

ЕКОНОМІЧНІ ТА ЕКОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЄКТІВ ВИРОБНИЦТВА БІОМЕТАНУ З ПРОМІЖНИХ КУЛЬТУР В УКРАЇНІ

Отримано 15 трав. 2025 р.; рекомендовано до публікації 22 вер. 2025 р.
Доступно онлайн 30 вер. 2025 р.

Гелетука Г. Г.¹, Желєзна Т. А.², Драгнєв С. В.³,
Кучерук П. П.⁴, Крамар В. Г.⁵

Автор для кореспонденції: Желєзна Тетяна,
e-mail: zhelyezna@uabio.org

Біометан має широку сферу застосування з можливістю заміщення викопних енергоносіїв у різних секторах економіки. Важливою характеристикою сталості біометану є обсяг викидів парникових газів протягом його життєвого циклу. Значний вплив на це має біомасова сировина, з якої отримують біометан. Метою роботи є аналіз можливостей виробництва біометану з проміжних культур в Україні з урахуванням питань сталості й економічної доцільності. Для досягнення поставленої мети було виконано техніко-економічне обґрунтування типового проєкту виробництва біометану з проміжних культур і проведено аналіз життєвого циклу біометану. Визначено, що для забезпечення низьких викидів парникових газів у сировинну суміш необхідно додавати гній тварин. Ще одним заходом для цього є уловлення й зрідження діоксиду вуглецю, який виділяється при очищенні та збагаченні біогазу до якості природного газу. Таким чином в досліджуваному проєкті вдалося досягти від'ємної емісії парникових газів на рівні -13 г CO₂-екв/МДж. Цей показник визначає високу оцінку сталості біометану. Результати техніко-економічного обґрунтування показують, що за прийнятих вхідних даних і вибраної фінансової моделі проєкт виробництва біометану з проміжних культур є достатньо інвестиційно привабливим з внутрішньою нормою рентабельності близько 20 % та індексом прибутковості 0,41. При цьому проєкт є доволі чутливим до зміни ключових економічних параметрів, насамперед капітальних витрат і ціни продажу біометану.

Ключові слова: біоенергетика, біомаса, енергетичний потенціал, біогаз, біометан, проміжні культури.

¹ д-р. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0002-5249-3092>

² канд. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0002-9607-3022>

³ канд. техн. наук, доцент
<https://orcid.org/0000-0003-3754-4186>

⁴ канд. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0003-1888-0774>

⁵ канд. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0002-8750-6885>

^{1, 2, 3, 4, 5} Інститут технічної теплофізики
НАН України, м. Київ, Україна

ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS OF PROJECTS ON BIOMETHANE PRODUCTION FROM INTERMEDIATE CROPS IN UKRAINE

Received May. 15, 2025; accepted Sept. 22, 2025
Available online Sept. 30, 2025

Geletukha G. G.¹, Zheliezna T. A.², Drahniev S. V.³,
Kucheruk P. P.⁴, Kramar V. G.⁵

Author for correspondence: Zheliezna Tetiana,
e-mail: zhelyezna@uabio.org

Biomethane has a wide scope of applications with the possibility of replacing fossil fuels in various sectors of economy. An important sustainability characteristic of biomethane is the amount of greenhouse gas emissions during its life cycle. The biomass feedstock from which biomethane is obtained has a significant impact on this. The purpose of the work is to analyze the possibilities of biomethane production

¹ Dr. of Science (Tech.)
<https://orcid.org/0000-0002-5249-3092>

² Dr. of Science (Tech.)
<https://orcid.org/0000-0002-9607-3022>

³ Cand. of Science (Tech.), Assoc. Prof.
<https://orcid.org/0000-0003-3754-4186>

⁴ Cand. of Science (Tech.)
<https://orcid.org/0000-0003-1888-0774>

⁵ Cand. of Science (Tech.)
<https://orcid.org/0000-0002-8750-6885>

^{1, 2, 3, 4, 5} Institute of Engineering Thermophysics
of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Kyiv, Ukraine

from intermediate crops in Ukraine, taking into account issues of sustainability and economic feasibility. To achieve this goal, a feasibility study of a typical project for the production of biomethane from intermediate crops was carried out and a life cycle analysis of biomethane was conducted. It is determined that to ensure low greenhouse gas emissions, it is necessary to add animal manure to the feedstock mixture. Another measure for this is the capture and liquefaction of carbon dioxide which is released during the cleaning and upgrading of biogas to the quality of natural gas. Thus, the project under study managed to achieve negative greenhouse gas emissions at the level of -13 g CO₂-eq/MJ. This indicator determines a high sustainability of biomethane. The results of the feasibility study show that, given the adopted input data and the selected financial model, the project for the production of biomethane from intermediate crops is quite attractive for investment with an internal return rate of about 20% and a profitability index of 0.41. At the same time, the project is quite sensitive to changes in key economic parameters, primarily capital costs and the sale price of biomethane.

Keywords: bioenergy, biomass, energy potential, biogas, biomethane, intermediate crops.

Вступ. Загальними тенденціями європейської енергетики є підвищення ефективності, заощадження енергії, перехід на відновлювані енергоносії та низьковуглецеві палива. З 1990 року кінцеве енергоспоживання ЄС практично не змінилося і залишається на рівні близько 40 тис. ПДж/рік. Найпомітнішими змінами структури споживання енергії є зростання внеску відновлюваних джерел енергії та зменшення частки нафти і нафтопродуктів [1]. Біоенергетика, один з потужних секторів відновлюваної енергетики, пропонує цілу низку твердих, рідких і газоподібних біопалив, споживання яких сприяє зеленому переходу. На сьогодні частка біопалив у кінцевому споживанні енергії ЄС становить майже 13 %, що відповідає 55 % загального внеску ВДЕ. Використання біомаси та біопалив дає можливість уникнути емісії парникових газів в обсязі близько 300 млн т CO₂-екв./рік порівняно зі споживанням викопних палив [2]. Розвиток біоенергетики ЄС відбувається в межах Європейського зеленого курсу, який був прийнятий наприкінці 2019 року і поставив за мету досягти кліматичної нейтральності Європи до 2050 року [3].

Одним з найперспективніших напрямів для заміщення традиційних енергоносіїв та скорочення викидів парникових газів є виробництво і споживання біометану [4–6]. Біометан являє собою біогаз, збагачений до якості природного газу. Існують різні технології збагачення біогазу; найрозповсюдженішою в європейських країнах сьогодні є мембранна сепарація [7]. Поточний обсяг отримання біометану в Європі становить близько 5 млрд м³/рік, а енергетичним планом ЄС REPowerEU 2022 року встановлено ціль досягти 35 млрд м³/рік до 2030 року [1, 8]. Лідерами у виробництві біометану є Німеччина (13,1 ТВт·год у 2023 р.), Франція (9,1 ТВт·год/рік), а також Італія, Сполучене Королівство і Данія (понад 7,4 ТВт·год/рік у кожній з країн). Основними видами сировини для отримання біометану є сільськогосподарські залишки та відходи, хоча в окремих країнах ситуація суттєво відрізняється від усередненої по Європі. Так, наприклад, в Норвегії, Швеції і Швейцарії біометан виробляється здебільшого з осаду стічних вод, у Хорватії, Сербії та Словаччині – з енергетичних рослин. Новим напрямом є залучення до сировинної бази біометану проміжних (покривних) культур – рослин, які

вироснуть, коли поле вільне від основних культур. У помітних обсягах це вже реалізовано в Болгарії, Італії, Сербії.

У перспективі структура сировини для виробництва біометану в Європі може суттєво змінитися. Це пов'язано з пошуком джерел сталої біомаси для виконання цілей енергетичного плану ЄС REPowerEU з нарощування обсягів споживання біометану. За прогнозом міжнародної компанії Guidehouse, у 2040 році проміжні культури становитимуть найбільшу частку (43 %) загального обсягу сировини для отримання біометану анаеробним зброджуванням. Друге і третє місця в структурі сировини посідатимуть сільськогосподарські залишки (20 %) і гній тварин (19 %), відповідно [1, 9]. Існуючі оцінки потенціалу виробництва біометану з проміжних культур в Європі показують, що за консервативним сценарієм він становить 44–46 млрд м³/рік [10–12]. Це свідчить про те, що енергетичного потенціалу проміжних культур достатньо, щоб у перспективі цей вид біомаси міг посісти основну позицію в структурі сировини.

Біометан як відновлюваний енергоносіє може безпосередньо заміщувати природний газ при спалюванні в енергетичних установках, а також використовуватися як моторне біопаливо у стисненому (біо-CNG) і зрідженому (біо-LNG) вигляді. За даними 2023 року, в Європі 23 % загального обсягу виробленого біометану було спожито на транспорті, 17 % використано для опалення будівель, 15 % – для виробництва електроенергії, 13 % – для потреб промисловості [1].

В Україні, як і в ЄС, біоенергетика відіграє значну роль у реалізації зеленого енергетичного переходу, а виробництво біогазу і біометану є одним з найперспективніших напрямів розвитку сектору [13, 14]. У лютому 2025 року Україна розпочала експорт біометану до Європи трубопровідним транспортом, а в травні цього ж року було здійснено першу експортну поставку зрідженого біометану (біо-LNG). Нині в Україні працюють чотири біометанових заводи, з яких три виконують експорт в ЄС. З огляду на подальше нарощування обсягів виробництва біометану в Україні актуальним питанням є підбір нових сталих видів сировини. Вибір сировини має значний вплив на технічні, економічні й екологічні

характеристики відповідних проєктів. Перспективним напрямом може бути використання біомаси проміжних культур [15].

Постановка завдання. Метою роботи є аналіз можливостей виробництва біометану з проміжних культур в Україні. Для досягнення поставленої мети виконувались такі завдання:

1. Оцінка потенціалу проміжних культур у перерахунку на вироблений біометан на загальному і регіональному рівнях.
2. Визначення економічних показників типового проєкту виробництва біометану з біомаси проміжних культур.
3. Визначення емісії парникових газів при отриманні біометану з проміжних культур.

Методи дослідження охоплюють аналіз статистичних даних та інформації щодо агрокліматичних умов областей України, виконання техніко-економічного обґрунтування, проведення оцінки життєвого циклу.

Виклад основного матеріалу. Сільськогосподарські культури розділяються на дві великі категорії – основні та проміжні (покривні). Основними культурами поле зайняте більшу частину вегетаційного періоду, вони дають основний товарний врожай власнику землі. Проміжні можна вирощувати в періоди, коли поле вільне від основних культур, і в такий спосіб отримувати додатковий врожай з тієї ж ділянки землі протягом одного року.

Однією з головних умов для цього є наявність достатньої вологості в ґрунті. Проміжні культури часто вирощують для подальшого використання як «зелене» добриво (сидерати), а в Україні є досвід вирощування таких культур на корм тваринам. Новий («біоенергетичний») підхід до ПК полягає в тому, що їх надземна частина застосовується для виробництва біогазу / біометану, а дигестат з біогазової установки повертається на поле як органічне добриво [16]. При цьому немає негативного впливу на вирощування основних культур і немає потреби в залученні додаткових земель. Така модель (BiogasDoneRight™) була розроблена майже десять років тому в Італії і на сьогодні успішно впроваджена у багатьох господарствах Італії та Франції [11, 17].

Під час оцінки потенціалу виробництва біометану з проміжних культур в Україні використано підходи, близькі до консервативних сценаріїв в оцінках європейських фахівців [11, 18]. Прийнято, що для вирощування проміжних культур в Україні можна виділити 20 % посівної площі, яка становить 28,4 млн га за даними 2021 року. При середній врожайності ПК 5 т с. р. /га/рік, виході біогазу 570 м³/т с. р. і концентрації метану в біогазі 57 %, потенціал отримання біометану з проміжних культур оцінюється в 9,23 млрд м³ CH₄/рік. Ця складова є найбільшою (47 %) у загальній структурі економічного потенціалу виробництва біометану з різних видів сировини шляхом анаеробного зброджування і термічної газифікації (табл. 1).

Таблиця 1. Потенціал виробництва біометану з різних видів сировини в Україні [19]

Table 1. The potential for biomethane production from different feedstocks in Ukraine [19]

Види сировини	Теоретичний потенціал виробництва*, млрд м ³ CH ₄ /рік	Економічний потенціал виробництва* (доступний для енергетики)	
		Частка теоретичного потенціалу, %	млрд м ³ CH ₄ /рік
Гній сільськогосподарських тварин	1,04	80	0,83
Післяжнивні рештки сільськогосподарських культур	16,79	26	4,37
Побічна продукція харчової переробної промисловості	1,69	39	0,66
Тверді побутові відходи	0,70	75	0,53
Осад стічних вод комунальних очисних споруд	0,07	100	0,07
Силос кукурудзи як енергетичної рослини (вирощування на 1 млн га)	3,00	100	3,00
Проміжні культури (вирощування на 20 % посівної площі)	9,23	100	9,23
Деревна біомаса, енергетичні рослини (для технології термохімічної газифікації)	9,51	10	0,95
Біометан, всього	42,03	47	19,64

* Оцінка теоретичного та економічного потенціалів біомаси виконана з урахуванням підходів Біоенергетичної асоціації України [20].

Для визначення потенціалу виробництва біометану з проміжних культур на регіональному рівні необхідно врахувати природно-кліматичні умови областей України і підібрати відповідні види ПК. Для розрахунку потенціалу по областях України площу під проміжними культурами (20 % посівної площі, крім Одеської і Донецької областей, де

через нестачу опадів прийнято 5 %) розділено навпіл між озимими та післяжнивними ПК. Основна різниця між цими видами полягає у строках сівби і збирання культур. З урахуванням орієнтовної врожайності ПК, підібраної для умов кожної області, сумарний потенціал становить 9229 млн м³ CH₄/рік (табл. 2), що збігається з результатом оцінки в цілому для України. За абсолютним значенням, високі потенціали відповідають областям з великими посівними площами, як-от Полтавська, Вінницька, Дніпропетровська. За виходом біометану з гектара посівної площі (питомий потенціал), лідерами є області зі значним обсягом річних опадів, такі як Івано-Франківська, Львівська, Рівненська, Тернопільська, Хмельницька та Чернівецька.

Таблиця 2. Потенціал виробництва біометану з проміжних культур за областями України

Table 2. The potential for biomethane production from intermediate crops in Ukraine's regions

Область	Площі для вирощування проміжних культур, тис. га		Орієнтовна врожайність проміжних культур, т с. р./га		Об'єм біометану, млн м ³ CH ₄ /рік
	озимі	післяжнивні	озимі	післяжнивні	
Вінницька	165	165	7,0	3,5	564
Волинська	61	61	8,0	3,5	229
Дніпропетровська	197	197	7,0	3,5	673
Донецька	52	–	5,2	–	88
Житомирська	115	–	6,0	–	225
Закарпатська	17	17	9,0	4,5	76
Запорізька	171	171	8,0	3,5	640
Івано-Франківська	38	38	9,0	5,0	174
Київська	119	119	8,0	3,5	445
Кіровоградська	171	171	7,0	3,5	582
Луганська	86	86	8,0	3,5	320
Львівська	71	71	9,0	5,0	321
Миколаївська	160	–	6,0	–	312
Одеська	92	–	5,2	–	156
Полтавська	173	173	8,0	3,5	647
Рівненська	62	62	9,0	5,0	282
Сумська	121	121	9,0	3,5	491
Тернопільська	84	84	9,0	5,0	382
Харківська	182	182	8,0	3,5	681
Херсонська	148	–	6,0	–	288
Хмельницька	121	121	9,0	5,0	548
Черкаська	122	122	7,0	3,5	415
Чернівецька	31	31	9,0	5,0	140
Чернігівська	135	135	9,0	3,5	550
Біометан, всього					9229

Великий потенціал проміжних культур, доступний для потреб енергетики, є однією з передумов розвитку цього напрямку виробництва біометану в Україні. Іншим важливим аспектом є економічна доцільність відповідних проєктів. Проведемо техніко-економічне обґрунтування типового проєкту, в якому сировиною для отримання біометану є суміш силосу проміжних культур і гноївки свиней. Додавання гноївки необхідне для

забезпечення якомога менших викидів парникових газів протягом життєвого циклу біометану. Величина загальної емісії ПГ у процесі виробництва є невід'ємною характеристикою біометану, яка впливає на оцінку рівня його сталості і, відповідно, на ціну реалізації.

Концепція проєкту передбачає виробництво біогазу обсягом 28 664 нм³/добу (табл. 3) в установці аграрного

типу, до складу якої входять основні метантенки та доброджувач. Основна частина виробленого біогазу подається на установку очищення і збагачення до якості природного газу із застосуванням мембранної технології. Решта біогазу спалюється у когенераційній установці для забезпечення власних потреб всього виробничого комплексу в тепловій та електричній енергії. Це розглядається як захід зменшення загального карбонового сліду біометану. До КГУ подається лише біогаз, отриманий з силосу кукурудзи, який є додатковим видом

сировини в проєкті. Вважається, що вироблений біометан закачується у газотранспортну систему України, а гарантії походження реалізуються на європейському ринку відновлюваних палив. Діоксид вуглецю, виділений у процесі збагачення біогазу, очищується до якості харчового продукту і зріджується, являючи собою товарний продукт для внутрішнього ринку. Дигестат з біогазової установки двічі на рік вносять під основні культури на поля, де вирощуються проміжні культури для проєкту.

Таблиця 3. Розрахункові показники виходу біогазу та складу різних видів сировини

Table 3. Estimate indicators for biogas yield and composition of different feedstocks

Показник	Розмірність	Суміш сировини, всього	Сировина			
			Силос жита озимого	Гноївка свиней	Силос вико-вівсяної суміші (30 %/70 %)	Силос кукурудзи
Витрата сировини	т/рік	141 614	25 067	90000	12533	14014
Вміст сухої речовини в сировині	%	-	30	4	30	35
Вміст азоту загального	кг N/т	3,7	5,4	2,8	6,2	4,5
Співвідношення C:N в сировині	-	16,6	25,6	5,7	21,6	34,4
Вихід біогазу	нм ³ /т СОР	581,3	618,2	553,8	618,2	636,4
Прийнятний біохімічний потенціал виходу метану	нм ³ CH ₄ /т СОР	328,6	340,0	360,0	340,0	350,0
	нм ³ CH ₄ /т	114,6	93,8	12,2	93,8	113,9
Виробництво біогазу	нм ³ /добу	28 664	11132	4411	5566	7555
Вміст CH ₄ у біогазі	%	56,5	55	65	55	55
Вміст CO ₂ у біогазі	%	42,5	44,0	34,0	44,0	44,0
Виробництво CH ₄	нм ³ CH ₄ /добу	16206	6122	2867	3061	4155
	нм ³ CH ₄ /рік	591 5203	2 234 673	104 520	1 117 292	1 516 718
	нм ³ /рік	10 462 181	4 063 042	1 610 031	2 031 440	2 757 669
Виробництво CO ₂	нм ³ CO ₂ /добу	12 171	4898	1500	2449	3324

Прийнято, що біометановий проєкт відносить витрати на силосування біомаси та постачання силосу до БГУ й не враховує витрати на перевезення та внесення дигестату. Ціна силосу жита, вико-вівсяної суміші та кукурудзи враховує рентабельність аграрної компанії, яка постачає біомасу, на рівні 25 %. За прийнятих цін сировини та кінцевих продуктів і за умов фінансової моделі, що використовується в ТЕО, дисконтований термін окупності проєкту становить менше 8 років з внутрішньою нормою рентабельності (IRR) близько 20 % (табл. 4). Таким чином, проєкт виробництва біометану з біомаси проміжних культур можна вважати достатньо привабливим для інвестицій. Аналіз чутливості показує, що основний вплив на IRR має ціна продажу біометану, а ціна зрідженого CO₂ як товару впливає менше. Коливання капітальних витрат також має значний вплив на економічні показники проєкту. Збільшенні CAPEX на 20 % може поставити проєкт на межу інвестиційної доцільності (IRR 14,8 %), тоді як зменшення на 20 % – навпаки, суттєво підвищить економічну стійкість. Однак можливість зниження CAPEX на 15–20 % оцінюється сьогодні як невисока.

Таблиця 4. Результати ТЕО проєкту виробництва біометану з проміжних культур в Україні

Table 4. Results of a feasibility study of biomethane production from intermediate crops in Ukraine

Показник	Значення
Капітальні витрати, млн євро, у тому числі:	14,22
Техніка та обладнання	8,36
Будівництво та монтаж	5,04
Інше	0,82
Частка власних коштів, %	40
Частка запозичених коштів, %	60
Операційні витрати, млн євро/рік (без ПДВ), у тому числі:	1,98
сировина	1,21
операційні витрати	0,29
логістика цільових продуктів	0,39
Дохід, млн євро/рік (без ПДВ), у тому числі:	4,87
біометан в ГТС	3,92
зріджений CO ₂	0,75

дигестат	0,19
Чиста приведена вартість, млн євро	5,78
Внутрішня норма рентабельності (IRR), %	19,9
Індекс прибутковості	0,41
Простий термін окупності, років	5,9
Дисконтований термін окупності, років	7,8

Сильною стороною проекту, що розглядається, є істотне скорочення викидів ПГ протягом життєвого циклу біометану з досягненням сумарного значення, яке є від'ємним (-13 г CO_{2-екв}/МДж). Такий результат отримано завдяки включенню гною до сировинної суміші, а також врахуванню уловлення і зрідження діоксиду вуглецю, який виділяється при збагаченні біогазу. Розрахунок викидів парникових газів виконано за методикою Директиви ЄС 2018/2001 з відновлюваної енергетики (RED III) для палив з біомаси (Додаток VI В Директиви). При цьому використано один з дозволених підходів, який полягає у комбінації розрахункових значень та розподілених значень за замовчуванням. Таким чином, вироблений біометан повністю задовольняє вимогам Директиви RED III щодо скорочення викидів ПГ, принаймні на 65 % порівняно з компаратором викопного палива для транспорту – 94 г CO_{2-екв}/МДж.

Висновки. Україна має значний потенціал виробництва біометану з проміжних культур, який є найбільшим у загальній структурі різних видів відповідної сировини. У більшості областей проміжні культури можна вирощувати на площі, яка становить до 20 % посівної площі. Для природно-кліматичних умов України можна розглядати озимі ПК, наприклад зелене жито, тритикале, озиму пшеницю й озимий ячмінь та післяжнивні ПК, як-от ярі зернові, кукурудза (ранньостиглі гібриди), сорго, вика. Перед започаткуванням вирощування проміжних культур у конкретному аграрному господарстві необхідно проаналізувати структуру посівних площ, існуючі сівозміни, рівень забезпечення ґрунту вологою та інші місцеві умови.

Очікується, що оптимально розроблені проекти виробництва біометану з проміжних культур матимуть достатньо хороші економічні показники і можуть розглядатися як інвестиційно привабливі. Однак такі проекти є доволі чутливими до зміни величини капітальних витрат та ціни продажу біометану. Для підвищення загальної прибутковості проектів рекомендується уловлювати діоксид вуглецю, який виділяється при очищенні і збагаченні біогазу, та продавати його у зрідженому вигляді на внутрішньому ринку. Використання гною в суміші різних видів сировини в проектах виробництва передового біометану дозволяє додатково скоротити викиди парникових газів, а відтак і карбонову інтенсивність біометану. Це, відповідно, може збільшити попит на такий біометан та можливу ціну його реалізації при експорті на європейський ринок відновлюваних палив. Продаж зрідженого діоксиду вуглецю, який заміщує викопний вуглець, також сприяє зменшенню загального карбонового сліду біометану.

ПОСИЛАННЯ

1. Statistical Report 2024. European Biogas Association. URL: <https://www.europeanbiogas.eu/eba-statistical-report-2024/>
2. Железна Т. А., Драгнєв С. В. Аналіз тенденцій розвитку біоенергетики та скорочення викидів парникових газів в ЄС. Теплофізика та теплоенергетика. 2025. 47(2). С. 92–101. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2025.9>
3. Siddi M. The European Green Deal: Assessing its current state and future implementation. FIIA Working Paper. 2020. 114. P. 1–14. URL: https://www.researchgate.net/publication/341701815_The_European_Green_Deal_Assessing_its_current_state_and_future_implementation
4. Sesini M., Creti A., Massol O. Unlocking European biogas and biomethane: Policy insights from comparative analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2024. 199. 114521. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114521>
5. Marconi P., Rosa L. Role of biomethane to offset natural gas. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2023. 187. 113697. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113697>
6. Geletukha G., Kucheruk P., Matveev Y. Prospects and Potential for Biomethane Production in Ukraine. Ecological Engineering & Environmental Technology. 2022. 23(4). P. 67–80. <https://doi.org/10.12912/27197050/149995>
7. Крамар В. Г. Технології збагачення біогазу та їх характеристики. Теплофізика та теплоенергетика. 2023. 45(1). С. 64–74. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2023.8>
8. Siddi M. Assessing the European Union's REPowerEU plan: Energy transition meets geopolitics. FIIA Working Paper. 2022. 130. P. 1–15. URL: https://www.researchgate.net/publication/364351657_Assessing_the_European_Union's_REPowerEU_plan_Energy_transition_meets_geopolitics
9. Alberici S., Toop G., Monchen B., Peeters Sh., Peterse J. Biogases towards 2040 and beyond. Guidehouse Europe Ltd., 2024. 35 p. URL: <https://guidehouse.com/-/media/new-library/services/sustainability/documents/2024/biogases-towards-2040-and-beyond.ashx>
10. Birman J., Burdloff J., De Peufelhoux H., Erbs G., Feniou M., Lucille P.-L. Geographical analysis of biomethane potential and costs in Europe in 2050. ENGIE, 2021. 43 p. URL: https://www.engie.com/sites/default/files/assets/documents/2021-07/ENGIE_20210618_Bio-gas_potential_and_costs_in_2050_report_1.pdf
11. Magnolo F., Dekker H., Decorte M., Bezzi G., Rossi L., Meers L., Speelman S. The Role of Sequential Cropping

- and Biogasdoneright™ in Enhancing the Sustainability of Agricultural Systems in Europe. *Agronomy*. 2021. 11(11). 2102. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112102>
12. Primmer N. et al. Sequential and rotational cropping for biomethane: The potential of sustainable crop rotations across Europe. Biomethane Industrial Partnership. Task Force 3.1, 2025. 65 p. URL: https://bip-europe.eu/wp-content/uploads/2025/04/BIP-Task-Force-3.1_Biomethane-Potential-Novel-Cropping-Systems_April2025.pdf
 13. Гелетука Г. Г., Желєзна Т. А., Кучерук П. П., Драгнев С. В. Аналіз перспективних напрямків використання енергетичного потенціалу біомаси України. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2023. 45 (2). С. 77–86. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.9>
 14. Гелетука Г. Г., Желєзна Т. А., Баштовий А. І. Дорожня карта розвитку біоенергетики України до 2050 року. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2020. 42(2). С. 60–67. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2020.6>
 15. Желєзна Т. А., Драгнев С. В. Аналіз підходів до використання проміжних культур як сировини для виробництва біометану в Україні. *Енергетика і автоматика*. 2024, 3, с. 121–131. [http://dx.doi.org/10.31548/energiya3\(73\).2024.121](http://dx.doi.org/10.31548/energiya3(73).2024.121)
 16. Ablicieva I. Yu., Geletukha G. G., Kucheruk P. P., Enrich-Prast A., Carraro G., Berezna I. O., Bereznyi D. M. Digestate potential to substitute mineral fertilizers: Engineering approaches. *Journal of Engineering Sciences*. 2022. 9(1). Pp. H1–H10. DOI: 10.21272/jes.2022.9(1).h1
 17. Selvaggi R., Valenti F., Pappalardo G., Rossi L., Bozzetto S., Pecorino B., Dale B.E.. Sequential crops for food, energy, and economic development in rural areas: The case of Sicily. *Biof., Bioprod. and Bioref.* 2018. 12(1). P. 22–28. <https://doi.org/10.1002/bbb.1844>
 18. Alberici S., Grimme W., Toop G. Biomethane production potentials in the EU: Feasibility of REPowerEU 2030 targets, production potentials in the Member States and outlook to 2050. Guidehouse Netherlands B.V., 2022. 35 p. URL: https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2022/07/GfC_national-biomethane-potentials_070722.pdf
 19. Geletukha G., Zheliezna T., Drahnev S., Kucheruk P., Kramar V. Advanced biomethane production from intermediate and cover crops. *Analytical Note No. 1*, 2025. 64 p. URL: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2025/05/Analytical-Note-1-2025-EN.pdf>
 20. Желєзна Т. А. Оцінка загального енергетичного потенціалу біомаси в Україні. Презентація на вебінарі Проєкту міжнародної технічної допомоги USAID «Економічна підтримка Східної України» 03.10.2023. https://uabio.org/wp-content/uploads/2023/10/Zhelyezna_Seminar-USAID_03-10-2023.pdf

REFERENCES

1. Statistical Report 2024. European Biogas Association. URL: <https://www.europeanbiogas.eu/eba-statistical-report-2024/>
2. Zheliezna T. A., Drahnev S. V. Analiz tendentsii rozvytku bioenergetyky ta skorochennia vykydiv parnykovykh gaziv v ES [Analysis of trends for bioenergy development and reduction of greenhouse gas emissions in the EU]. *Teplofizyka ta teploenergetyka*. 2025. 47(2). P. 92–101. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2025.9> [in Ukrainian]
3. Siddi M. The European Green Deal: Assessing its current state and future implementation. FIIA Working Paper. 2020. 114. P. 1–14. URL: https://www.researchgate.net/publication/341701815_The_European_Green_Deal_Assessing_its_current_state_and_future_implementation
4. Sesini M., Creti A., Massol O. Unlocking European biogas and biomethane: Policy insights from comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. 199. 114521. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114521>
5. Marconi P., Rosa L. Role of biomethane to offset natural gas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. 187. 113697. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113697>
6. Geletukha G., Kucheruk P., Matveev Y. Prospects and Potential for Biomethane Production in Ukraine. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2022. 23(4). P. 67–80. <https://doi.org/10.12912/27197050/149995>
7. Kramar V. G. Tekhnologii zbagachennia biogazu ta ikh kharakterystyky [Biogas upgrading technologies and their characteristics]. *Teplofizyka ta teploenergetyka*. 2023. 45(1). P. 64–74. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.8> [in Ukrainian]
8. Siddi M. Assessing the European Union's REPowerEU plan: Energy transition meets geopolitics. FIIA Working Paper. 2022, 130, p. 1–15. URL: https://www.researchgate.net/publication/364351657_Assessing_the_European_Union's_REPowerEU_plan_Energy_transition_meets_geopolitics
9. Alberici S., Toop G., Monchen B., Peeters Sh., Peterse J. Biogases towards 2040 and beyond. Guidehouse Europe Ltd., 2024. 35 p. URL: <https://guidehouse.com/media/new-library/services/sustainability/documents/2024/biogases-towards-2040-and-beyond.ashx>
10. Birman J., Burdloff J., De Peufelhoux H., Erbs G., Feniou M., Lucille P.-L. Geographical analysis of biomethane potential

- and costs in Europe in 2050. ENGIE, 2021. 43 p. URL: https://www.engie.com/sites/default/files/assets/documents/2021-07/ENGIE_20210618_Bio-gas_potential_and_costs_in_2050_report_1.pdf
11. Magnolo F., Dekker H., Decorte M., Bezzi G., Rossi L., Meers L., Speelman S. The Role of Sequential Cropping and Biogasdoneright™ in Enhancing the Sustainability of Agricultural Systems in Europe. *Agronomy*. 2021. 11(11). 2102. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112102>
 12. Primmer N. et al. Sequential and rotational cropping for biomethane: The potential of sustainable crop rotations across Europe. Biomethane Industrial Partnership. Task Force 3.1, 2025, 65 p. URL: https://bip-europe.eu/wp-content/uploads/2025/04/BIP-Task-Force-3.1_Biomethane-Potential-Novel-Cropping-Systems_April2025.pdf
 13. Geletukha G. G., Zheliezna T. A., Kucheruk P. P., Drahnev S. V. Analiz perspektyvnykh napriamkiv vykorystannia energetychnoho potentsialu biomasy Ukrainy [Analysis of prospective directions for using Ukraine's biomass potential for energy]. *Teplofizyka ta teploenergetyka*. 2023. 45(2). P. 77–86. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2023.9> [in Ukrainian]
 14. Geletukha G. G., Zheliezna T. A., Bashtovyi A. I. Dorozhnia karta rozvytku bioenergetyky Ukrainy do 2050 roku [Roadmap for bioenergy development in Ukraine until 2050]. *Teplofizyka ta teploenergetyka*. 2020. 42(2). P. 60–67. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2020.6> [in Ukrainian]
 15. Zheliezna T. A., Drahnev S. V. Analiz pidkhodiv do vykorystannia promizhnykh kultur iak syrovyny dlia vyrobnytstva biometanu v Ukraini [Analysis of approaches to the use of intermediate crops as feedstock for biomethane production in Ukraine]. *Energetyka i avtomatyka*. 2024. 3. P. 121–131. [http://dx.doi.org/10.31548/energiya3\(73\).2024.121](http://dx.doi.org/10.31548/energiya3(73).2024.121) [in Ukrainian]
 16. Ablieieva I. Yu., Geletukha G. G., Kucheruk P. P., Enrich-Prast A., Carraro G., Berezhna I. O., Berezhnyi D. M. Digestate potential to substitute mineral fertilizers: Engineering approaches. *Journal of Engineering Sciences*. 2022. 9(1). Pp. H1–H10. DOI: 10.21272/jes.2022.9(1).h1
 17. Selvaggi R., Valenti F., Pappalardo G., Rossi L., Bozzetto S., Pecorino B., Dale B. E. Sequential crops for food, energy, and economic development in rural areas: The case of Sicily. *Biof., Bioprod. and Bioref.* 2018. 12(1). P. 22–28. <https://doi.org/10.1002/bbb.1844>
 18. Alberici S., Grimme W., Toop G. Biomethane production potentials in the EU: Feasibility of REPowerEU 2030 targets, production potentials in the Member States and outlook to 2050. Guidehouse Netherlands B.V., 2022. 35 p. URL: https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2022/07/GfC_national-biomethane-potentials_070722.pdf
 19. Geletukha G., Zheliezna T., Drahnev S., Kucheruk P., Kramar V. Advanced biomethane production from intermediate and cover crops. *Analytical Note No 1*, 2025. 64 p. URL: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2025/05/Analytical-Note-1-2025-EN.pdf>
 20. Zheliezna T. A. Otsinka zagalnogo energetychnoho potentsialu biomasy v Ukraini [Assessment of biomass energy potential in Ukraine]. Presentation at USAID project webinar on 03.10. 2023. URL: https://uabio.org/wp-content/uploads/2023/10/ZHelyezna_Seminar-USAID_03-10-2023.pdf [in Ukrainian]