

## БІОГАЗОВА УСТАНОВКА СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО МАШИНОБУДУВАННЯ МЕТАНОВОГО БРОДІННЯ БУРЯКОВОГО ЖОМУ

**Валієв Тімур Оділович**

аспірант

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0003-3400-6147

email: timurvaliev@gmail.com

**Поліщук Віктор Миколайович**

доктор технічних наук, професор

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0002-9654-9051

polishchuk@nubip.edu.ua

*Актуальність дослідження обумовлена необхідністю підвищення продуктивності біогазових установок за рахунок розширення сировинної бази. В Україні в 2022 р. працювало 23 цукрових заводах, відходами від яких є буряковий жом. Біля кожного із цих заводів можна було б побудувати біогазову установку, сировиною для яких слугували б відходи переробки цукрових буряків. Метою роботи є визначення оптимальних обсягів завантаження бурякового жому в метантенк для отримання максимального виходу біогазу. Дослідження проводились на лабораторній біогазовій установці у складі метантенка корисним об'ємом 30 л, і газгольдера «мокрого» типу. Метантенк працював при періодичній системі завантаження сировини. Температура субстрату становила 38°C. До 20 л дигестату додавалось 2,1 кг, 1,5 кг, 1 кг, 0,5 кг і 0,25 кг бурякового жому з рН=3,69. Вміст бурякового жому в субстраті становив 10,5; 7,5; 5,0 і 2,5%, 1,25%. При всіх варіантах вмісту жому в субстраті максимальний вихід біогазу був отриманий на наступну добу після завантаження субстрату в метантенк. В цей же час рН субстрату різко знижувався. В подальшому метанове зброджування жому відбувається відповідно того, як це здійснюється для інших типів субстратів: після досягнення стаціонарної фази в першу добу метанового бродіння спостерігається фаза відмирання, протягом якої популяція метаногенів скорочується внаслідок вичерпування поживних речовин субстрату. В цей час рН субстрату поступово збільшувався і в кінці метанового бродіння досягав свого початкового значення. В результаті дослідження встановлено, що буряковий жом успішно піддається метановому зброджуванню без додавання гною ВРХ при завантаженні до 10% від об'єму субстрату. Однак зростання обсягу завантаження бурякового жому веде до зниження виходу біогазу. Максимальний вихід біогазу при зброджуванні бурякового жому при періодичній системі завантаження метантенка спостерігається вже на наступну добу, а через дві доби вихід біогазу різко знижується. Оптимальний вміст бурякового жому при завантаженні його в метантенк, при якому вихід біогазу буде максимальним (1,762 л/(год.кг СОP)), становить 2,3%.*

**Ключові слова:** біогаз, метан, установка, бродіння, жом, галузеве машинобудування.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.4.2>

**Постановка проблеми.** Актуальність дослідження обумовлена необхідністю підвищення продуктивності біогазових установок за рахунок розширення сировинної бази. Традиційною сировиною для виробництва біогазу є гній ВРХ, який найкраще підходить до анаеробного зброджування. Однак гній ВРХ як сировина має один недолік – вихід біогазу при його метановому зброджуванні невеликий. Для збільшення виходу біогазу з гною ВРХ використовуються кусубстрати – відходи сільськогосподарського та переробного виробництва, при цьому виключається необхідність їх утилізації. До таких кусубстратів належать vinasse (Polishchuk et al., 2020), некондиційне борошно (Joseph et al., 2009), vegetable oil sediment (Polishchuk et al., 2021a), гранульована солома (Nazarenko et al., 2021), гранульована із пташиним послідом солома, відходи виробництва біодизеля: soap waste, який утворюється при нейтралізації біодизеля, та сирий гліцерин, який є побічним продуктом виробництва біодизеля (Polishchuk et al., 2021b). Разом із тим, ці кусубстрати не придатні до монозброджування, тому

сировинна база для виробництва біогазу часто буває обмеженою коров'ячим і свинячим гноем, пташиним послідом і кукурудзяним силосом.

Разом із тим, в Україні в 2022 році було вирощено 8,9 млн. тонн цукрових буряків, із яких на 23 цукрових заводах вироблено 1,45 млн. тонн цукру. Відходом виробництва цукру з цукрових буряків є буряковий жом – знецукрена бурякова стружка, що залишається після вилучення з неї цукру дифузійним способом (Romanіuk et al., 2022a). Обліково-нормативний вихід свіжого невіджатого жому при переробці зрілого буряка і дотримання оптимального технологічного режиму приймається рівним 83% до маси переробленого буряка при вмісті сухих речовин в ньому 6,5%. При пресуванні з жому виділяється жомпресова вода, підвищується вміст в ньому сухих речовин, а вихід пресованого жому в % до маси буряків відповідно зменшується. Жом із вмістом сухих речовин 10-12% називається віджати́м, а віджати́й до вмісту сухих речовин вище 12% – пресовани́м.

Буряковий жом використовується в кормових цілях. Для цього його висушують. Однак цей процес енергозатратний. Частіше жом складують в жомових ямах. Жом, який перебував у жомовій ямі більше трьох діб, називається кислим, оскільки за цей період він набуває кислої реакції ( $\text{pH} \leq 5,0$ ). Згодовування такого жому коровам впливає на якість молока: молоко швидше скисає, масло з такого молока буде занадто твердим, а сири не визрівають в належний час.

Тому доцільно біля кожного цукрового заводу збудувати біогазовий комплекс, в якості сировини для цих комплексів використовувати кислий жом.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Був проведений аналіз досліджень монозброджування жому, а також його сумісного зброджування з іншими субстратами. Аналізувався вихід біогазу, а також фактори, що на нього впливають.

Вихід метану, отриманий із двох різних зразків жому цукрових буряків, як описано в роботі (Rogovskii et al., 2020), значно варіювався між 236-326 мл/г VS, можливо, через різні концентрації азоту, фосфору і калію, знайдені в цих зразках ( $181 \pm 216$  г/кг ТС). В роботі (Mužik et al., 2012) описані результати дослідження метанового зброджування жому цукрових буряків. Встановлено, що стабільне виробництво біогазу може бути досягнуто в одностадійному режимі при максимальному об'ємному завантаженні 10 кг жому/м<sup>3</sup> за добу. Ефективність деградації становила 75% для VS. Вихід біогазу сягав 610 л/кг VS при вмісті метану 50-53%. Як сказано в роботі (Romaniuk et al., 2018), біологічне розкладання жому цукрових буряків швидке, а вихід метану відносно високий. Найвищий вихід метану 330,9 л/кг VS був досягнутий за час утримання 35 діб. Ще вищий вихід метану до 388,9 л/кг VS був досягнутий при коферментації жому цукрових буряків із кукурудзяним силосом, але для біодеградації субстрату був потрібний довший час утримання – 55 діб. Середній вихід біометану при метановому зброджуванні жому становить 0,321 л/г VS, як зазначено в (Polishchuk et al., 2022). Біохімічний метановий потенціал бурякового жому при зберіганні у відкритих силосах становить 337-420 л CH<sub>4</sub>/кг VS, а при зберіганні в закритих силосах – 411-451 л CH<sub>4</sub>/кг VS (Rogovskii, 2019). За даними датських вчених, потенціал біометану в жомі цукрових буряків становить 324 м<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/т VS (Langebeck et al., 2020). Вихід біогазу з бурякового жому біогазу становив 168,7 мл/г твердих речовин (TS), тоді як після попередньої термічної обробки КОН вихід біогазу зріс майже втричі до 458,4 мл/г TS (Hutnan et al., 2000). В роботі (Janke et al., 2015) стверджується, що використання бурякового жому в якості сировини біогазових установок дозволяє отримувати 60-70 м<sup>3</sup> біогазу з 1 тонни сировини.

Результати метанового зброджування сухого бурякового жому на дослідній біогазовій установці, яка складалась з кислотогенного реактора (об'ємом 5,3 м<sup>3</sup>) і метаногенного реактора (об'ємом 3,5 м<sup>3</sup>), описані в роботі (Hutnan et al., 2001). Рекомендована норма органічного навантаження для кислотогенного реактора становила 20 кг COD/ (м<sup>3</sup>·добу), гідравлічний час утримання –

4 доби, максимальний вміст підкисленої пульпи (сухої речовини) в цьому реакторі – 6-7%. Органічне навантаження метаногенного реактора становило 21 кг COD/ (м<sup>3</sup>·добу). Час гідравлічного утримання в цьому реакторі коливався від 27 діб (при завантаженні 3 кг/(м<sup>3</sup>·добу)) до 3,9 діб (при завантаженні 21 кг/(м<sup>3</sup>·добу)). Середнє значення питомого виробництва біогазу становило 0,391 м<sup>3</sup> на кг доданого сухого бурякового жому Середня ефективність деградації сухого жому становила 91,5%.

Жом цукрових буряків має метановий потенціал 240 мл CH<sub>4</sub>/г VS за умови його сумісного метанового зброджування з коров'ячим гноєм (Gomez-Quiroga et al., 2022). Термофільне (55°C) анаеробне спільне зброджування висушеного жому і коров'ячого гною проводили при напівбезперервному завантаженні реактора, як сказано в роботі (Fang et al., 2011). Результати показали, що найкраща продуктивність системи (щодо стабільності, виробництва біогазу, і видалення органічних речовин) було досягнуто при часі гідравлічного утримання 5 діб при швидкості завантаження органічних речовин (OLR) 12,47 гVS/л за добу). Вихід біогазу при цьому становив 315 мл/г VS.

Вихід біогазу з жому цукрової тростини становить 293 мл/г VS (метану – 122 мл/г VS) (Brooks et al., 2008).

При сумісному метановому зброджуванні стічних вод цукрового заводу та бурякового жому вихід метану з 255±11 mL/g COD-added для реактора з безперервним завантаженням субстрату було збільшено до 337±15 mL/g COD-added для реактора з періодичним завантаженням субстрату (збільшення виходу метану на 32,2 %). Тому в роботі (Rogovskii, 2019) робляться висновки, що для метанового зброджування стічних вод цукрового заводу та бурякового жому більш ефективним є періодичне завантаження субстрату. В роботі (Nazarenko et al., 2020) описані результати сумісного метанового зброджування кінського гною, яблучних вичавок і жому цукрових буряків у співвідношенні 2:1:3. Вихід біогазу без попередньої обробки субстрату становив 189,7 мл/г VS, після лужної попередньої обробки NaOH вихід біогазу зріс до 300,9 мл/г VS, після кислотної попередньої обробки HNO<sub>3</sub> – до 310,4 мл/г VS, а після попередньої термічної обробки при 150°C протягом 60 хвилин – до 329,4 мл/г VS. В роботі (Rogovskii, 2019) стверджується, що кумулятивний вихід біогазу з жому цукрових буряків, подрібненого до частинок розміром 2,5 мм, становить 617,2 мл/г легких твердих речовин (VS), що було на 20,2 % вище порівняно з виходом біогазу з необробленого жому. А найвища кумулятивна продуктивність біогазу, 898,7 мл/г VS, була отримана з меленого, попередньо обробленого термічним тиском і ферментативно гідролізованого жому.

Максимальний вихід біогазу при сумісному зброджуванні жому цукрової тростини і осаду стічних вод становить 4,98 м<sup>3</sup>/кг VS. Анаеробне мезофільне спільне зброджування жому цукрових буряків з пташиним послідом і осадом міських стічних вод досліджувалось в роботі (Brooks et al., 2008). Максимальний вихід метану в 418 дм<sup>3</sup>/кг VS було досягнуто, коли реактор працював із часом утримання 20 діб і швидкістю органічного заван-

таження 4,25 kgVS/m<sup>3</sup> за добу. В роботі (Hutnan et al., 2000) автори рекомендують для метанового зброджування пшеничної соломи додавати до неї можна сухий жом в кількості 5% від маси соломи. Але для збільшення виходу біогазу необхідно шукати добавки, що містять азот.

Отже, в літературних джерелах наведені значення максимального виходу біогазу при монозброджуванні бурякового жому і при сумісному зброджуванні бурякового жому з іншими субстратами. Однак у літературних джерелах не вказано, яку кількість бурякового жому необхідно додати до субстрату, щоб отримати максимальний вихід біогазу.

**Метою досліджень** є визначення оптимальних обсягів завантаження бурякового жому в метантенк для отримання максимального виходу біогазу.

**Результати досліджень.** Для визначення відношення вологи до сухої речовини підготовленого зразка жому застосовувались електронні ваги-вологоміри серії ADGS (рис. 1), які складаються з лабораторних вагів 3 класу точності та вбудованим над ними пристроєм для сушіння, що дозволяє використовувати їх як традиційні лабораторні ваги, так і як автоматизований прилад для визначення вмісту вологи в зразках.



Рис. 1. Ваги-вологомір ADGS-50

Визначення вмісту вологи в зразках матеріалів та речовин здійснюють термографічним методом.

Визначення термографічним методом вмісту вологи в речовинах та матеріалах полягає у визначенні маси підготовленого зразку до і після його висушування шляхом нагрівання. Випаровування вологи зі зразка під час нагрівання призводить до зменшення його маси, що дозволяє виключно за даними вимірювань маси розраховувати вміст у досліджуваному зразку вологи, яка була до початку процесу сушіння зразку.

Визначення вмісту вологи в одному і тому ж зразку може бути реалізовано з однаковою точністю при суттєво різних по значенню температурах сушіння зразка (різниця буде полягати виключно в часі проведення процедури).

За кінцевий результат аналізу приймають середньоарифметичні результати двох паралельних вимірювань. Результат округлюють до другого десяткового знаку.

Встановлено, що середня вологість жому становить 93,11%, тоді як середній сухий залишок – 6,89%. Неорга-

нічна частка жому становить 4,07%, органічна – 95,93%. Елементний склад органічної частини жому становить: вуглець – 44,44%, азот – 3,61%, водень – 6,97%, сірка – 0,36%, фосфор – 0,12%, кисень – 44,5%. Показник рН жому становить 3,69. Дослідження проводились в компанії «Ecodevelop».

Дослідження проводяться при періодичному завантаженні метантенка. При цьому до 20 л дигестату додається 2,1 кг, 1,5 кг, 1 кг, 0,5 кг і 0,25 кг жому. Вміст жому в субстраті становить 10,5; 7,5; 5,0 і 2,5%, 1,25%.

Дослідження впливу вмісту жому в субстраті на динаміку і накопичений вихід біогазу при періодичному завантаженні метантенка проводились на лабораторній біогазовій установці у складі метантенка корисним об'ємом 30 л, і газгольдера «мокрого» типу. Контроль і регулювання температури бродиння здійснювались терморегулятором ТРЦ-02 через термометр опору ТСМ-50. Об'єм отриманого біогазу один чи декілька разів на добу визначався по шкалі, закріпленій на направляючій 15 по висоті підняття циліндра-рівнеміра 14 газгольдера, з наступним перерахунком при відомому діаметрі циліндра-рівнеміра, який становить 20 см.

Дослідження проводились при періодичному завантаженні метантенка. При цьому в метантенк завантажуються відміряний об'єм субстрату, кран 16 закривається для створення анаеробного режиму. Температура субстрату становить 38°C.

Критерієм ефективності біогазових технологій є величина виходу біогазу і вміст в ньому метану (теплова цінність біогазу).

Аналіз компонентного складу біогазу проводили на газовому хроматографі 6890 N фірми Agilent Technologies. Умови аналізу: детектор-катарометр, температура детектора – 200°C. Аналіз легких газів проводився на колонці MOLSIV, довжиною 15 м. Зразки газу вводили безпосередньо в дозатор хроматографа 6890 N фірми Agilent Technologies.

Дослідження апроксимованої функції на екстремум здійснювалось за допомогою методу дихотомії.

Динаміка виходу біогазу в часі визначалась в трьох повторностях, після чого встановлювалось середнє значення (рис. 2).

Порівнювалась динаміка виходу біогазу при вмісті жому в субстраті 1,25%, 2,5%, 5%, 7,5%, 10% (рис. 3. рис. 4).

Показник рН субстрату при цьому змінювався наступним чином (рис. 5).

Як видно із рис. 3 при всіх варіантах вмісту жому в субстраті максимальний вихід біогазу був отриманий на наступну добу після завантаження субстрату в метантенк. В цей же час рН субстрату різко знижувався. В подальшому метанове зброджування жому відбувається відповідно того, як це здійснюється для інших типів субстратів: після досягнення стаціонарної фази в першу добу метанового бродиння спостерігається фаза відмирання, протягом якої популяція метаногенів скорочується внаслідок вичерпування поживних речовин субстрату. В цей час рН субстрату поступово збільшувався і в кінці метанового бродиння досягав свого початкового значення.

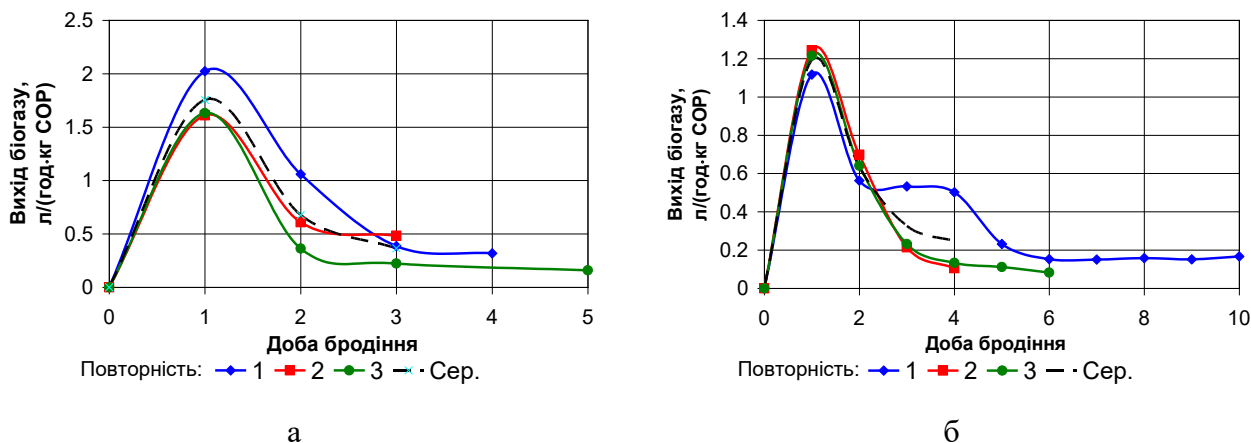


Рис. 2. Динаміка виходу біогазу при вмісті жому в субстраті: а – 2,5%, б – 5%

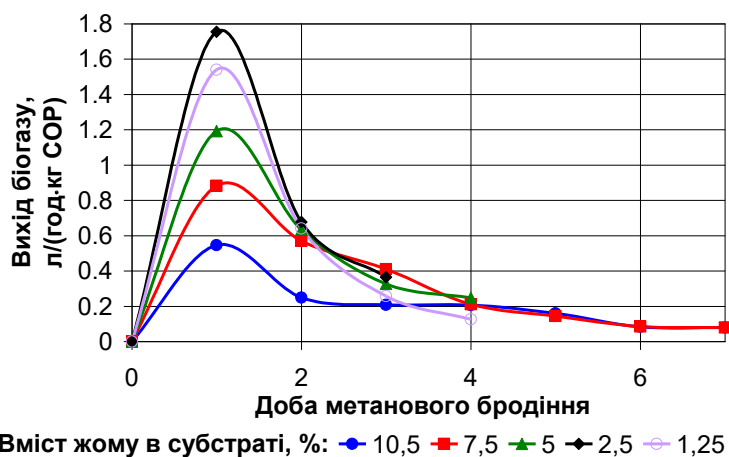


Рис. 3. Динаміка виходу біогазу при вмісті жому в субстраті 1,25-10,5%

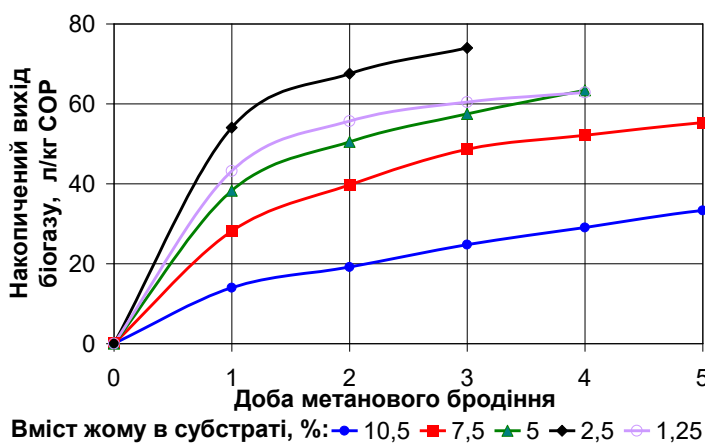


Рис. 4. Накопичений вихід біогазу при вмісті жому в субстраті 1,25-10,5%

Якщо порівнювати метанове зброджування жому із метановим зброджуванням гною ВРХ [4], то варто відмітити, що цикл метанового зброджування жому коротший майже в 10 раз за цикл метанового бродіння гною ВРХ.

При цьому максимум виходу біогазу при метановому зброджуванні жому настає вже в першу добу, тоді як при метановому зброджуванні гною ВРХ – на 6-8 добу. Максимальний вихід біогазу при метановому зброджуванні

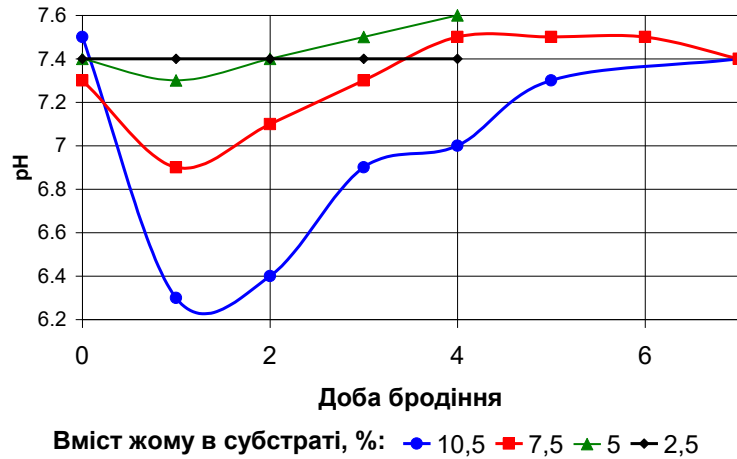


Рис. 5. pH субстрату при вмісті жому в субстраті 2,5-10,5%

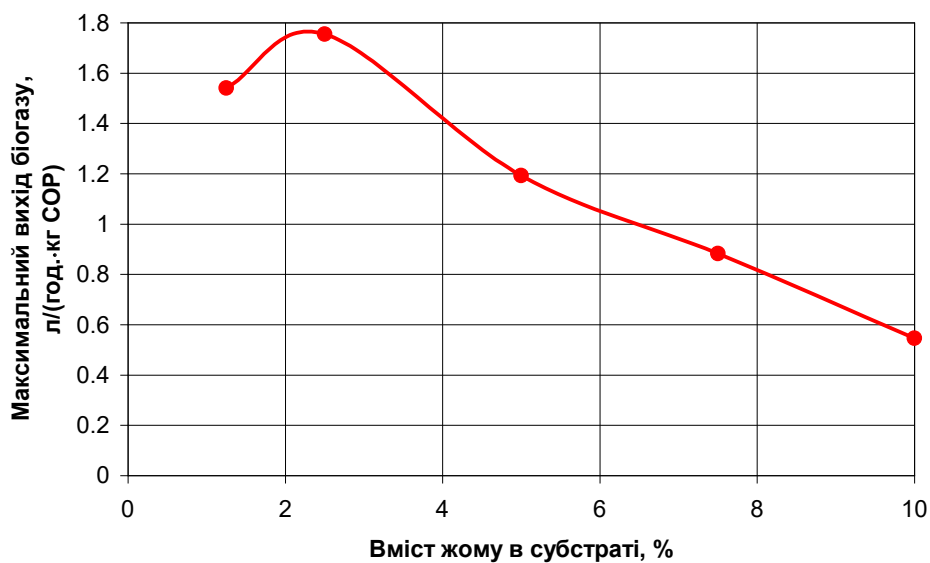


Рис. 6. Залежність максимальної швидкості виходу біогазу від вмісту жому в субстраті

жому також у більшості варіантів перевищує (інколи значно перевищує) максимальний вихід біогазу при метановому зброджуванні гною ВРХ.

Промислове виробництво біогазу здійснюється при квазібезперервному завантаженні субстрату у метантенк, тоді як експериментальні дослідження динаміки виходу біогазу проводились за періодичному завантаженні субстрату у метантенк. Щоб здійснювати завантаження субстрату в квазібезперервному режимі (приблизно кожну годину) потрібно, щоб дослідник постійно перебував біля метантенка, адже він не укомплектований системою автоматичного завантаження субстрату. Якщо в денний час це допустимо, то в нічний час досить складно. Тому експериментальні біогазові установки, які функціонують в квазібезперервному режимі завантаження субстрату, для виключення участі дослідника з потребують автоматизації, щоб максимально виключити участь дослідника з процесу завантаження. Це значно ускладнює облад-

нання біогазової установки і викликає суттєве подорожчання досліджень.

Тому більшість досліджень динаміки виходу біогазу здійснюється саме при періодичному режимі завантаження метантенка. Але при цьому постає питання адаптації результатів таких досліджень для використання в промислових біогазових установках, які працюють в режимі напівбезперервного завантаження субстратом. Згідно із [4], вихід біогазу при поступовій системі завантаження буде близький до максимального виходу біогазу при періодичній системі завантаження метантенка. Максимальна швидкість виходу біогазу при вмісті жому в субстраті 1,25-10,5% наведена на рис. 6.

**Обговорення.** Функція  $w_{bmax}=f(b)$  була досліджена на екстремум  $w_{bmax} \rightarrow \max$  методом дихотомії на комп'ютері в програмі MathCad за допомогою функції *maximize* (Hrynkiv et al., 2020). Встановлено (Kulichkova et al., 2020), що оптимальний вміст бурякового жому при заван-

таженні його в метантенк (Romaniuk et al., 2022b), при якому вихід біогазу буде максимальним (1,762 л/(год.·кг СОP)), становить 2,3%.

**Висновки.** Буряковий жом успішно піддається метановому зброджуванню без додавання гною ВРХ при при завантаженні до 10% від об'єму субстрату. Однак зростання обсягу завантаження бурякового жому веде до зниження виходу біогазу.

Максимальний вихід біогазу при зброджуванні бурякового жому при періодичній ситемі завантаження метантенка спостерігається вже на наступну добу, а через дві доби вихід біогазу різко знижується.

Оптимальний вміст бурякового жому при завантаженні його в метантенк, при якому вихід біогазу буде максимальним (1,762 л/(год.·кг СОP)), становить 2,3%.

#### **Бібліографічні посилання:**

1. Brooks, L., Parravicini, V., Svardal, K., Kroiss, H. & Prendl L. (2008). Biogas from sugar beet press pulp as substitute of fossil fuel in sugar beet factories. *Water Science and Technology*, 58 (7): 1497–1504. <https://doi.org/10.2166/wst.2008.516>.
2. Fang, Ch., Bae, K. & Angelidaki, I. (2011). Anaerobic co-digestion of by-products from sugar production with cow manure. *Water Research*, 45(11): 3473–3480. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.04.008>.
3. Gomez-Quiroga, X., Aboudi, K., Alvarez-Gallego K. J. & Romero-García L. I. (2022). Successful and stable operation of anaerobic thermophilic co-digestion of sun-dried sugar beet pulp and cow manure under short hydraulic retention time. *Chemosphere*, 293: 133484. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133484>.
4. Hryniv, A., Rogovskii, I., Aulin, V., Lysenko, S., Titova, L., Zagurskiy, O. & Kolosok, I. (2020). Development of a system for determining the informativeness of the diagnosing parameters of the cylinder-piston group of the diesel engines in operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(105): 19–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206073>.
5. Hutnan, M., Dřtil, M., Derco, J. & Mrafcová, L. (2000). Anaerobic biodegradation of sugar beet pulp. *Biodegradations*, 11(4): 203–211. <https://doi.org/10.1023/a:1011139621329>.
6. Hutnan, M., Dřtil, M., Derco, J., Mrafcová, L., Horňák, M. & Mičo S. (2001). Two-step pilot-scale anaerobic treatment of sugar beet pulp. *Polish Journal of Environmental Studies*, 10(4): 237–243.
7. Janke, L., Leite, A., Nikolausz, M., Schmidt, Th., Liebetrau, J., Nelles, M. & Stinner W. (2015). Biogas production from sugarcane waste: assessment on kinetic challenges for process designing. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(9): 20685–20703. <https://doi.org/10.3390/ijms160920685>.
8. Joseph, O., Rouez, M., Métivier-Pignon, H., Bayard, R., Emmanuel, E. & Gourdon, R. (2009). Adsorption of heavy metals on to sugar cane bagasse: Improvement of adsorption capacities due to anaerobic degradation of the biosorbent. *Environmental Technology*, 30(13): 1371–1379. <https://doi.org/10.1080/09593330903139520>.
9. Kulichkova, G. I., Ivanova, T. S., Köttner, M., Volodko, O. I., Spivak, S. I., Tsygankov, S. P. & Blume, Ya. B. (2020). Plant feedstocks and their biogas production potentials. *The Open Agriculture Journal*, 14: 219–234. <https://doi.org/10.2174/1874331502014010219>.
10. Langebeck, B., Pipper, Ch. & Jeppesen, J. (2020). Biogas production from hydrolyzed sugar beet pulp and from top and tails. *Sugar industry*, 145(7): 427–430. <https://doi.org/10.36961/si24554>.
11. Mužík, O., Kara, J. & Hanzlikova, I. (2012). Potential of sugar beet pulp for biogas production. *Listy Cukrovarnicke a Reparske*, 128(7): 246–249.
12. Nazarenko, I., Dedov, O., Beryk, I., Rogovskii, I., Bondarenko, A., Zapryvoda, A. & Titova, L. (2020). Study of stability of modes and parameters of motion of vibrating machines for technological purpose. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(7–108): 71–79. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217747>.
13. Nazarenko, I., Mishchuk, Y., Mishchuk, D., Ruchynskiy, M., Rogovskii, I., Mikhailova, L., Titova, L., Berezoviy, M. & Shatrov, R. (2021). Determination of energy characteristics of material destruction in the crushing chamber of the vibration crusher. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(7(112)): 41–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239292>.
14. Polishchuk, V. M., Shvorov, S. A., Flonts, I. V., Davidenko, T. S. & Dvornyk, Ye. O. (2021a). Increasing the yield of biogas and electricity during manure fermentation cattle by optimally adding lime to extruded straw. *Problemele Energeticii Regionale*, 1(49): 73–85. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.1-49.02>.
15. Polishchuk, V. M., Shvorov, S. A., Krusir, G. V., Didur, V. V., Witaszek, K., Pasichnyk, N. A., Dvornyk, Ye. O. & Davidenko, T. S. (2022). Using soap waste from biodiesel production to intensify biogas generation during anaerobic digestion of cow dung. *Problemele Energeticii Regionale*, 1(53): 97–107. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.1-53.08>.
16. Polishchuk, V. M., Shvorov, S. A., Zablodskiy, M. M., Kucheruk, P. P., Davidenko, T. S. & Dvornyk, Ye. O. (2021b). Effectiveness of adding extruded wheat straw to poultry manure to increase the rate of biogas yield. *Problemele Energeticii Regionale*, 3(51): 111–124. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.3-51.10>.
17. Polishchuk, V. M., Shvorov, S. A., Tarasenko, S. Ye. & Antypov, I. O. (2020). Increasing the biogas release during the cattle manure fermentation by means of rational addition of substandard flour as a cosubstrate. *Science and Innovation*, 16(4): 25–35. <https://doi.org/10.15407/scin16.04.025>.
18. Rogovskii, I. L., Polishchuk, V. M., Titova, L. L., Sivak, I. M., Vyhovskyi, A. Yu., Drahnev, S. V. & Voinash, S. A. (2020). Study of biogas during fermentation of cattle manure using a stimulating additive in form of vegetable oil sediment. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 15(22): 2652–2663.
19. Rogovskii, I. L. (2019). Systemic approach to justification of standards of restoration of agricultural machinery. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv, Ukraine, 10(3): 181–187. <https://doi.org/10.31548/machenergy2019.03.181>.

20. Romaniuk, W., Polishchuk, V., Marczuk, A., Titova, L., Rogovskii, I. & Borek, K. (2018). Impact of sediment formed in biogas production on productivity of crops and ecologic character of production of onion for chives. *Agricultural Engineering*, 22(1): 105–125. <https://doi.org/10.1515/agriceng-2018-0010>.

21. Romaniuk, W., Rogovskii, I., Polishchuk, V., Titova, L., Borek, K., Shvorov, S., Roman, K., Solomka, O., Tarasenko, S., Didur, V. & Biletskii, V. (2022a). Study of technological process of fermentation of molasses vinasse in biogas plants. *Processes*, 10: 2011. <https://doi.org/10.3390/pr10102011>.

22. Romaniuk, W., Rogovskii, I., Polishchuk, V., Titova, L., Borek, K., Wardal, W. J., Shvorov, S., Dvornyk, Y., Sivak, I., Drahnev, S. & Derevjanko, D. (2022b). Study of methane fermentation of cattle manure in the mesophilic regime with the addition of crude glycerine. *Energies*, 15(9): 3439. <https://doi.org/10.3390/en15093439>.

**Valiev T. O.**, *Postgraduate student, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

**Polishchuk V. M.**, *Doctor of Technical Sciences, Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

#### **Biogas installation of agricultural machinery for methane fermentation of beet pulp**

*The relevance of the study is due to the need to increase the productivity of biogas plants due to the expansion of the raw material base. In Ukraine in 2022, 23 sugar factories were operating, the waste from which is beet pulp. It would be possible to build a biogas plant near each of these factories, the raw material for which would be sugar beet processing waste. The purpose of the work is to determine the optimal volume of loading beet pulp into the methane tank to obtain the maximum yield of biogas. The research was carried out at a laboratory biogas installation consisting of a methane tank with a useful volume of 30 liters and a “wet” type gas holder. The methane tank operated with a periodic system of raw material loading. The temperature of the substrate was 38 °C. 2.1 kg, 1.5 kg, 1 kg, 0.5 kg and 0.25 kg of beet pulp with pH=3.69 was added to 20 liters of digestate. The content of beet pulp in the substrate was 10.5; 7.5; 5.0 and 2.5%, 1.25%. With all variants of pulp content in the substrate, the maximum biogas output was obtained the next day after loading the substrate into the methane tank. At the same time, the pH of the substrate decreased sharply. Subsequently, methane fermentation of the pulp occurs in accordance with the way it is carried out for other types of substrates: after reaching the stationary phase on the first day of methane fermentation, a die-off phase is observed, during which the population of methanogens decreases due to depletion of substrate nutrients. At this time, the pH of the substrate gradually increased and reached its initial value at the end of methane fermentation. As a result of the study, it was established that beet pulp is successfully subjected to methane fermentation without the addition of cattle manure when loading up to 10% of the volume of the substrate. However, the increase in the loading volume of beet pulp leads to a decrease in the yield of biogas. The maximum yield of biogas during the fermentation of beet pulp with a periodic system of loading the methane tank is observed already on the next day, and after two days the yield of biogas decreases sharply. The optimal content of beet pulp when loading it into a methane tank, at which the biogas output will be maximum (1.762 l/(h. kg of CO)) is 2.3%.*

**Key words:** *biogas, methane, installation, fermentation, pulp, industry engineering.*