

АНАЛІЗ ЕКОНОМІЧНОЇ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ ВСТАНОВЛЕННЯ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ З ПЕРЕРОБЛЕННЯ ГНОЮ У ФЕРМЕРСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

О.В. Мудрак¹, Т.В. Морозова^{2,3}

¹КЗВО «Вінницька академія безперервної освіти» (м. Вінниця, Україна)
e-mail: ov_mudrak@ukr.net; ORCID: 0000-0002-1776-6120

²Національний університет водного господарства і природокористування
(м. Рівне, Україна)

³Національний транспортний університет (м. Київ, Україна)
e-mail: tetiana.morozova@ukr.net; ORCID: 0000-0003-4836-1035

У статті проаналізовано вплив умов утримання тварин, хімічного складу гною і якісних параметрів біомаси на ефективність роботи біогазових установок (БГУ). Встановлено, що стійлово-табірна система утримання тварин забезпечує кращі умови для отримання гнойової біомаси з високими якісними характеристиками, що робить її найбільш перспективною для використання в БГУ. З'ясовано, що оптимізація параметрів біомаси, як-от співвідношення C:N, концентрація сухої речовини та вміст органічної речовини, сприяє підвищенню рентабельності виробництва біогазу. Результати дослідження підтверджують, що впровадження біогазових установок дає змогу зменшити антропогенне навантаження на компоненти довкілля, поліпшити екологічний стан навколишнього середовища, підвищити енергоефективність господарств і знизити собівартість отриманої продукції. Однак високі інвестиційні витрати та тривалий термін окупності проєкту обмежують їх широке використання. Рекомендовано фермерським господарствам оцінювати доцільність впровадження БГУ з урахуванням специфіки виробничих умов, а подальші дослідження спрямувати на адаптацію екологічних технологій для малих і середніх господарств та розробку фінансових механізмів підтримки. Використання біогазових установок у фермерських господарствах зумовлює підвищення енергоефективності, зменшення антропогенного навантаження на компоненти довкілля та покращання економічних показників діяльності. Подальші дослідження мають бути спрямовані на адаптацію БГУ до екологічних умов малих і середніх фермерських господарств, а також на розробку ефективних фінансових механізмів для їхнього впровадження. Показано, що стійлово-табірна система утримання тварин забезпечує кращі якісні параметри гнойової біомаси, сприяючи підвищенню її придатності для анаеробного зброджування в біогазових установках (БГУ). Ця система дає можливість отримати на 2777 т більше гнойової маси на рік порівняно зі стійлово-пасовищною системою. Введення біогазових установок знижує екологічне навантаження на довкілля та зумовлює енергетичну автономію господарств. Використання залишкової біомаси як біодобрива зменшує витрати на виробництво культурних рослин, підвищуючи економічну ефективність фермерських господарств.

Ключові слова: гноєва біомаса, стійлово-табірне утримання, рентабельність, енергоефективність, екологічна стабільність, анаеробне зброджування.

ВСТУП

У сучасних умовах фермерські господарства стикаються з викликами, пов'язаними зі зростанням цін на енергоносії, необхідністю ефективної утилізації органічних відходів та дотриманням екологічних стандартів і нормативів. Використання біогазових установок (далі — БГУ) є перспективним напрямом, що дає змогу

комплексно вирішувати ці проблеми. БГУ перетворюють органічні відходи сільського господарства (гній, залишки рослинництва, харчові відходи) на біогаз і органічне добриво. Біогаз, що складається переважно з метану (55–75%) і вуглекислого газу, є відновлюваним джерелом енергії, яке може застосовуватися для виробництва електроенергії, тепла або як заміна природного газу [1].

Сучасні виклики в аграрному секторі вимагають пошуку ефективних і «екологічно чистих» способів утилізації органічних відходів. Одним із перспективних рішень є БГУ, що дають можливість не лише зменшити негативний вплив на компоненти довкілля, але й отримати додаткові джерела енергії. Впровадження таких технологій особливо актуальне для фермерських господарств, що мають значні обсяги гнойової біомаси.

Мета роботи — розробка і обґрунтування перспектив використання біогазових установок у фермерських господарствах для підвищення енергоефективності, зменшення негативного впливу на компоненти довкілля, оптимізації утилізації відходів та посилення економічної рентабельності агровиробництва.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У сучасному світі енергія є важливим та стратегічно цінним ресурсом. Оскільки традиційні джерела енергії обмежені й швидко виснажуються, дослідження альтернативних і сталих джерел енергії набуває дедалі більшої актуальності [2–4]. Біогазова енергетика є одним із найперспективніших напрямів, що доповнює такі відновлювані джерела, як енергія вітру і сонця [5]. На відміну від вітрової чи сонячної енергетики, біогазові установки не потребують складної інфраструктури, що робить їх доступними для регіонів із різноманітною топографією і обмеженими ресурсами [6]. Біогаз є джерелом енергії, яке не залежить від погодних умов, що забезпечує стабільність і безпеку енергопостачання. Біомасу можна вважати одним із найперспективніших відновлюваних джерел енергії завдяки її значному потенціалу. Важливим кроком у цій сфері є використання всіх доступних органічних відходів і побічних продуктів сільськогосподарського виробництва для зменшення антропогенного навантаження та поліпшення екологічного стану [7].

Використання біогазових установок має численні переваги:

- *екологічна складова*: скорочення викидів парникових газів, зокрема метану, який утворюється за природного розкладання органіки. Біогазові установки також сприяють зменшенню залежності від ископного палива [8; 9];
- *енергетична ефективність*: біогаз може використовуватися для виробництва електроенергії, тепла, а також як паливо для транспорту. Тепло, що утворюється в когенераційних установках, можна застосовувати для опалення або сушіння дігестату [10];
- *економічна вигода*: зменшення витрат на утилізацію відходів та енергоресурси. Однак, попри значний потенціал, існують і певні виклики:
- *фінансові бар'єри*: високі початкові інвестиції у створенні біогазової установки;
- *регіональні обмеження*: доступність органічних відходів для виробництва біогазу залежить від регіональних умов;
- *політична підтримка*: недостатнє сприяння з боку держави може перешкоджати впровадженню технологій [11].

Перспективи розвитку. Дорожня карта розвитку біоенергетики України до 2050 р. передбачає активне запровадження біогазових технологій та нарощування виробництва біогазу і біометану. Згідно з прогнозами, фактичне виробництво біометану в Україні може досягти 1 млрд м³ у 2030 р. та збільшитися до 4,5 млрд м³ у 2050 р. На сучасному етапі особливо актуальним є питання енергетичної безпеки як на глобальному, так і на регіональному рівнях. Це набуває особливої гостроти в умовах тривалих військових дій, унаслідок яких цілеспрямовано знищується енергетична інфраструктура України. Відтак, нагальною необхідністю є диверсифікація джерел енергопостачання та пошук альтернативних методів виробництва енергії [12].

Перспективність та доцільність розвитку біогазових технологій повністю відповідає глобальним цілям у сфері боротьби зі зміною клімату, включаючи декарбонізацію та запобігання глобальному потеплінню. Крім того, використання біогазу сприяє покращанню екологічного стану

довкілля, зокрема якості атмосферного повітря, ґрунтового покриву та водних ресурсів, а також забезпечує розширений доступ до відновлюваних джерел енергії [13]. Станом на 2022 р. в Україні функціонують приблизно 70 біогазових установок із загальною потужністю понад 135 МВт. Виробництво біогазу нині базується на використанні обмеженого спектра основних видів сировини, зокрема курячого посліду, свинячого гною, гною великої рогатої худоби, силосу та жому буряків цукрових. З огляду на зростання потреби в енергетичній незалежності і зміну клімату, біогазові установки відіграють ключову роль у переході до сталої енергетики. Інтенсивний пошук нових субстратів для виробництва біогазу, як-от відходи харчової промисловості чи органіка зі сміттєзвалищ, відкриває нові можливості для розвитку галузі. У країнах із нестабільними ринками енергоресурсів біогазові установки можуть забезпечити стабільне постачання тепла та електроенергії, зумовлюючи енергетичну безпеку [8].

Біогазові установки є перспективним рішенням для фермерських господарств і регіонів, які прагнуть зменшити антропогенне навантаження на компоненти довкілля, поліпшити екологічний стан навколишнього середовища, підвищити енергоефективність і забезпечити стабільність енергопостачання. Успішне запровадження цієї технології потребує подальших досліджень, інвестицій та політичної підтримки.

Екологічні переваги. Використання БГУ сприяє зменшенню викидів парникових газів, як-от метан і вуглекислий газ, що утворюються під час природного розкладання органічних відходів. Дослідження показують, що фермерські господарства, які впровадили біогазові установки, зменшили свої викиди парникових газів на 30–50% [14]. Окрім того, кінцевий продукт — дігестат — є високоякісним органічним добривом, яке знижує потребу у хімічних добривах, що, своєю чергою, зменшує забруднення ґрунтів та поверхневих і підземних вод [15; 16].

Економічна доцільність. Застосування БГУ дає змогу знизити витрати на енергоресурси та утилізацію відходів. Згідно з дослідженнями, середній фермерський господарський комплекс із 100 гол. великої рогатої худоби може виробляти до 50–60 м³ біогазу на добу, що еквівалентно близько 30–35 м³ природного газу [14]. Враховуючи зростання цін на енергоносії, це гарантує значну економію коштів.

Перспективи впровадження. Для фермерських господарств України, які мають великий потенціал у сфері виробництва органічних відходів, запровадження БГУ може стати ефективним інструментом сталого розвитку. Підтримка держави у вигляді субсидій і «зелених» тарифів на електроенергію з відновлюваних джерел додатково стимулює фермерів до впровадження цієї технології.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Характеристика фермерського господарства. Фермерське господарство розташоване в рівнинній зоні України, що характеризується помірним кліматом. Ґрунтовий покрив переважно представлений чорноземами, зі вмістом гумусу у верхньому шарі від 1,8% до 3,2%. Рельєф угідь здебільшого рівнинний, з окремими підвищеннями та ярами, що створює сприятливі умови для механізованого обробітку. Ознак ерозійних процесів на території господарства не зафіксовано.

Кліматичні умови регіону визначаються середньорічною температурою повітря +5,6°C, максимальними значеннями +35,8°C та мінімальними –29,5°C. Середньорічна кількість опадів становить 495 мм. Домінуючими є західні та північно-західні вітри, а відносна вологість повітря варіюється в межах 60–65%. Тривалість вегетаційного періоду сягає 180–200 днів, що забезпечує сприятливі умови для вирощування сільськогосподарських культур.

Площа ріллі господарства становить 2180,4 га. Основними напрямками діяльності є вирощування зернових, технічних, кормових та овочевих культур. Найбільшу

частку посівних площ займають зернові культури (43,7%). Врожайність основних сільськогосподарських культур демонструє позитивну динаміку, зокрема, врожайність буряка цукрового зросла на 179,5% упродовж останніх трьох років.

У галузі тваринництва в рік дослідження поголів'я великої рогатої худоби було 1410 гол., що на 6,4% перевищує показники попереднього року. Надій молока на одну корову збільшився на 50%, досягнувши 5200 кг. Водночас у свинарстві спостерігається зменшення поголів'я свиноматок на 46,9% та зниження виходу поросят на 25,8%.

Незважаючи на скорочення частки тваринницької продукції, господарство залишається прибутковим, хоча рівень рентабельності демонструє тенденцію до зниження. Структура товарної продукції зазнала змін: частка рослинництва збільшилась до 52,8%, тоді як частка тваринництва скоротилась до 47,2%.

Фермерське господарство має позитивні тенденції у розвитку молочного тваринництва та вирощуванні технічних культур. Це створює сприятливі умови для впровадження екологічно безпечних технологій, зокрема біогазових установок, а також підвищенню енергоефективності та екологічної стійкості виробництва.

Дослідження ґрунтується на аналізі кількості гнойової біомаси з урахуванням виду, віку та умов утримання тварин. Основними джерелами інформації є наукові публікації, статистичні дані та результати практичних досліджень. Для оцінювання ефективності використання біогазових установок враховувалися хімічний склад гною, технології годівлі, методи видалення та накопичення

органічної маси [17; 18]. Розрахунки здійснено згідно з [19].

Добову кількість безпідстилкового гною (Q_{Γ}) визначали за формулою:

$$Q_{\Gamma} = (M_{EJ} + (K \cdot M_{EJ})) \cdot n_J, \quad (1)$$

де M_{EJ} – середня маса екскрементів, що виділяється однією твариною за добу, кг; n_J – кількість тварин у групі; K – коефіцієнт, залежний від системи гноєвидалення (табл. 1) [18].

Добова кількість гною з підстилкою:

$$Q_{\Gamma} = (M_{EJ} + (K \cdot M_{EJ}) + M_{ПJ}) \cdot n_J, \quad (2)$$

де $M_{ПJ}$ – добова кількість підстилки на одну голову, кг.

Річна кількість гнойової маси:

$$Q_{\Gamma \text{ річний}} = Q_{\Gamma \text{ доб}} \cdot t, \quad (3)$$

де t – кількість днів у році (звичайно $t=365$).

Річна кількість за стійлово-табірного утримання:

$$Q_{\Gamma \text{ річний}} = [(M_{EJ} + M_{ПJ} + (K \cdot M_{EJ})) \cdot t_{\Pi} + ((M_{EJ} + (K \cdot M_{EJ})) \cdot t_{\text{Л}}) \cdot n_J], \quad (4)$$

де t_{Π} – кількість днів утримання у приміщенні (245 днів); $t_{\text{Л}}$ – кількість днів утримання у літніх таборах (120 днів).

Вологість безпідстилкового гною:

$$W_{\Gamma} = W_E + Z, \quad (5)$$

де W_{Γ} – вологість гною, %; W_E – вологість екскрементів, %; Z – кількість води, що потрапляє в систему гноєвидалення.

Вологість підстилкового гною:

$$W_{\Gamma} = W_E - 0,01 \cdot R_{\Pi} \cdot (W_{\text{Н}} - W_{\Pi}) + 0,01 \cdot R_{\text{В}} \cdot (100 - W_E), \quad (6)$$

Таблиця 1. Коефіцієнт, який розраховується на основі добового виходу екскрементів тварин [18]

Система видалення	Коефіцієнт
Транспортна (конвеєрна)	0,1–0,2
Самосплавна	0,3–0,5
Лотково-змивна (суха чистка)	2,0–2,5
Лотково-змивна (волога чистка)	5,0–6,0
Гідрозмив	7,0–8,0

де W_H , W_W , W_E — вологість підстилки, води та екскрементів відповідно, %; R_H , R_W — процентне співвідношення в гнойовій масі підстилки і води, %.

Вміст сухої речовини у гної:

$$R_{a.c.p.} = Q_g \cdot (1 - W_H/100), \quad (7)$$

де $R_{a.c.p.}$ — вміст абсолютно сухої речовини, т; W_H — вологість гною, %.

Вміст органічної речовини у гної:

$$O_p = R_{a.c.p.} \cdot 0,8, \quad (8)$$

де O_p — вміст органічної речовини, т.

Добовий обсяг завантаження метантенка:

$$Q_{\text{доб}} = Q_g / g_r, \quad (9)$$

де $Q_{\text{доб}}$ — добовий обсяг завантаження, м³; g_r — питома частка гною за оптимальної вологості.

Місткість бродильної камери (метантенка):

$$V_K = Q_{\text{доб}} / (r \cdot g), \quad (10)$$

де V_K — обсяг бродильної камери, м³; $Q_{\text{доб}}$ — добовий обсяг завантаження метантенка, м³; r — добова доза завантаження (% від об'єму); g — коефіцієнт заповнення (0,8–0,95).

Річна кількість твердої фракції ($M_{\text{ш.річн.}}$):

$$M_{\text{ш.річн.}} = Q_{\text{г.річн.}} \cdot (1 - W_H / 100), \quad (11)$$

Кількість біогазу для підігріву біомаси ($Q_{\text{бр.}}$):

$$Q_{\text{бр.}} = B_{\text{гу}} / g, \quad (12)$$

де $B_{\text{гу}}$ — теплова енергія для підігріву, МДж; g — теплотворна здатність біогазу (22 МДж/м³).

Добова енергетична цінність 1 м³ біогазу — це кількість енергії, що може бути отримана зі спалювання біогазу об'ємом 1 м³ за добу. Вона розраховується аналогічно до загальної енергетичної цінності, але враховує добову продукцію біогазу в системі.

Річна енергетична цінність 1 м³ біогазу — це загальна кількість енергії, що може бути

одержана з 1 м³ біогазу впродовж року, з урахуванням постійного виробництва біогазу та стабільного його складу. Визначається за формулою:

$$Q_{\text{річ}} = Q_{\text{д}} \cdot 365, \quad (13)$$

де $Q_{\text{д}}$ — енергетична цінність 1 м³ біогазу [19].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Перспективи виробництва біометану в аграрному секторі України. Виробництво біометану відкриває для аграріїв можливість диверсифікації ризиків, пов'язаних із коливаннями цін і збуту продукції, а також забезпечує господарства органічними добривами. Для громад це створює нові робочі місця. Європейський Союз демонструє стрімкий розвиток цієї галузі, що пов'язано з прагненням до енергетичної незалежності та зменшення викидів парникових газів. Біометан — це горючий газ, отриманий із біомаси та очищений до якості природного газу. Біогазові установки генерують біогаз із приблизним складом 55% метану (CH₄) і 45% вуглекислого газу (CO₂). Після очищення до вмісту метану понад 96% біогаз перетворюється на біометан, який є відновлюваним джерелом енергії з низьким вуглецевим слідом.

Згідно з Директивою ЄС RED II, особлива увага приділяється виробництву біометану з відходів і залишків, що не конкурують із харчовими продуктами та кормами. Серед рекомендованих видів сировини виділяється гній, що забезпечує максимальне скорочення викидів парникових газів і має найвищу рентабельність. Наприклад, у країнах ЄС ціни на біометан із різних видів сировини становлять: із силосу кукурудзи — 55–60 євро/МВт·год, із соломи та покривних культур — 90–95 євро/МВт·год, із гною і посліду — 140–145 євро/МВт·год. Це свідчить про високу економічну ефективність використання гною як сировини для біометану.

В Україні перспективи виробництва біометану обмежені через скорочення поголів'я тварин. На початок 2022 р. кількість

великої рогатої худоби становила лише 2,6 млн гол., що відповідає 11% від рівня 1991 р. (24,6 млн гол.). У сільськогосподарських підприємствах цей показник був ще нижчим — близько 1 млн гол., із яких лише 424,6 тис. — корови. Крім того, площі під кукурудзою на силос знизилися від 4636,9 тис. га у 1990 р. до 214,2 тис. га у 2021 р., що становить лише 0,5% сільськогосподарських угідь. Для порівняння, у Німеччині кукурудза на силос займає 2,2 млн га, або 12% земель, із яких 20% використовується для виробництва яловичини, а решта — у молочному секторі та для біогазу.

З огляду на обмеження експорту зернових через блокування чорноморських портів, українським аграріям доцільно диверсифікувати традиційний бізнес і приділити більше уваги тваринництву.

У 2021 р. середня рентабельність тваринництва в Україні зросла до 12,7% проти 1,2% у 2020 р., а виробництво молока мало рентабельність близько 20%. Водночас рентабельність виробництва біометану з гною та посліду становить 30–65%, а в окремих випадках — до 100%. Це робить будівництво біометанових установок економічно доцільним, оскільки вони підвищують загальну рентабельність тваринницьких ферм і птахофабрик.

Комплексний підхід, що включає скотарство на базі локальних кормів (зокрема кукурудзи на силос) і виробництво біометану, дає змогу отримати більший дохід від реалізації харчових продуктів (молока і м'яса) та відновлюваного енергоносія (біометану). Це сприятиме розвитку тваринництва, зменшенню залежності від експорту зернових і підвищенню енергоефективності аграрного сектору України.

Кількість гнойової біомаси значною мірою залежить від виду тварин, умов утри-

мання та використання підстилкових матеріалів. За стійлово-табірного утримання тварин річна кількість гною є значно більшим порівняно зі стійлово-пасовищним утриманням (табл. 2).

Це зумовлено тим, що підстилки використовуються впродовж 245 діб на рік, що сприяє збільшенню загального обсягу утвореної біомаси. Натомість у стійлово-пасовищній системі тварини перебувають на природних пасовищах у літній період, що знижує кількість гною, придатного для утилізації в біогазових установках (БГУ).

Чинники, що впливають на ефективність БГУ:

- *хімічний склад гною*: гній великої рогатої худоби (ВРХ) має нижчий вміст сухої речовини порівняно зі свинячим, однак великі обсяги компенсують цю різницю. Наприклад, за стійлово-табірного утримання великої рогатої худоби річна кількість гною становить понад 36 т/добу;
- *тип годівлі*: раціони з високим вмістом силосу, сіна та концентратів сприяють підвищенню енергетичної цінності гнойової біомаси, що позитивно впливає на кількість біогазу;
- *умови утримання*: використання підстилок підвищує загальний обсяг гною, однак знижує концентрацію органічної речовини, що потребує врахування за проєктування БГУ.

Перспективи впровадження біогазових установок. БГУ є економічно вигідними для фермерських господарств, які мають: достатні обсяги гнойової біомаси для стабільного функціонування БГУ; інтеграційну можливість у наявну інфраструктуру ферми; потребу в альтернативних джерелах енергії для опалення, освітлення чи інших потреб.

Впровадження БГУ сприяє: зниженню витрат на утилізацію органічних відходів;

Таблиця 2. Кількість гнойової маси за різних умов утримання тварин

Показники	Стойлово-табірне	Стойлово-пасовищне
Річна кількість гною, т	12287,40	9510,36
Добова кількість гною, т	33,66	26,06

Примітка: складено авторами за власними розрахунками.

отриманню біогазу як джерела теплової і електричної енергії; виробництву високоякісного органічного добрива, що підвищує родючість ґрунтів.

Вплив якісних параметрів гнойової біомаси на ефективність виробництва біогазу. Якісні параметри гнойової біомаси істотно впливають на ефективність анаеробного зброджування і обсяги отриманого біогазу. Основними характеристиками, які визначають потенціал біогазової установки, є концентрація сухої речовини, вміст органічної речовини, співвідношення вуглецю до азоту (C:N), а також рівень рН.

Концентрація сухої речовини. Дослідження показали, що для ефективного метаногенезу оптимальною є концентрація сухої речовини на рівні 8–12%. Надмірно високий вміст сухої речовини, характерний для гною великої рогатої худоби за стійлово-табірного утримання (23,54%), потребує попереднього розведення, що збільшує витрати на підготовку біомаси. Водночас низька концентрація сухої речовини (12,0% для стійлово-пасовищного утримання) може знижувати ефективність бродіння через недостатню щільність субстрату.

Вміст органічної речовини. Органічна речовина є основним джерелом метану за анаеробного зброджування. У гнойовій масі великої рогатої худоби за стійлово-табірного утримання її вміст становив 2903,66 т/рік, що перевищує показник для стійлово-пасовищного утримання (912,99 т/рік). Це зумовлює вищий потенціал отримання біогазу в першому випадку. Однак високий вміст білків і жирів може спричиняти накопичення аміаку, що пригнічує активність метаноутворювальних мікроорганізмів.

Співвідношення вуглецю до азоту (C:N). Оптимальне співвідношення для метаногенезу — це баланс між кількістю вуглецю (C) та азоту (N) у біомасі, який забезпечує ефективний процес анаеробного зброджування. Вуглець є джерелом енергії для мікроорганізмів. Його надлишок сприяє виробленню летких жирних кислот, але за дефіциту азоту процес може сповільнюватися через нестачу поживних речовин

для росту бактерій. Азот необхідний для синтезу білків і побудови клітин мікроорганізмів. Однак його надлишок призводить до утворення аміаку, який пригнічує активність метаноутворювальних мікроорганізмів.

Співвідношення C:N є ключовим параметром, який впливає на ефективність роботи БГУ. Оптимальне співвідношення 10–30:1 означає, що в біомасі на кожні 10–30 частин вуглецю має припадати 1 частина азоту. Гній ВРХ часто має C:N у межах 20:1, що ідеально підходить для анаеробного зброджування. Курячий послід має низьке співвідношення (5–10:1) через високий вміст азоту. За низького співвідношення (надлишок азоту) утворюється аміак, що підвищує рН і пригнічує метаногенез. За високого співвідношення (надлишок вуглецю) сповільнюється ріст бактерій через нестачу азоту, що знижує продуктивність утворення біогазу. Для досягнення оптимального співвідношення застосовують:

- *змішування субстратів:* гній із високим вмістом азоту (курячий послід) можна змішувати з біомасою, багатою на вуглець (солома, відходи рослинництва);
- *контроль параметрів ферментації:* регулювання співвідношення C:N у вихідній біомасі дає змогу підтримувати стабільний і ефективний процес метаногенезу.

Кількість біогазу залежно від типу біомаси. Різні види гнойової біомаси мають специфічні показники виходу біогазу (табл. 3). Найбільша кількість біогазу спостерігається за зброджування курячого посліду (0,630 м³/кг сухої органічної речовини), тоді як для гною великої рогатої худоби цей показник сягає 0,380 м³/кг.

Рекомендації для підвищення ефективності роботи БГУ:

- *оптимізація складу біомаси:* змішування гною різних видів тварин (наприклад, великої рогатої худоби із курячим послідом) для досягнення оптимального співвідношення C:N;
- *попередня підготовка біомаси:* регулювання концентрації сухої речовини шляхом розведення або підсушування;

Таблиця 3. Кількість біогазу залежно від типу гнойової біомаси

Тип біомаси	Кількість біогазу, м ³ /кг сухої органічної речовини	Вміст метану, %
Гній великої рогатої худоби	0,380	55,0
Гній свиней	0,580	77,0
Гній коней	0,250	60,0
Курячий послід	0,630	79,2

Примітка: складено авторами за власними розрахунками.

- *вибір технології гноєвидалення*: використання скребкових систем, які забезпечують стабільний хімічний склад біомаси.

Параметри системи анаеробного зброджування гнойової біомаси є ключовими для ефективного функціонування біогазових установок, оскільки вони визначають продуктивність та економічну доцільність використання гнойової біомаси як сировини. До основних параметрів належать: добова продуктивність реактора; добовий обсяг завантаження бродильної камери; місткість (об'єм) метантенка; річна кількість біогазу. Ці параметри істотно залежать від способу утримання тварин і складу біомаси.

Добова продуктивність реактора, яка відображає здатність установки обробляти вихідний гній, визначається річною кількістю гнойової маси. За стійлово-табірного утримання тварин цей показник становив 36,02 т/добу, що значно перевищує аналогічний показник для стійлово-пасовищного утримання (28,49 т/добу).

Добовий обсяг завантаження бродильної камери залежить від вмісту вологи та кількості гною. Він сягав 0,44 м³ за стійлово-табірного утримання та 0,31 м³ за стійлово-пасовищного.

Місткість бродильної камери (метантенка) визначається на основі добового обсягу завантаження. Вона становила 7,86 м³ для стійлово-табірного утримання та 5,35 м³ для стійлово-пасовищного.

Річна кількість біогазу, розрахована з урахуванням вмісту сухої та органічної речовин у біомасі, сягала: 675072,26 м³/рік для стійлово-табірного утримання; 49054,00 м³/рік для стійлово-пасовищного.

Ці результати демонструють значну перевагу стійлово-табірного утримання тварин, яке забезпечує майже в 1,5–2 рази

вищі значення основних параметрів системи анаеробного зброджування.

Вихід залишкової продукції. Після процесу анаеробного зброджування гнойової біомаси та одержання біогазу утворюється залишкова продукція, яка представлена твердою фракцією (шламом) і надосадовою рідиною (рідкою фракцією). Кількість цих фракцій залежить від вологості гною, що завантажується в систему, а також від вологості отриманих продуктів. У середньому, з 1 кг органічної речовини, біологічно розкладеної на 70%, утворюється: 0,5 кг біогазу, 0,2 кг води, 0,3 кг нерозщепленого залишку (шламу).

Розділення біомаси після зброджування на тверду та рідку фракції здійснюється за допомогою сепараторів (центрифуг) або віброгрохотів.

Тверда фракція гною містить значну кількість поживних речовин, що робить її цінним органічним добривом. Вона також може використовуватися як білково-вітамінна кормова добавка. Під час анаеробної ферментації вміст сухої органічної речовини в шламі зменшується майже на 50% порівняно з вихідним гноєм, оскільки 10–15% вуглецю субстрату включається до мікробної маси або трансформується в компоненти біогазу (метан і діоксид вуглецю).

Склад шламу залежить від хімічного складу вихідної сировини та параметрів процесу біометаногенезу. Після зброджування в шламі зберігаються біогенні елементи (азот, фосфор, калій), а поживні речовини перебувають у більш доступній для рослин формі. Це підвищує біологічну активність шламу як органічного добрива. Крім того, шлам містить білки та вітамін В₁₂, що дає змогу використовувати його як кормову добавку.

Таблиця 4. Вихід залишкової продукції після анаеробного зброджування гною

Показники	Кількість твердої фракції	Кількість рідкої фракції
Річна кількість, т	3686,22	1843,11
Відносний вихід, %	30,0	20,0
Добова кількість, т	10,1	5,05

Примітка: складено авторами за власними розрахунками.

Рідка фракція після анаеробного зброджування відповідає екологічним вимогам до стічних вод і містить значну кількість поживних речовин. У середньому, її склад включає: суху речовину: 1,0–5,0%, органічну речовину: 0,25–4,2%, фосфор: 0,05–0,7%, азот: 0,31–1,14%, рівень рН: 6,5–8,3. Рідка фракція може використовуватися як рідке органічне добриво або як субстрат для вирощування гідробіонтів, зокрема мікроводоростей (наприклад, спіруліни). Спіруліна є цінною білково-вітамінною добавкою для сільськогосподарських тварин, а також сировиною для фармацевтичної промисловості.

Наші розрахунки засвідчили, що річна кількість твердої фракції становить 3686,22 т, що сягає 30% від річного виходу гнойової маси (табл. 4). Добова кількість шламу становить 10,1 т. Річна кількість рідкої фракції дорівнює 1843,11 т (20% від річного виходу гнойової маси), а добова кількість — 5,05 т.

Отже, залишкова продукція після анаеробного зброджування гнойової біомаси є цінним ресурсом, який може використовуватися як органічне добриво або кормова добавка, що сприяє підвищенню екологічної ефективності та економічної доцільності біогазових технологій.

Ефективність біогазової установки. Товарний біогаз — частина загального обсягу

біогазу, отриманого в процесі анаеробного бродіння, яка може бути використана для виробництва теплової або електричної енергії, а також як заміник традиційних енергетичних ресурсів (природного газу, нафти, дизельного палива тощо). Значна частина виробленого біогазу використовується для підігрівання біомаси, яка зброджується, що є необхідною умовою підтримання стабільності технологічного процесу. Ефективність застосування товарного біогазу залежить від низки чинників, зокрема: кількості біогазу, витраченого на підігрівання субстрату; теплових втрат у процесі анаеробного бродіння; природно-кліматичних умов; конструктивних особливостей БГУ; технологічного режиму її роботи.

Розрахунками встановлено, що коефіцієнт ефективності БГУ, який становить 2,49 відображає енергетичну й техніко-технологічну ефективність. Це значення визначає необхідний рівень окремих параметрів, поданих у табл. 5.

Енергетичні показники біогазових установок значною мірою залежить від витрат енергії на обігрівання реактора. Анаеробний процес потребує дотримання певних температурних режимів, рівномірного прогрівання субстрату, а також уникнення зон переохолодження чи перегріву.

Для підтримання необхідної температури в реакторі важливо попередньо пі-

Таблиця 5. Обсяг товарного біогазу

Показники	Значення
Теплова енергія, необхідна для підігрівання біомаси, МДж	1011206,20
Кількість біогазу, необхідного для підігріву біомаси, м ³	45963,92
Частка біогазу, необхідного для підігріву гною, %	0,068
Максимально-теоретичний коефіцієнт виходу товарного біогазу	0,90
Коефіцієнт ефективності БГУ	2,49

Примітка: складено авторами за власними розрахунками.

дігріти субстрат до заданої температури перед його подачею в установку. Додаткове підведення теплової енергії компенсує теплові втрати, що виникають під час роботи установки. Тепло може бути підведено як безпосередньо в реактор, так і в пристрій, який забезпечує подачу субстрату.

Щоб уникнути негативного впливу перепадів температури на анаеробний процес, рекомендовано поєднувати підігрівання з інтенсивним перемішуванням субстрату. Це забезпечує рівномірний розподіл тепла й підвищує ефективність теплопередачі. Для запобігання утворенню відкладень на поверхнях теплообмінників необхідно використовувати обладнання з високою швидкістю руху субстрату або передбачати системи, які легко очищуються. Особливу увагу слід приділити конструкції теплообмінників, щоб уникнути зниження їх ефективності через наявність твердих частинок у субстраті (наприклад, залишків соломи, шерсті, пір'я).

Технологічні та економічні аспекти енергетичних показників біогазових установок. Для невеликих реакторів як пристрої перемішування застосовуються теплообмінні нагрівальні агрегати, як-от гнучкі металеві трубопроводи, циліндричні або плоскі теплообмінники. Ці пристрої забезпечують циркуляцію гарячої води та можуть бути легко демонтовані для очищення реактора. Нагрівачі, вбудовані в стінки реактора, доцільно застосовувати лише за умови, що вони здатні передавати

теплоту субстрату з обох боків стінки, як це реалізовано в двокамерних реакторах із внутрішньою перегородкою.

Додатковим методом підігрівання субстрату є введення гарячої води або пари безпосередньо в середовище реактора. Цей підхід може бути ефективним, оскільки вода одночасно виконує функції розбавлення та турбулізації субстрату, який містить велику кількість твердих частинок. Однак введення пари під тиском призводить до підвищення вологості біогазу, що потребує додаткових заходів для осушення газу перед його використанням. У великих установках, наприклад, на комунальних підприємствах для очищення стічних вод, цей недолік часто ігнорують через високий коефіцієнт корисної дії теплопередачі.

Енергетичні показники біогазових установок визначаються як технологічними, так і економічними показниками. До технологічних показників належать: обсяг газогенерації (річний та добовий); вихід біогазу на одиницю біомаси (1 голова, 1 кг сухої речовини, 1 кг органічної речовини); продуктивність на одиницю корисної площі реактора. На основі даних фермерського господарства визначено ключові показники, що відображають енергетичні показники біогазового виробництва (табл. 6).

Економічна оцінка енергетичних показників біогазових установок базується на здатності отримувати теплову та електричну енергію, а також замінювати традиційні енергетичні ресурси. Відомо, що 1 м³ біо-

Таблиця 6. Енергетичні показники біогазового виробництва у фермерському господарстві

Показник	На одну голову	На 1 кг сухої речовини	На 1 кг органічної речовини	На 1 м ³ корисної площі
<i>Енергетичні показники</i>				
Добова кількість біогазу, м ³	0,60	0,32	0,39	3,21
Річна кількість біогазу, м ³	2143,09	3,38	4237,74	12478,23
<i>Економічні показники</i>				
Теплотворна здатність 1 м ³ біогазу, МДж	20–22			
Добова енергетична цінність 1 м ³ біогазу, Квт/год	278,016			
Річна енергетична цінність 1 м ³ біогазу, Квт/год	1080115,6			

Примітка: складено авторами за власними розрахунками.

газу еквівалентний енергії, яка міститься у 0,65 м³ природного газу, 0,7 л нафти, 0,65 л дизельного пального, 0,64 л бензину, 0,6 л гасу, 3,5 кг дров або 1,5 кг кам'яного вугілля. Розрахунки доводять, що найбільш рентабельним для дослідженого фермерського господарства є виробництво електроенергії з біогазу. Загальний коефіцієнт корисної дії (ККД), з урахуванням утворення тепла за виробництва електроенергії, досягає 80–85%, до того ж 33% хімічної енергії біометану безпосередньо перетворюється в електроенергію.

Проект утилізації гною за допомогою біогазової установки передбачає комплексний підхід, який охоплює всі етапи від збору сировини до отримання кінцевого продукту. На основі літературних даних та проведених розрахунків визначено кілька ключових умов для ефективного функціонування установки:

- *характеристики сировини:* гній повинен мати рідку, але густу консистенцію; вміст сухої речовини у сировині не може бути меншим за 3%, оскільки за нижчих показників виробництво біогазу буде настільки незначним, що навіть витрати на будівництво установки не окупляться;
- *розташування об'єкта:* для зменшення витрат на транспортування електроенергії до мережі, біогазову установку бажано розташовувати поблизу державних ліній електропередач; важливо мінімізувати відстань між місцем нагромадження сировини (гноєсховищем) і установкою, щоб уникнути додаткових витрат на транспортування та використання спеціальної техніки; об'єкт має бути розташований на безпечній відстані від населених пунктів, щоб відповідати санітарним нормам;
- *експлуатаційні характеристики:* за максимальної потужності біогазова установка може переробляти близько 100 м³ гною щодня, забезпечуючи вихід до 3000 м³ біогазу. Це еквівалентно виробництву 4–5 тис. кВт·год електроенергії;
- *економічна ефективність:* використання дешевої електроенергії дає можливість знизити собівартість виробництва тваринницької продукції на 1,2%;

застосування біодобрив, отриманих із залишкової маси після бродіння, може зменшити собівартість вирощування культурних рослин на 20%;

- *інвестиційні та технологічні виклики:* будівництво БГУ є дорогим проектом, що вимагає значних інвестицій (приблизно 1 млн дол. США); реалізація проекту передбачає зміну технології утримання тварин та схеми утилізації гною на існуючих комплексах; для успішного запуску установки потрібні кваліфіковані фахівці з практичним досвідом підготовки сировини, які можуть адаптувати проект до специфіки конкретного господарства;
- для фермерських господарств *термін окупності* БГУ перевищує 10 років.

Отже, хоча економічна ефективність біогазових установок для невеликих господарств може бути обмеженою через високі інвестиційні витрати та тривалий термін окупності, основною метою їх впровадження є екологічний ефект. Використання таких установок сприяє зменшенню негативного впливу на довкілля, раціональному застосуванню відходів та підвищенню екологічної стійкості сільськогосподарського виробництва.

Дослідження підтверджує перспективність та необхідність розвитку біогазової енергетики в Україні як напряму підвищення енергетичної безпеки, зменшення залежності від традиційних енергоресурсів та посилення еколого-економічної ефективності виробництва. Впровадження маловідходних технологій у біоенергетиці зумовить скорочення видобутку викопного палива та зниження обсягів викидів парникових газів, що відповідає глобальним екологічним трендам і цілям сталого розвитку.

Практична значущість. Реалізація заходів щодо розвитку біоенергетики у процесі післявоєнного відновлення економіки України сприятиме зменшенню залежності від викопного палива та підвищенню загального рівня еколого-економічної ефективності енергетичного сектору.

ВИСНОВКИ

Аналіз засвідчив, що умови утримання тварин, хімічний склад гною та якісні параметри біомаси істотно впливають на ефективність виробництва біогазу. Зокрема, стійлово-табірна система утримання тварин забезпечує кращі умови для отримання гнойової біомаси з високими якісними характеристиками, що робить її більш придатною для використання в біогазових установках (БГУ).

Вихід гнойової маси визначається видом тварин, способом їх утримання та використання підстилки. За умов стійлово-табірного утримання річна кількість гнойової маси на 2777 т більший, ніж за стійлово-пасовищного утримання.

Концентрація сухої речовини у гнойовій масі за стійлово-табірного утримання досягає 30%, що сприяє зростанню рентабельності використання біомаси майже втричі. Основні параметри анаеробного зброджування гнойової біомаси в БГУ за таких умов вищі в 1,5–2 рази, ніж за стійлово-пасовищного утримання.

Річна кількість твердої фракції з гнойової маси становить 3686,22 т (30% від загального річного обсягу біомаси), а рідкої фракції — 1843,11 т (20%). Найбільш рентабельним для господарства є виробництво електроенергії з біогазу, що забезпечує загальний ККД 80–85%, з яких 33% хімічної енергії біометану перетворюється безпосередньо на електроенергію.

Впровадження біогазових установок дає змогу знизити екологічне навантаження на довкілля, підвищити енергоефективність господарств та гарантувати додатковий дохід. Використання залишкової маси як біодобрива сприяє зменшенню витрат на вирощування культурних рослин, підвищуючи економічну ефективність фермерських господарств.

РЕКОМЕНДАЦІЇ

Фермерським господарствам доцільно оцінювати потенціал біогазових установок, враховуючи специфіку умов утримання тварин, доступність ресурсів і відстань до місць нагромадження сировини.

Подальші дослідження слід спрямувати на адаптацію БГУ до умов малих і середніх господарств, а також на розробку ефективних фінансових механізмів для їх впровадження.

Рекомендовано розвивати технології, що сприятимуть оптимізації параметрів біомаси (співвідношення C:N, концентрація сухої речовини, вміст органічної речовини) для підвищення рентабельності біогазових установок.

Тому, впровадження біогазових технологій у фермерських господарствах має не лише економічний, а й значний екологічний ефект, зумовлюючи сталий розвиток агропромислового сектору.

ЛІТЕРАТУРА

1. Bond, T., & Templeton, M. R. (2011). History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable Development*, 15(4), 347–354. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.09.003>.
2. Gadirli, G., Pilarska, A. A., Dach, J., Pilarski, K., Kolasa-Więcek, A., & Borowiak, K. (2024). Fundamentals, Operation and Global Prospects for the Development of Biogas Plants-A Review. *Energies*, 17(3), 568. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17030568>.
3. Igliński, B., Kiełkowska, U., Pietrzak, M., Skrzatek, B., Kumar, M., & Piechota, G. (2023). The regional energy transformation in the context of renewable energy sources potential. *Renew. Energy*, 218, 119246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119246>.
4. Мудрак, О. В., & Морозова, Т. В. (2023). Застосування мікрокосмів для екологічно аргументованого добору біопаливних культур. *Агроекологічний журнал*, 4, 123–133. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2023.293762>.
5. Pilarski, K., Pilarska, A. A., Boniecki, P., Niedbała, G., Durczak, K., Witaszek, K., ... Kowalik, I. (2020). The Efficiency of Industrial and Laboratory Anaerobic Digesters of Organic Substrates: The Use of the Biochemical Methane Potential Correction Coefficient. *Energies*, 13(5), 1280. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13051280>.
6. Bond, T., & Templeton, M. R. (2011). History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy Sustain. Dev.*, 15, 347–354. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.09.003>.
7. Perea-Moreno, M.-A., Samerón-Manzano, E., & Perea-Moreno, A.-J. (2019). Biomass as Renewable Energy: Worldwide Research Trends. *Sustainability*, 11(3), 863. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11030863>.

8. Pilarski, K., Pilarska, A.A., Kolasa-Więcek, A., & Suszanowicz, D. (2023). An Agricultural Biogas Plant as a Thermodynamic System: A Study of Efficiency in the Transformation from Primary to Secondary Energy. *Energies*, 16(21), 7398. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16217398>.
9. Kozłowski, K., Dach, J., Lewicki, A., Cieślík, M., Czeakała, W., Janczak, D., & Brzoski, M. (2018). Laboratory simulation of an agricultural biogas plant start-up. *Chem. Eng. Technol.*, 41, 711–716. DOI: <https://doi.org/10.1002/ceat.201700390>.
10. Nevzorova, T., & Kutcherov, V. (2019). Barriers to the wider implementation of biogas as a source of energy: A state-of-the-art review. *Energy Strategy Rev.*, 26, 100414. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100414>.
11. Kozłowski, K., Pietrzykowski, M., Czeakała, M., Dach, J., Kowalczyk-Juško, A., Józwiakowski, K., & Brzoski, M. (2019). Energetic and economic analysis of biogas plant with using the dairy industry waste. *Energy*, 183, 1023–1031. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.179>.
12. Dudin, V., Polehenka, M., Tkalič, O., Pavlychenko, A., Napich, H., & Roubík, H. (2024). Ecological and economic assessment of the effectiveness of implementing bioenergy technologies in the conditions of post-war recovery of Ukraine. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 203–208. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-1/203>.
13. Lohosha, R., Palamarchuk, V., & Krychkovskyi, V. (2023). Economic efficiency of using digestate from biogas plants in Ukraine when growing agricultural crops as a way of achieving the goals of the European Green Deal. *Energy Policy Journal*, 26(2), 161–182. DOI: <https://doi.org/10.33223/epj/163434>.
14. Kowalczyk-Juško, A., Pochwatka, P., Zaborowicz, M., Czeakała, W., Mazurkiewicz, J., Mazur, A., ... Dach, J. (2020). Energy value estimation of silages for substrate in biogas plants using an artificial neural network. *Energy*, 202, 117729. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117729>.
15. Mazurkiewicz, J. (2022). Energy and Economic Balance between Manure Stored and Used as a Substrate for Biogas Production. *Energies*, 15(2), 413. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15020413>.
16. Wang, C., Amon, B., Schulz, K., & Mehdi, B. (2021). Factors That Influence Nitrous Oxide Emissions from Agricultural Soils as Well as Their Representation in Simulation Models: A Review. *Agronomy*, 11(4), 770. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11040770>.
17. Chubur, V., Danylov, D., Chernysh, Y., Plyatsuk, L., Shtepa, V., Haneklaus, N., & Roubik, H. (2022). Methods for intensifying biogas production from waste: A scientometric review of cavitation and electrolysis treatments. *Fermentation*, 8(10), 570. URL: <https://doi.org/10.3390/fermentation8100570>.
18. Калетнік, Г. М., Здирко, Н. Г., & Фабіянська, В. Ю. (2018). Біогаз в домогосподарствах — запорука енергонезалежності сільських територій України. *Економіка. Фінанси. Менеджмент: актуальні питання науки і практики*, 8, 7–22. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/efmapnp_2018_8_3.
19. ВНТП-АПК-09.06. (2006). Системи видалення, обробки, підготовки та використання гною. Міністерство аграрної політики України. URL: <https://surl.li/orawdd>.

Стаття надійшла до редакції журналу 26.11.2024