



УДК 504+332.712

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.7.2024.24>

ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ БІОКОНВЕРСІЙНИХ КУЛЬТУР

В. П. Резніченко¹, А. В. Коломієць², Т. М. Туник³

Актуальність полягає в тому, що технології виробництва біогазу з переробки біоконверсійних культур сприяють формуванню більш чистого екологічного середовища, забезпечуючи енергетичну незалежність від постачання вугілля та газу, а також дозволяють генерувати електроенергію та тепло без шкоди для довкілля. Процес біоконверсії вигідний не тільки через виробництво газу, але й завдяки створенню екологічно чистих видів енергії. Проведене дослідження має за мету дослідити та оцінити можливість застосування біоконверсійних культур як відновлювальних енергетичних ресурсів для збільшення ефективності виробництва енергії. Завданням є аналіз потенціалу отримання енергії з біологічних культур, що можуть сприяти розвитку більш надійних та екологічно безпечних енергетичних систем. Методами дослідження є: аналіз статистики щодо виробництва, застосування та продуктивності біоконверсійних культур у різноманітних регіонах світу, що дозволяє порівняти їх як джерела відновлюваної енергії та оцінити їхній енергетичний потенціал; лабораторні дослідження для визначення енергетичної цінності біоконверсійних культур, продуктивність різних методів обробки та аналізує вплив різноманітних умов на вироблення біогазу, біодизеля та інших продуктів; використання моделювання для дослідження біоконверсійних процесів, оцінки їх енергетичної ефективності та екологічного впливу. Цей метод дозволяє аналізувати складні системи, які складно або неможливо вивчати лише через експерименти, включаючи розгляд хімічних реакцій. Практичні результати дослідження підтверджують значний інтерес до розробки та імплементації технологій біоконверсії для виробництва енергії з органічних відходів, що відповідає потребам зменшення екологічного навантаження та збільшення ефективності використання відновлюваних джерел енергії. Зокрема, анаеробне бродіння

¹ кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри загального землеробства
(Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький)
e-mail: vita.micenko16@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5693-0942

² кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри екології, охорони навколишнього середовища та здорового способу життя
(Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький)
e-mail: lyudkolomiec11@meta.ua
ORCID: 0000-0002-6410-1762

³ кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри екології, охорони навколишнього середовища та здорового способу життя
(Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький)
e-mail: lyudkolomiec11@meta.ua
ORCID: 0009-0003-6333-0832

сільськогосподарських відходів та гною продемонструвало високий потенціал у виробництві біогазу, який може бути ефективною альтернативою традиційним енергоресурсам. Перспективи подальших досліджень у сфері біоконверсійних технологій та виробництва енергії з органічних відходів відкривають широкі можливості для наукової спільноти, промисловості та суспільства в цілому. З огляду на зростаючий попит на екологічно чисті та відновлювані джерела енергії, важливо сконцентрувати зусилля на оптимізації існуючих технологій та розробці інноваційних методів переробки біомаси.

Ключові слова: біоконверсійна культура, біоконверсійні процеси, біогаз, анаеробна ферментація, енергетична ємність, біогазова станція, екологія.

EVALUATION OF THE ENERGY EFFICIENCY OF RENEWABLE ENERGY SOURCES BASED ON BIOCONVERSION CULTURES

V. P. Reznichenko, L. V. Kolomiets, T. M. Tunik

Technologies for the production of biogas from the processing of bioconversion crops contribute to the formation of a cleaner ecological environment, ensuring energy independence from the supply of coal and gas, and also allow the generation of electricity and heat without harming the environment.

The bioconversion process is beneficial not only through the production of gas, but also through the creation of environmentally friendly types of energy. The purpose of the conducted research is to investigate and evaluate the possibilities of using bioconversion crops as renewable energy resources to increase the efficiency of energy production. The task is to analyze the potential of obtaining energy from biological crops, which can contribute to the development of more reliable and ecologically safe energy systems. Research methods are: statistical analysis of production, application and productivity of bioconversion crops in various regions of the world, which allows comparing them as sources of renewable energy and assessing their energy potential; laboratory studies to determine the energy value of bioconversion crops, the performance of various processing methods and analyzes the impact of various conditions on the production of biogas, biodiesel and other products; the use of modeling for the study of bioconversion processes, assessment of their energy efficiency and environmental impact.

This method allows the analysis of complex systems that are difficult or impossible to study only through experiments, including consideration of chemical reactions. The practical results of the research confirm the significant interest in the development and implementation of bioconversion technologies for the production of energy from organic waste, which meets the needs of reducing the environmental burden and increasing the efficiency of the use of renewable energy sources. In particular, anaerobic fermentation of agricultural waste and manure has shown high potential in the production of biogas, which can be an effective alternative to traditional energy resources. Prospects for further research in the field of bioconversion technologies and energy production from organic waste open wide opportunities for the scientific community, industry and society as a whole. Given the growing demand for environmentally friendly and renewable energy sources, it is important to focus efforts on optimizing existing technologies and developing innovative biomass processing methods.

Key words: bioconversion culture, bioconversion processes, biogas, anaerobic fermentation, energy capacity, biogas plant, ecology.

Вступ

Кожного року в Україні на агропромислових підприємствах та у харчових заводах утворюється велика кількість органічних відходів, включаючи тваринний гній, пташиний послід, соломку, відходи овочевих сховищ та м'ясопереробних заводів, листя дерев та чагарників, деревну кору та тирсу. Лише частина цих відходів після обробки використовується як джерело енергії для сільськогосподарських територій. Більшість відходів накопичується біля тваринницьких та птахівницьких ферм, що погіршує їх якість та спричиняє забруднення повітря і ґрун-

тових вод токсичними речовинами через спалювання або захоронення на звалищах. Оптимальним розв'язанням цієї проблеми є застосування сучасних методів біоконверсійної утилізації органічних відходів, таких як анаеробна ферментація для виробництва біогазу, твердофазна аеробна біоферментація та вермікомпостування (Амонс і Красняк, 2023). Ці технології не тільки екологічно безпечні, але й економічно вигідні, оскільки дозволяють перетворювати біогаз в електричну та теплову енергію для різних потреб.

Літературний аналіз проблеми ресурсозбереження виокремлює ключові аспекти,

Таблиця 1

Енергетична ємність деяких видів твердого та рідкого біопалива (Products. Energy, sustainability and innovation. Enel Group, 2023)

Вид палива	Вміст води, % мас.	Енергоємність біопалива	
		МДж/кг	кВт/кг
Дуб	20	14,1	3,9
Сосна	20	13,8	3,8
Солома	15	14,3	3,9
Зернові	15	14,2	3,9
Ріпакова олія	-	37,1	10,3
Антрацит	4	30,0-35,0	8,3
Буре вугілля	20	10,0-20,0	5,5
Пічне паливо	-	42,7	11,9
Біометанол	-	16,0	4,48
Біоетанол	-	19,6	5,5
Біобутанол	-	29,2	8,2
Біодизель	Відсутнє	37,0	10,3

які вивчаються дослідниками: Кудря, 2020; Фрайер, 2021; Обухов, Ібрагім, Толба, Ель-Ріфаї, 2019 види збережених ресурсів, характер процесів, можливості впровадження заходів, етапи життєвого циклу ресурсів і продукції, обсяги фінансування та результати заощадження. Як зазначають Редько та Аленіна, 2021, біоконверсійні процеси мають значний соціально-екологічний вплив, який полягає у зменшенні викидів парникових газів і неприємних запахів, а також у профілактиці санітарних проблем. Різні галузі професійного світу вбачають у біоконверсії свої переваги та розробляють економічні методики для впровадження цих технологій (Чумаченко, 2022). В результаті цих процесів отримують продукцію з ринковою цінністю, таку як біогаз, та тверді та рідкі органічні добрива.

Матеріал та методи

1) Аналіз статистичних даних. Використання статистичних даних про виробництво, використання та ефективність біоконверсійних культур у різних країнах дозволяє провести порівняльний аналіз та оцінити потенціал цих культур як відновлюваних джерел енергії. Енергетичний потенціал біомаси, маються на увазі всі матеріали, отримані з рослин: деревина, трави, відходи деревообробки та збирання зернових, гній тощо. Біомаса як сухе паливо може бути порівняна з вугіллям. Теплотворна здатність сухої біомаси варіюється від 17,5 ГДж/т для різних трав до майже 20 ГДж/т для деревини. Для порівняння, відповідні показники для бітумного вугілля та лігніну становлять 30 і 20 ГДж/т. При заготівлі біомаса містить значну кількість вологи: від 8-20% маси для соломи, 30-60% маси для деревини та 75-90% маси для гною (табл. 1).

2. Експериментальний метод. Цей метод включає проведення лабораторних та польових експериментів для визначення енергетичного потенціалу біоконверсійних культур, ефективності різних методів їх переробки та вивчення впливу різних умов на виробництво біогазу, біодизеля тощо. Дослідження проводилося за наступним алгоритмом: 1) підготовка і вибір типів біоконверсійних культур для дослідження; 2) збір зразків біомаси для кожної культури; підготовка зразків до аналізу, висушування їх до постійної ваги за контрольованих умов; 3) визначення вологості за допомогою термогравіметричного аналізу і сухої маси зразків після висушування; 4) здійснення хімічного аналізу біомаси для визначення

вмісту целюлози, геміцелюлози, лігніну та інших компонентів; 5) оцінка енергетичного потенціалу, застосування методу анаеробного зброджування для визначення кількості та складу біогазу, отриманого з кожного типу біомаси; 6) проведення калориметричного аналізу для визначення теплоти згоряння біомаси, що є індикатором енергетичної цінності; 7) аналіз результатів: зіставлення отриманих даних для кожної культури, включно з врожайністю, вологістю, хімічним складом, кількістю та складом біогазу, теплою згоряння.

3. Моделювання та симуляція. Використання комп'ютерного моделювання та симуляцій для аналізу процесів біоконверсії, оцінки енергетичної ефективності та впливу на довкілля Це дозволяє моделювати великі та складні системи, які важко дослідити експериментально. В роботі використано метод хімічних реакцій. Біогаз, який є первинним продуктом отриманим з органічної маси або біомаси, формується через складні хімічні реакції. Ці реакції включають розщеплення та стабілізацію органічної речовини через різні метаболічні шляхи за участю мікроорганізмів у анаеробних умовах. Головними компонентами анаеробного газу є метан (CH₄) та вуглекислий газ (CO₂). Цей газ також містить сірководень (H₂S), аміак (NH₃), водень (H₂), та окис вуглецю (CO). Метаногенез, процес утворення метану,

відбувається через послідовне розкладання біологічної маси, яка складається з води, білків, жирів, мінералів, вуглеводів та різних видів мікроорганізмів. При цьому утворюється газова суміш, де основною частиною є метан (до 85%).

Мета дослідження полягає в аналізі та оцінці потенціалу використання біоконверсійних культур як відновлюваних джерел енергії з метою підвищення енергетичної ефективності. Робота спрямована на вивчення можливостей виробництва енергії з біологічних культур, які можуть бути використані для створення більш стійких та екологічно чистих джерел енергії.

Завданнями даного дослідження є:

- оцінка потенціалу різних видів біоконверсійних культур в контексті їх здатності генерувати енергію.

- аналіз технологій перетворення біомаси на енергію, включаючи їх економічні та екологічні аспекти.

- розгляд можливостей інтеграції біоконверсійних культур у сучасні енергетичні системи з метою зменшення залежності від традиційних джерел енергії та зниження викидів парникових газів.

- оцінка впливу використання біоконверсійних культур на енергетичну безпеку та стійкість енергопостачання.

- розробка рекомендацій щодо ефективного впровадження біоконверсійних культур в енергетичний сектор.

Результати

Інтерес до розробки та застосування технологій біоконверсії органічних відходів для виробництва енергії зростає на тлі погіршення екологічної ситуації, зменшення запасів невідновлюваних енергетичних ресурсів та підвищення їх цін. Біоенергетика, що використовує біомасу як джерело палива, може стимулювати економічний розвиток промисловості, при цьому не завдаючи шкоди довкіллю, оскільки вона не сприяє збільшенню рівня вуглекислого газу в атмосфері (Македон і Байлова, 2023). Біоенергетика базується на використанні біомаси як безпосереднього палива або після її обробки. Сьогодні розроблено численні способи конверсії біомаси в паливо та енергію, залежно від типу біомаси, її призначення та умов обробки. Технологічна обробка біомаси, залежно від її вологості, може бути розділена на термохімічну, фізико-хімічну та біотехнологічну. Біохімічне перетворення біомаси відбувається за допомогою мікро-

організмів, які використовують біомасу для підтримки своєї життєдіяльності, але не окислюють її повністю. З енергетичної точки зору важливими є два основні типи біохімічних процесів: анаеробне бродиння, яке призводить до утворення біогазу, і ферментація, при якій виділяється етанол (EarthExplorer, 2023).

Біомасу можна класифікувати на первинну (рослини, тварини, мікроорганізми тощо) та вторинну (відходи переробки первинної біомаси, а також продукти життєдіяльності людини та тварин). Хімічний склад біомаси варіюється залежно від її типу. Наприклад, рослинна біомаса є складною сумішшю різноманітних сполук, де в сухій речовині міститься 5-30% водорозчинних речовин (цукор, крохмаль, сечовина, солі), 2-40% протеїнів, 25-88% целюлози та геміцелюлози, а також 5-30% лігніну. Оскільки біомаса містить різні типи та групи сполук, важливо враховувати природу вихідних продуктів, технологію їх переробки та характеристики відходів при розробці ефективних способів її практичного використання. Основні характеристики, за якими види біомаси розрізняються, включають (Products. Energy, sustainability and innovation. Enel Group, 2023):

- технічні параметри, такі як зольність, вологість і калорійність;

- елементний склад;

- склад мінеральної частини;

- характеристики, що визначають утворення шлаку;

- екологічні показники;

- корозійні властивості;

- також важливо відзначити позитивні екологічні аспекти біомаси;

- низький рівень зольності (в середньому 4% маси);

- невеликий вміст сірки (0,02-0,1% маси) та азоту (0,3-1,2% маси);

- зниження загрози забруднення атмосфери парниковими газами, завдяки циркуляції CO₂ (кількість CO₂, поглинутого рослинами, еквівалентна кількості, що виділяється під час їхнього спалювання);

- малий вміст хлору в мінеральній частині (в середньому 0,04% маси, для рослинних відходів до 4,3% маси).

Головними джерелами твердої біомаси для енергетичних потреб слугують аграрний та лісовий сектори. Згідно з інформацією, наданою Інститутом відновлюваної енергетики НАН України та іншими відкритими джерелами, щорічне виробни-

цтво зернових та бобових культур в Україні перевищує 60 млн тон, при цьому утворюється значна кількість побічних продуктів, таких як солома та рослинні відходи. Річний енергетичний потенціал біомаси в Україні дорівнює приблизно 35 млн тон нафтового еквіваленту, використання якого може дозволити економити близько 38 млрд м³ природного газу щорічно.

1. Анаеробне бродіння біоконверсійних сільськогосподарських культур. Головними джерелами сировини для анаеробного бродіння є гній та деякі види сільськогосподарських відходів. Гній містить органічні речовини, які не були засвоєні тваринами. Через діяльність різних видів бактерій ця субстанція перетворюється на біогаз, який складається з діоксиду вуглецю (CO₂) і метану (CH₄). Ефективність цього процесу залежить від підтримуваної температури, яка може бути мезофільною (біля 37°C) або термофільною (біля 55°C). Дані свідчать про перспективи використання біогазу як палива. Один кубічний метр біогазу еквівалентний приблизно 0,7 м³ природного газу або 0,8 л мазуту (Фурдичк, 2022). Кількість виробленого біогазу залежить як від типу використаної сировини, так і від технології її переробки (табл. 2).

Таблиця 2

Вплив виду вихідної сировини на вихід біогазу при біоконверсії відходів ряду сільськогосподарських культур (Фурдичк, 2022)

Початкова сировина	Вихід біогазу з 1 кг сухої речовини, л/кг.	Зміст метану в газі, %
Трава	630	70
Листя деревне	220	59
Соснова голка	370	69
Бадилля картопляне	420	60
Стебла кукурудзи	420	53
Мякіна	615	62
Солома пшенична	340	58
Солома лляна	360	59
Лущиння соняшника	300	60

Метанове бродіння гною сприяє його беззапахості, дегельмінтизації, знищенню здатності бур'янових насінин до проростання та перетворенню добрив у форму,

що легко засвоюється рослинами. При цьому важливі для рослин поживні речовини, такі як азот, фосфор та калій, зберігаються майже повністю (Фрайер, 2021).

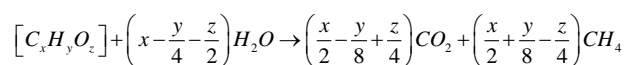
У процесі метанового бродіння можна виокремити три головні фази, кожна з яких включає активність різних бактерій:

1) Розкладання нерозчинної органічної речовини (целюлоза, жири, полісахариди) з утворенням вуглеводнів та жирних кислот;

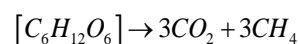
2) Діяльність кислотоутворюючих бактерій, які переважно виробляють оцтову та пропіонову кислоти;

3) Поглинання цих речовин метаноутворюючими бактеріями, що призводить до утворення біогазу, який складається з 60-70% метану (CH₄) та 30-40% вуглекислого газу (CO₂), а також містить водень, сірководень і інші гази.

Загальна реакція анаеробного бродіння може бути представлена як:



Наприклад, перетворення глюкози за загальною реакцією:



Теплове згоряння глюкози видає майже 2800 кДж/моль енергії, тоді як 3 моль метану виробляє приблизно 2700 кДж. Цей процес має екзотермічний характер, тому частина енергії втрачається у вигляді тепла. Теоретична ефективність цього процесу при повній переробці сировини досягає приблизно 95%, але ефективність переробки целюлози становить близько 90% (Чумаченко, 2022).

Гній як сировина для виробництва біогазу переробляється у так званих метанових резервуарах. Гній подається в ці резервуари у формі кашки, яка зазвичай містить 95% води за масою. У цих резервуарах підтримується потрібна температура (35°C для мезофільного та 55°C для термофільного процесів). Отриманий біогаз має теплоту згоряння близько 25 МДж/м³ і може використовуватися як паливо для топків, парових котлів або як заміник моторного палива у двигунах. Теплотехнічні характеристики біогазу представлені в таблиці 3 і на рис. 1.

Процес отримання біогазу ґрунтується на анаеробному бродінні органічних відходів при температурах від 25 до 35°C (мезофільні умови) та від 50 до 60°C (термофільні

Таблиця 3

Теплотехнічні характеристики біогазу (Кудря, 2020)

Показник	CH ₄	Компоненти CO ₂	H ₂	H ₂ S	Суміш 60% конверсійна маса + 40% CO ₂
Об'ємна частка, %	55-70	2744	1	3	100
Об'ємна теплота згоряння, МДж/м ³ (нижча)	353	10,8	22,8		21,5
Температура займання, С°	650-750		585		650-750
Густина:					
нормальна, г/л	0,72	1,98	0,09	1,54	1,20
критична, г/л	102	408	31	349	320

умови) у спеціалізованих біогазових установках, відомих як метантенки. Ці металеві резервуари оснащені системами підігріву. Метаногенерація дозволяє скоротити час ферментації та знезараження органічних відходів до 5-10 днів. Біогазові технології вирізняються тим, що вони не обмежуються лише виробництвом енергії, але також включають вирішення екологічних, агрохімічних, лісотехнічних та інших проблем, що сприяє їх високій рентабельності та конкурентоздатності (Zhang та ін., 2021).

2. Твердофазна аеробна ферментація – складний біологічний процес, в ході якого органічні речовини обробляються в аеробних умовах при температурі 50-65°C та вологості субстрату 60-70%. Термохімічний метод передбачає нагрівання біомаси без доступу кисню до 500-800 °C (для деревних відходів), що значно нижче температури газифікації вугілля. В результаті такого процесу утворюються H₂, CO і CH₄. Біохімічний метод заснований на використанні бактерій, таких як: «Rhodobacter spheroides», «Enterobacter cloacae».

Мікробіологічний процес ферментації проходить за такою послідовністю. Спочатку у субстраті розвиваються мезофільні мікроорганізми, які розщеплюють органічні азотовмісні речовини, споживаючи вуглеводи та вивільняючи аміак до моменту, коли його концентрація стає токсичною для цих мікроорганізмів. Внаслідок цього температура субстрату зростає, що призводить до загибелі мезофільної мікрофлори, створюючи умови для розвитку термофільних мікроорганізмів. Вони використовують аміак, органічні речовини, мертві мікроорганізми, а також проміжні метаболіти та синтезують мікробіологічний білок, знову вивільняючи аміак, який асимілюється мікроорганізмами. Компостування слід припинити тоді, коли компост найбільш багатий

на поживні речовини, оскільки подальше продовження ферментації може призвести до повного перетворення органічної речовини на діоксид вуглецю, воду, аміак і мінеральні солі. Зазвичай ферментація триває від 7 до 14 днів. Отриманий продукт – компост – є однорідною сухою сипучою масою темно-коричневого кольору, яка не має неприємного запаху. Він характеризується високим рівнем біогенності та поживності, що обумовлено вивільненням поживних елементів з природних біополімерів органічної сировини та мікробіологічним синтезом вторинних метаболітів під час ферментації (Обухов, Ібрагім, Толба, Ель-Ріфаї, 2019).

Технологія твердофазної аеробної ферментації є технічно та економічно доступною для впровадження у господарствах різних форм власності та різного фінансово-економічного стану. Ця технологія особливо перспективна для застосування у біологічному землеробстві, зокрема в обробці органічних відходів.

3. Вермікомпостування базується на переробці органічних відходів та різних типів гною за допомогою дощових хробаків, в результаті чого утворюється високоякісне органічне добриво, відоме як вермікомпост або комерційно як біогумус. Для цього процесу використовується безліч видів дощових хробаків, але найбільшу популярність здобув червоний каліфорнійський хробак, який був селекційно виведений у 1950-х роках у Каліфорнії (США) на основі продуктивної лінії гнойового хробака. Цей гібрид та подібні до нього штами широко поширилися в країнах Західної та Східної Європи, включаючи Україну з початку 1990-х років (Ярмола, 2023).

Харчуванням для хробаків служать ферментовані органічні відходи та різні типи гною. У багатьох закордонних технологіях використовується попередня метан-гене-

рація або твердофазна аеробна ферментація перед подачею корму хробакам. Прості та доступні методи виробництва вермікомпосту включають застосування буртів, лежаків або ящиків. Оптимальні умови для активного розмноження хробаків – температура близько $20\pm 2^\circ\text{C}$, вологість 65-70%, рН середовища 6,5-7,5. При дотриманні технології популяція хробаків може зрости протягом року.

Вермікомпости вважаються якіснішими та ефективнішими, ніж звичайні компости, вони більш стерильні, містять корисні штами мікрофлори та біостимулятори, що сприяють росту, розвитку та дозріванню рослин. Також дощові хробаки мають здатність накопичувати важкі метали або інші забруднювачі у своєму організмі, знижуючи їх концентрацію у вермікомпості порівняно з оригінальним кормом. Вермікомпост може бути застосований як компонент ґрунту у теплицях до 20-23% від загального об'єму (Products. Energy, sustainability and innovation. Enel Group, 2023).

Біогазові технології переробки гною та органічних відходів особливо перспективні для фермерських та тепличних господарств, оскільки вони дозволяють отримувати цінні добрива разом з біогазом, який складається з 55-85% метану і 15-45% вуглекислого газу. Біогаз може використовуватися для опалення теплиць, пропарювання ґрунту та інших потреб. З 1 тонни органічних речовин (з вологістю 10%) можна отримати до 552 м³ біогазу. Енергія, що міститься в 1 м³ біогазу з вмістом метану 62%, еквівалентна 0,6 м³ природного пального газу, 0,74 л нафти, 0,67 л дизельного пального, 0,49 л бензину тощо. Застосування біогазу також дозволяє економити мазут, вугілля, електроенергію та інші енергоресурси. Згідно із закордонним досвідом, переробка гною від 300 корів забезпечує біогазом потреби 600 осіб (Редько та Аленіна, 2021).

Метанове анаеробне ферментування органічних субстратів є складним багатостадійним процесом, що включає чотири основні стадії: гідроліз, кислотогенез, ацетогенез та метаногенез. Кінцевим продуктом цього ферментування є біогаз. На першому етапі, гідролізі, органічний матеріал субстрату розкладається на білки, вуглеводи та жири. Гідролітична мікрофлора перетворює білки на амінокислоти, вуглеводи на моносахариди, а жири на моносахариди та високомолекулярні жирні кислоти. На другому етапі, кислотогенезі, відбувається перетворення моносахаридів та амінокислот на леткі жирні кислоти. Далі, на етапі ацетогенезу, ці леткі та високомолекулярні

жирні кислоти перетворюються на ацетати та водород (Амонс і Красняк, 2023). На завершальному етапі, метаногенезі, з ацетату, а також водороду та вуглекислого газу утворюється метан.

Біогаз можна класифікувати за трьома категоріями залежно від вихідної сировини (Ярмола, 2023):

- з відходів тваринництва (наприклад, гній, послід птахів), відходів рослинництва (наприклад, кукурудзяний силос, сорго, буряковий жом) та відходів харчової промисловості (наприклад, молочна сироватка, мелясна барда, пивна дробина);
- з органічної складової полігонів твердих побутових відходів;
- з осадів стічних вод міських і промислових очисних споруд.

Для переробки відходів сільськогосподарських підприємств використовуються реактори типу CSTR (реактор з постійним перемішуванням). На рис. 1 зображена типова блок-схема роботи біогазової станції з таким реактором. Сировину, яка є субстратом для отримання біогазу, спочатку подрібнюють та гомогенізують, при необхідності виконують попередню хімічну обробку. Підготовлений субстрат подається до реактора, де він перемішується з мікроорганізмами при підтримці сталої температури. Біогаз, що утворюється під час ферментації, накопичується у верхній частині реактора чи в газгольдері. Після видалення з біогазу домішок сірководню та вологи, його використовують для генерації електричної енергії або очищають від вуглекислого газу для отримання біометану (Renewables, 2020: Analysis ..., 2020).

Для ферментування деяких видів сировини без застосування коферментів потрібно використовувати двостадійну технологію. Як приклад, отримання біогазу з посліду птахів або спиртової барди в стандартному реакторі може бути складним. Ефективна переробка таких матеріалів і досягнення високого виходу біогазу вимагають застосування додаткового реактора для гідролізу, де можна регулювати рівень кислотності, щоб запобігти утворенню умов з надмірним вмістом кислот або лугів. Більшість сучасних біогазових установок включає декілька реакторів (Makedon et al., 2021).

На основі отриманих досліджень було створено комплексну енергетичну систему, яка складається з газогенератора та анаеробного реактора. Газ, вироблений у газогенераторі, направляється в анаеробний реактор, де відбувається охолодження, конденсація вологи та органічних речовин, які потім змішуються з коров'ячим гноєм. Генераторний газ проходить через суб-

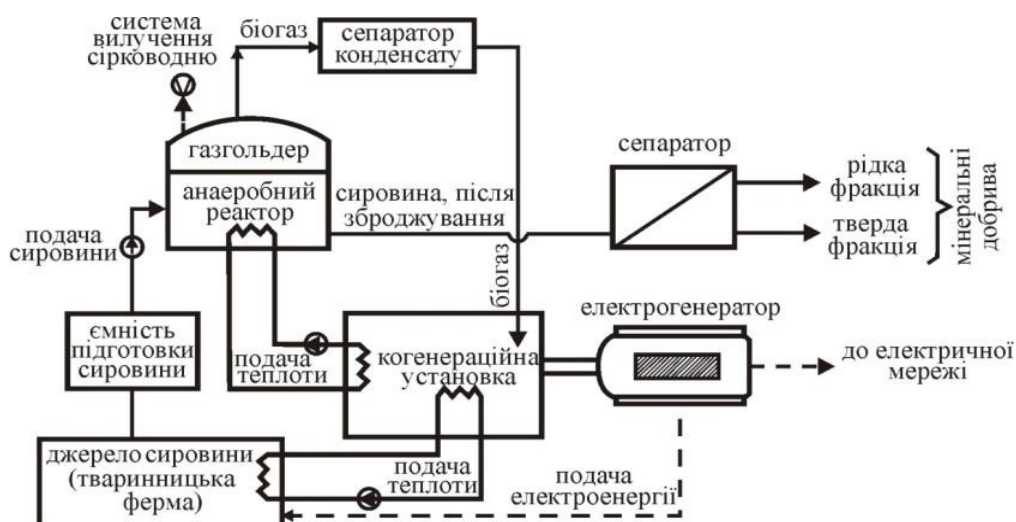


Рис. 1. Типова блок-схема роботи біогазової станції при використанні у якості палива біоконверсійних культур (Македон, Михайленко, Красніков, 2023; Affordable and Clean Energy. Swedish Energy Agency, 2021)

страт, забезпечуючи його перемішування, руйнування кірки на поверхні субстрату, зміщується з біогазом і направляється у дизель-генератор для виробництва електроенергії [17]. Для промислового застосування методу переробки конденсату була розроблена основна схема, яка представлена на рис. 2.

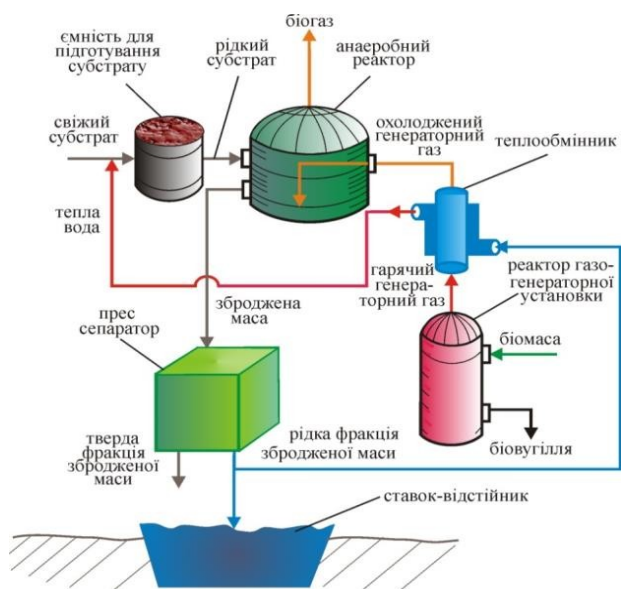


Рис. 2. Комплексна енергетична установка отримання біогазу з біоконверсійних культур (BDO in Україна, 2023)

Переваги спільного використання біогазових та газогенераторних систем включають:

- тепло, що генерується генераторним газом, застосовується або для забезпечення стабільної температури у біогазовому реакторі, або для передпідігріву субстрату;
 - органічні кислоти, розчинні смоли та фенольні сполуки використовуються як вихідний матеріал для виробництва біогазу.
- При проходженні генераторного газу крізь шар субстрату відбувається його ефективне перемішування та розпад поверхнього шару субстрату. Використання стічних фенольних вод з газогенераторних систем у біогазових установках, без необхідності застосування спеціальних бактерій, дозволяє переробляти ці води у вже існуючих промислових біогазових комплексах, число яких зростає.

Обговорення

Одним з основних напрямків майбутньої роботи є подальше вдосконалення методів анаеробного бродіння та ферментації з метою підвищення ефективності виробництва біогазу та біоетанолу. Це включає розробку нових штамів мікроорганізмів з підвищеною продуктивністю, а також оптимізацію умов ферментації. Крім того, важливим аспектом є розширення спектру сировинної бази для біоконверсії, зокрема через використання відходів сільськогосподарського та харчового виробництва, а також міських органічних відходів. Дослідження у цій області допоможуть знайти оптимальні способи переробки різних типів біомаси та їх ефективне використання. Потенціал розвитку біогазових технологій та інтеграції газогенераторних систем

нераторних систем в енергетичний ланцюг також є предметом подальших досліджень. Це включає розробку ефективних та економічно вигідних систем для переробки біогазу у вищі форми енергії, такі як біометан або електрична енергія, а також вивчення можливостей зберігання та транспортування біогазу. Наукові дослідження в галузі твердофазної аеробної ферментації та вермікомпостування відкривають нові можливості для створення цінних органічних добрив та покращення ґрунтів, що сприятиме сталому розвитку сільськогосподарського сектору.

Існують певні недоліки та обмеження, які слід взяти до уваги: дослідження може бути зосереджене на обмеженій кількості видів біомаси, що не дозволяє повною мірою оцінити потенціал інших біоконверсійних культур. Розширення спектру вивчених культур може відкрити нові можливості для виробництва енергії; умови анаеробного бродіння та ферментації, такі як температура, рН та вологість, можуть істотно впливати на ефективність процесів. Відсутність стандартизованих умов у дослідженні може призводити до заниження або завищення реальної енергетичної ефективності.

Висновки

Визначено, що розвиток технологій біоконверсії органічних відходів у енергію відображає зростаючий інтерес до альтер-

нативних джерел енергії на тлі екологічних викликів, зменшення запасів невідновлюваних ресурсів та підвищення цін на традиційне паливо. Використання біомаси як джерела енергії сприяє зменшенню викидів парникових газів, зокрема CO₂, оскільки рослини під час росту абсорбують цей газ, що компенсує його викиди при спалюванні біомаси. Досліджено спектр технологій біоконверсії, від анаеробного бродіння, що виробляє біогаз, до ферментації для виробництва етанолу та аеробних методів, які включають компостування та вермікомпостування. Обґрунтовано, що анаеробне бродіння сільськогосподарських відходів демонструє високий потенціал у виробництві біогазу, що може бути використано як паливо, забезпечуючи альтернативу природному газу та іншим видам фосильного палива. Біогазові технології забезпечують не тільки виробництво енергії, але й сприяють вирішенню екологічних проблем, пов'язаних з органічними відходами, тим самим підвищуючи їх рентабельність і конкурентоздатність. Розроблені технології та методики, включаючи спільне використання біогазових і газогенераторних систем, демонструють значний потенціал для промислового впровадження, особливо у фермерських та тепличних господарствах, забезпечуючи виробництво енергії і цінних добрив.

Список використаної літератури

Амонс С., Красняк О. Екологізація аграрного виробництва як основа формування системи продовольчої безпеки України. *Економіка та суспільство*. 2023. №(47). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-47-41>.

Відновлювані джерела енергії / За ред. С.О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. 392 с.

Еколого-економічні засади збалансованого аграрного виробництва та використання природних ресурсів агросфери: монографія / за ред. О.І. Фурдичка. Київ: ДІА, 2022. 408 с.

Македон В.В., Байлова О.О. Планування і організація впровадження цифрових технологій в діяльність промислових підприємств. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія «Економічні науки»*. 2023. № 47. С. 16–26. <https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3>.

Македон В., Михайленко О., Красніков П. Управління розробкою та реалізацією національних і міжнародних проектів у сфері відновлювальної енергетики. *Підприємництво та інновації*. 2023. №(26). С. 5–13. <https://doi.org/10.32782/2415-3583/26.1>

Резніченко В.П., Ковальов М.М., Кулик Г.А. Обґрунтування замкненого ресурсозберігаючого виробництва екологічно безпечної сільськогосподарської продукції у сучасних енергонезалежних агроєкокомплексах. *Таврійський науковий вісник*. № 109 (1). 2019. С. 109–114. <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2019.109-1.17>.

Фрайер Е. Розвиток відновлювальної енергетики: досвід Східної Німеччини для України. *Журнал європейської економіки*. 2021. Т. 20. № 3. С. 464–483. [Електронний ресурс]. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/jee_2021_20_3_6 (дата звернення: 20.12.2023).

Чумаченко О. Роль відновлюваних джерел енергії у електроенергетичному балансі України. *Вчені записки Університету «КРОК»*. 2022. №3(67). С. 39–47. <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2022-67-39-47>.

Ярмола К.В. Стратегії виходу компаній на ринок відновлювальних джерел енергії в умовах глобальних кліматичних змін. *Нові компетенції для Індустрії 5.0 та управління даними для закладів вищої освіти* : збірник матеріалів круглого столу / під заг. ред. Храпкіної В.В., Пічик К.В.; Національний університет «Києво-Могилянська академія» [та ін.]. Київ : НАУКМА, 2023. С. 76–83.

Affordable and Clean Energy. Swedish Energy Agency. 2021. [Електронний ресурс]. URL: <http://www.energimyndigheten.se/en/aboutus/> (дата звернення: 10.01.2024).

BDO in Україна. 2023 рік: найближче майбутнє відновлювальних джерел енергії. Міжнародна аудиторська компанія BDO – BDO. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.bdo.ua/uk-ua/insights-2/information-materials/2023-the-near-futureof-renewables> (дата звернення: 12.01.2024).

EarthExplorer. 2023. [Електронний ресурс] URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата звернення: 12.01.2024).

Makedon V., Dzeveluk A., Khaustova Y., Bieliakova O., Nazarenko I. Enterprise multi-level energy efficiency management system development. *International Journal of Energy, Environment, and Economics*. 2021. Volume 29, Issue 1. pp. 73–91.

Obukhov S., Ibrahim A., Tolba M.A., M.El-Rifaie A. Power balance management of an autonomous hybrid energy system based on the dual-energy storage. *Energies*. 2019. Vol. 12. <https://doi.org/10.3390/en12244690>.

Products. Energy, sustainability and innovation. Enel Group. [Електронний ресурс] URL: <https://www.enel.com/company/services-and-products> (дата звернення: 04.01.2024).

Renewables 2020: Analysis and forecast to 2025. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2020> (дата звернення: 04.01.2024).

The big choices for oil and gas in navigating the energy transition / McKinsey & Company. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/the-big-choices-for-oil-and-gas-in-navigating-the-energytransition?cid=emlweb> (дата звернення: 04.01.2024).

Zhang X., Yao G., Vishwakarma S., Musumba M., Heyman A., Eric A. Davidson. Quantitative assessment of agricultural sustainability reveals divergent priorities among nations. *One Earth*. 2021. № 4. pp. 1262–1277.

References (translated & transliterated)

Amons, S., & Krasnyak, O. (2023). Ekolohizatsiia ahrarnoho vyrobnytstva yak osnova formuvannia systemy prodovolchoi bezpeky Ukrainy [Ecologization of agricultural production as the basis of the formation of the food security system of Ukraine]. *Ekonomika ta suspilstvo [Economy and Society]*, 47. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-47-41> [in Ukrainian].

Kudriya, S.O. (2020). Vidnovlyuvani dzherela enerhiyi [Renewable energy sources]. Kyiv, Instytut vidnovlyuvanoyi enerhetyky NANU [in Ukrainian].

Furdychko, O.I. (Ed.). (2022). Ekoloho-ekonomichni zasady zbalansovanoho ahrarnoho vyrobnytstva ta vykorystannya pryrodnykh resursiv ahrosfery: monohrafiya [Ecological and economic principles of balanced agricultural production and use of natural resources of the agrosphere: monograph]. Kyiv, DIA [in Ukrainian].

Makedon, V.V., & Bailova, O.O. (2023). Planuvannya i orhanizatsiya vprovadzhennya tsyfrovyykh tekhnolohiy v diyal'nist' promyslovykh pidpryyemstv. [Planning and organizing the implementation of digital technologies in the activities of industrial enterprises]. *Naukovyy visnyk Khersons'koho derzhavnogo universytetu. Seriya «Ekonomichni nauky» [Scientific Bulletin of Kherson State University. Series "Economic Sciences"]*, 47, 16–26. <https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3> [in Ukrainian].

Makedon, V., Mykhaylenko, O., & Krasnikov, P. (2023). Upravlinnya rozrobkoyu ta realizatsiyeyu natsional'nykh i mizhnarodnykh proektiv u sferi vidnovlyuval'noyi enerhetyky [Management of the development and implementation of national and international projects in the field of renewable energy]. *Pidpryyemnytstvo ta innovatsiyi [Entrepreneurship and Innovation]*, 26, 5–13. <https://doi.org/10.32782/2415-3583/26.1> [in Ukrainian].

Reznichenko, V.P., Koval'ov, M.M. & Kulyk, H.A. (2019). Obgruntuvannya zamknenoho resursozberihayuchoho vyrobnytstva ekolohichno bezpechnoyi sil'skohospodars'koyi produktsiyi u suchasnykh enerhonezaleznykh ahrokokompleksakh [Justification of closed resource-saving production of ecologically safe agricultural products in modern energy-independent agro-

ecocomplexes]. *Tavriys'kyi naukovyy visnyk [Taurian Scientific Herald]*, 109 (1), 109–114. <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2019.109-1.17> [in Ukrainian].

Frayyer, E. (2021). Rozvytok vidnovlyuval'noyi enerhetyky: dosvid Skhidnoyi Nimechchyny dlya Ukrayiny [Development of renewable energy: the experience of East Germany for Ukraine]. *Zhurnal yevropeys'koyi ekonomiky [Journal of European Economy]*, 20, 3, 464–483. [Electronic resource] URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/jee_2021_20_3_6 (access date 20.12.2023) [in Ukrainian].

Chumachenko, O. (2022). Rol' vidnovlyuvanykh dzherel enerhiyi u elektroenerhetychnomu balansy Ukrayiny [The role of renewable energy sources in the electricity balance of Ukraine]. *Vcheni zapysky Universytetu «KROK» [Scientific notes of the "KROK" University]*, 3(67), 39–47. <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2022-67-39-47> [in Ukrainian].

Yarmola, K.V. (2023). Stratehiyi vykhodu kompaniy na rynek vidnovlyuval'nykh dzherel enerhiyi v umovakh hlobal'nykh klimatychnykh zmin [Strategies for companies to enter the market of renewable energy sources in conditions of global climate change]. *Novi kompetentsiyi dlya Industriyi 5.0 ta upravlinnya danymi dlya zakladiv vyshchoyi osvity – New competencies for Industry 5.0 and data management for institutions of higher education: collection of materials of the round table: zbirnyk materialiv kruhloho stolu / pid zah. red. Khrapkinoyi V.V., Pichyk K.V.; Natsional'nyy universytet "Kyievo-Mohylyans'ka akademiya, Kyiv. NaUKMA* [in Ukrainian].

Affordable and Clean Energy. Swedish Energy Agency, (2021). [Electronic resource]. URL: <http://www.energimyndigheten.se/en/aboutus/> (access date 10.01.2024) [in English].

BDO in Ukraine. (2023). Nayblyzhche maybutnye vidnovlyuval'nykh dzherel enerhiyi. Mizhnarodna audytors'ka kompaniya BDO – BDO [The near future of renewable energy sources. International auditing company BDO – BDO]. [Electronic resource]. URL: <https://www.bdo.ua/uk-ua/insights-2/information-materials/2023-the-near-future-of-renewables> (access date 12.01.2024) [in Ukrainian].

EarthExplorer. (2023). [Electronic resource] URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (access date 12.01.2024) [in English].

Makedon, V., Dzeveluk, A., Khaustova, Y., Bieliakova, O., & Nazarenko, I. (2021). Enterprise multi-level energy efficiency management system development. *International Journal of Energy, Environment, and Economics*, 29, 1, 73–91 [in English].

Obukhov, S., Ibrahim, A., Tolba, M.A., & M.El-Rifaie, A. (2019). Power balance management of an autonomous hybrid energy system based on the dual-energy storage. *Energies*, 12. <https://doi.org/10.3390/en12244690> [in English].

Products. Energy, sustainability and innovation. Enel Group (2023). [Electronic resource]. URL: <https://www.enel.com/company/services-and-products> (access date 04.01.2024) [in English].

Renewables 2020: Analysis and forecast to 2025. (2020). [Electronic resource]. URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2020> (access date 12.01.2024) [in English].

The big choices for oil and gas in navigating the energy transition (2023). McKinsey & Company. [Electronic resource]. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/the-big-choices-for-oil-and-gas-in-navigating-the-energy-transition?cid=emlweb> (access date 04.01.2024) [in English].

Zhang, X., Yao, G., Vishwakarma, S., Musumba, M., Heyman, A., & Eric A., Davidson (2021). Quantitative assessment of agricultural sustainability reveals divergent priorities among nations. *One Earthe*, 4, 1262–1277 [in English].

Отримано: 30.01.2024

Прийнято: 19.02.2024