

С. Й. Ткаченко¹
Д. В. Степанов¹
Н. Д. Степанова¹

АНАЛІЗ СОЦІАЛЬНОЇ ТА ЕНЕРГО- І ПРИРОДОЗБЕРЕЖНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ БІОГАЗОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

¹Вінницький національний технічний університет

Розвиток ринку біогазу в Україні очікувано дозволить замінити 2,6...18 млрд м³ природного газу на рік, сприятиме посиленню енергетичної безпеки країни, створенню нових робочих місць, економічному розвитку регіонів, дозволить покривати пікові навантаження в електромережі, утилізувати відходи рослинництва, а також деякі відходи харчової промисловості. Біогазові технології належним чином вписуються в доктрину ООН сталого розвитку суспільства. Цикл одного з них стає початком другого циклу. Завдяки цьому досягається практично повна безвідходність і інтенсифікація виробництва на достатній відстані від меж динамічної рівноваги екосистеми. Такий комплексний підхід, з погляду експертів ООН, коли відходи і побічні продукти одного виробництва виступають в якості сировини або напівфабрикатів для другого, зможе повністю вирішити проблему сталого розвитку суспільства

Проаналізовано основні складові ефекти (продукти) біогазової технології: соціально-екологічний, агротехнічний (біодобриво), енергетичний. Сформульовано ексергетичний метод комплексної оцінки ефективності біогазової технології. Запропоновано узагальнену функціональну схему біогазової технології. Проаналізовано ефективність різних варіантів утилізації виробленого біогазу, разом з тим і використання теплогенераторів безпосереднього спалювання, двигунів внутрішнього згорання, паротурбінних, газотурбінних та мікротурбінних установок, систем тригенерації, а також технологій отримання біометану та додавання його в мережі газопостачання. За результатами досліджень виявлено раціональні варіанти утилізації біогазу для біогазових установок різних типорозмірів. Встановлено групи факторів впливу на процеси метаногенезу у біогазових установках. Проаналізовані фізичні фактори впливу на інтенсивність процесу зброджування. Запропоновані технічні та організаційні рішення щодо підвищення ефективності біогазових установок.

Ключові слова: біогаз, ексергія, біогазова установка, енергетичний ефект, еколого-соціальний ефект, ефект використання біодобрив, утилізація біогазу, теплогенератор, двигун внутрішнього згорання, газотурбінна установка, тригенераційна система, біометан, вуглекислота, біореактор, перемішування, зброджування.

Вступ

Україна належить до країн з дефіцитом власних викопних палив, в ній низький рівень розвитку поновлювальної енергетики, але водночас вона має гарні передумови для майбутнього розвитку вторинних джерел енергії, наприклад, біоенергетики [1]. Розвиток біогазових технологій створює комбінований позитивний ефект, що містить як енергетичний, так і екологічний і соціальний ефекти. Одним з найдоцільніших способів переробки органічних відходів залишаються біогазові технології, в яких реалізуються контрольовані процеси анаеробного зброджування.

Загальний потенціал України оцінюється в 52 млрд м³ біогазу на рік [2]. Враховуючи структуру підприємств та технічну і економічну доцільність, обсяг біогазового виробництва в Україні оцінюється в 1600 установок з міні-ТЕЦ потужністю 100 кВт. Загальна встановлена потужність БГУ (біогазова установка) може сягати 820 МВт електроенергії [3]. На сьогодні працюють великі БГУ на відходах птахофабрик «Чернобаївка» (в проекті 21 МВт), компанії МХП (в проекті 26 МВт) та ін.

За даними Біоенергетичної асоціації в 2010 році вся біоенергетика давала 1,1 млрд м³ біогазу, в 2014 — до 3 млрд м³, до кінця 2020 р. очікується 5,4 млрд м³ на рік, а до 2030 року — 8,4 млрд м³ на рік. До 2030 року варто освоїти 51 % економічно доцільного ринку БГУ, а загальне річне виробництво електричної енергії може становити 2,5 млрд кВт·год [3].

У світі широко зростає виробництво біогазу та поширюється його використання в енергетиці. Розвиток ринку біогазу в Україні очікувано дозволить замістити 2,6...18 млрд м³ природного газу на рік, сприятиме посиленню енергетичної безпеки країни, створенню нових робочих місць, економічному розвитку регіонів, дозволить покривати пікові навантаження в електромережі, утилізувати відходи рослинництва, а також деякі відходи харчової промисловості.

З позицій об'єктивного аналізу проблеми нижче наводяться негативні результати застосування біогазової технології [4], вказуються причини негативного результату. Проведені розрахунки за моделлю безперервного виробництва біогазу для переробки екскрементів 2000 голів великої рогатої худоби в мезофільних умовах ферментації. Економічний аналіз показав, що попри прийнятний рівень щодо зниження капітальних витрат, ціна газу в 7...10 разів вище від ціни природного газу, а вартість тепла, одержаного при згоранні біогазу в 12...14 разів більше вартості тепла, одержаного при згоранні природного газу. Зроблено висновок, що виробництво біогазу як альтернативного джерела енергії за цією технологічною схемою є недоцільним. У Радянському Союзі перше підприємство з виробництва біогазу введено в дію в Тбілісі в 1950 році. З економічного погляду підприємство було нерентабельне і невдовзі ліквідовано. З практичного погляду цікавість до метаногенезу в СРСР підтримувалася тільки можливістю отримання вітаміну В12 з одержаної біомаси. Наприкінці 50-х років минулого століття потужна установка напівперіодичної дії для переробки тваринницького гною була змонтована і запущена в Запоріжжі (на острові Хортиця). Вона пропрацювала декілька років, але наслідок абсолютної нерентабельності виробництва, неконкурентоспроможності з природним газом, який в необмеженій кількості мала країна, технічної недосконалості, її наприкінці 60-х років ХХ ст. демонтували. У цих випадках досліджувався лише один ефект біогазової технології — енергетичний [4].

Мета роботи — встановлення умов рентабельної реалізації потенціалу біогазової технології.

Результати досліджень

Біогазові технології належним чином вписуються в доктрину ООН сталого розвитку суспільства. Сучасні технології (виробництва), за можливістю, повинні бути зв'язані між собою таким чином, що кінцевий цикл одного з них стає початком другого циклу. Завдяки цьому досягається практично повна безвідходність і інтенсифікація виробництва на достатній відстані від меж динамічної рівноваги екосистеми. Такий комплексний підхід, з погляду експертів ООН, коли відходи і побічні продукти одного виробництва виступають як сировина або напівфабрикат для другого, зможе сприяти вирішенню проблеми сталого розвитку суспільства.

Для дослідження ефективності утилізації біогазу розроблена узагальнена функціональна схема біогазової технології (рис. 1) на основі методології, наведеної в [5]. Узагальнена функціональна схема біогазової технології включає всі можливі технологічні процеси та витрати ресурсів для їх здійснення. Під час підготовки субстрату до зброджування використовується вода для зволоження, тепла енергія для підігріву та механічна енергія для подрібнення, перемішування і переміщення. В біогазовому реакторі відбуваються процеси анаеробного зброджування, при цьому використовується тепла та механічна енергія для перемішування та термостабілізації. Для оброблення збродженого субстрату використовується тепла енергія для сушки субстрату та механічна енергія для відділення рідкої фази, брикетування та транспортування добрив. Оброблення біогазу включає процеси осушення та відділення сірководню і вуглекислоти з використанням холоду та реагентів. Крім того, ця підсистема включає процеси стискування та акумулювання біогазу, біометану та вуглекислоти з використанням механічної енергії. Підсистема використання біогазу, біометану та вуглекислоти включає процеси спалювання біогазу та біометану для отримання теплової, електричної енергії та холоду, або заповнення балонів газами та подання біометану в газову мережу.

Встановлення великих біогазових установок можуть бути малоефективні в зв'язку зі складністю підвезення сировини. Тому найбільше розповсюдження в країнах Європи отримали невеликі та середні біогазові комплекси, завдяки яким забезпечуються теплою та електроенергією сільськогосподарські комплекси та сусідні населені пункти. Така «децентралізація» дозволить підвищити ефективність та надійність всієї системи енергопостачання України.

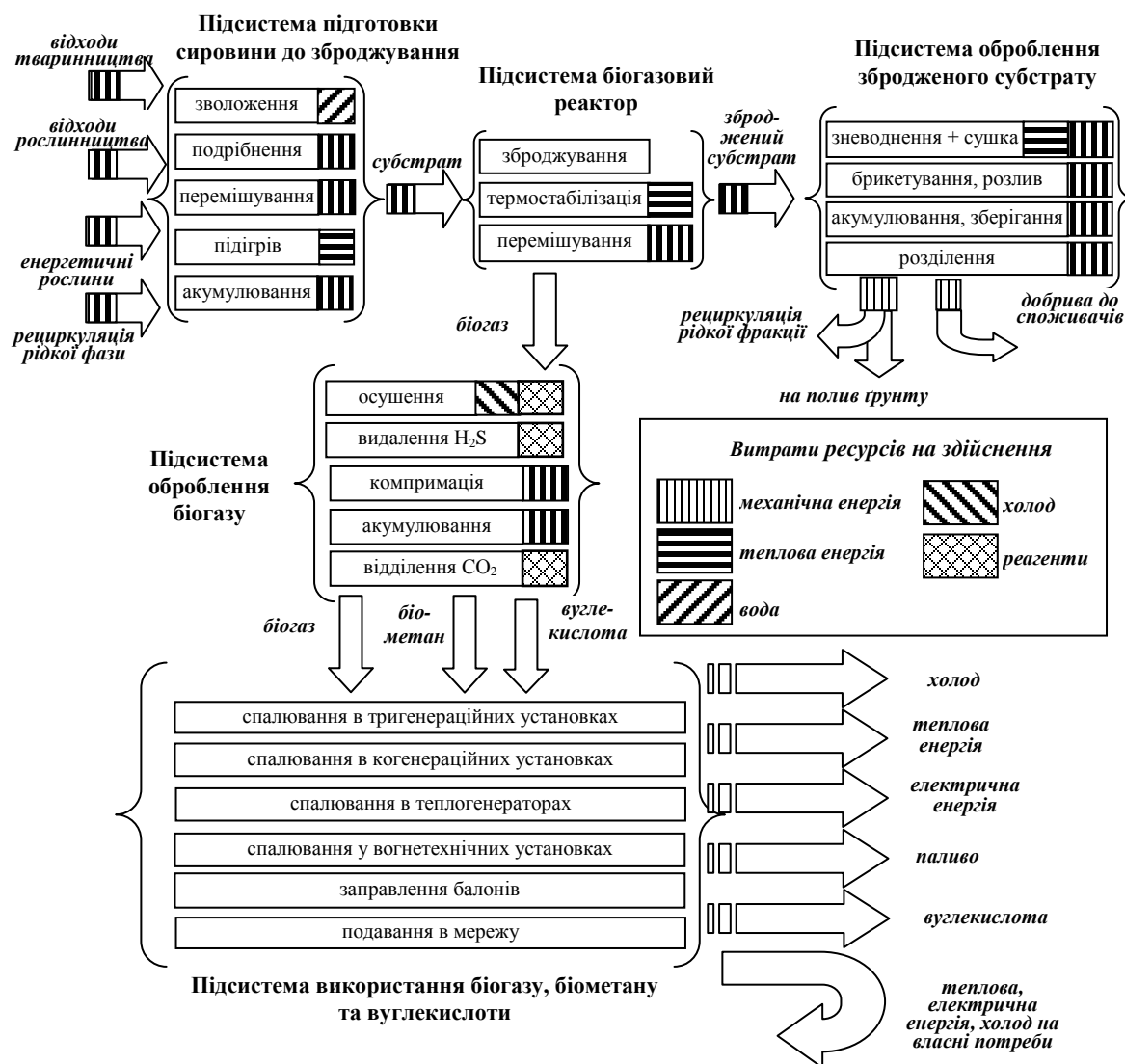


Рис. 1. Узагальнена функціональна схема біогазової технології

Енергія виробленого в БГУ біогазу може бути використана з отриманням одного, двох чи трьох енергетичних продуктів: теплової енергії (в теплогенераторах); електричної та теплової енергії (когенераційні установки — паротурбінні ПТУ, газотурбінні ГТУ, газопоршнєві ГПУ, мікротурбінні МТУ); електричної, теплової енергії та холоду (тригенераційні установки — когенерація + холодильна установка, частіше з абсорбційною холодильною машиною АБХМ).

Теплогенератори для спалювання біогазу мають широкий діапазон потужності і можуть бути встановлені в схемі БГУ з будь-яким об'ємом реактора. Конструкція біогазових теплогенераторів не відрізняється від котлів на природному газі. Відмінністю є невеликі конструктивні особливості пальників для спалювання біогазу. Роботи з реконструкції газових пальників для ефективного спалювання біогазу виконані на одній з перших БГУ в Україні [6], [7].

Паротурбінні установки комплектуються паровими котлоагрегатами та паровими турбінами.

Діапазон електричних потужностей парових турбін 75 кВт...1900 МВт. Таким потужностям відповідають БГУ з об'ємом реактора від 800 м³ і більше.

Газотурбінні установки мають переважно великі одиничні електричні потужності (3...25 МВт), а також чутливі до складу паливного газу. Для ефективної їх роботи бажано збагачувати біогаз до біометану [8].

Мікротурбінні установки мають потужність 30...250 кВт, менш чутливі до складу паливного газу і можуть працювати на біогазі з тваринницьких відходів та на звалищному газі.

Найрозповсюдженішими та найраціональнішими когенераційними установками для утилізації біогазу є газопоршнєві двигуни внутрішнього згорання. Вони мають достатньо високий ККД з

виробництва електроенергії, простіші в експлуатації та менш вибагливі до складу біогазу. Одиначна потужність когенераційних газопоршневих установок (КГПУ) складає від 5 кВт до 9 МВт. Це дозволяє утилізувати біогаз від установок з реактором від 50 м^3 до $85\,000 \text{ м}^3$ і більше у разі встановлення групи КГПУ. Таким чином, КГПУ можуть бути забезпечені всі можливі типорозміри БГУ, крім малих (до 50 м^3 реактора). Електричний ККД малих КГПУ складає 33...35 % і збільшується для великих КГПУ до 40...42 %.

Абсорбційні холодильні машини використовують теплоту для виробництва холоду. Розроблено ряд типорозмірів АБХМ (70...4850 кВт холоду), що працюють на гарячій воді в комбінації з КГПУ. За умов температури грійної води $90/85 \text{ }^\circ\text{C}$ і температури холодної води $7/12 \text{ }^\circ\text{C}$ холодильний коефіцієнт таких машин складає 0,65...0,8, зростаючи зі збільшенням холодої потужності. Таким чином, така АБХМ може використовувати теплоту від КГПУ з електричною потужністю від 65 кВт, що відповідає об'єму реактора БГУ від 700 м^3 .

Біометан додають в мережі газопостачання, спалюють в когенераційних установках, використовують як моторне паливо. Збагачення біогазу до біометану в Німеччині, Австрії використовуються за умов витрат біометану $250...10000 \text{ м}^3/\text{год}$ [9]. Ця умова відповідає тваринницьким біогазовим установкам з об'ємом реактора від 9000 м^3 і вище.

Під час збагачення біогазу можна отримати додатковий продукт — вуглекислий газ CO_2 . Способи використання CO_2 : харчова промисловість — консервант E290, розпушувач; в сільському господарстві — добавка в повітря для теплиць; в пожежній справі — заповнювач вогнегасників; в холодильній технології — холодоагент в холодильних установках, сухий лід тощо.

Вуглекислота CO_2 є альтернативним природним холодильним агентом R744. Вуглекислота на відміну від інших холодоагентів нетоксична, негорюча, має високу холодовидатність, інертна до матеріалів, безпечна у використанні, дешева, доступна, і в замкненому циклі незначно впливає на атмосферу. Відносними недоліками R744 є можливість утворення кислоти у разі контакту з вологою та високі робочі тиски у випарнику ($35...50 \text{ бар}$) та конденсаторі ($60...120 \text{ бар}$), що підвищує вимоги до відповідного обладнання. Провідними виробниками холодильного обладнання (Danfoss, AlfaLaval) розробляються установки, що працюють на R744. Переважно R744 використовується в нижніх ступенях каскадних машин, в теплових насосах, допоміжних холодильних системах та як проміжний холодоносій.

Біогаз в отриманому стані зберігати в значних об'ємах неможливо через високу вартість такого рішення. Біогаз неможливо стиснути до значного тиску без попереднього очищення до метану, оскільки вуглекислий газ в біогазі не дає можливості стиснути його до 200 атм. А при стисненні всього лише до декількох атмосфер об'єм, який займає біогаз, зменшиться незначно. Процес очищення біогазу від вуглекислого газу складний.

Отже, очищення біогазу, отримання і стиснення біометану доступне лише на крупних біогазових установках. Біометан відправляють в загальну газову мережу, яка в цьому випадку слугує накопичувачем, куди можна направляти газ влітку і відбирають взимку.

Похідні від спалювання біогазу — теплова і електрична енергія. Теплову енергію взагалі неможливо накопичувати і зберігати довгий час, а електричну енергію накопичувати можна в акумуляторах. Для великих біогазових установок застосовувати акумулятори неможливо. Для малих БГУ акумулятори можуть накопичувати енергію лише на декілька діб. Отже електроенергію має сенс продавати в загальні електромережі (за зеленим тарифом).

Енергетичні продукти біогазової установки зберігати довгий час самостійно неможливо і невідносно, але можна використовувати централізовані засоби для зберігання таких видів енергії.

Біодобриво після БГУ можна зберігати та застосовувати в зручний час. Для сільськогосподарських БГУ ефект створення біодобрив є одним з визначальних, тому що використання отриманих в БГУ органічних речовин дозволяє відновити родючість ґрунту, підвищити врожайність і екологічність вирощування культур, а також запобігати виснаженню ґрунтів.

Аналізуючи принципи роботи та наявну літературу, встановлено, що на інтенсивність процесу зброджування впливають такі групи факторів: біологічні, фізичні, хімічні та організаційно-технологічні.

До основних видів біологічних факторів можна віднести склад зброджуваної біомаси, склад мікрофлори та умови життєдіяльності мікроорганізмів. Концентрація, кислотність середовища, вміст легких жирних кислот у зароджуваній масі, обсяг і склад біогазу, що утворюється — хімічні фактори впливу на процес зброджування. До організаційно-технологічних факторів впливу на процес зброджування можна віднести дозу добового завантаження свіжих порцій зароджуваної маси, завантаження біореактора органічною речовиною ($\text{кг СОР}/(\text{м}^3 \cdot \text{добу})$).

Фізичні фактори впливу: температура збродження, гідродинамічні і тепломасообмінні процеси, структура суміші.

На ринку Західної Європи присутнє велике розмаїття біогазових установок. У діючих БГУ переважають реактори циліндричної форми. Недоліками такого типу біогазових реакторів є те, що за рахунок недостатнього та нерівномірного прогрівання різних частин суміші коливання температур в об'ємі реактора стають значними. Це порушує технологічні вимоги та зменшує продуктивність щодо виходу біогазу порівняно з теоретичним [10].

За рахунок невідповідності вертикального градієнту температур у нижній зоні утворюється холодний малорухомий шар, а верхня зона перегрівається. До недоліків таких реакторів можна віднести також і великі площі теплообмінників.

Технологія бродіння в біогазових установках потребує дотримання визначених прийнятих меж температурного режиму та стабілізації теплообміну між нагрівником та субстратом.

Досвід експлуатації таких рідкофазних реакторів вказує на складності, зумовлені недосконалістю процесу, що виконується із застосуванням механічних гвинтових мішалок, які не проводять перемішування шарів субстрату у вертикальній площині. Таким чином, не задовольняються вимоги технологічного процесу гомогенізації та потреби підведення поживних речовин до колоній метаноутворюючих мікроорганізмів по всьому об'єму біореактора. Крім того, в таких реакторах не усувається явище розшарування біомаси з утворенням непродуктивних баластних шарів з різною питомою вагою [10].

У результаті накопичення мінеральної складової біомаси в нижній частині реактора в процесі експлуатації БГУ продуктивність реактора падає і протягом 2—3 років складає 50 % від проектної. Значно погіршуються експлуатаційні та економічні показники вироблення біогазу. Звільнення від баластних шарів є трудомісткою операцією, яку необхідно виконувати у шкідливих умовах [10].

Одним з факторів, що впливає на вихід біогазу в біогазовій установці є перемішування багатокомпонентної суміші. Відомі різні способи перемішування, а саме механічний (за допомогою мішалок різного виду), гідравлічний та аеродинамічний.

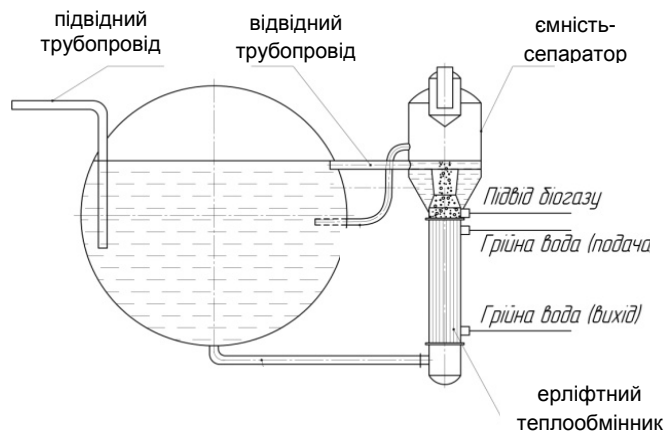


Рис. 2. Система циркуляційних контурів у біогазовому реакторі

До гідравлічного способу можна віднести застосування системи циркуляційних контурів для перемішування [11] (рис. 2). Використання цього методу дозволить вирішити не лише проблему перемішування, а і питання термостабілізації у реакторі біогазової установки. Аналізуючи енергозатрати на перемішування та термостабілізацію реактора встановлено, що на потреби перемішування (а саме привід компресора для біогазу) витрачається, залежно від об'єму, реактора 0,05...0,9 % виробленого біогазу.

Крім того система з циркуляційними контурами враховує мікробіологічні особливості анаеробного процесу, а саме обмеження стосовно швидкості руху субстрату ($w_c \leq 0,6$ м/с), що сприяє збільшенню виходу біогазу.

Необхідно розробити наукову базу і технічні рішення для усунення названих недоліків:

1) усунути розшарування біомаси. Авторами роботи [11] запропоновано перемішування у вертикальній площині, коли рідина з нижньої частини біореактора по циркуляційному контуру подається у верхню, при цьому підігрівається у виносному теплообміннику, тобто виконується перемішування та термостабілізація одночасно;

2) зменшити енерговитрати на процес перемішування [12];

3) створити технологічні і технічні рішення утилізації теплової енергії для можливості використання термофільного режиму, використання інокуляції і мобілізації;

4) отримати наукові, технологічні та технічні рішення для розроблення методів і засобів утилізації теплової енергії.

Біогазові технології у світі знаходять все більше застосування для вирішення еколого-соціальних проблем, проблем вироблення якісних добрив і газоподібного енергоносія.

В зв'язку зі складністю визначення названих ефектів співвідношення між трьома названими ефектами встановлюють, в основному, експертними методами.

Наразі в розвинених європейських країнах не стоїть проблема «чи будувати біогазові установку біля тваринницького комплексу?». Кожна тваринницька ферма повинна мати систему утилізації органічних відходів. Таким чином, еколого-соціальний ефект забезпечується обов'язковістю встановлення системи утилізації органічних відходів.

Авторами для оцінки ефективності БГУ запропонований і апробований [13] безрозмірний ексергетичний критерій, який є відношенням сумарної ексергетичної вартості основних видів продукції і ефектів за певний час: біогазу (біометану), добрив (інші ефекти), від попередження забруднення біосфери — до всіх видів витрат в ексергетичних одиницях [14]

$$E_{\Sigma}^* = (E_{EE} \cdot C_{EE} + E_{BB} \cdot C_{BB} + E_{CE} \cdot C_{EC}) / (\sum_{j=1}^n B_{Ej} \mp \sum_{j=1}^n E_{Uj}),$$

де C_{EE} , C_{BB} , C_{EC} — відповідно ексергетична вартість одиниці продукції (ефектів) E_{EE} , E_{BB} , E_{EC} ; $\sum_{j=1}^n B_{Ej}$ — сумарні приведені витрати (капітальні, експлуатаційні тощо), які віднесені до визначеного відрізка часу в ексергетичних одиницях; $\sum_{j=1}^n E_{Uj}$ — сумарні витрати (доходи), у формулі позначені \pm за умов утилізації біогазової установки з n елементів, які віднесені до визначеного відрізка часу в ексергетичних одиницях.

Визначивши одну складову E_i , наприклад, ефект від економії палива за рахунок виробленого біогазу і біометану E_{EE} , і використавши експертну оцінку співвідношень між складовими E_i , тобто $E_{EE} : E_{BB} : E_{EC} = a : b : c$, можна орієнтовно оцінити величину ексергетичного критерію — показника відносного сукупного еколого-економічного ефекту процесу біоконверсії.

Для оцінки ексергетичного показника ефективності біоконверсії до уваги взято співвідношення між ефектами: від використання палива E_{EE} ; від вироблення добрив E_{BB} ; екологічний E_{EC} .

Відповідно до [15] з мінімальним ефектом від попередження забруднення біосфери

$$E_{EE} : E_{BB} : E_{EC} = 0,27 : 0,72 : 0,003,$$

з максимальним ефектом від попередження забруднення біосфери

$$E_{EE} : E_{BB} : E_{EC} = 0,2 : 0,15 : 0,65.$$

Висновки

Аналіз ситуації в аграрному секторі та в енергетиці показав, що Україна має значний потенціал виробництва біогазу і заміщення ним викопних палив.

В роботі розроблено узагальнену функціональну схему біогазової технології, яка дозволяє врахувати можливі варіанти утилізації отриманих в реакторі продуктів, і головне — біогазу. Проаналізовані варіанти утилізації біогазу за допомогою різного енергетичного обладнання, а саме використання теплогенераторів безпосереднього спалювання, когенераційних установок на базі двигунів внутрішнього згорання, паротурбінних, газотурбінних та мікротурбінних установок, тригенераційного обладнання на основі ДВЗ та абсорбційних холодильних машин. До того ж, оцінено технологію отримання біометану з подальшим додаванням його в мережі газопостачання та вуглекислоти.

Виявлено, що отримання біометану доцільне для біогазових комплексів з об'ємом реактора понад 9000 м³. Тригенерація може бути ефективно використана для біогазових установок з об'ємом реактора понад 700 м³, а для когенерації мінімальний об'єм біореактора становить 50 м³. Використання теплогенераторів з безпосереднім спалюванням в них біогазу може використовуватись для біогазової установки будь-якого типорозміру.

Встановлено, що на процеси метаногенезу впливають біологічні, фізичні, хімічні та організаційно-технологічні чинники. Проаналізовано фізичні фактори впливу на інтенсивність процесу біоконверсії. Запропоновано метод, що дозволяє усунути розшарування біомаси у реакторі і одночасно дозволяє знизити енергозатрати на процес перемішування субстрату у біореакторі.

Сучасні технології (виробництва), по можливості, повинні бути зв'язані між собою таким чином, що кінцевий цикл одного з них стає початком другого циклу. Такий комплексний підхід, з погляду експертів ООН, коли відходи і побічні продукти одного виробництва виступають як сировина або напівфабрикат для другого, зможе сприяти вирішенню проблеми сталого розвитку суспільства.

Проаналізовано основні складові ефекти (продукти) біогазової технології: соціально-екологічний, агротехнічний (біодобриво), енергетичний. Запропоновано ексергетичний метод комплексної оцінки ефективності біогазової технології. Встановлені умови рентабельної реалізації потенціалу біогазової технології.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] *Развитие биогазовых технологий в Украине и Германии: нормативно-правовое поле, состояние и перспективы.* [Електронний ресурс]. Режим доступа: http://www.uabio.org/img/files/news/pdf/Razvitie_biogazovyh_tehnologiy_1.pdf.
- [2] *Стан та перспективи виробництва біогазу в Україні.* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://uabio.org/img/files/news/pdf/min-agro.pdf>.
- [3] Г. Г. Гелету́ха, *Перспективи біогазу в Україні.* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.epravda.com.ua/columns/2013/07/3/383399/>.
- [4] Ю. І. Сидоров, О. С. Мельниченко, В. П. Новіков, і Р. Я. Влязло, «Розрахункова модель безперервного виробництва біогазу та її економічний аналіз», *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*, № 497 : Хімія, технологія речовин та їх застосування, с. 65-70, 2004.
- [5] Д. В. Степанов, і С. Й. Ткаченко, «Метод формування функціональних та апаратурно-схемних ланцюгів систем виробництва енергоносіїв з органічних відходів», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 80-84, 2013.
- [6] Д. В. Степанов, Ю. В. Куріс, С. Й. Ткаченко, і Е. Н. Крючков, «Показатели работы бытового котла при сжигании смесей природного газа и биогаза», *Экотехнологии и ресурсосбережение*, № 1, с. 17-21, 2007.
- [7] С. Й. Ткаченко, Д. В. Степанов, Е. Н. Крючков, Ю. В. Куріс, і І. В. Літвішків, «Особенности работы водогрейного котла на биогазе», *Наукові вісті КПІ*, № 1, с. 25-29, 2006.
- [8] Е. П. Ясиницький, і Р. Й. Гупало, «Газотурбінний двигун на біогазі», *Вісник НАУ*, № 4, с. 167-170, 2011.
- [9] *Технічний звіт з оцінки потенціалу відновлюваної енергетики в Україні: Біогаз.* [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.uself.com.ua/fileadmin/documents/U-Biogas_Technical_Report.pdf.
- [10] Г. А. Голуб, *Біогаз. Модуль з серії навчально-методичних матеріалів*, в Проект «Підвищення енергоефективності і стимулювання використання відновлювальної енергії в агрохарчових та інших малих та середніх підприємствах України». Київ, Україна: НУБІП, 2015, 48 с.
- [11] С. Й. Ткаченко, Н. Д. Степанова, Н. В. Резидент, Д. І. Денесяк, і К. О. Іщенко, «Однопроходный биореактор биогазовой установки», *Пат. 125227 України, МПК C02F 11/04. № a201712221*; опубл. 10.05.2018, Бюл. № 9.
- [12] С. Й. Ткаченко, О. Ю. Бочкова, і Н. Д. Степанова, «Біогазова установка із системою циркуляційних контурів», *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*, № 4, Бер., 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/488>.
- [13] С. Й. Ткаченко, Є. П. Ларюшкін, Г. О. Нудель, і В. С. Таргоня, «Оцінка енергетичної ефективності біогазової установки», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2, с. 48-55, 1998.
- [14] В. М. Бродянский, и др., А. А. Долинский, В. М. Бродянский, Ред. *Экспериментальные расчеты технических систем*, справочное пособие. Київ, Україна: Наукова думка, 1991. 360 с.
- [15] В. Г. Некрасов «Оценка экономической эффективности метанового сбраживания навоза», *Техника в сельском хозяйстве*, № 6, с. 27-29, 1988.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 30.12.2019

Ткаченко Станіслав Йосипович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри теплоенергетики, e-mail: stahit6937@gmail.com ;

Степанов Дмитро Вікторович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики, e-mail: Stepanovdv@ukr.net ;

Степанова Наталія Дмитрівна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики, e-mail: Stepanovand@i.ua .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

S. Yo. Tkachenko¹

D. V. Stepanov¹

N. D. Stepanova¹

Analysis of Social and Energy and Sustainable Efficiency of Biogas Technology Implementation

¹Vinnitsia National Technical University

The development of the biogas market in Ukraine is expected to allow to replace 2.6... 18 billion m³ of natural gas per year, which will enhance the country's energy security, create new jobs, economic development of the regions, allow to cover peak loads in the electricity grid, utilize plant waste, as well as some food industry waste. Biogas technologies are properly integrated into the UN Doctrine of Sustainable Development. The cycle of one of them is the beginning of the second cycle. This results in virtually complete waste-free production and intensification of production at a sufficient distance from the dynamic ecosystem equilibrium boundaries. Such a comprehensive approach, from the point of view of UN experts, when waste and by-products of one production act as raw materials or semi-finished products for another, will be able to

completely solve the problem of sustainable development of society

The main constituent effects (products) of biogas technology are analyzed: socio-ecological, agrotechnical (biofertilizer), energy. The exergy method of complex estimation of efficiency of biogas technology is formulated. A generalized functional diagram of biogas technology is proposed. The effectiveness of different options for utilization of biogas produced, including the use of direct combustion heat generators, internal combustion engines, steam turbine, gas turbine and microturbine installations, triggering systems, as well as technologies for biomethane production and its addition to the gas supply network are analyzed. According to the results of the research, rational variants of biogas utilization for biogas plants of different sizes have been identified. Groups of factors of influence on the processes of methanogenesis in biogas plants have been established. Physical factors of influence on the intensity of the fermentation process are analyzed. Technical and organizational solutions for improving the efficiency of biogas plants are proposed.

Keywords: biogas, exergy, biogas plant, energy effect, ecological and social effect, biofertilization effect, biogas utilization, heat generator, internal combustion engine, gas turbine system, triggering system, biomethane, carbon dioxide, bioreactor.

Tkachenko Stanislav Yo. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Heat and Power Engineering, e-mail: stahit6937@gmail.com ;

Stepanov Dmytro V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor, of the Chair of Heat and Power Engineering, e-mail: Stepanovdv@ukr.net ;

Stepanova Natalia D. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Heat Power Engineering, e-mail: Stepanovand@i.ua

С. И. Ткаченко¹
Д. В. Степанов¹
Н. Д. Степанова¹

Анализ социальной и энерго- и природоохранной эффективности реализации биогазовых технологий

¹Вінницький національний технічний університет

Развитие рынка биогаза в Украине ожидаемо позволит заменить 2,6...18 млрд м³ природного газа в год, будет способствовать усилению энергетической безопасности страны, созданию новых рабочих мест, экономическому развитию регионов, позволит покрывать пиковые нагрузки в электросети, утилизировать отходы растениеводства, а также некоторые отходы пищевой промышленности. Биогазовые технологии должным образом вписываются в доктрину ООН устойчивого развития общества. Цикл одного из них становится началом второго цикла. Благодаря этому достигается практически полная безотходность и интенсификация производства на достаточном расстоянии от границ динамического равновесия экосистемы. Такой комплексный подход, с точки зрения экспертов ООН, когда отходы и побочные продукты одного производства выступают в качестве сырья или полуфабрикатов для второго, сможет полностью решить проблему устойчивого развития общества.

Проанализированы основные составляющие эффекты (продукты) биогазовой технологии: социально-экологический, агротехнический (биоудобрение), энергетический. Предложен эксергетический метод комплексной оценки эффективности биогазовой технологии. Предложена обобщенная функциональная схема биогазовой технологии. Проанализирована эффективность различных вариантов утилизации производимого биогаза, в том числе использование теплогенераторов непосредственного сжигания, двигателей внутреннего сгорания, паротурбинных, газотурбинных и микротурбинных установок, систем тригенерации, а также технологий получения биометана и добавления его в сети газоснабжения. По результатам исследований выявлено рациональные варианты утилизации биогаза для биогазовых установок различных типоразмеров. Установлены группы факторов влияния на процессы метаногенеза в биогазовых установках. Проанализированы физические факторы влияния на интенсивность процесса сбраживания. Предложенные технические и организационные решения по повышению эффективности биогазовых установок.

Ключевые слова: биогаз, эксергия, биогазовая установка, энергетический эффект, эколого-социальный эффект, эффект использования биоудобрений, утилизация биогаза, теплогенератор, двигатель внутреннего сгорания, газотурбинная установка, тригенерационная система, биометан, углекислота, биореактор, перемешивание, сбраживание.

Ткаченко Станислав Йосифович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теплоэнергетики, e-mail: stahit6937@gmail.com ;

Степанов Дмитрий Викторович — канд. техн. наук, доцент кафедры теплоэнергетики, e-mail: Stepanovdv@ukr.net ;

Степанова Наталья Дмитриевна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры теплоэнергетики, e-mail: Stepanovand@i.ua