

Н. В. Пришляк,

к. е. н., доцент, Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця

ORCID ID: 0000M0002M0544M1441

Д. М. Токарчук,

к. е. н., доцент, Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця

ORCID ID: 0000-0001-6341-4452

Я. В. Паламаренко,

к. е. н., старший викладач, Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця

ORCID ID: 0000-0001-9972-4313

DOI: 10.32702/2306-6814.2020.24.58

РЕКОМЕНДАЦІЇ З ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОЇ СИРОВИНИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ НА ОСНОВІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ ЩОДО ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЦІННОСТІ ВІДХОДІВ*

N. Pryshliak,

PhD in Economics, Associate Professor, Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia

D. Tokarchuk,

PhD in Economics, Associate Professor, Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia

Y. Palamarenko,

PhD in Economics, Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia

RECOMMENDATIONS FOR SELECTING THE OPTIMAL FEEDSTOCK FOR BIOGAS PRODUCTION ON THE BASIS OF EXPERIMENTAL DATA ON THE ENERGY VALUE OF WASTE

Серед сучасних підходів до утилізації органічних та рослинних відходів виділяють біоконверсію. Це екологічно безпечний напрям переробки біовідходів з метою отримання екологічно чистого біогазу. Вирішення проблеми утилізації відходів шляхом розробки сучасної технології біоконверсії сприятиме поліпшенню екологічного стану довкілля. Основними напрямками дослідження є визначення сировини, яку необхідно використовувати у подальшому для виробництва біогазу; теоретичне обґрунтування та експериментальний підхід до вибору відходів, які можуть використовуватися для отримання біогазу; статистична обробка експериментальних даних та визначення залежності виходу біогазу від ступеня підготовки сировини. Основними задачами цього дослідження є: визначення ефективності отримання біогазу на основі різних відходів сільського господарства; визначення чинників, що впливають на якість процесу метанового зброджування (кінетику і швидкість виходу біогазу) за отриманими результатами.

The problem of efficient waste recycling and disposal nowadays is one of the most acute in the world. Attention to the issues of rational waste management in Ukraine by both the authorities and the scientific community has significantly increased in recent years. The solution to the problem is possible through the implementation of effective measures for fast, safe waste processing and obtaining a positive economic and environmental effect from the disposal and reuse of feedstock. The aim of the article is to determine the optimal feedstock for biogas production based on the analysis

* Стаття включає результати досліджень відповідно до НДДКР "Розробка новітньої концепції використання відходів сільського господарства для забезпечення енергетичної автономії аграрних підприємств" Вінницького національного аграрного університету (номер державної реєстрації 0119U100786 від 19.02.2019 р.).

of available theoretical data, as well as our own experimental data, taking into account the energy value of waste. Among the most commonly used methods of waste disposal in modern conditions are incineration and disposal. Since combustion is a rather expensive and dangerous process for the environment, the use of biomass to generate heat and electricity is quite promising today. At present, Ukraine produces about 1.6 billion tons of all types of waste annually. In many cases, the amount of waste generated exceeds the volume of output. Among modern approaches to the disposal of organic and plant waste, bioconversion is distinguished. This is an environmentally friendly direction for processing biowaste in order to obtain environmentally friendly biogas. Solving the problem of waste disposal through the development of modern bioconversion technology will improve the ecological state of the environment. The main areas of research are the definition of raw materials that must be used in the future for biogas production; theoretical justification and experimental approach to the selection of waste that can be used for biogas production; statistical processing of experimental data and determination of the dependence of the biogas yield on the degree of raw material preparation. The main objectives of this study are: determination of the efficiency of biogas production based on various agricultural waste; determination of factors affecting the quality of the methane digestion process (kinetics and rate of biogas yield) with the obtained results.

*Ключові слова: сировина, біовідходи, біогазовий реактор, технологічні прилади та обладнання.
Key words: feedstock, biowaste, biogas reactor, technological devices and equipment.*

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Проблема ефективної переробки і утилізації відходів є однією з найгостріших у світі. Увага до питань раціонального поводження з відходами в Україні з боку як органів влади, так і наукових кіл в останні роки значно посилилась. Вирішення проблеми можливе завдяки впровадженню ефективних заходів швидкої, безпечної переробки відходів і отриманню позитивного економічного й екологічного ефекту від утилізації та багаторазового використання сировини. Серед найчастіше вживаних методів утилізації відходів у сучасних умовах застосовують спалювання і захоронення. Оскільки спалювання є достатньо дорогим і небезпечним для навколишнього середовища процесом, то досить перспективним на сьогодні є використання біомаси для генерації теплової та електроенергії. Згідно із Законом України "Про альтернативні види палива" біомаса — це "біологічно відновлювальна речовина органічного походження, що зазнає біологічного розкладу (відходи сільського господарства (рослинництва і тваринництва), лісового господарства та технологічно пов'язаних з ним галузей промисловості, а також органічна частина промислових та побутових відходів" [4].

Водночас накопичення відходів збільшується з кожним днем із зростанням населення та споживання, що безпосередньо має негативний вплив на навколишнє середовище та економіку. Органічні відходи сільського господарства становлять значну загрозу навколишньому середовищу та населенню [16]. Таким чином, управління органічними відходами є дуже важливим з огляду на зростаючий попит на енергію та погіршення екологічної ситуації [19].

Загальноєвропейські та світові тенденції поводження з відходами свідчать про зростання їх енергетичного використання, що дає змогу отримати біопалива для заміни традиційних енергоресурсів. Отримання біогазу з сільськогосподарських відходів дає можливість частково вирішити низку проблем, що стоять перед АПК

країни: економічну — збільшення конкурентоздатності аграрної продукції завдяки зменшенню витрат на енергоносії при її виробництві; енергетичну — власне виробництво палива, забезпечення енергетичної незалежності аграрних підприємств; агрохімічну — отримання екологічно чистих добрив; екологічну — утилізація органічних відходів, які завдають шкоди навколишньому середовищу; фінансову — зниження витрат на утилізацію органічних відходів і придбання традиційних енергоносіїв, соціальну — створення нових робочих місць [14].

Використання біогазу для виробництва енергії витісняє використання викопного палива і, таким чином, сприяє скороченню викидів парникових газів та інших забруднювачів [6].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Вирішенню проблем виробництва біогазу, отриманого з відходів сільського господарства, з метою енергозабезпечення присвячено праці як вітчизняних, так і зарубіжних вчених. Зокрема, дослідженням щодо вибору сировини та особливостей виробництва біогазу присвячені праці таких науковців: Скляр О.Г., Скляр Р.В. [12], Калетнік Г.М. [18], Гончарук І.В. [20, 21], Ємчик Т.В. [22], Ходаківська О.В. [22], Гармаш С.Н. [1], Гаценко К.В. [2], Г.Г. Гелетуша, Гаценко К.В. [2], Волошин М.Д., Хажмурадов М.А. [15], Козловець О.А. [7], Кириленко І.В. [6] та ін. Проте залишається не визначеними рекомендації з вибору оптимальної сировини для виробництва біогазу на основі експериментальних даних, які враховують енергетичну цінність відходів.

МЕТА СТАТТІ

Метою статті є визначення оптимальної сировини для виробництва біогазу на основі аналізу наявних теоретичних даних, а також власних експериментальних даних, що враховують енергетичну цінність відходів.

Таблиця 1. Економічно доцільний потенціал виробництва біогазу в Україні, 2018 р.

Типи підприємства	Основний вид відходів	Вміст сухої речовини, %	Кількість компаній, од.	Усього відходів, млн т/р	Потенціал виробництва біогазу, млн куб. м/год	Частка економічно доцільного потенціалу на БГУ з міні ТЕЦ від 0,1 МВт
Тваринницькі ферми	Послід	10-12	5079	20,5	385,8	97%
Свиноферми	Послід	7-10	5634	4,7	160,3	30%
Птахоферми	Послід	25-30	785	2,9	377,7	68%
Пивоварні	Післяспиртова барда	20-25	51	1,4	121,8	10%
Цукрові заводи	Меяса	10-12	60	6,5	975,5	46%
Спиртзаводи	Післяспиртова барда	6-8	58	4,5	116,8	13%
Переробка молока/виробництво сиру	Молочна сироватка	6-7	300	0,9-25	90	12%
Енергетичні плантації	Силос кукурудзи	20-25	Вирощування на 40 % площі орних земель		7405,5	-
Разом			11667		9633,4	54%

Джерело: сформовано за даними опрацьованої літератури [8].

Таблиця 2. Динаміка кількості біогазових установок і обсягу електроенергії, що виробляється в Україні за період 2015–2019 рр.

Роки	Кількість біогазових установок, од.			Потужність біогазових установок, МВт		
	Біогаз із відходів та сировини АПК	Біогаз із полігонів ТПВ	Всього	Біогаз із відходів та сировини АПК	Біогаз із полігонів в ТПВ	Всього
2015	5	7	12	11	7	18
2016	6	7	13	14	7	21
2017	9	12	13	14	7	21
2018	13	20	33	28	18	46
2019	20	25	45	47	23	70

Джерело: сформовано за даними Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України [3].

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Нині в Україні щорічно виробляється близько 1,6 млрд т усіх видів відходів. У багатьох випадках обсяги відходів, що утворюються, перевищують обсяги виробленої продукції. Так, наприклад, тваринницькі комплекси і птахофабрики можна розглядати передусім чергу як виробників відходів, оскільки обсяги гною і посліду в сотні і тисячі разів перевищують обсяги основної продукції. Кількість відходів агропромислового комплексу України сьогодні досягає 290 млн т на рік (108 млн т сухої речовини), причому більша частина цих відходів не утилізується. Це призводить до проблем окислення ґрунтів, відчуження сільськогосподарських земель (під зберігання гною), забруднення ґрунтових вод і викидів в атмосферу метану та інших парникових газів [12].

Виробництво біогазу із сільськогосподарської біомаси має велике екологічне значення і стає все більш важливим як джерело доходу для фермерів. При цьому виробляється поновлювана енергія. Близько двох третин відновлюваної енергії в Європейському Союзі надходить з біомаси, включаючи відходи.

Проаналізуємо економічний потенціал виробництва біогазу в Україні (табл. 1).

Біогаз є конкурентоспроможним із природним газом через низьку вартість органічної біомаси (побутові

відходи, сільськогосподарські відходи або харчова промисловість). Зазначимо, що на рішення інвестора щодо вибору біогазових установок впливають такі фактори: вид та характеристики сировини, наявні обсяги та логістика.

Аграрні підприємства мають різні варіанти залучення інвестиційних коштів на будівництво біогазової установки: власні кошти, лізинг або кредитування за рахунок європейського пільгового кредитування. Важливою є активізація діяльності у сфері біогазового виробництва, популяризація біогазу та подальше стимулювання розвитку галузі завдяки державній підтримці [13].

Наступним нашим кроком буде аналіз ринку біогазу в Україні та за кордоном з метою виявлення проблем і подальших перспектив розвитку.

Відтак обсяги інвестицій у біогазові станції в Україні за період 2012–2019 рр. становлять близько 112 млн євро. При цьому станом на 01.10.2019 р., 47 МВт (67 %) електроенергії виробляється біогазовими електростанціями, що працюють на відходах аграрних підприємств, а 23 МВт — із біогазу з полігонів ТПВ (табл. 2).

Порівняння статистичних даних по Україні (табл. 2) з даними по Німеччині (табл. 3) показало суттєву відсталість вітчизняного ринку біогазу від європейського лідера.

Таблиця 3. Динаміка кількості біогазових установок і обсягу електроенергії, що виробляється на його основі у Німеччині за період 2004–2019 рр.

Роки	Кількість біогазових установок, од.	Обсяг електроенергії, що виробляється на основі біогазу, МВт
2004	2050	390
2005	2680	650
2006	3500	1100
2007	3711	1271
2008	3891	1377
2009	5205	1893
2010	6311	2291
2011	7838	3097
2012	8292	3352
2013	8649	3637
2014	8746	3906
2015	9014	4018
2016	9209	4237
2017	9331	4550
2018	9444	4953
2019	9523	5228

Джерело: сформовано за даними опрацьованої літератури [9; 17].

Зазначимо, що розвиток ринку біогазу в Україні, відбувається в основному через сприяння великих компаній. Відповідно у країнах Європи понад 50% фермерських господарств мають біогазові установки різної потужності за сприяння державним програм підтримки. Для прикладу у Німеччині кількість діючих на базі фермерських господарств біогазових установок складає більше 9500, у цю кількість входять установки малої потужності. Якщо досліджувати кількість великих біометанових заводів, то їх кількість становить 194.

Варто зазначити, що Україна має значний потенціал щодо виробництва біогазу з відходів аграрних підприємств, враховуючи, що у нашій країні наявні високі

темпи розвитку агропромислового комплексу, який у свою чергу є основним постачальником біоенергетичної сировини.

Нині ситуація на вітчизняному ринку біогазу нагадує 2000-і роки у Німеччині (табл. 3), саме в той період відбувалося активне будівництво біогазових установок і вироблення біогазової енергії для потреб господарств.

Виходячи з теми дослідження, варто дослідити сировину, яка може використовуватися для виробництва біогазу. Проведений аналіз літературних джерел показав, що сировину можна класифікувати по-різному. Ми пропонуємо розділити її на 2 категорії, а саме: "основну" і "додаткову". Водночас варто зазначити, що отри-

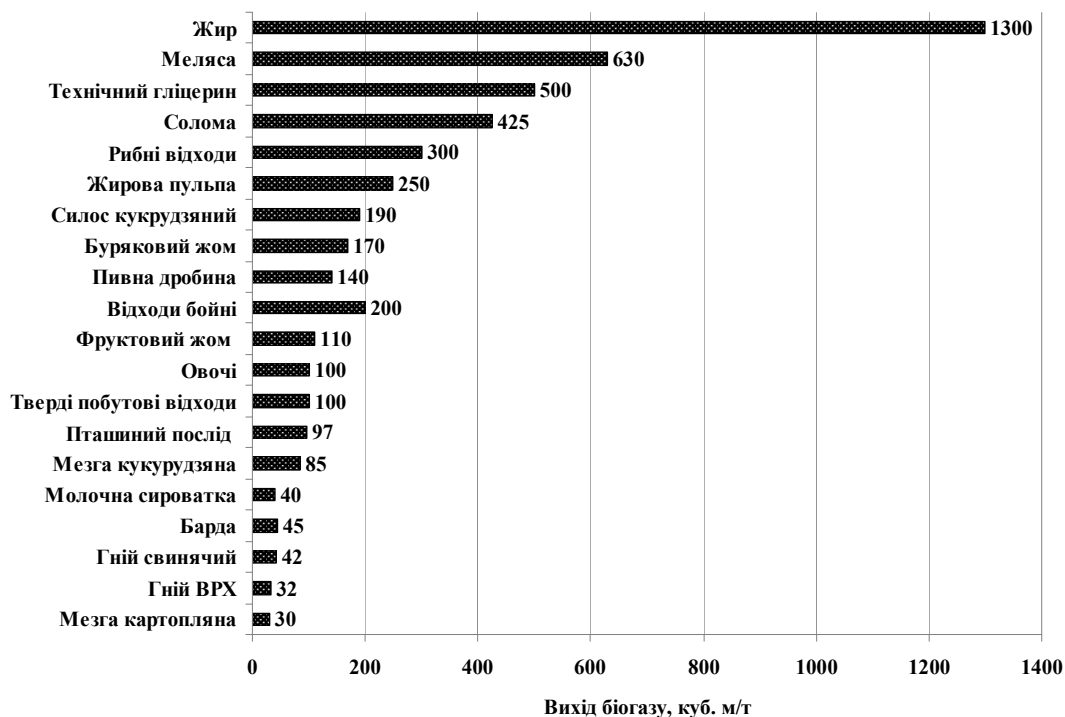


Рис. 1. Вихід біогазу з 1 тони сировини, м³

Джерело: сформовано за даними опрацьованої літератури [10].

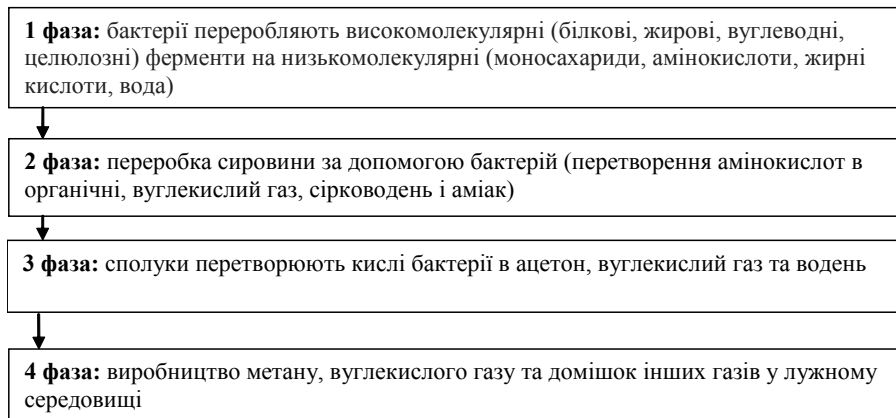


Рис. 2. Фази виробництва біогазу

Джерело: сформовано за даними опрацьованої літератури [15].

Таблиця 4. Результати отримання біогазу з органічних відходів

Найменування відходів	Вихід біогазу на 1 кг сухої речовини, дм ³ /кг	Вміст метану, %
Гній ВРХ	250	50
Свинячий гній	400	75
Солома пшениці	350	60
Соняшникове лушпиння	300	60

Джерело: [1].

мувати біогаз можна практично з будь-яких органічних речовин.

Додаткова сировина використовується як додатковий субстрат до основної сировини тваринного походження задля стабілізації процесів ферментації та переважно для підвищення економічної ефективності біогазових комплексів. Зазначимо, що використання додаткових видів сировини як моно-субстратів неефективне ні з технологічної, ні з економічної точок зору.

До основних видів сировини належать такі категорії органічних продуктів (відходів):

- відходи тваринництва;
- відходи підприємств харчової промисловості;
- органічна фракція муніципальних побутових відходів;
- органічний осад з водоочисних споруд;
- органічна фракція з полігонів ТПВ.

Відходи тваринництва — це відходи великих ферм ВРХ, свинокомплексів та птахоферм. Основні види відходів тваринництва:

- коров'ячий гній;
- свинячий гній;
- курячий послід птахокомплексів м'ясного напрямку;
- курячий послід птахокомплексів яєчного напрямку.

Підприємства харчової промисловості:

- цукрові заводи;
- спиртові заводи;
- м'ясокомбінати;
- пивзаводи;
- молокозаводи.

Аграрні підприємства отримують свої відходи, що мають різний енергетичний потенціал і особливості, про

які йтиме мова далі. Спільним є те, що ці органічні відходи у разі відсутності їх утилізації можуть бути небезпечними для навколишнього середовища.

Розглянемо потенційні види додаткової сировини рослинного походження:

- силосна кукурудза;
- цукрове сорго;
- цукровий буряк;
- солома зернових культур.

Зокрема, цукрові буряки у цьому переліку опинилися не випадково, оскільки широко використовуються в країнах ЄС через свою високу врожайність і значний показник виходу біогазу.

Окремої уваги заслуговують цукрові заводи. Їх відходи — цукровий жом — як сировина для отримання біогазу займає проміжне місце між вищезгаданими "основними" і "додатковими" категоріями. З одного боку, цей побічний продукт може реалізовуватись як корми для довколишніх ферм ВРХ. З іншого — його кількість і потенціал щодо вироблення біогазу дозволяють отримувати високий додатковий прибуток, що часом перевищує прибуток від виробництва цукру [11].

Розвиток біорізноманіття відходів сприяє поліпшенню довкілля та виробленню альтернативних джерел енергії для сільськогосподарських підприємств — біогазу [1]. Українська сільськогосподарська галузь має можливість виробляти 7,8 млрд м³ газу на рік, виробляючи величезні кількості первинних органічних відходів.

Якщо ж використовувати не тільки відходи сільськогосподарства, але й вторинні аграрні відходи, потенціал полігонів твердих побутових відходів, осад стічних вод та інші джерела сировини то, відповідно, кількість виробленого біогазу може зрости до 18 млрд м³.

На рисунку 1 показано обсяги виробництва біогазу з використанням різноманітної сировини. Вибираючи біогазові установки, потрібно мати на увазі, що їх можна застосовувати одночасно до різної сировини та використовувати різні методи залежно від вмісту вологи. Водночас спеціальні ферменти використовуються для підвищення ефективності виробництва біогазу та скорочення часу відновлення обладнання.

Виробництво електроенергії та тепла з біогазу здійснюється біогазовими установками та генераторами з використанням біомаси. Електростанції обох типів працюють на біомасі, при цьому необхідні лише незначні

зміни у характеристиках біогазової сировини та технологічному процесі. Водночас завдяки сучасним технологіям, біогаз можна виробляти після того, як було попередньо підготовлено будь яку органічну сировину.

Для генераторів біогазу найбільш ефективні такі види сировини: відходи від діяльності сільського господарства, а також від сільськогосподарських підприємств (гній, послід, жом, силос тощо), стічні води, побутові відходи зі звалищ та полігонів. Зазначимо, що ця сировина, здатна до бродіння (розпад бактерій та бактеріальне бродіння) та біогаз, змішаний з 60—70% метану та третиною CO₂.

При використанні біогазових установок процес переробки сировини займає близько 3—4 тижнів, і етапи перебродження біомаси зазвичай виконуються паралельно (рис. 2).

Спочатку рівень метану зростає поступово, але потім очікується постійний потік газу.

Низка науковців експериментально досліджували вихід біогазу з різних видів сировини. На особливу увагу заслуговують дослідження Гармаша С., Мітіна Н. та Збарєва І. Вчені в лабораторних умовах використовували пристрій (міні-реактор), який з'єднували за допомогою трубок через невелику ванну (гідрозатвор) з газовими накопичувальними ємностями — газгольдерами, газові ємності були з пластикових пляшок (або з гумових деталей).

Експеримент відбувався так: газ, зібраний через випускную трубу, подавався у факел, де спалювався. У першій серії експериментів об'єктом дослідження був гній верхової рогатої худоби. Експеримент тривав 32 дні. Під час дослідження силу концентрації біогазу вивчали у двох зразках. Вимірювання діаметра кульки в пластикових пляшках проводили з інтервалом 3—4 дні. Найвищі рівні метану були зафіксовані через тиждень після початку експерименту. Друга спроба була зроблена за допомогою свинячого гною.

Експеримент вивчав інтенсивність біогазу у двох зразках. Найвища концентрація метану була зафіксована через 6 днів після початку експерименту. Третя серія експерименту дослідження полягала у використанні соломи пшениці та лушпиння соняшнику. Виробництво біогазу відбувалося у лабораторії. Система отримання біогазу налаштована на регулювання температури при $t = + 40^{\circ} \text{C}$. Після заповнення шинного відділення протягом двох тижнів контролювали виділення газу. У таблиці 4 наведені середні результати виходу біогазу з органічних відходів (з трьома повтореннями).

Провівши експериментальне порівняння, науковцями було виявлено, що найвищий вихід біогазу був зафіксований під час використання свинячого гною та соломи пшениці (до 400 та 350 дм³ / кг) відповідно.

В іншому експерименті, вчений Козловець О.А. використовував як субстрат такі види органічних відходів:

- курячий послід з підстилкою (солома);
- стебла кукурудзяні та листя з полів;
- очерет (стебла, листки) з берегів річок;
- стебла та відходи коноплі.

Як інокулят використовували зброджений залишок, утворений в процесі переробки сільськогосподарських відходів. Під час експерименту один раз на період зброджування задіювали лабораторний реактор, який

Таблиця 5. Матриця проведення досліджень зброджування пташиного посліду з целюлозовмісними субстратами

Субстрат	Співвідношення				
Послід: кукурудза	(9:1)	(4:1)	(7:3)	(3:2)	(1:1)
Послід: папір	(9:1)	(4:1)	(7:3)	(3:2)	(1:1)
Послід: конопля	(1:19)	(1:9)	(3:17)	(1:4)	(1:1)
Послід: папір	(9:1)	(4:1)	(7:3)	(3:2)	(1:1)

Джерело: [7].

завантажували вручну. Процес завантаження розпочинався через верхню кришку реактора, яка була обладнана перемішувачем пристроєм та штуцером для виходу біогазу. Основні інгредієнти вносились відповідно правильній пропорції. Вони добре перемішувались перед завантаженням. Інокулят перемішували таким чином аби він мав однорідну консистенцію. Щоб підтримувати належний вміст вологи у реактор додавали воду. Відразу після завантаження реактор герметизували силіконовим герметиком, щоб запобігти витоків газу.

Для обертання мішалки використовували гідравлічний привід типу G-31 (19). При цьому корпус приводу побудований так, що запобігає випадковому самозайманню біогазу. Газгольдер складався із портивної частини із закріпленим резервуаром для води всередині корпусу, самого корпусу та градуйованої пластикової пляшки всередині.

У таблиці 5 наведено матрицю з результатами експериментального дослідження зброджування пташиного посліду з різними косубстратами. Під час побудови тестової матриці не враховувалося співвідношення елементів, що містять більше 50% сировини з вмістом целюлози. Відповідно було прийнято рішення збільшити кількість посліду у субстраті (з точки зору використовуваних технологій), враховуючи той факт, що процес метаногенезу зменшує витрати.

Процес бродіння тривав 21 день. При температурі $34 \pm 1^{\circ} \text{C}$ — 10 днів, після чого температура підвищувалась до $37,5 \pm 1^{\circ} \text{C}$. У світовій практиці відходи кукурудзи як целюлозовмісного косубстрату в якості сировини часто використовуються у технології виробництва біогазу. Результат використання кукурудзи як косубстрату був використаний як еталон для інших видів целюлозовмісної сировини.

Провівши експеримент, було встановлено, що найвищий вихід біогазу (545 дм³) спостерігається при співвідношенні посліду до кукурудзи 1:1 і становить $53 \pm 2,7\%$. Отриманий результат можна пояснити тим, що за більшої кількості целюлозовмісної сировини відбувається зменшення кількості іонів амонію, що пригнічує ріст мікроорганізмів та процес бродіння. Це особливо важливо та є вирішальним фактором для внесення целюлозовмісного композиту, що містить щонайменше 70% сухої органічної речовини, що використовується в сучасних технологіях. Варто зазначити, що великий об'єм біогазу не є показником кількісного виробництва енергії — оскільки метан, CO₂ та інші гази утворюються одночасно.

Використання запропонованої Козловцем О.А. лабораторної біогазової установки дало можливість отримувати біогаз з пташиного посліду з додаванням косубстратів. Наявне обладнання забезпечило мож-

ливість аналізу зразків біогазу, а також була можливість вимірювати кількість виробленого біогазу та відбору культуральної рідини. Відтак, застосовувані аналітичні методи можна використовувати для ідентифікації біогазу, зокрема, його складу, рідин з метановим резервуаром, вологи та вмісту золи [7].

Відомо, що відходи тваринництва добре змішуються з будь-якими іншими субстратами, оскільки дана сировина сприяє стабільності ферментаційних процесів біогазового виробництва, а додавання силосу кукурудзи або інших субстратів підвищує загальний вихід біогазу.

У світі силос у біогазовому виробництві використовують вже багато років. Як зазначає Г.Г. Гелетуха: "Родоначальником є Німеччина, де ввели підвищений тариф за енергію, отриману з біогазу. Там почали будуватися станції, сумарна потужність яких перевищила потужність чотирьох атомних блоків. Звісно, відходів не вистачало, тож почали використовувати сировину в співвідношенні 30 на 70 — гній та силос. Під вирощування силосу задіяли біля 1 млн га землі, що дорівнює 10% загальних земельних угідь Німеччини. Коли з'явився запит від аграріїв, насінневі компанії навіть почали розробляти спеціальні гібриди рослин, які найкраще поводити себе в реакторах" [5].

Нами було проведено дослідження виходу біогазу із сумішевого субстрату: гній свиней з додаванням кукурудзяного силосу. Дослідження проводилися на базі діючої біогазової установці, що з 2014 року функціонує на одному з підприємств Вінницької області, що займається вирощуванням свиней.

Підприємство використовувало лише гній свиней для виробництва біогазу. Принцип роботи даної біогазової установи дуже простий. Зі свинарників рідкий гній стікає в центральну трубу, після чого потрапляє в накопичувач і звідти у біогазовий реактор. Об'єм накопичувача становить 80 м³. Далі за допомогою насоса, що обладнаний перемішувачем, субстрат подається до біогазового реактора. Свіжий субстрат подається до біогазового реактора 6 днів на тиждень в об'ємі 50—70 м³. Об'єм біогазового реактора становить 600 м³. При цьому біогазова установка здатна продукувати щодня 500—600 м³ біогазу.

Біогазовий реактор — це монолітна бетонна конструкція, товщиною 22—28 см, що обладнана всередині перемішувачами (горизонтальний та гідрозмішувач) та трубами для нагріву субстрату, що знаходяться на дні реактора та по радіусу. Для підтримки стабільної температури у біогазовому реакторі використовують біогаз, що вона виробляє. Надлишок біогазу використовують для потреб свинокомплексу. Ззовні біогазовий реактор утеплений пінопластом. Зверху біогазовий реактор обладнаний герметичною мембраною, що здатна розтягуватись. Перший період для забезпечення термофільного процесу проходження реакції використовувався твердопаливний котел. Наразі у реакторі підтримують температуру 38—42 °С. Після процесу бродіння переброджений шлам по підземній трубі потрапляє до лагуни, що знаходиться на відстані 200 м від біогазового реактора і там відстоюється, після чого може використовуватись як високоякісне органічне добриво. Лагуна є закритою і розрахована на 6000 м³ переброд-

женого субстрату. Такого об'єму лагуни вистачає на 100 днів роботи біогазової установи. За період роботи біогазової установи реактор двічі очищали від побічних речовин, що осідали на дні реактора та перешкоджали процесу бродіння.

Нами досліджувався варіант використання гною свиней разом з кукурудзяним силосом на існуючій установці, аналізувалися різні варіанти співвідношення гною свиней та кукурудзяного силосу: 70% на 30%, 65% на 35%, 60% на 40%. Оптимальним щодо виходу біогазу була наступна схема: гній свиней з ферми по трубопроводам, масою 2,9 т/добу з вологістю 95% завантажувався до приймального резервуару, де за допомогою занурюваних мішалок змішувався з 2,3 т фільтрату і потім, за допомогою роторного насоса, порційно (по 1,30 т) 4 рази на добу подавався до насоса. Силос, у кількості 1,9 т/добу та вологістю 70%, порційно 4 рази за добу (по 0,46 т), завантажувався до бункера. З бункера силос подавався до шнекового насоса, де змішувався з гноем свиней. Цей субстрат кількістю 7,1 т/добу і вологістю 90% подався у біогазовий реактор. У реакторі відбувався технологічний процес бродіння і утворення CH₄, CO₂ та інертних газів у невеликій кількості, у тому числі й сірководню. При цьому було забезпечено вихід біогазу в кількості 780 м³ на добу (284700 м³/рік), який за допомогою когенераційної станції можна трансформувати в електричну енергію — 75 кВт/год (651782 кВт/рік) і в теплову енергію — 89 кВт/год (770512 кВт/рік).

У середньому вартість будівництва такої біогазової установи варіюється від 20 до 30 тис. дол. Але екологічний (відсутність неприємного запаху від накопичення та відстоювання в лагунах свинячого гною) та економічний (отримання біогазу та високоякісних органічних добрив) ефекти дозволяють швидко повернути вартість вкладених інвестицій. Використання оптимізованої сировини дасть змогу збільшити вихід біогазу і максимізувати ефекти.

ВИСНОВКИ

Виробництво біогазу є привабливою альтернативою щодо виробництва енергії. Враховуючи значні об'єми сировини, все більше уваги приділяється виробництву та когенерації біогазу.

Експериментальні дослідження показали, що вихід біогазу на 1 кг сухої речовини коливається від 250 дм³/кг (гній великої рогатої худоби) до 400 дм³/кг (свинячий гній). Для реалізації ефективних енергетичних біогазових проєктів важливо стимулювати виробництво електроенергії з біогазу, отриманого не тільки з відходів біомаси, а й зі спеціально вирощеної рослинної сировини. Вихід біогазу при використанні сумішей типу гній свиней та кукурудзяний силос дозволяє збільшити вихід біогазу до 162,6 м³/кг сировини.

Проведений аналіз показав високий рівень метану (50—75%) у біогазі. Тому, у майбутньому розвиток біогазових технологій в Україні дозволить замінити до 14 млрд м³ природного газу щороку, що значною мірою сприятиме енергетичній незалежності країни.

Економічна ефективність анаеробного зброджування залежить від інвестиційних витрат, витрат на експлу-

атацію біогазової установки, а також від оптимального виробництва метану. Доведено, що цей вид палива є універсальним і може використовуватися в різних сферах. Позитивні зміни в законодавстві ще більше спонукають інвесторів вкладати кошти у будівництво біогазових установок. Паралельно з виробництвом електроенергії в Україні доцільно впроваджувати виробництво біометану для прямого заміщення природного газу або більш ефективної енергетичної утилізації біогазу у виробництві електроенергії та тепла.

Література:

1. Гармаш С. Мітіна Н., Зубарева І. Перспективи отримання біогазу в Україні із відходів органічного походження. 2016. URL: http://www.zgia.zp.ua/gazeta/InternetKonf_2016_31.pdf
2. Гаценко К.В., Волошин М.Д., Хажмурадов М.А., Козловець О.А. Технологія отримання біогазу на основі харчових відходів. Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету. 2019. № 1. С. 131—136. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpddtu_2019_1_28
3. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. URL: <http://saee.gov.ua/en>
4. Закон України "Про альтернативні види палива" від 14 січня 2000 р. Відомості Верховної Ради України (ВВР). 2000. № 1391-XIV (ст. 1).
5. Зелений газ: навіщо аграріям відправляти силос в топку. URL: http://profapk.org.ua/news/news_apk/1939.html
6. Кириленко І.В., Токарчук Д.М. Ефективна організація використання відходів аграрних підприємств у формуванні енергетичної та екологічної безпеки. Економіка. Фінанси. Менеджмент: актуальні питання науки і практики. 2020. № 2. С. 66—83.
7. Козловець О.А. Біотехнологія одержання біогазу при коферментації посліду птахів. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 03.00.20 — біотехнологія. — Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" МОН України. — Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" МОН України. Київ, 2017.
8. Паламаренко Я.В. Сучасний стан та перспективи розвитку біогазової галузі України. Інвестиції: практика та досвід. 2019. № 21. С. 54—62. DOI: 10.32702/2306-6814.2019.21.54
9. Пришляк Н.В., Токарчук Д.М., Паламаренко Я.В. Забезпечення енергетичної та екологічної безпеки держави за рахунок біопалива з біоенергетичних культур і відходів: монографія. Вінниця: Консоль, 2019. 248 с. Рек. ВР ВНАУ (Протокол № 3 від 10.10.2019 р.).
10. Сакун Л.М., Різніченко Л.В., Велькін Б.О. Перспективи розвитку ринку біогазу в Україні та за кордоном. Економіка і організація управління. 2020. № 1 (37). С. 160—170.
11. Сировина для біогазу. ECOBUSINESS. Екологія підприємства. Новини. URL: <https://ecolog-ua.com/news/syrovyna-dlya-biogazu>
12. Скляр О.Г., Скляр Р.В. Біогазові станції як екологічно безпечний засіб переробки відходів. Біоенергетичні системи: Матеріали IV міжнародної науковопрактичної конференції "Біоенергетичні системи", 29 травня 2020 р. Житомир: Поліський національний університет, 2020. 242 с.
13. Токарчук Д.М. Інвестиційне забезпечення виробництва біогазу сільськогосподарськими підприємствами України. Економіка. Фінанси. Менеджмент: актуальні питання науки і практики. 2016. № 12. С. 26—35.
14. Токарчук Д.М. Управління ефективним використанням сільськогосподарських відходів для виробництва біогазу. Облік і фінанси. 2018. № 3 (81). С. 133—139.
15. Хажмурадов М.А. Установка та технологія по утилізації біогазу. Наука та інновації. 2006. № 4. С. 19.
16. Berezyuk S., Tokarchuk D., Pryshliak N. Economic and Environmental Benefits of Using Waste Potential as a Valuable Secondary and Energy Resource. Journal of Environmental Management and Tourism. 2019. 10 (1), 149—160.
17. Findeisen C. Biogas — trends on the German and the international market / German Biogas Association. 2019. URL: https://www.eclareon.com/sites/default/files/clemens_findeisen-biogas_trends_on_the_german_and_international_market.pdf
18. Kaletnik G. M., Pryshliak N. V. Bioenergy potential development of the agrarian sector as a component of sustainable development of Ukraine. Management mechanisms and development strategies of economic entities in conditions of institutional transformations of the global environment: col. monog./edited by M. Bezpartochnyi, in 2 Vol./ISMA University. Riga: Landmark SIA, 2019. P. 96—104. 2020.
19. Pryshliak N. Biogas production in individual biogas digesters: experience of India and prospects for Ukraine. Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal. 2019. Т. 5. №. 1. С. 122—136.
20. Гончарук І. В. Виробництво біогазу в аграрному секторі — шлях до підвищення енергетичної незалежності та родючості ґрунтів. Агросвіт. 2020. № 15. С. 18—29. DOI: 10.32702/2306-6792.2020.15.18.
21. Kaletnik G., Honcharuk I., Okhota Yu. The Waste-Free Production Development for the Energy Autonomy Formation of Ukrainian Agricultural Enterprises. Journal of Environmental Management and Tourism, Vol. XI, Summer, 2020, 3 (43): 513—522. DOI:10.14505/jemt.-v11.3(43).02.
22. Пришляк Н.В., Токарчук Д.М., Гончарук І.В., Ємчик Т.В., Ходаківська О.В., Луцяк В.В., Паламаренко Я.В., Семчук І.А. Використання відходів сільського господарства в Україні. Інформаційно-аналітичний огляд. Вінниця: Консоль, 2019. 118 с.

References:

1. Garmash, S. Mitina, N. and Zubareva, I. (2016) "Prospects for obtaining biogas in Ukraine from waste of organic origin", URL: http://www.zgia.zp.ua/gazeta/InternetKonf_2016_31.pdf (Accessed 17 November 2020).
2. Gatsenko, K.V. Voloshin, M.D. Khazhmuradov M.A. and Kozlovets, O.A. (2019) "Technology of biogas production on the basis of food waste", Zbirnyk naukovykh

- prats Dniprovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu, vol. 1, pp. 131—136. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpddtu_2019_1_28 (Accessed 15 November 2020).
3. The official website of the State Agency for Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine (2020), available at: <http://saee.gov.ua/en> (Accessed 12 November 2020).
 4. Verkhovna Rada of Ukraine (2000), Law of Ukraine "On Alternative Fuels, Information of the Verkhovna Rada of Ukraine (VVR), vol. 1391-XIV (Article 1).
 5. Nataliia, H. (2017), "Green gas: why send farmers silage to the furnace", available at: http://profapk.org.ua/news/news_apk/1939.html (Accessed 15 November 2020).
 6. Kirilenko, I.V. and Tokarchuk, D.M. (2020) "Effective organization of waste utilization of agricultural enterprises in the formation of energy and environmental security", *Ekonomika. Finansy. Menedzhment: aktualni pytannia nauky i praktyky*, vol. 2, pp. 66—83.
 7. Kozlovets, O.A. (2017), "Biotechnology of biogas production during coenzyming of bird droppings. Abstract of Ph.D. dissertation, biotechnology, National Technical University of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
 8. Palamarenko, Y. (2019), "The current situation and prospects of development of the biogase industry of Ukraine", *Investytsiyi: praktyka ta dosvid*, vol. 21, pp. 54—62. DOI: 10.32702/2306-6814.2019.21.54
 9. Pryshlyak, N.V. Tokarchuk, D.M. and Palamarenko Y.V. (2019), Zabezpechennia enerhetychnoi ta ekolohichnoi bezpeky derzhavy za rakhunok biopalyva z bioenerhetychnykh kultur i vidkhodiv [Ensuring energy and environmental security of the state through biofuels from bioenergy crops and waste], Console, Vinnytsia, Ukraine.
 10. Sakun, L.M. Riznichenko, L.V. and Velkin, B.O. (2020), "Prospects for the development of the biogas market in Ukraine and abroad", *Ekonomika i orhanizatsiia upravlinnia*, vol. 1 (37), pp. 160—170.
 11. ECOBUSINESS (2019), "Raw materials for biogas", available at: <https://ecolog-ua.com/news/syrovynadlya-biogazu> (Accessed 20 November 2020).
 12. Sklyar, O.G. and Sklyar, R.V. (2020) "Biogas plants as an environmentally friendly means of waste processing". Bioenerhetychni systemy: Materialy IV mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Bioenerhetychni systemy" [Bioenergy Systems: Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference "Bioenergy Systems"], Polissya National University, Zhytomyr, Ukraine, 29 May.
 13. Tokarchuk, D.M. (2016), "Investment support for biogas production by agricultural enterprises of Ukraine", *Ekonomika. Finansy. Menedzhment: aktualni pytannia nauky i praktyky*, vol. 12, pp. 26—35.
 14. Tokarchuk, D.M. (2018) "Management of efficient use of agricultural waste for biogas production". *Oblik i finansy*, vol. 3 (81), pp. 133—139.
 15. Khazhmuradov, M.A. (2006) "Installation and technology for biogas utilization", *Nauka ta innovatsii*, vol. 4, pp. 19.
 16. Berezyuk, S. Tokarchuk, D. and Pryshliak, N. (2019), "Economic and Environmental Benefits of Using Waste Potential as a Valuable Secondary and Energy Resource". *Journal of Environmental Management and Tourism*, vol. X, Issue 1 (33), pp. 149—160.
 17. Findeisen, C. (2019), "Biogas — trends on the German and the international market", German Biogas Association, available at: https://www.eclareon.com/sites/default/files/clemensfindeisen-biogas_trends_on_thegerman_and_international_market.pdf (Accessed 15 November 2020).
 18. Kaletnik, G. and Pryshliak, N. (2019), "Bioenergy potential development of the agrarian sector as a component of sustainable development of Ukraine", *Management mechanisms and development strategies of economic entities in conditions of institutional transformations of the global environment: collective monograph*, vol. 2, pp. 96—104.
 19. Pryshliak, N. (2019), "Biogas production in individual biogas digesters: experience of India and prospects for Ukraine", *Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 122—136.
 20. Goncharuk, I.V. (2020), "Biogas production in the agricultural sector — a way to increase energy independence and soil fertility", *Ahrosvit*, vol. 15, pp. 18—29. DOI: 10.32702/2306-6792.2020.15.18.
 21. Kaletnik, G. Honcharuk, I. and Okhota, Yu. (2020), "The Waste-Free Production Development for the Energy Autonomy Formation of Ukrainian Agricultural Enterprises", *Journal of Environmental Management and Tourism*, vol. XI, Summer, no. 3 (43), pp. 513—522. DOI:10.14505/jemt.v11.3(43).02.
 22. Pryshliak, N.V. Tokarchuk, D.M. Goncharuk, I.V. Yemchuk, T.V. Khodakivska, O.V. Lutsyak, V.V. Palamarenko, Y.V. and Semchuk, I.A. (2019), *Vykorystannia vidkhodiv silskoho hospodarstva v Ukraini. Informatsiino-analitychnyi ohliad [Use of agricultural waste in Ukraine. Information and analytical review]*, Console, Vinnytsia, Ukraine.

Стаття надійшла до редакції 04.12.2020 р.

www.dy.nauka.com.ua

Електронне фахове видання

**ДЕРЖАВНЕ УПРАВЛІННЯ
УДОСКОНАЛЕННЯ ТА РОЗВИТОК**

Виходить 12 разів на рік

включено до переліку наукових фахових видань України
з питань **ДЕРЖАВНОГО УПРАВЛІННЯ**
(Категорія «Б»)

Наказ Міністерства освіти і науки України
від 28.12.2019 №1643

Спеціальність 281

e-mail: economy_2008@ukr.net

тел.: (044) 223-26-28, (044) 458-10-73