

УДК 621.87

ПІДВИЩЕННЯ ВИХОДУ БІОГАЗУ ПРИ ЗБРОДЖУВАННІ ГНОЮ ВЕЛИКОЇ РОГАТОЇ ХУДОБИ З ВІДХОДАМИ ВИНОРІБСТВА В БІОГАЗОВИХ УСТАНОВКАХ

В. М. Поліщук¹, С. А. Шворов¹, Г. В. Крусір², Д. А. Дерев'янко³, Є. О. Дворник¹, Т. С. Давиденко¹

¹Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.

²Одеська національна академія харчових технологій, Україна.

³Поліський національний університет, Україна.

Стаття з спеціальності: 162 – біотехнології та біоінженерія.

Кореспонденція авторів: polischuk.v.m@gmail.com; sosdok@i.ua; krussir.65@gmail.com; derevyanko.dmutro@gmail.com; dvornykevgen@gmail.com; davidenkotaras009@gmail.com

Історія статті: отримано – червень 2021, акцептовано – листопад 2021, опубліковано – 17 грудня 2021 року. Бібл. 27, рис. 4, табл. 0.

Анотація. Метою роботи є підвищення виходу біогазу на біогазових установках за рахунок спільного зброджування гною великої рогатої худоби (ВРХ) з стічними водами виноробних виробництв (СВВВ). Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання: визначався вихід біогазу з гною ВРХ з СВВВ при періодичному завантаженні метантенка; на основі отриманих експериментальних даних здійснювалось калібрування математичної моделі оцінки виходу біогазу при зброджуванні гною ВРХ з додаванням СВВВ; за допомогою відкаліброваної математичної моделі прогнозувався вихід біогазу для квазібезперервного завантаження метантенка. Дослідження проводились на лабораторній біогазовій установці, що складається з метантенка корисним об'ємом 30 л і газгольдера мокрого типу. Вихід біогазу фіксувався за підняттям циліндра-рівнеміра мокрого газгольдера за допомогою закріпленої на ньому шкали, відградуваної в сантиметрах. Теплота згоряння біогазу визначалась за його елементним складом, який фіксувався газоаналізатором. Найбільш істотними результатами є наступні: за даними експериментальних досліджень виходу біогазу при періодичному режимі завантаження з використанням розробленої математичної моделі забезпечується прогнозування виходу біогазу для квазібезперервного завантаження метантенка. В результаті проведених досліджень встановлено, що максимальний вихід біогазу при 2% заміні води на СВВВ в субстраті становить 0,415 л/(год·кг СОР), 6,5% – 0,862 л/(год·кг СОР), 13% – 1,372 л/(год·кг СОР). Значимість результатів досліджень полягає в тому, що використання відходів виноробства в якості косубстрату дозволить збільшити в господарстві з поголів'ям 1000 голів ВРХ добовий вихід біогазу до 20,5 тис. м³, річне виробництво електроенергії – до 54,7 млн. МДж (15,2 млн. кВт·год.), теплової енергії – до 14,79 тис. Гкал. При цьому термін окупності біогазової установки потужністю 4,4 МВт при

використанні «зеленого» тарифу скоротиться до 6,5 року.

Ключові слова: біогаз, субстрат, гній великої рогатої худоби, відходи виноробства, стічні води виноробних виробництв, суха органічна речовина, метантенк, біогазова установка, метанове бродіння.

Постановка проблеми

Як відомо, гній ВРХ часто використовується для отримання біогазу, з якого виробляється електрична і теплова енергія. Однак, внаслідок наявності в гної великої кількості сировини, вихід біогазу при його зброджуванні за допомогою біогазових установок відносно низький. Тому актуальним завданням є підвищення виходу біогазу з гною ВРХ за рахунок використання різних стимулюючих добавок. Якщо ж така стимулююча добавка є відходом виробництва, при цьому вирішується завдання її утилізації, тим самим поліпшується екологічна ситуація в регіоні.

З метою підвищення виходу біогазу і вироблення енергії, на даний час широко практикується спільне зброджування гною ВРХ з силосом кукурудзи. Разом із тим, дану сировину можна використовувати як корм для тварин і продуктів харчування для людини. Тому для підвищення виходу біогазу з гною ВРХ доцільно використовувати більш дешеву сировину, яка стимулює вихід біогазу - відходи виробництв, які необхідно утилізувати з мінімальними витратами, покращуючи при цьому екологію.

Аналіз останніх досліджень

Як показано в роботі [1], вихід біогазу при зброджуванні кукурудзяного силосу (650 м³/кг VS) або харчових відходів (660 м³/кг VS) значно вищий, ніж з гною тварин (450 м³/кг VS). Зброджування відходів виноробства з гном ВРХ в лабораторному

реакторі з фіксованою плівкою при температурі 35°C забезпечує вихід метану 1048 л/кг VS. При цьому також фіксувалось збільшення загального виходу метану в порівнянні з монозброджуванням гною ВРХ [2]. В роботі [3] наведені результати дослідження процесу метанового зброджування відходів виробництва червоних вин з високим вмістом таніну (2-3 г/л) і високими концентраціями сульфатів (3-8 г/л). Встановлено, що дубильні речовини не гальмують утворення кислоти і відновлення сульфату в ацидогенній фазі. Навіть при концентрації 800 мг/л у ацидогенному реакторі було деградовано 30% дубильних речовин. Концентрація танінів 500 мг/л у метановому реакторі на 20% обмежувала біологічну активність метаногенів.

В роботі [4] наведені результати дослідження можливості утилізації стічних вод первинного виноробного виробництва шляхом їх метанового зброджування, що в свою чергу є обґрунтуванням для застосування метаногенезу як найбільш ефективного методу очищення висококонцентрованих стічних вод. Вологість стічних вод виноробних виробництв з осадом становить 92%, що є оптимальним значенням для ефективного процесу метанового зброджування. Відношення C:N коливаються від 20:1 до 100:1. Стічні води виноробних підприємств первинного виноробства характеризуються слаболужним середовищем, значення рН якого складає 7,4 при допустимому значенні рН середовища, при якому процес метаноутворення протікає стабільно, в межах 6,5-7,5.

Результати проведених досліджень, наведених в роботі [4], дозволяють зробити висновок про те, що процес утворення біогазу починається через 22 год. після завантаження субстрату і по мірі збільшення виходу біогазу зростає і вміст в ньому метану. Максимальний вихід біогазу спостерігався на 21 добу бродіння і склав 5,65 дм³/добу при вмісті метану 67%. В роботі [5] наведено усереднений склад стічних вод виноробних підприємств. Стічні води основного виробництва заводів первинного виноробства мають наступні показники: ХСК=380-6400 мг О²/дм³, БСК=300-4300 мг О²/дм³, рН=4,7-7,5, цеху утилізації: ХСК=4000-30000 мг О²/дм³, БСК=2800-23000 мг О²/дм³, рН=4,4-6,0, заводів вторинного виноробства: ХСК=80-1000 мг О²/дм³, БСК=40-900 мг О²/дм³, рН=7,2-9,6. Як зазначено в [5], використання сучасних метантенків дає можливість підтримувати високу концентрацію біомаси в зоні бродіння (60-80 г/дм³), підвищити навантаження до 17-18 кг ХСК О²/м³ метантенка і скоротити тривалість очищення до 1,5-2 діб.

В роботі [6] найвищий вихід біогазу з відходів виноробства склав 855,5 л/кг VS (774,5 л/кг СР), в [7] - від 400 до 600 л/кг ХСК, в [8] і [9] - 9 м³ СН₄/м³, тоді як в [10] - 172 мл/год. VS, в [11] - 207 мл СН₄/год. ХСК, а в [12] - 43 мл СН₄/год. VS. Вихід біогазу із стоків бананових вин при завантаженні в ферментатор 62,4 м³/добу, відповідно до [13], становив 163 м³/добу.

Як зазначено в роботі [14], метанове зброджування стоків заводів по виробництву соків і вина з подрібненням осаду протягом 15 діб дозволило

отримати накопичений вихід біогазу близько 1600 мл/год. VS, без подрібнення - близько 800 мл/год. VS.

У роботах [15-18] проводилось дослідження спільного зброджування відходів виноробства з активним мулом в мезофільних умовах, вихід біогазу при цьому склав 0,4 м³/кг СОР, тоді як в роботі [19] при зброджуванні в термофільних умовах - 0,64 л/год. VS (для порівняння, при зброджуванні тільки активного мулу вихід біогазу склав 0,38 л/год. VS), а при обробці ультразвуком - 1,411 л/год. VS [20]. Авторі рекомендують для термофільного зброджування на одну частину активного мулу додавати три частини винних стоків.

Представлені результати досліджень в [21] показують, що в процесі виноробства крім стічних вод утворюється багато побічних продуктів, в основному виноградних кісточок, виноградних стебел і винних осадів. Анаеробне зброджування особливо підходить для обробки відходів виноробства завдяки високому вмісту багатих поживними речовинами органічних речовин і значного енергетичного потенціалу. В роботі показано, що на сьогоднішній день широко представлені тільки результати мезофільних тестів. У цьому дослідженні потенційна продукція метану і кінетичні константи були визначені за допомогою періодичних досліджень в термофільних умовах і зіставлені з мезофільними значеннями, вже відомими в літературі. Показано, що з виноградних відходів, вироблених в Італії (808 тис. т на рік) може бути вироблено близько 245 ГВт·год. теплової та 201 ГВт·год. електричної енергії за рік.

У дослідженні [22] приведена оцінка вироблення біогазу та метану з вичавок винограду (сорт Каберне Фран). Були визначені фізичні і хімічні характеристики сировини, а структурні полісахариди ідентифіковані та проаналізовані методом Ван-Соеста. Для оцінки виробництва метану з вичавки винограду, м'якоті і насіння, проведені періодичні анаеробні зброджування. При цьому оцінено вплив подрібнення біомаси шляхом механічної попередньої її обробки на метановий потенціал. Показано, що попередня обробка біомаси збільшує анаеробну біорозкладність для вичавки, м'якоті і насіння винограду на 13,1%, 4,8% і 22,2% відповідно.

В роботі [23] представлені результати експериментів на лабораторних установках для оцінки виходу біогазу і метану, отриманих в результаті анаеробного зброджування свіжих виноградних відходів. Результати експериментів показують, що вихід метану досягає до 110 м³/т з більш високою продуктивністю, ніж з інших видів біомаси. Включення виноградних кісточок позитивно впливає на вироблення біогазу та метану. Крім того, при використанні подрібнених виноградних відходів може бути досягнутий більш високий відсоток СН₄.

Аналіз проведених досліджень показує, що потрібне подальше вивчення питань інтенсифікації виходу біогазу та вироблення електроенергії на основі зброджування гною ВРХ зі стимулюючими добавками. При цьому в розглянутих вище роботах оцінка виходу біогазу здійснювалась тільки за даними експериментальних досліджень, що вимагає значних тимчасових і вартісних витрат, особливо при

періодичному завантаженні субстратів. Хоча в теперішньому часі велика кількість сучасних біогазових установок працює в системі з квазінеперервним завантаженням.

Одним з підходів до усунення зазначених недоліків є застосування математичних моделей прогнозування виходу біогазу при переході від періодичного до квазінеперервного завантаження метантенка.

Мета досліджень

Метою роботи є підвищення виходу біогазу із гною ВРХ за рахунок додавання стимулюючої добавки у вигляді відходів виноробства.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- визначити вихід біогазу із гною ВРХ з додаванням відходів виноробства при періодичному завантаженні метантенка;
- оцінити вихід біогазу при зброджуванні гною ВРХ з додаванням відходів виноробства;
- за допомогою математичної моделі спрогнозувати вихід біогазу при квазінеперервному завантаженні метантенка.

Результати досліджень

Для проведення дослідження використовувалась лабораторна біогазова установка з 30 л метантенком, мокрим газгольдером (рис. 1) при періодичному завантаженні субстрату, при якому метантенок повністю заповнюється свіжою порцією субстрату, яка видаляється з нього лише після закінчення періоду метанового бродіння.

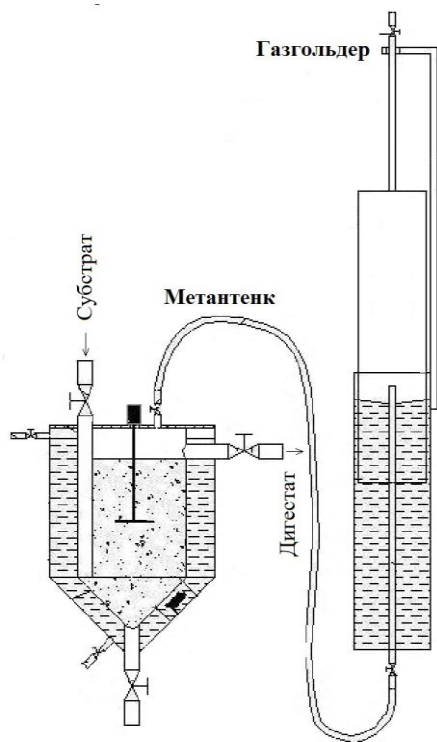


Рис. 1. Лабораторна біогазова установка.
Fig. 1. Laboratory biogas plant.

Нагрівання субстрату в метантенку здійснюється за допомогою водяної сорочки з електронагрівачем. Завантаження свіжого субстрату в нижню частину активної зони метантенка проводиться через трубку метантенка, що забезпечує витіснення відпрацьованого дигестату на рівні межі субстрату і біогазу. При заправці метантенка в ньому необхідно зберегти не менше 1/3 відпрацьованого дигестату для незмінності мікрофлори комплексу метаноутворюючих бактерій. Вихід біогазу фіксується за шкалою, відградуваною в сантиметрах, нанесеною на циліндр-рівнемір мокрого газгольдера. Біогаз спалюється на газовій плиті, нагріваючи при цьому воду у вимірювачі теплотворення [24].

Для проведення дослідів з додаванням стічних вод виноробних виробництв (СВВВ) субстрат готувався шляхом додавання до водопровідної води подрібнених виноградних гребенів в співвідношенні 10:1. В ході досліджень частина води в субстраті була замінена СВВВ, як показано в табл. 1.

Середній вимірний рН субстрату при вмісті в ньому 2% СВВВ склав 7,86, при вмісті 6,5% СВВВ – 7,4, при вмісті 13% СВВВ – 7,38.

Метантенок завантажувался субстратом наполовину (коефіцієнт завантаження – 0,5). При додаванні нової порції субстрату переброджений субстрат змінювався наполовину (коефіцієнт спорощення – 0,5). Тобто, при новому завантаженні в метантенок додавалось 7,5 кг субстрату. Як субстрат використовувався гній ВРХ (тверда фракція), зібраний на пасовищі, з його відносною вологістю 84%. У метантенок завантажувалось 3 кг гною, розведеного 4,5 кг рідини (води або її суміші з СВВВ). Температура бродіння становила 40°C.

Таблиця 1. Склад субстрату при дослідженні впливу СВВВ на вихід біогазу при метановому зброджуванні гною ВРХ.

Table 1. The composition of the substrate in the study of the effect of wastewater from wineries on biogas yield during methane fermentation of cattle manure

Показник	№ досліді			
	1	2	3	4
ВРХ	3	3	3	3
Волога, кг, в якій:	4,5	4,5	4,5	4,5
вода, кг	4,5	4,35	4	3,5
СВВВ, кг	0	0,15	0,5	1
%	0	2	6,5	13
Вміст СОР в субстраті, кг	0,46	0,40	0,41	0,42
%	5,44	5,34	5,47	5,65
Відносна вологість субстрату, %	93,40	93,5	93,4	93,2

Дослідження виходу біогазу при зброджуванні гною ВРХ з додаванням СВВВ. На рис. 2 представлені результати досліджень, які свідчать, що при зброджуванні гною ВРХ та заміною частини води в субстраті 2% СВВВ в субстраті, динаміка зброджування аналогічна сбраживанню чистого гною ВРХ [24]. У цьому випадку вихід біогазу поступово

зростає в часі, а потім так само поступово спадає.

Збільшення вмісту СВВВ в субстраті до 6,5% і більше дещо змінює динаміку зброджування субстрату. Вихід біогазу з часом різко зростає, а після досягнення максимуму так само різко падає.

При незначному вмісті СВВВ в субстраті спостерігається діауксія, яка чітко виражена, тоді як

при збільшенні вмісту стоків в субстраті стає ледь помітною.

Із рис. 2 встановлено, що максимальний вихід біогазу при 2% заміні води на СВВВ в субстраті становить 0,415 л/(год·кг СОР), 6,5% – 0,862 л/(год·кг СОР), 13% – 1,372 л/(год·кг СОР).

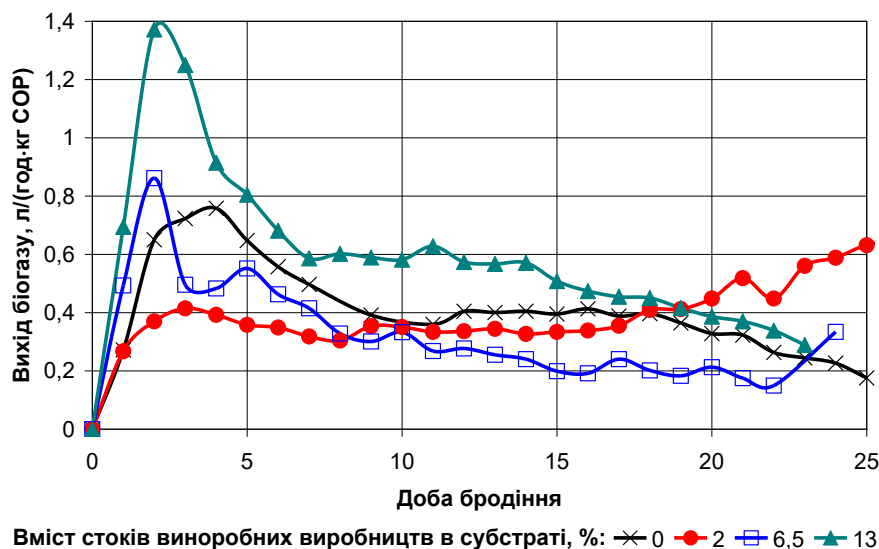


Рис. 2. Динаміка виходу біогазу при зброджуванні гною ВРХ з додаванням СВВВ при температурі бродіння 40°C.

Fig. 2. Dynamics of biogas output during fermentation of cattle manure with the addition of wastewater from wineries at a fermentation temperature of 40°C.

Біогаз, отриманий при зброджуванні гною ВРХ з додаванням замість води СВВВ 2%, 6,5% і 13%, в першу добу бродіння або зовсім не горів, або погано горів, виділяючи близько 8 МДж/м³ біогазу за експрес-методом [25]. На другу добу метанового бродіння горіння біогазу стабілізувався з теплою згорання 14-18 МДж/м³ за експрес-методом.

С допомогою газоаналізатора GEM-500 визначався елементний склад біогазу при різних рівнях циліндра-рівнеміра. У разі знаходження циліндра-рівнеміра на позначці 12,5 см вміст метану в біогазі становив 62%, а теплота згорання біогазу складала 22,1 МДж/м³. В інших випадках біогаз для вимірювання його елементного складу відбирався з газгольдера при опусканні циліндра-рівнеміра до рівнів 19,5 см, 15 см, 12 см, 10 см, 7 см, 5 см, 3 см. При цьому вміст метану в біогазі становив 52 %, 55%, 65%, 66%, 68%, 66% і 66% відповідно.

Таким чином, СВВВ доцільно використовувати для часткової заміни води при приготуванні субстратів для виробництва біогазу. В результаті проведених досліджень встановлено, що максимальний вихід біогазу реєструвався при концентрації 13% СВВВ. Менший вміст СВВВ в субстраті істотно не покращує вихід біогазу в порівнянні з використанням для приготування субстрату звичайної води.

Моделювання виходу біогазу при квазібезперервному завантаженні метантенка на основі результатів експериментальних досліджень виходу біогазу при періодичному завантаженні

метантенка. Метантенк біогазової установки, на якому проводились експериментальні дослідження зброджування субстратів на основі гною ВРХ з додаванням СВВВ, призначений для періодичного завантаження субстрату. Режим квазінеперервного завантаження субстрату, коли він завантажується малими порціями через певний проміжок часу, як правило, близько 1 год., на цьому метантенку здійснити досить складно.

Разом з тим, на практиці на діючих біогазових установках періодичний режим завантаження метантенка застосовується рідко, частіше використовується квазінеперервний режим завантаження, коли субстрат в метантенк завантажуються малими порціями через певний проміжок часу (як правило, близько 1 год.). При цьому вихід біогазу сягає максимального значення при періодичній системі завантаження і тримається на такому рівні протягом всього часу роботи біогазової установки. Тому, використовуючи результати дослідів при періодичній системі завантаження метантенка, можна змодельовати вихід біогазу при квазінеперервній системі завантаження. На основі даних, наведених в роботі [26], і власних досліджень [24], можна стверджувати, що вихід біогазу при квазібезперервній системі завантаження буде близький до максимального виходу біогазу при періодичній системі завантаження метантенка.

Розглянемо математичну модель функціонування метантенка біогазової установки, що складається з системи диференціальних рівнянь, в якій зростання

популяції метаноутворюючих бактерій описується рівнянням Моно з урахуванням процесу відмирання, що задається рівнянням Колпікова, а швидкість утворення біогазу – прямо пропорційна концентрації бактерій. Модель концентрації поживних речовин субстрату враховує зміну концентрації поживних

речовин субстрату в часі, завантажених з субстратом в метантенк, а також вивантажених з нього, перероблених бактеріями і використаних для формування їх клітинної біомаси, на виробництво енергії для підтримки їх життєдіяльності і вироблення біогазу:

$$\begin{cases} \frac{dC}{dt} = \left(\frac{\mu_m \cdot S}{k_a + S} - \frac{\mu_d \cdot k_b}{k_b + S} - p \right) \cdot C \\ \frac{dS}{dt} = p \cdot (S_0 - S) - \left(k_a \cdot \mu_m \cdot C + \frac{k_\beta \cdot S \cdot \mu_m}{k_a + S} \cdot C + k \cdot \rho_\delta \cdot \rho_c \cdot \frac{dV_\delta}{dt} \right) \\ \frac{dV_\delta}{dt} = \frac{K_\gamma \cdot S}{\rho_c} \end{cases}$$

де C – концентрація бактерій, $\text{кг}/\text{м}^3$; S – концентрація поживних речовин в субстраті, $\text{кг}/\text{м}^3$; dV/dt – динаміка виходу біогазу, $\text{м}^3/(\text{кг} \cdot \text{добу})$; p – коефіцієнт розведення культури потоком свіжого субстрату, доба^{-1} ; k – коефіцієнт перетворення поживних речовин субстрату в біогаз, $\text{кг}/\text{кг}$; ρ_δ , ρ_c – щільність біогазу і субстрату, $\text{кг}/\text{м}^3$; k_a , k_β – безрозмірні коефіцієнти засвоєння субстрату; k_a – константа, рівна такій концентрації поживних речовин субстрату, при якій швидкість росту досягає половини граничної, $\text{кг}/\text{м}^3$; k_b – емпіричний коефіцієнт, $\text{кг}/\text{м}^3$; μ_d – максимальна питома швидкість відмирання метанобразуючих бактерій, доба^{-1} ; μ_m – максимальна питома швидкість росту метаноутворюючих бактерій, доба^{-1} ; K_γ – коефіцієнт швидкості перетворення поживних речовин субстрату в біогаз, $\text{м}^3/(\text{кг} \cdot \text{добу})$; t – час, діб

Початковими умовами для вирішення системи диференціальних рівнянь є:

– початкова концентрація біомаси метаноутворюючих бактерій (C_0) в метантенку – 1 $\text{кг}/\text{м}^3$;

– початкова концентрація поживних речовин в субстраті (S_0) визначалася з результатів експериментальних досліджень: в метантенк робочим об'ємом 30 л завантажувалося 8,5 кг субстрату, в т.ч. 3,5 кг гною ВРХ та 5 кг води; отже, $S_0 = 3,5/(30 \cdot 1000) = 115 \text{ кг}/\text{м}^3$;

– початковий вихід біогазу $V_0 = 0 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

З урахуванням того, що з 1 г оцтової кислоти утворюється 0,27 г метану, коефіцієнт перетворення поживних речовин субстрату в біогаз приймається як $k = 0,27$.

У разі періодичного завантаження метантенка відносна швидкість надходження субстрату $p=0 \text{ діб}^{-1}$, а для квазібезперервного режиму – $p>0 \text{ діб}^{-1}$.

При квазінеперервному завантаженні відносна швидкість надходження субстрату p може бути визначена як величина, зворотна часу гідравлічного утримання: $p=1/t_{\text{г}}$. На працюючих біогазових установках $t_{\text{г}}$ близький до 20 діб, тому $p=0,05 \text{ діб}^{-1}$ [27].

Параметри μ_m , μ_d , k_a , k_b , k_β , K_γ залежать від температурного режиму метантенка і типу косубстрату. Щільність біогазу становить 1,212 $\text{кг}/\text{м}^3$. Щільність субстрату становить $\rho_c=1010 \text{ кг}/\text{м}^3$.

У пакеті Simulink, інтегрованого в програму MATLAB, було проведено імітаційне моделювання процесу зброджування гною ВРХ з додаванням СВВВ. В результаті отримана динаміка виходу біогазу, як показано на рис. 3.

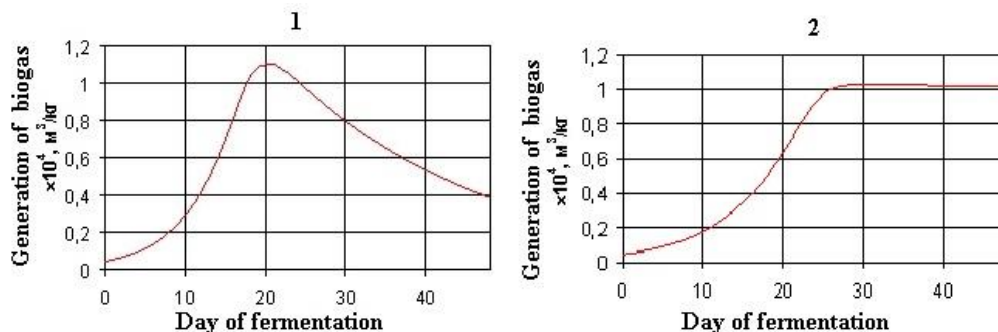


Рис. 3. Динаміка виходу біогазу, отримана в результаті моделювання процесу зброджування гною ВРХ з додаванням СВВВ: 1 – при періодичному завантаженні субстрату; 2 – при квазінеперервному завантаженні субстрату

Fig. 3. Dynamics of biogas output obtained as a result of modeling the functioning of the digester of a biogas plant during fermentation of cattle manure with the addition of wastewater from wineries: 1 – with periodic loading of the substrate; 2 – with quasi-continuous substrate loading

Крім того, здійснювалося порівняння результатів імітаційного моделювання динаміки виходу біогазу з результатами експериментальних досліджень. Шляхом підбору параметрів μ_m , μ_d , k_a , k_b , k_{α} , k_{β} , K_{γ} домагалися того, щоб імітована модель, представлена в осцилографі Scope пакета Simulink, була найбільш близькою до залежності виходу біогазу в часі, отриманої експериментальним шляхом (див. рис. 2).

Вихід біогазу вимірювався в м³/кг, оскільки при проведенні експериментальних досліджень вихід біогазу визначався з 1 кг субстрату.

Таблиця 2. Коефіцієнти імітаційної моделі виходу біогазу при зброджуванні гною ВРХ з додаванням СВВВ з різним їх вмістом в субстраті при температурі бродіння 40°C.

Table 2. Coefficients of the simulation model of biogas yield during fermentation of cattle manure with the addition of wastewater from wineries with different content in the substrate at a fermentation temperature of 40°C

Вміст СВВВ, %	μ_m , діб ⁻¹	μ_d , діб ⁻¹	K_{γ} , м ³ /(кг·добу)	R ²
2,0	2,4	0,085	0,00000093	0,9041
6,5	2,1	0,09	0,00000195	0,9083
13	2,0	0,095	0,00000313	0,9382

При імітаційному моделюванні приймалося, що $k_{\alpha}=10^{-9}$, $k_{\beta}=5$, k_a 14 кг/м³, $k_b=0,01$ кг/м³.

Коефіцієнти μ_m , μ_d і K_{γ} визначалися шляхом підбору і порівняння даних імітаційного моделювання

Ступінь наближення результатів імітаційного моделювання генерації біогазу до виходу біогазу, отриманого експериментальним шляхом, оцінювалась коефіцієнтом детермінації.

Коефіцієнти імітаційної моделі виходу біогазу при зброджуванні гною ВРХ з додаванням СВВВ з різним їх вмістом в субстраті при температурі бродіння 40°C наведені в табл. 2.

з експериментальними даними до отримання найнижчого можливого коефіцієнта детермінації R².

Коефіцієнт μ_m , в табл. 2 може бути описаний логарифмічною функцією, а коефіцієнти μ_d і K_{γ} – поліномом Ньютона другого порядку:

$$\mu_m = 0,2414 \cdot \ln(Wd) + 0,5514 \text{ при } R^2=0,9863, \quad (2)$$

$$\mu_d = -1,58 \cdot 10^{-3} \cdot Wd^2 + 3,15 \cdot 10^{-2} \cdot Wh - 4,82 \cdot 10^{-2} \text{ при } R^2=0,9999, \quad (3)$$

$$K_{\gamma} = -4,1 \cdot 10^{-9} \cdot Wd^2 + 2,62 \cdot 10^{-7} \cdot Wh + 4,23 \cdot 10^{-7} \text{ при } R^2=1,0, \quad (4)$$

де Wd – вміст СВВВ в субстраті, %.

Оскільки коефіцієнти детермінації імітаційної моделі виходу біогазу при зброджуванні гною ВРХ з додаванням СВВВ наближаються до одиниці, то вони досить точно відображають експериментальні дані. При перевірці за критерієм Фішера встановлена значимість коефіцієнта детермінації.

Змодельований вихід біогазу при зброджуванні гною ВРХ з СВВВ для квазінеперервної системи завантаження метантенка апроксимується ступеневою функцією:

$$V_{\text{б.мод}} = 0,266 \cdot Wd^{0,64} \text{ при } R^2=0,9992 \quad (5)$$

де $V_{\text{б.мод}}$ – змодельований вихід біогазу для квазібезперервної системи завантаження метантенка, л/кг СОР; Wd – вміст в субстраті стоків виноробних виробництв, %.

Новизна роботи полягає в тому, що за даними експериментальних досліджень виходу біогазу при періодичному режимі завантаження за допомогою розробленої математичної моделі, реалізованої в пакеті Simulink, забезпечується прогнозування виходу біогазу для квазібезперервного завантаження метантенка.

При зброджуванні гною з ферми на 1000 голів ВРХ (з них 500 дійних корів) добовий вихід біогазу становитиме 10,6 тис. м³. При цьому термін окупності біогазової установки потужністю 2,3 МВт у складі двох метантенков об'ємом по 2500 м³ (один з яких виступає в ролі доброджувача, де виробляється до 20% біогазу) при ціні електроенергії, отриманої з біогазу по "зеленому" тарифу, 0,157 \$/кВт·год., становить 10 років. Річне виробництво електроенергії при спалюванні біогазу на когенераційної установку становить 27,9 млн. МДж (7,8 млн. кВт·год.). При цьому також виробляється 7,7 тис. Гкал теплової енергії, яку крім підтримки теплового балансу метантенків можна використовувати для побутових потреб.

При утилізації відходів виноробних виробництв шляхом їх метанового зброджування спільно з гноем ВРХ з ферми на 1000 голів добовий вихід біогазу збільшиться до 20,5 тис. м³. Річне виробництво електроенергії збільшиться до 54,7 млн. МДж (15,2 млн. кВт·год.), теплової енергії – до 14,79 тис. Гкал. При цьому термін окупності біогазової установки потужністю 4,4 МВт при використанні «зеленого» тарифу скоротиться до 6,5 років (рис. 4).

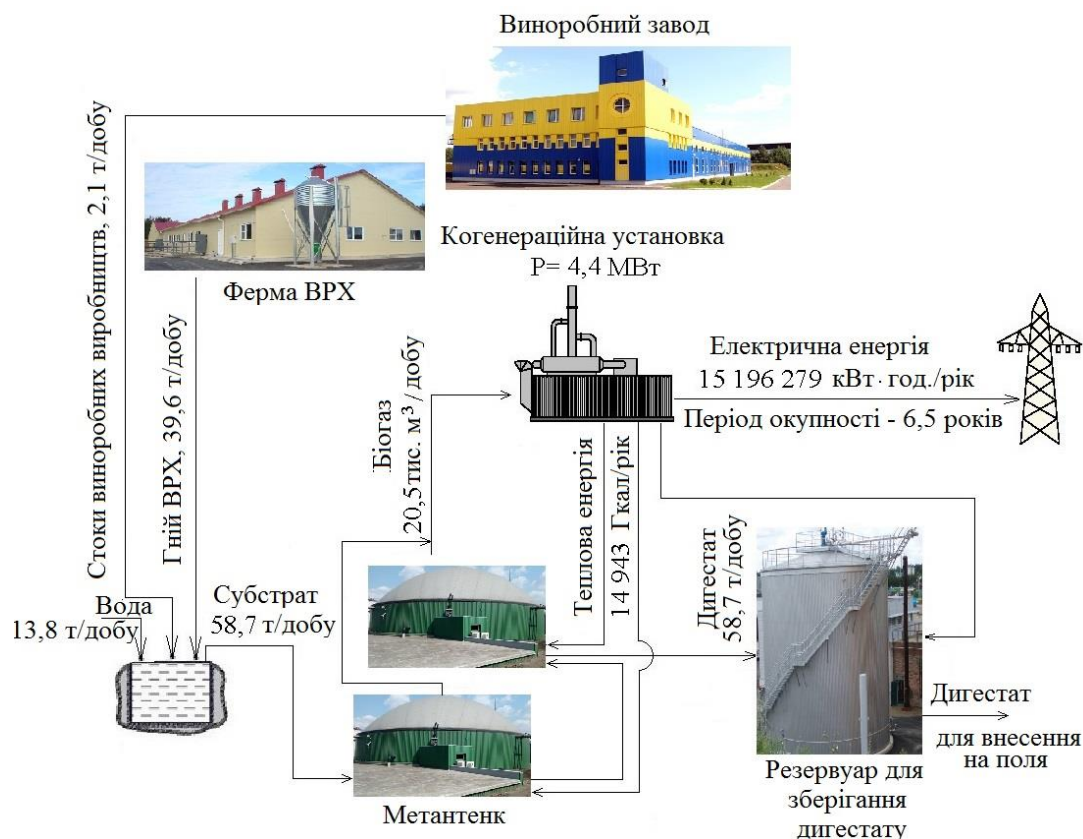


Рис. 4. Схема виробництва біогазу з гною великої рогатої худоби і стічних вод виноробних виробництв з виробленням теплової та електричної енергії.

Fig. 4. Diagram of biogas production from cattle manure and wastewater from wineries with the generation of heat and electricity.

Висновки

1. В результаті проведених досліджень встановлено, що при зброджуванні гною ВРХ з додаванням СВВВ максимальний вихід біогазу при 2% заміні води на СВВВ в субстраті становить 0,415 л/(год·кг СОР), 6,5% – 0,862 л/(год·кг СОР), 13% – 1,372 л/(год·кг СОР).

2. Прогнозований вихід біогазу, отриманий за допомогою розробленої математичної моделі, реалізованої в пакеті Simulink при квазінеперервному завантаженні метантенка, і результати експериментальних досліджень виходу біогазу при періодичному режимі завантаження з додаванням до гною ВРХ 13% відходів виноробства в пікових точках повністю збігаються.

3. При реалізації нового методичного підходу до прогнозування виходу біогазу результати розрахунків показують, що використання відходів виноробства в якості косубстрату дозволить збільшити в господарстві з поголів'ям 1000 голів ВРХ добовий вихід біогазу до 20,5 тис. м³, річне виробництво електроенергії – до 54,7 млн. МДж (15,2 млн. кВт·год.), теплової енергії – до 14,79 тис. Гкал. При цьому термін окупності біогазової установки потужністю 4,4 МВт при використанні "зеленого" тарифу знизиться до 6,5 років.

Список літератури

1. Lijo L., Gonzalez-Garcia S., Bacenetti J., Moreira M.T. The environmental effect of substituting energy crops for food waste as feedstock for biogas production. *Energy*, 2017, vol. 137. P. 1130-1143. doi: 10.1016/j.energy.2017.04.137.
2. Lo K.V., Liao P.H. Methane production from fermentation of winery waste. *Biomass*. 1986, Vol. 9, iss. 1. P. 19-27. doi: doi.org/10.1016/0144-4565(86)90009-0.
3. Ehlinger F., Gueler I., Bal, F.X., Prevot C. Treatment of lees vinasses of red wine by methanogenic fermentation in presence of tannins and sulphides. *Water Science & Technology*. 1992, Vol. 25, iss. 7. P. 275-284. doi: doi.org/10.2166/wst.1992.0159.
4. Крусир Г. В., Дубровин В. А., Полищук В. Н., Дубовик А. А., Соколова И. Ф. Исследование метаногенеза сточных вод предприятий первичного виноделия. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. Т. 4. № 10 (70). С. 43–47. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.26227.
5. Домарецкий В., Куц А., Билько М., Мельник И. Получение биогаза из сточных вод винодельческих предприятий. *Научные труды Одесской национальной академии пищевых технологий*. 2010, Ч. 2, № 38. С. 300-305.
6. Jasko J., Skripsts E., Dubrovskis V. Biogas production of winemaking in anaerobic fermentation process. *11th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development (May 24-25, 2012,*

Jelgava, Latvia), *Engineering for Rural Development*. 2012, Vol. 11. P. 576-579.

7. Moletta R. Winery and distillery wastewater treatment by anaerobic digestion. *Water Science & Technology*. 2005, Vol. 51, iss. 1. P. 137-144. doi: 10.2166/wst.2005.0017.

8. Perez M., Romero L.I., Sales D. Organic matter degradation kinetics in an anaerobic thermophilic fluidized bed bioreactor. *Anaerobe*. 2001, Vol. 7, iss. 1. P. 25-35. doi: 10.1006/anae.2000.1362.

9. Perez M., Romero L.I., Sales D. Anaerobic thermophilic fluidized bed treatment of industrial wastewater: Effect of F : M relationship. *Chemosphere*. 1999, Vol. 38, iss. 14. P. 3443-3461. doi: 10.1016/S0045-6535(98)00556-6.

10. Akassou M., Kaanane A., Crolla A., Kinsley C. Statistical modelling of the impact of some polyphenols on the efficiency of anaerobic digestion and the co-digestion of the wine distillery wastewater with dairy cattle manure and cheese whey. *Water Science And Technology*. 2010, Vol. 62, iss. 3. P. 475-483. doi: 10.2166/wst.2010.235.

11. Carrillo-Reyes J., Albarrán-Contreras B.A., Buitron G. Influence of Added Nutrients and Substrate Concentration in Biohydrogen Production from Winery Wastewaters Coupled to Methane Production. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2019, Vol. 187. P. 140-151. doi: doi.org/10.1007/s12010-018-2812-5.

12. Rebecchi S., Bertin L., Vallini V., Bucchi G., Bartocci F., Fava F. Biomethane production from grape pomaces: a technical feasibility study. *Environmental Engineering and Management Journal*. 2013, Vol. 12, iss. S11. P. 105-108.

13. Paschal C., Gastory L., Katima J.H.Y., Njau K. N. Application of up-flow anaerobic sludge blanket reactor integrated with constructed wetland for treatment of banana winery effluent. *Water Practice And Technology*. 2017, Vol. 12, iss. 3. P. 667-674. doi: 10.2166/wpt.2017.062.

14. Makadia T.H., E., Adetutu T.M., Sheppard P.J., Ball A.S. Effect of anaerobic co-digestion of grape marc and winery wastewater on energy production. *Australian Journal of Crop Science*. 2016, Vol. 10, iss. 1. P. 57-61.

15. Cavinato C., Da Ros C., Pavan P., Cecchi F., Bolzonella D. Treatment of waste activated sludge together with agro-waste by anaerobic digestion: focus on effluent quality. *Water Science And Technology*. 2014, Vol. 69, iss. 3. P. 525-531. doi: 10.2166/wst.2013.736.

16. Da Ros C., Cavinato C., Cecchi F., Bolzonella D. Anaerobic co-digestion of winery waste and waste activated sludge: assessment of process feasibility. *Water Science And Technology*. 2014, Vol. 69, iss. 2. P. 269-277. doi: 10.2166/wst.2013.692.

17. Da Ros C., Cavinato C., Pavan P., Bolzonella D. Mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion of winery wastewater sludge and winelees: An integrated approach for sustainable wine production. *Journal of Environmental Management*. 2017, Vol. 203, Part 2, SI. P. 745-752. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.03.029.

18. Da Ros C., Cavinato C., Pavan P., Bolzonella D. Winery waste recycling through anaerobic co-digestion with waste activated sludge. *Waste Management*. 2014, Vol. 34, iss. 11. P. 2028-2035. doi:

10.1016/j.wasman.2014.07.017.

19. Tai M. Q., Chen J. R., Chang C. C. Feasibility of anaerobic co-digestion of waste activated sludge under thermophilic conditions. For results 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering (Jun 11-16, 2009, Beijing, China), *Engineering for Rural Development*. 2009, Vol. 1-11. 6320

20. Tai M. Q., Chen J. R., Chang C. C. Effect of ultrasonic pretreatment subsequent anaerobic co-digestion on naphthalene and pyrene removal. For results International Conference on Advances in Chemical Technologies for Water and Wastewater Treatment (May 15-18, 2008, Xian, China), *Advanced in chemical Technologies for water and wastewater treatment*. 2008. P. 637-646.

21. Da Ros C., Cavinato C., Bolzonella D., Pavan R. Renewable energy from thermophilic anaerobic digestion of winery residue: preliminary evidence from batch and continuous lab-scale trials. *Biomass Bioenergy*. 2016, Vol. 91. P. 150-159.

22. Achkar J. H., Lendormi T., Hobaika Z., Salameh Il., Louka N., Maroun R. G., Ianoiselle J. L. Anaerobic digestion of grape pomace: biochemical characterization of the fractions and methane production in batch and continuous digesters. *Waste Management*. 2016, Vol. 50. P. 275-282. doi: doi.org/10.1016/j.wasman.2016.02.028.

23. Failla S., Restuccia A. Methane potentials from grape marc by a laboratory scale plant. *Applied Mathematical Sciences*. 2014, Vol. 8, iss. 132. P. 6665-6678. doi: dx.doi.org/10.12988/ams.2014.474551.

24. Polishchuk V., Titova L., Shvorov S., Gunchenko Y. Estimation of Biogas Yield and Electricity Output during Cattle Manure Fermentation and Adding Vegetable Oil Sediment as a Co-substrate. *Problemele Energeticii Regionale*. 2019. Vol. 2 (43). P. 117-132.

25. Поліщук В. М., Василенков В. Є., Лободко М. М., Волошин В. С. Експрес-метод визначення теплотворної здатності біогазу. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2012. № 170. Ч. 2. С. 258-263.

26. Eder B., Schulz H. Biogas-Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Wirtschaftlichkeit, Beispiele, 2007. Freiburg, Germany: Ökobuch, 237 p.

27. Королев С. А., Майков Д. В. Идентификация математической модели и исследование различных режимов метаногенеза в мезофильной среде. *Компьютерные исследования и моделирование*. 2012. Т.4. №1. С. 131-141.

References

1. Lijo, L., Gonzalez-Garcia, S., Bacenetti, J., Moreira, M.T. (2017). The environmental effect of substituting energy crops for food waste as feedstock for biogasproduction. *Energy*. 137. 1130-1143. doi: 10.1016/j.energy.2017.04.137.

2. Lo, K.V., Liao, P.H. (1986). Methane production from fermentation of winery waste. *Biomass*. 9 (1). 19-27. doi: doi.org/10.1016/0144-4565(86)90009-0.

3. Ehlinger, F., Gueler, I., Bal, F.X., Prevot, C.

- (1992). Treatment of lees vinasses of red wine by methanogenic fermentation in presence of tannins and sulphides. *Water Science & Technology*. 25 (7). 275-284. doi: doi.org/10.2166/wst.1992.0159.
4. Krusir, G., Dubrovin, V., Polishchuk, V., Dubovik, A., Sokolova, I. (2014). Research of metanogenesis waste waters of primary winemaking. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 9 (10). 43-47. doi: 10.15587/1729-4061.2014.26227.
5. Domareckij, V., Kuts, A., Bilko, M., Melnik, I. (2010). Reception of biogas from waste and waste water wine companies. *Scientific works of the Odessa National Academy of Food Technologies*. 2 (38). 300-305.
6. Jasko, J., Skripsts, E., Dubrovskis, V. (2012). Biogas production of winemaking in anaerobic fermentation process. 11th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development (May 24-25, 2012, Jelgava, Latvia), *Engineering for Rural Development*. 11. 576-579.
7. Moletta, R. (2005). Winery and distillery wastewater treatment by anaerobic digestion. *Water Science & Technology*. 51 (1). 137-144. doi: 10.2166/wst.2005.0017.
8. Perez, M., Romero, L.I., Sales, D. (2001). Organic matter degradation kinetics in an anaerobic thermophilic fluidised bed bioreactor. *Anaerobe*. 7 (1). 25-35. doi: 10.1006/anae.2000.1362.
9. Perez, M., Romero, L.I., Sales, D. (1999). Anaerobic thermophilic fluidized bed treatment of industrial wastewater: Effect of F : M relationship. *Chemosphere*. 38 (14). 3443-3461. doi: 10.1016/S0045-6535(98)00556-6.
10. Akassou, M., Kaanane, A., Crolla, A., Kinsley, C. (2010). Statistical modelling of the impact of some polyphenols on the efficiency of anaerobic digestion and the co-digestion of the wine distillery wastewater with dairy cattle manure and cheese whey. *Water Science And Technology*. 62 (3). 475-483. doi: 10.2166/wst.2010.235.
11. Carrillo-Reyes, J., Albarrán-Contreras, B.A., Buitron, G. (2019). Influence of Added Nutrients and Substrate Concentration in Biohydrogen Production from Winery Wastewaters Coupled to Methane Production. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 187. 140-151. doi: doi.org/10.1007/s12010-018-2812-5.
12. Rebecchi, S., Bertin, L., Vallini, V., Bucchi, G., Bartocci, F., Fava, F. (2013). Biomethane production from grape pomaces: a technical feasibility study. *Environmental Engineering and Management Journal*. 12 (S11). 105-108.
13. Paschal, C., Gastory, L., Katima, J.H.Y., Njau, K.N. (2017). Application of up-flow anaerobic sludge blanket reactor integrated with constructed wetland for treatment of banana winery effluent. *Water Practice And Technology*. 12 (3). 667-674. doi: 10.2166/wpt.2017.062.
14. Makadia, T.H., Adetutu, T.M., Sheppard, P.J., Ball, A.S. (2016). Effect of anaerobic co-digestion of grape marc and winery wastewater on energy production. *Australian Journal of Crop Science*. 10 (1). 57-61.
15. Cavinato, C., Da Ros, C., Pavan, P., Cecchi, F., Bolzonella, D. (2014). Treatment of waste activated sludge together with agro-waste by anaerobic digestion: focus on effluent quality. *Water Science And Technology*. 69 (3). 525-531. doi: 10.2166/wst.2013.736.
16. Da Ros C., Cavinato C., Cecchi F., Bolzonella D. Anaerobic co-digestion of winery waste and waste activated sludge: assessment of process feasibility. *Water Science And Technology*. 2014, Vol. 69, no. 2. pp. 269-277. doi: 10.2166/wst.2013.692.
17. Da Ros, C., Cavinato, C., Pavan, P., Bolzonella, D. (2017). Mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion of winery wastewater sludge and winelees: An integrated approach for sustainable wine production. *Journal of Environmental Management*. 203 (2). 745-752. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.03.029.
18. Da Ros, C., Cavinato, C., Pavan, P., Bolzonella, D. (2014). Winery waste recycling through anaerobic co-digestion with waste activated sludge. *Waste Management*. 34 (11). 2028-2035. doi: 10.1016/j.wasman.2014.07.017.
19. Tai, M.Q., Chen, J.R., Chang, C.C. (2009). Feasibility of anaerobic co-digestion of waste activated sludge under thermophilic conditions. For results 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering (Jun 11-16, 2009, Beijing, China), *Engineering for Rural Development*. 1-11. 6320.
20. Tai, M.Q., Chen, J.R., Chang, C.C. (2008). Effect of ultrasonic pretreatment subsequent anaerobic co-digestion on naphthalene and pyrene removal. For results International Conference on Advances in Chemical Technologies for Water and Wastewater Treatment (May 15-18, 2008, Xian, China), *Advanced in chemical Technologies for water and wastewater treatment*. 637-646.
21. Da Ros, C., Cavinato, C., Bolzonella, D., Pavan R. (2016). Renewable energy from thermophilic anaerobic digestion of winery residue: preliminary evidence from batch and continuous lab-scale trials. *Biomass Bioenergy*. 91. 150-159.
22. Achkar, J.H., Lendormi, T., Hobaike, Z., Salameh, I., Louka, N., Maroun, R.G., Lanoiselle, J.L. (2016). Anaerobic digestion of grape pomace: biochemical characterization of the fractions and methane production in batch and continuous digesters. *Waste Management*. 50. 275-282. doi: doi.org/10.1016/j.wasman.2016.02.028.
23. Failla, S., Restuccia, A. (2014). Methane potentials from grape marc by a laboratory scale plant. *Applied Mathematical Sciences*. 8 (132). 6665-6678. doi: dx.doi.org/10.12988/ams.2014.474551.
24. Polishchuk, V., Titova, L., Shvoro, S., Gunchenko, Y. (2019). Estimation of Biogas Yield and Electricity Output during Cattle Manure Fermentation and Adding Vegetable Oil Sediment as a Co-substrate. *Problemele Energeticii Regionale*. 2 (43). 117-132.
25. Polishchuk, V.M., Vasilenkov, V.E., Lobodko, M.M., Voloshin, V.S. (2012). Express method for determining the calorific value of biogas *Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences*. 174 (2). 258-263.
26. Eder, B., Schulz, H. (2007). *Biogas-Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Wirtschaftlichkeit, Beispiele*, Freiburg, Germany: Ökobuch. 237.
27. Korolev, S.A., Maykov, D.V. (2012). Identification of a mathematical model and study of various modes of methanogenesis in a mesophilic

medium. Computer Research and Modeling. 4 (1). 131-141.

ПОВЫШЕНИЕ ВЫХОДА БИОГАЗА ПРИ
СБРАЖИВАНИИ НАВОЗА КРУПНОГО РОГАТОГО
СКОТА С ОТХОДОВ ВИНODEЛИЯ В
БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКЕ

*В. Н. Поліщук, С. А. Шворов, Г. В. Крусір,
Д. А. Дерев'янка, Є. О. Дворник, Т. С. Давиденко*

Аннотация. Целью работы является повышение выхода биогаза и выработки электроэнергии на биогазовых установках за счет совместного сбраживания навоза крупного рогатого скота с отходами виноделия. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: определялся выход биогаза из навоза крупного рогатого скота с отходами виноделия при периодической загрузке метантенка; на основе полученных экспериментальных данных осуществлялась калибровка математической модели оценки выхода биогаза при сбраживании навоза крупного рогатого скота с добавлением отходов виноделия; с помощью откалиброванной математической модели прогнозировался выход биогаза для квазинепрерывной загрузки метантенка. Исследования проводились на лабораторной биогазовой установке, состоящей из метантенка полезным объемом 30 л и газгольдера мокрого типа. Выход биогаза фиксировался по поднятию цилиндра-уровнемера мокрого газгольдера с помощью, закрепленной на нем шкалы, отградуированной в сантиметрах. Теплота сгорания биогаза определялась по его элементному составу, который фиксировался газоанализатором. Наиболее существенными результатами являются следующие: по данным экспериментальных исследований выхода биогаза при периодическом режиме загрузки с использованием разработанной математической модели обеспечивается прогнозирование выхода биогаза для квазинепрерывной загрузки метантенка. В результате проведенных исследований установлено, что максимальный выход биогаза при 2% замене воды на СВВП в субстрате составляет 0,415 л/(ч·кг СОВ), 6,5% – 0,862 л/(ч·кг СОВ), 13% – 1,372 л/(ч·кг СОВ). Значимость результатов исследований состоит в том, что использование отходов виноделия в качестве косубстрата позволит увеличить в хозяйстве с поголовьем 1000 голов КРС суточный выход биогаза до 20,5 тыс. м³, годовое производство электроэнергии – до 54,7 млн. МДж (15,2 млн. кВт·ч.), тепловой энергии – до 14,79 тыс. Гкал. При этом срок окупаемости биогазовой установки мощностью 4,4 МВт при использовании «зеленого» тарифа сократится до 6,5 года.

Ключевые слова: биогаз, субстрат, навоз крупного рогатого скота, отходы виноделия, сточные воды винодельческих производств, сухое органическое вещество, метантенк, биогазовая установка, метановое брожение.

INCREASED BIOGAS OUTPUT DURING
FERMENTATION OF MANURE OF CATTLE WITH
WINEMAKING WASTE IN BIOGAS PLANTS

*V. M. Polishchuk, S. A. Shvovor, G. V. Krusir,
D. A. Derevianko, Ye. O. Dvornyk, T. S. Davidenko*

Abstract. The aim of the work is to increase biogas output and generation of electricity in biogas plants due to the joint fermentation of cattle manure with winemaking waste. To achieve this goal, the following tasks were solved: the biogas yield from cattle manure with winemaking waste was determined during periodic loading of the digester; on the basis of the obtained experimental data, a mathematical model was calibrated to estimate the biogas yield during fermentation of cattle manure with the addition of winemaking waste. As a result of the studies, it was found that when manure is fermented with part of the water replaced in the substrate 2% of the winemaking waste, the fermentation dynamics in the substrate are similar to the fermentation of pure cattle manure. Biogas obtained by fermentation of manure with the addition of 2%, 6.5% and 13% of wastewater from wine production instead of water in the first day of fermentation either did not burn at all or burned poorly. The addition of winemaking waste to a substrate based on manure in an amount of 13% allows increasing the maximum biogas yield by a third to 1,372 l/(hr·kg dry organic matter). The significance of the research results lies in the fact that the use of winemaking waste as a substrate will allow a third increase in biogas output and power generation, and a reduction in the payback period of a 4.4 MW biogas plant using the green tariff to 6.5 years.

Key words: biogas, substrate, cattle manure, winemaking waste, dry organic matter, digester, biogas plant, methane fermentation.

В. М. Поліщук ORCID 0000-0002-9654-9051.

С. А. Шворов ORCID 0000-0001-7776-9940.

Г. В. Крусір ORCID 0000-0001-6464-5754.

Д. А. Дерев'янка ORCID 0000-0001-8487-2153.

Є. О. Дворник ORCID 0000-0003-4904-1076.

Т. С. Давиденко ORCID 0000-0003-0277-6892.