біоенергетики у ЗПТЕ (права вісь)

холода (RHC-ETIP) розглянуто два сценарії розвитку сектору опалення та охолодження до 2040 року – досягнення 50% (базовий) або 100% (амбіційний) тепла і холоду з ВДЕ. За обома сценаріями біомаса забез-

печуватися близько третини загального виробництва теплової енергії (понад 100 млн т н.е./рік) (рис. 4) [8].

При цьому в базовому сценарії частка біомаси від всіх ВДЕ у 2040 р. становитиме більше 65%, а

Рис. 3. Виробництво електроенергії у світі за джерелами, ЕДж [3].

1 – атомна енергія; 2 – нафта; 3 – природний газ; 4 – вугілля; 5 – енергетичні рослини; 6 – відходи рубок та інші види відходів; 7 – геотермальна електроенергія; 8 – гідроелектроенергія; 9 – геліотермічна; 10 – геліоелектрична; 11 – енергія хвиль; 12 – енергія вітру (офішорні ВЕС); 13 – енергія вітру (наземні ВЕС)

Рис. 4. Виробництво теплової енергії в ЄС за джерелами, млн т н.е. [8]:

1 – тепло з невідновлюваних джерел енергії; 2 – тепло з біомаси; 3 – геотермальне тепло; 4 – сонячна теплова енергія; 5 – тепло з ВДЕ для опалення та виробничих процесів; 6 – теплові насоси (тепло отчужающего середовища та геотермальне); 7 – відновлювані гази та водень

в амбіційному – близько третини через суттєве зростання використання теплових насосів. Важливо зазначити, що різкий ріст обсягів виробництва тепла тепловими насосами до 2040 р. видається ймовірним для країн з теплим кліматом, для яких коефіцієнт перетворення ТН може досягти величини 3 і більше, що забезпечує ефективність роботи ТН. В країнах з холодними зимами (у тому числі в Україні) середньосезонний COP не досягає величини 3, і це стримує економічну доцільність широкого впровадження теплових насосів.

За оцінкою IRENA, у 2050 р. ВДЕ зможуть забезпечити 77% загальної потреби будівель в енергії у світі, у тому числі 48% – за рахунок «зеленої» електроенергії, 14% – за рахунок «сучасної» біомаси. При цьому біомаса (із застосуванням сучасних технологій) залишиться найпотужнішим джерелом відновлюваної енергії для будівель, постачаючи 30% необхідної енергії для опалення та приготування їжі. Це передбачає трикратний ріст обсягу її використання порівняно з поточним рівнем. Кінцеве споживання енергії у промисловості у 2050 році забезпечуватиметься на 63% за рахунок ВДЕ, у тому числі 36% – відновлюваною електроенергією, 19% – біомасою [6].

У транспортному секторі перехід на ВДЕ прогнозується найбільш складним. Навіть у 2050 р. 42% енергетичної потреби сектору у світі забезпечуватимуть викопні види палива, що підкреслює необхідність глибокої трансформації. Для досягнення очікуваних 22% частки біомаси в кінцевому споживанні енергії на транспорті у 2050 р. (38% внеску всіх ВДЕ), обсяг виробництва рідких біопалив

протягом 2015-2050 рр. має зрости майже у дев'ять разів і скласти 1120 млрд л/рік, близько половина з яких – біопалива другого покоління [9].

Для досягнення цілей Європейського зеленого курсу, до 2050 року також очікується суттєвий ріст споживання рідких біопалив та біогазу/біометану на транспорті із забезпеченням 20...30% загальної потреби в енергії сектору (рис. 5).

Переваги розвитку біоенергетики

На тлі безперечного визнання в Європі і в світі ключової ролі біоенергетики у боротьбі зі зміною клімату викликають занепокоєння певні дискусії про безперспективність енергетичного використання біомаси, що існують в Україні. Зокрема, висловлюється думка, що біоенергетика – це щось застаріле і пов'язане з технологіями минулого. Частково таке враження може бути викликане тим, що в сільській місцевості жителі часто використовують дрова у пічках, грубках та інших побутових пристроях. Цей сектор біоенергетики класифікується як «традиційна біоенергетика» і дійсно поступово відходить у минуле. Проте на його місце заходить сектор «сучасної біоенергетики», до якого відносяться сучасні технології сталювання біомаси на котельнях, ТЕС та ТЕЦ, біогазові і біометанові технології, а також технології виробництва рідких біопалив першого і другого покоління.

У світі і в ЄС існує багато прикладів успішного впровадження подібних проектів сучасної біоенергетики. Наприклад, в центрі Стокгольму з населенням 2,3 млн чол. працює одна з найбільших в світі ТЕЦ на біомасі (130 МВт_{ел.} + 280 МВт_{т.}). За раху-

Рис. 5. Споживання енергії на транспорті в ЄС за видами джерел, млн т н.е. [10]:

**1 – нафтопродукти; 2 – рідкі біопалива; 3 – природний газ; 4 – електроенергія; 5 – водень;
6 – біометан; 7 – відновлювані гази; 8 – синтетичне біопаливо;**

***,** – варіанти сценаріїв розвитку до 2050 року**

нок біомаси забезпечується 80% потреби міста в теплі і 20% енергії на транспорті. До 2030 р. планується перехід міста на 100% ВДЕ. У Вільнюсі (550 тис. чол.) працює найбільша у Східній Європі ТЕЦ на біомасі (70 МВт_{сл.} + 164 МВт_{т.}). Біоенергетика забезпечує місту 85% потреби в теплі і 25% потреби в електроенергії. До 2040 р. у Вільнюсі планується досягти 100% теплової енергії з ВДЕ. У Копенгагені 98% житлового фонду (включаючи приватний сектор) підключено до системи централізованого тепlopостачання, яка є повністю конкурентною. В місті функціонують декілька великих ТЕЦ на біомасі загальною тепловою потужністю 1,3 ГВт. Наразі біомаса забезпечує 90% потреби Копенгагену в теплі і 20% енергії в секторі транспорту. До 2040 р. планується досягти 100% всієї енергії з ВДЕ.

Наведені приклади демонструють можливість будівництва потужних біоенергетичних об'єктів у великих містах, що мають системи централізованого тепlopостачання, виконуючи при цьому високі вимоги щодо зниження шуму і безпечної роботи через близькість до житлових районів.

Також існує думка, що в майбутньому можна досягти практично 100% частки застосування електроенергії в опаленні і на транспорті, через що для біомаси в цих секторах не залишається місця. Автори статті не розділяють цієї думки і вбачають значну роль біоенергетики в зазначених секторах, в тому числі у довгостроковій перспективі. У підтвердження цього, згідно переважній більшості існуючих прогнозів на глобальному та європейському рівні (у тому числі наведених вище), на довгострокову перспективу залишається значний внесок біоенергетики у виробництво відновлюваної теплової енергії та у забезпеченні енергії на транспорті.

Перспективи біоенергетики в електроенергетичному секторі вбачаються у комбінованому виробництві теплової та електричної енергії (ТЕЦ на біомасі), а також через застосування біометану – у балансуванні енергосистем з високою часткою ВДЕ. Потенціал виробництва біометану в Україні оцінюється у 7,8 млрд м³/рік. Цього обсягу більше ніж достатньо для повного переведення необхідної газової маневреної генерації на біометан. Вважаємо декарбонізацію маневрених газових потужностей через використання біометану однією з найбільш перспективних опцій для підвищення маневреності енергетичної системи України з високою часткою ВДЕ.

Висновки

Аналіз існуючих прогнозів і сценаріїв трансформації світової та Європейської енергетики показує безперечну перспективність довгострокового розвитку біоенергетики, демонструє її значний внесок в реалізацію «зеленого» переходу, декарбонізацію енергетики і боротьбу зі зміною клімату. У 2050 році біоенергетиці відводиться 25...40% у кінцевому споживанні енергії, 30...40% – у загальному виробництві енергії з ВДЕ; 10...12% – у кінцевому споживанні відновлюваної електроенергії, 30...65% – у кінцевому споживанні відновлюваної теплової енергії, 30...40% – у кінцевому споживанні відновлюваної енергії на транспорті.

Для України пріоритетними напрямками вбачаються комбіноване виробництво теплової і електричної енергії з біомаси, а також виробництво біометану для прямого заміщення природного газу і вуглецево-нейтрального балансування енергосистем з високою часткою ВДЕ. В секторі теплової енергії рекомендується впровадження сучасних котлів і ТЕЦ на біомасі переважно аграрного походження. Для сектору транспорту перспективи полягають у виробництві рідких біопалив першого і другого покоління, а також біометану з біомаси, отриманої з дотриманням критеріїв сталості.

ЛІТЕРАТУРА:

1. D. Nelissen, J. Faber, R. van der Veen et al. Availability and costs of liquefied bio- and synthetic methane. CE Delft, Delft, 2020. <https://bit.ly/3zqURGL>
2. *Renewable Energy: a key climate solution*, IRENA. <https://www.irena.org/climatechange/Renewable-Energy-Key-climate-solution>
3. *The Energy Report. 100% Renewable Energy by 2050*, WWF, Ecofys, OMA, 2011. https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/101223_energy_report_final_print_2.pdf
4. *Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector*, IEA, 2021. https://read.oecd-ilibrary.org/energy/net-zero-by-2050_c8328405-en#page78
5. M. Leonard, J. Pisani-Ferry, J. Shapiro et al. The geopolitics of the European Green Deal. Policy Brief, 2021. <https://ecfr.eu/publication/the-geopolitics-of-the-european-green-deal/>
6. *Global Energy Transformation. A Roadmap to 2050*, IRENA, 2018. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Report_GET_2018.pdf

7. *W. Zappa, M. Junginger, M. van den Broek*. Is a 100% renewable European power system feasible by 2050? // *Applied Energy*. – 2019, v. 233-234, p. 1027-1050. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.109>

8. *Strategic Research and Innovation Agenda for Climate-Neutral Heating and Cooling in Europe*, RHC-ETIP, 2020.

<https://www.rhc-platform.org/content/uploads/2020/10/RHC-ETIP-SRIA-2020-WEB.pdf>

9. *Doubling Bioenergy Use Essential for Global Sustainability*, IRENA, 2017. <https://bit.ly/2Wp1hHQ>

10. *Sustainable Mobility for all: Climate Neutral Liquid Fuels*. Sustainable Fuels 2050 Vision.

<https://www.sustainablefuels.eu/assets/uploads/2020/10/SF-Vision2050-V10-002.pdf>

GLOBAL PROSPECTS FOR BIOENERGY SECTOR

Geletukha G.G., Zheliezna T.A

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Marii Kapnist, 2a, Kyiv, 03057, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2021.9>

The aim of the work is to analyze some global scenarios for bioenergy development, including the development in certain sectors, as well as to identify priority areas for bioenergy in Ukraine. Today, bioenergy is a world leader in renewable energy, playing a significant role in replacing fossil fuels and reducing greenhouse gas emissions. Over the last twenty years, the global primary energy supply from biomass and biofuels has tripled and reached more than 10% of the total primary energy supply, accounting for almost 70% of the contribution of all renewable sources. The International Renewable Energy Agency predicts that by 2050, renewable energy sources could account for 60% or more of the total final energy consumption of many countries. The share of biomass in the global final consumption of renewable energy might be almost half in 2030 and 40% in 2050. According to the International Energy Agency, starting from 2030, one can expect to use only modern bioenergy technologies with increasing consumption of modern biomass up to about 100 EJ in 2050. For Ukraine, the priority areas seem to be combined heat and power production from biomass, as well as production of biomethane for the direct replacement of natural gas and carbon-neutral balancing of the energy system with a high share of renewable sources. For the thermal energy sector, the introduction of modern boilers and CHP plants running mainly on agricultural biomass is recommended. For the transport sector, prospects are the production of first and second generation liquid biofuels, as well as biomethane from biomass obtained in compliance with sustainability criteria.

References 10, table 1, figures 5.

Key words: bioenergy, biomass, biofuels, biogas, biomethane, renewable energy sources.

1. D. Nelissen, J. Faber, R. van der Veen et al. Availability and costs of liquefied bio- and synthetic methane. CE Delft, Delft, 2020. <https://bit.ly/3zqURGL>
2. *Renewable Energy: a key climate solution*, IRENA. <https://www.irena.org/climatechange/Renewable-Energy-Key-climate-solution>
3. *The Energy Report. 100% Renewable Energy by 2050*, WWF, Ecofys, OMA, 2011. https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/101223_energy_report_final_print_2.pdf
4. *Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector*, IEA, 2021. https://read.oecd-ilibrary.org/energy/net-zero-by-2050_c8328405-en#page78
5. M. Leonard, J. Pisani-Ferry, J. Shapiro et al. The geopolitics of the European Green Deal. Policy Brief, 2021. <https://ecfr.eu/publication/the-geopolitics-of-the-european-green-deal/>
6. *Global Energy Transformation. A Roadmap to 2050*, IRENA, 2018. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Report_GET_2018.pdf
7. W. Zappa, M. Junginger, M. van den Broek. Is a 100% renewable European power system feasible by 2050? // *Applied Energy*. – 2019, v. 233-234, p. 1027-1050. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.109>
8. *Strategic Research and Innovation Agenda for Climate-Neutral Heating and Cooling in Europe*, RHC-ETIP, 2020. <https://www.rhc-platform.org/content/uploads/2020/10/RHC-ETIP-SRIA-2020-WEB.pdf>
9. *Doubling Bioenergy Use Essential for Global Sustainability*, IRENA, 2017. <https://bit.ly/2Wp1hHQ>
10. *Sustainable Mobility for all: Climate Neutral Liquid Fuels. Sustainable Fuels 2050 Vision*. <https://www.sustainablefuels.eu/assets/uploads/2020/10/SF-Vision2050-V10-002.pdf>

Отримано 21.10.2021

Received 21.10.2021