

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

КОЗЛОВЕЦЬ ОЛЕКСАНДР АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 662.659:606:628:543.2:543.5:004.942

**БІОТЕХНОЛОГІЯ ОДЕРЖАННЯ БІОГАЗУ ПРИ КОФЕРМЕНТАЦІЇ
ПОСЛІДУ ПТАХІВ**

03.00.20 – біотехнологія

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі екобіотехнології та біоенергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України (м. Київ).

Науковий керівник: Доктор технічних наук, старший науковий співробітник, доцент
Голуб Наталія Борисівна,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, професор кафедри екобіотехнології та біоенергетики.

Офіційні опоненти:

Доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Циганков Сергій Петрович,
Інститут харчової біотехнології та геноміки НАН України, заступник директора з наукової роботи.


Доктор технічних наук, професор
Баль-Прилипка Лариса Вацлавівна
Національний університет біоресурсів і природокористування України, декан факультету харчових технологій та управління якістю продукції АПК.

Захист дисертації відбудеться «02» березня 2018 р. о 13-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.28 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп. 4, ауд. 258.

З дисертацією можна ознайомитись у Науково-технічній бібліотеці ім. Г. І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розіслано «__» _____ 2018 р.

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.002.28, д.б.н., доц.

 **Галкін О. Ю.**

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. З кожним роком на території України та в світі збільшується кількість аграрно–промислових комплексів (АПК) по вирощуванню тварин та птиці. З ростом АПК на пряму зв'язаний ріст відходів галузі, які можуть бути перероблені на альтернативні енергоносії (біогаз) шляхом ферментативного зброджування.

Проблема утилізації посліду з метою одержання біогазу полягає в тому, що чистий послід погано піддається процесам метанової ферментації внаслідок значного вмісту іонів амонію. Для зниження концентрації іонів амонію, підвищення швидкості зброджування та виходу біогазу застосовують процес коферментації з целюлозовмісною сировиною.

Як косубстрат можливо використовувати відходи рослинництва сільського господарства. На теперішній час для зброджування посліду використовують, в основному, відходи або спеціально вирощену кукурудзу. При чому вміст целюлозовмісної сировини складає біля 70 %. Це призводить до зростання ціни на кінцевий продукт, оскільки витрати на її доставку складають до 25 % ціни біогазу [Вяткін П. С., 2016]. Тому дослідження, які спрямовані на підвищення вмісту посліду в субстраті та заміні кукурудзи на інші целюлозовмісні відходи при коферментації сировини, є актуальними.

Також не вирішеним лишається питання очищення води після зневоднення збродженої біомаси, оскільки висока концентрація іонів амонію, що залишається в воді, ускладнює процес очищення та не дозволяє використовувати її повторно. Тому актуальним є обґрунтування технологічних рішень очищення води після зневоднення збродженої біомаси для її повторного використання в процесі ферментації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки «Рациональне природокористування» та стратегічним пріоритетним напрямкам інноваційної діяльності в Україні на 2009 – 2020 роки: «Вдосконалення хімічних технологій, нові матеріали, розвиток біотехнологій»; «Охорона і оздоровлення людини та навколишнього середовища».

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі екобіотехнології та біоенергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Роботу виконано за темами кафедри: «Дослідження процесів біодеструкції органічних відходів різноманітного походження для захисту довкілля на станції «Академік Вернадський», № ДР 0113U005685 (2013 р.), виконавець; «Фотобіоелектрохімічна конверсія відходів і біосировини з одержанням електричної енергії та енергоносіїв», № ДР 0113U001650 (2013 – 2014 р.р.), виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є обґрунтування та розробка технологічних рішень одержання біогазу при коферментації пташиного посліду та целюлозовмісної сировини.

Для досягнення поставленої мети були вирішені такі задачі:

- визначити целюлозовмісний косубстрат, за використання якого підвищується вихід біогазу та вміст метану в ньому при ферментації посліду птахів;

- обґрунтувати та визначити раціональні параметри (співвідношення посліду та косубстрату, концентрації субстрату та інокуляту, термін гідравлічного утримання субстрату тощо) процесу анаеробного зброджування пташиного посліду з різною целюлозовмісною сировиною;

- теоретично обґрунтувати та змодельовати процес метанового зброджування пташиного посліду при зміні рН середовища;

- обґрунтувати технологічне рішення та визначити технологічні умови очищення води після зневоднення збродженої біомаси від сполук азоту після процесу ферментації посліду птахів;

- розробити технологічну та апаратурну схеми безвідходної біотехнології одержання біогазу при коферментації пташиного посліду з целюлозовмісною сировиною з одночасним очищенням води від сполук азоту після зневоднення збродженої біомаси після ферментації.

Об'єкт дослідження. Процеси метанового зброджування пташиного посліду з різними целюлозовмісними косубстратами та очищення води після зневоднення збродженої біомаси після ферментації посліду.

Предмет дослідження. Технологічні параметри процесів коферментації пташиного посліду з різною целюлозовмісною сировиною та очищення води після зневоднення збродженої біомаси для повторного її використання.

Методи досліджень. Для визначення якісного складу біогазу використовували метод газової хроматографії. Дослідження вмісту летких жирних кислот (ЛЖК) у середовищі проводили за використання рідинної хроматографії. Хімічні та електрохімічні методи аналізу використовували для визначення показників (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , рН, ХСК) води після зневоднення збродженої біомаси посліду і целюлозовмісної сировини та її очищення. Для визначення кількості сухої органічної речовини та зольності застосовували гравіметричний метод.

Графічне оформлення даних та обробку результатів досліджень здійснено за допомогою програмного забезпечення MS Excel. Математичну модель залежності виходу біогазу від концентрації ацетату побудовано на базі програмного забезпечення MathCAD.

Наукова новизна одержаних результатів. Основні положення дисертаційних досліджень, які визначають наукову новизну отриманих результатів:

уперше:

- визначено залежність продукування асоціацією мікроорганізмів біогазу (метану) від компонентного складу целюлозовмісної сировини при коферментації посліду, що дозволяє підвищити вихід цільового продукту;

- запропоновано та експериментально підтверджено математичну залежність виходу біогазу від вмісту ацетату в середовищі зброджування, що дає змогу прогнозувати перебіг процесу метанового зброджування;

- показано вплив компонентного складу косубстрату на вміст сполук нітрогену у воді після зневоднення збродженої біомаси в процесі отримання біогазу з посліду, що дозволяє запропонувати технологічні режими анаеробно-аеробного очищення води після зневоднення збродженої біомаси для її повторного використання у технологічному процесі зброджування;

дістало подальший розвиток:

- визначення закономірностей продукування та шляхів підвищення швидкості утворення метану з пташиного посліду в залежності від терміну знаходження субстрату та співвідношення посліду і целюлозовмісного косубстрату, що дозволяє створити промислову технологію одержання біогазу з посліду за використання різної целюлозовмісної сировини.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення дисертаційної роботи полягає у вирішенні проблеми утилізації пташиного посліду з одержанням біогазу. Отримано такі практичні результати:

- визначено альтернативні кукурудзі косубстрати для ферментації пташиного посліду, що дозволяє ефективно замінити її на очерет та інші альтернативні джерела;

- встановлені технологічні параметри зброджування пташиного посліду дозволяють отримати біогаз з концентрацією метану до 80 %, що дозволяє знизити енергозалежність птахофабрик, зменшує антропогенне навантаження на навколишнє середовище та знижує собівартість продукції. Розроблені технологічні рішення анаеробної переробки пташиного посліду та очищення води після зневоднення збродженої біомаси для повторного використання впроваджено у проектну документацію в розділі «Технологія виробництва» ТОВ «Про Інжиніринг Груп»;

- запропоноване технологічне рішення очищення води після зневоднення збродженої біомаси після метанового зброджування посліду птахів від сполук нітрогену дозволяє повторно її використання в процесі одержання біогазу, підвищує екологічність отримання енергоносія та зменшує витрати технологічної води.

Результати проведених досліджень впроваджено у навчальний процес підготовки фахівців спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія» за спеціалізацією «Екологічна біотехнологія та біоенергетика».

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертаційної роботи одержано здобувачем особисто. Внесок дисертанта включає: розробку та конструювання лабораторної установки, яка дозволяє регулювати масообмінні процеси, температуру, збір біогазу; проведення ферментації посліду з різними видами целюлозовмісної сировини; визначення раціональних параметрів отримання біогазу при коферментації посліду; створення апаратурних та технологічних схем отримання біогазу та очищення води після зневоднення збродженої біомаси після ферментації.

Апробація отриманих результатів. Матеріали дисертації були представлені на щорічних конференціях: всеукраїнській науково-практичній конференції «Біотехнологія XXI століття». – Київ, 2012 (5 квітня), Київ, 2013 (24 квітня), Київ, 2014 (25 квітня), Київ, 2015 (24 квітня), Київ, 2016 (22 квітня); міжнародній науково-практичній конференції «Екологія Людина Суспільство». – Київ, 2011 (18-22 квітня), Київ, 2016 (12-13 травня); XIII, XV міжнародній науково-практичній конференції «Відновлювальна енергетика XXI століття». – Київ, 2014, (28-29 вересня), Київ, 2016 (29-30 вересня); «Сучасні проблеми природничих наук». – 2011, Ніжин (5-6 квітня); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти», Київ, 2016 (26–28 жовтня); «8–мій науковій конференції молодих фахівців в галузі очищення води та водопідготовки «IWA». – Гданськ (Польща) 2016 (11–14 травня); «Міжнародному конгресі ЕТЕВК–2015», Чорноморськ, 2015 (8–12 червня).

Публікації за результатами дисертаційної роботи. За темою дисертації опубліковано 29 наукових праць, у тому числі: 3 статті у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних науко-метричних баз даних, та 1 – у фаховому іноземному виданні; 1 патент України на винахід; 1 патент України на корисну модель; 3 статті у інших виданнях; 20 тез доповідей на українських та міжнародних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 189 сторінок, зокрема основний зміст роботи викладено на 114 сторінках комп'ютерного тексту, що містить: 38 рисунків, 17 таблиць, 154 найменувань літературних джерел, 5 додатків на 37 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі досліджень, показано наукову новизну, практичну цінність одержаних результатів, наведено відомості про апробацію результатів роботи.

Перший розділ містить аналітичний огляд літературних джерел за темою дисертаційної роботи. Розглянуто біохімічні процеси перетворення органічних відходів у біогаз та фізичні і хімічні чинники (температурні умови; рН середовища; тривалість ферментації; масообмінні процеси при метаногенезі; наявність летких жирних кислот; співвідношення C:N; якісний склад компонентів), які впливають на процес утворення метану.

Питанням дослідження ферментаційних процесів та розробки технологій переробки відходів птахівництва займалися такі вчені як: Chelliapan S., Eze J. I., Joshua O. S., Kanswohl N., Rösse D., Sakalauskas A., Sallis P. J., Schlegel M., Wellinger A., Wilby T., Ziemiński K., Голуб Н. Б., Дубровін В. О., Капустін В. П., Сидоров Ю. І. та інші.

В роботах показано, що додавання косубстрату впливає, як на рН середовища, так і на співвідношення C/N. Встановлено, що в процесі ферментації посліду та целюлозовмісного косубстрату утворюються дві буферні системи – аміачна, та гідрокарбонатна, які дозволяють регулювати значення рН при закисненні або залуговуванні середовища.

Показано, що кількісне утворення летких жирних кислот залежить від концентрації целюлозовмісної сировини та швидкості перебігу процесу її деструкції. Перевищення вмісту кислот вище визначеної межі призводить до зниження значення рН і припинення процесу метаногенезу.

Встановлено, що для перебігу процесу ферментації посліду з одержанням метану раціональним є співвідношення C/N (35-20):1, процес зупиняється при співвідношення 8:1. Оскільки послід містить підвищений вміст азотовмісних сполук, то для його ферментації додають косубстрат, який має високий вміст карбону.

Існують суперечливі дані щодо раціонального співвідношення послід/целюлозовмісна сировина для максимального виходу біогазу та вмісту метану в ньому. При цьому не з'ясовано, як залежить швидкість утворення метану від компонентного складу целюлозовмісної сировини.

На основі аналізу літературних джерел сформульовано завдання дисертаційної роботи.

Другий розділ містить відомості про методи, обладнання і методики досліджень, якісний та кількісний склад сировини, методику культивування *анаттох*-бактерій. Наведено схеми устаткування та описано принципи його роботи. Запропонована лабораторна установка дозволяє регулювати масообмінні процеси у реакторі, температурний режим, проводити збір біогазу, його спалювання та відбір проб для аналізу. Метод газової хроматографії використовували для визначення якісного складу біогазу. Для дослідження вмісту летких жирних кислот (ЛЖК) у середовищі використовували рідинну хроматографію. Хімічні та електрохімічні методи аналізу використовували для визначення показників (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , рН, ХСК) води після зневоднення зброженої біомаси після метанового збродження та її очищення. Для визначення кількості сухої органічної речовини та зольності субстратів застосовували гравіметричний метод.

Третій розділ присвячено обґрунтуванню зміни метаболічних шляхів утворення метану в залежності від продуктів, які утворюються в процесі ферментації, та запропоновано математичний вираз продукування метану в залежності від концентрації оцтової кислоти, що продукується асоціацією мікроорганізмів.

Показано, що для утворення метану в процесі біологічної деструкції органічних речовин, в основному, необхідно їх перетворити на оцтову кислоту або CO_2 . При чому при перетворенні оцтової кислоти у метан утворюється CO_2 , у випадку використання якого для продукування метану необхідною речовиною є молекулярний водень (рис.1). Утворення оцтової кислоти і CO_2 призводить до зниження рН середовища. Зниження рН призводить до призупинення життєдіяльності метаногенів та утворення метану.

Зниження значення рН до 6,5 сповільнює процес метаногенезу внаслідок чого відбувається накопичення оцтової кислоти, що призводить до її подальшого перетворення з утворенням низки інших кислот, які не є субстратами для процесу утворення метану (рис.1). При цьому підвищується швидкість процесу гідролізу високомолекулярних речовин, що призводить до збільшення кількості низькомолекулярних сполук, таких як: піруват, гліцеральдегід-3-фосфат, форміат тощо, що призводить до утворення водню, як кінцевого продукту. У кислому середовищі змінюється метаболізм мікроорганізмів, що використовують низькомолекулярні речовини на стадії ацидогенезу. Окрім водню відбувається утворення нейтральних речовин, що призводить до підвищення значення рН в процесі ферментації. Підвищення значення рН запускає процес утворення метану.

Досягнення умов близьких до нейтральних сприяє утворенню метану з оцтової, мурашиної кислот, метанолу та амінів. Виходячи з того, що швидкість метаболізму та росту гідролізуючих та ацидогенних бактерій вища, ніж метаногенних, підвищується процес розкладу високомолекулярних сполук і продукування кислот, що призводить до зниження рН. Тобто повторюваність процесів повинна призводити до синусоїдальної залежності виходу біогазу.

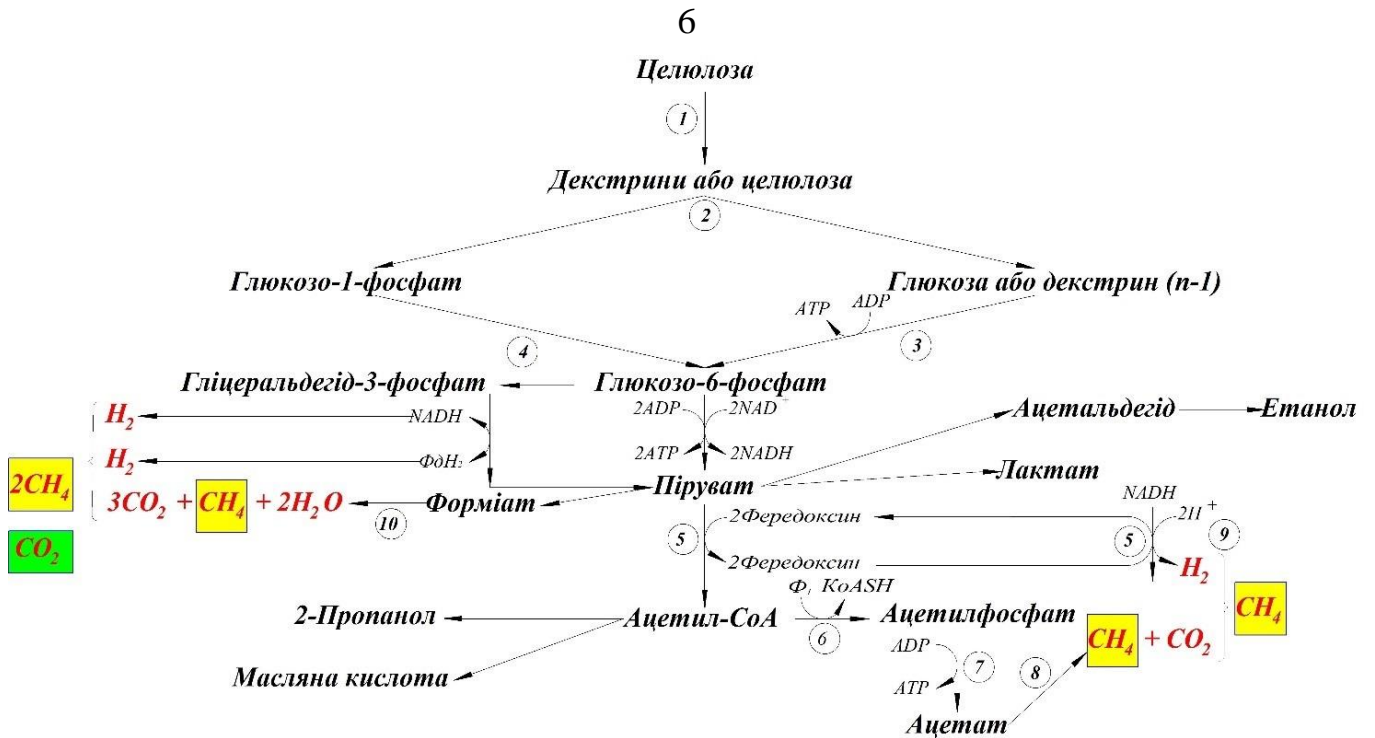


Рис. 1. Перетворення високомолекулярних сполук з утворенням метану:

- 1 – ендо-1,4-β-глюканазы та екзо-1,4-β-глюканазы (екзо-целобіогідролазы),
- 2 – екзо-1,4-β-глюкозидазы і целобіазы (β-глюкозидазы), 3 – глюкокіназа,
- 4 – фосфоглюкомутаза, 5 – пірувасинтаза, 6 – фосфат-ацетилтрансфераза,
- 7 – ацетаткіназа, 8 – коензим-M, 9 – NADH: ферредоксин-оксидоредуктаза + гідрогеназа, 10 – форміатдегідрогеназа.

Співвідношення, що пропонується, дозволяє досліджувати процес виходу метану в залежності від концентрації метаболітів, які продукуються мікроорганізмами. Математичний вираз процесу утворення біогазу описується системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dT}{dt} = 0, \\ \frac{dC_A}{dt} = -k_1 C_B C_C, \\ \frac{dC_B}{dt} = k_1 C_B C_C, \\ \frac{dC_C}{dt} = k_1 C_B C_C; \end{cases}$$

де C_A – концентрація оцтової кислоти, C_B – концентрація метану, C_C – концентрація CO_2 . Прийнято, що у процесі ферментації не відбувається зміни температури.

Для перевірки запропонованої моделі була розроблена програма, на основі якої проведено розрахунки процесу продукування біогазу. На рис. 2 наведено залежність виходу речовин В та С (компоненти біогазу) та споживання речовини А (оцтової кислоти) в процесі ферментації. Максимум виходу біогазу (компонентів В і С) відповідає мінімуму концентрації ацетату (компонента А) у ферментері. Аналіз результатів показав задовільну відповідність розрахункових та експериментальних даних, що підтверджує дієвість моделі (рис. 2).

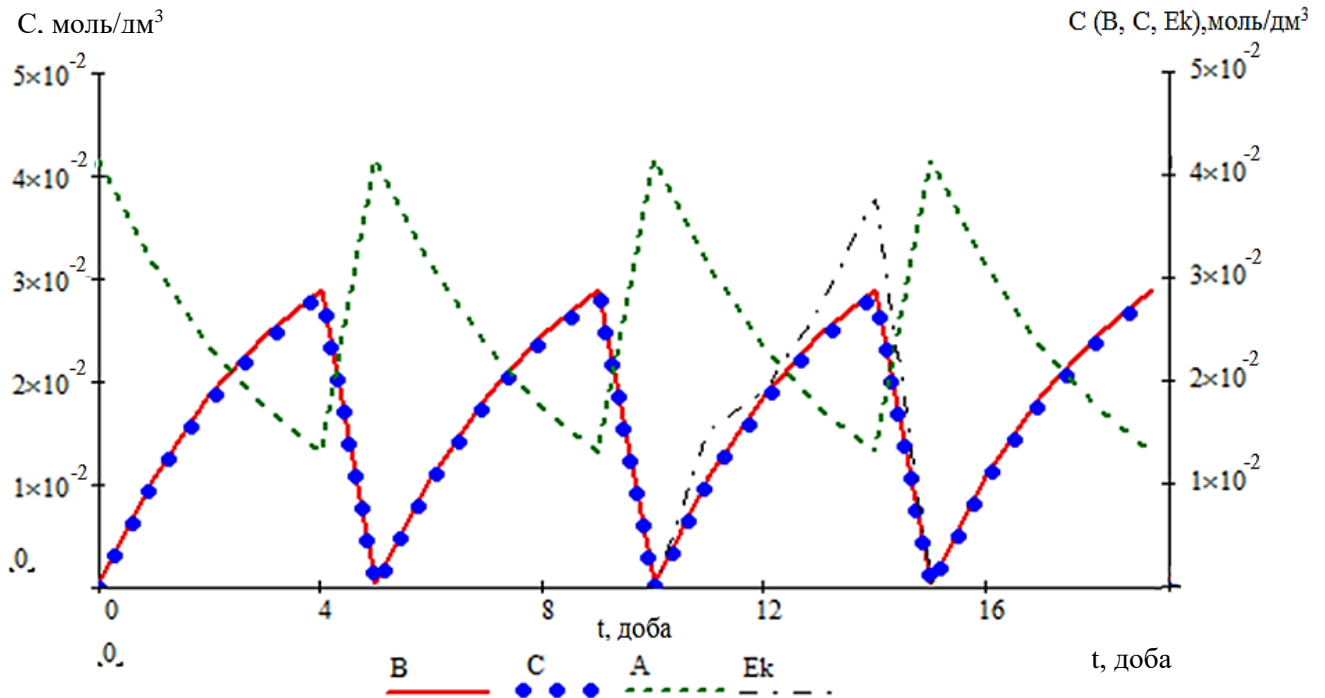


Рис. 2. Залежність виходу біогазу (В (-) – метан, С(•) – CO_2) та зміни концентрації оцтової кислоти А (-) в процесі коферментації посліду з кукурудзою (t), Ek (- • -) – експериментальні дані.

У четвертому розділі розглянуто вплив компонентного складу та вмісту косубстратів на вихід біогазу та вміст метану в ньому при ферментації посліду. Динаміка виходу біогазу, яку наведено на рис. 3 для очерету, має подібний характер для усіх видів косубстратів (кукурудзи, очерету, паперу, коноплі) незалежно від їх компонентного складу.

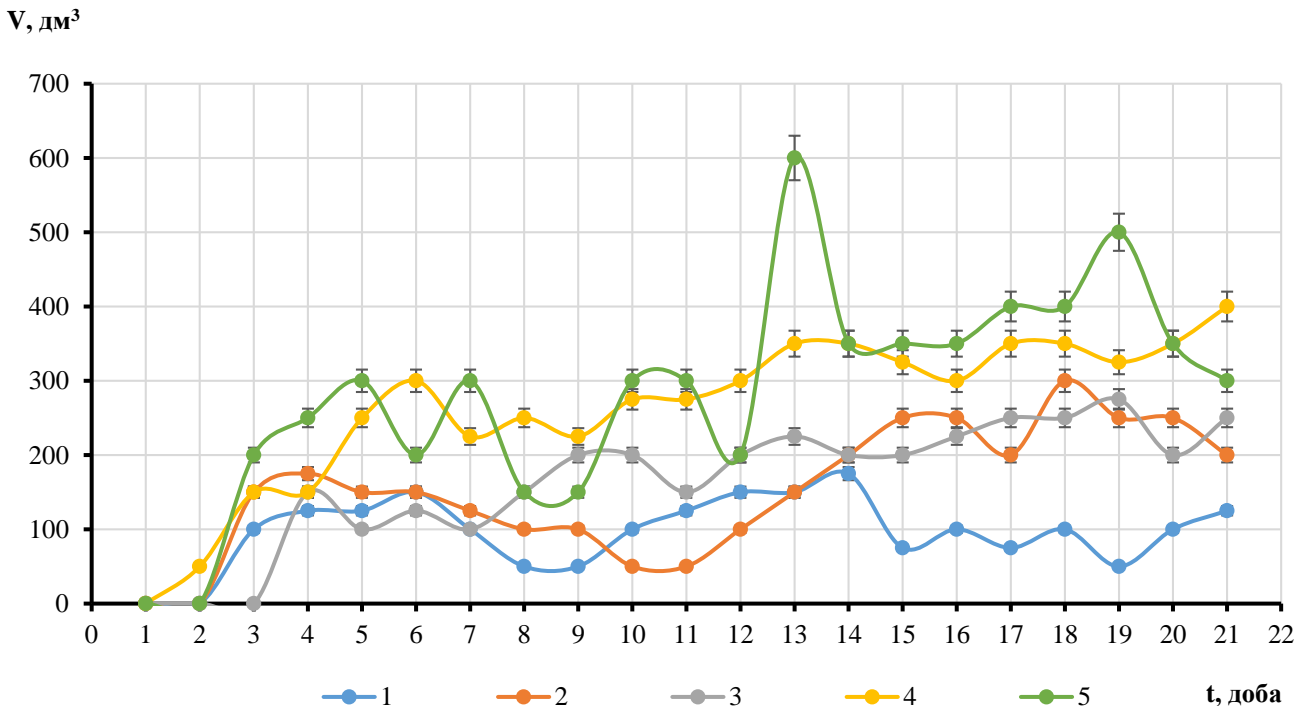


Рис. 3. Вихід біогазу (V) в процесі зброджування пташиного посліду та очерету (t) при співвідношенні послід/очерет: 1 – (9:1), 2 – (4:1), 3 – (7:3), 4 – (3:2), 5 – (1:1).

Встановлено, що вихід біогазу та вміст метану в ньому залежить, як від співвідношення послід/целюлозовмісна сировина, так і від компонентного складу целюлозовмісної сировини (рис. 4, 5).

V, cm³/гСОР

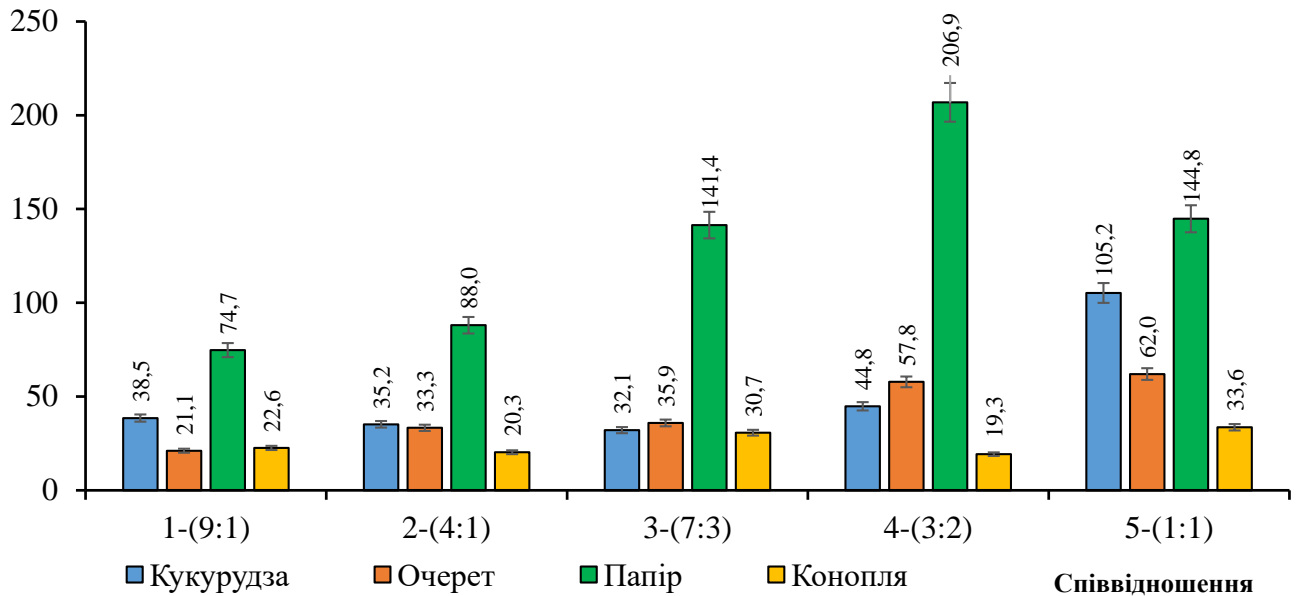


Рис. 4. Вихід біогазу (V) в залежності від виду целюлозовмісної сировини та співвідношення компонентів субстрату.

C, %

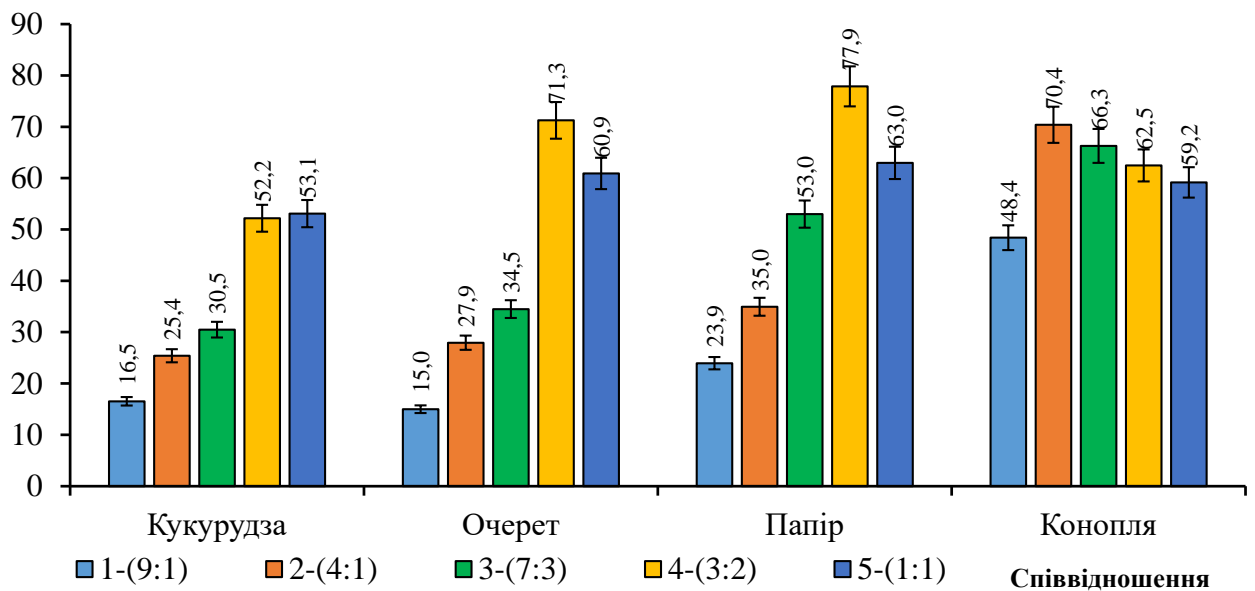


Рис. 5. Вміст метану (C) в біогазі в залежності від целюлозовмісної сировини та співвідношення компонентів субстрату (для відходів коноплі 1 – (1:19), 2 – (1:9), 3 – (3:17), 4 – (1:4), 5 – (1:1)).

Показано, що швидкість деструкції субстрату залежать від компонентного складу целюлозовмісної сировини. Чим більше вмісту лігніну та целюлози, що погано розчиняється, тим нижче швидкість її утилізації мікроорганізмами і менший вихід

біогазу. Слід також зауважити, що процес утворення метану відбувається при значення рН близьких до нейтральних, в той час, як деструкція целюлозовмісної сировини – в кислих умовах, тому на вміст метану в біогазі впливає співвідношення компонентів субстрату. Для косубстратів, що містять меншу кількість лігніну (15-17 % у кукурудзи) максимальний вихід біогазу характерний при більшому вмісті целюлозовмісної сировини (співвідношення послід/кукурудза 1:1), але в цьому випадку знижується вміст метану в біогазі внаслідок більшої кислотності середовища (рис.4, 5). При підвищенні вмісту лігніну (21 % очерет) швидкість утилізації біомаси зменшується, але підвищується вміст метану в біогазі до $71 \pm 3,5$ % (рис. 5) та вміст посліду в субстраті. Вихід метану менший лише на 26 % по відношенню до кукурудзи, як косубстрату при максимальному виході біогазу при співвідношенні послід/кукурудза – 1:1. Вихід метану за такого співвідношення (3:2) у випадку використання кукурудзи майже удвічі менший. Такий результат показує, що очерет може бути раціонально обґрунтованою заміною кукурудзи, як косубстрату при метановому зброджуванні посліду, що значно знизить вартість енергетичної сировини. При чому за таких умов збільшується використання посліду, як сировини, що утилізується, для отримання метану.

Одержані результати показали, що найбільший вихід біогазу та вміст метану в ньому характерний для використання відходів паперу, як косубстрату у співвідношенні послід/папір – 3:2.

Тобто, використання легкодоступних для мікроорганізмів волокон целюлози, що легко розкладається, дає змогу збільшити вміст посліду у субстраті та вихід біогазу з вмістом метану $78 \pm 3,9$ %. За використання відходів паперу за таких умов по відношенню до традиційного косубстрату – кукурудзи за умов максимального виходу біогазу (співвідношення послід/кукурудза 1:1) вихід метану у тричі більший.

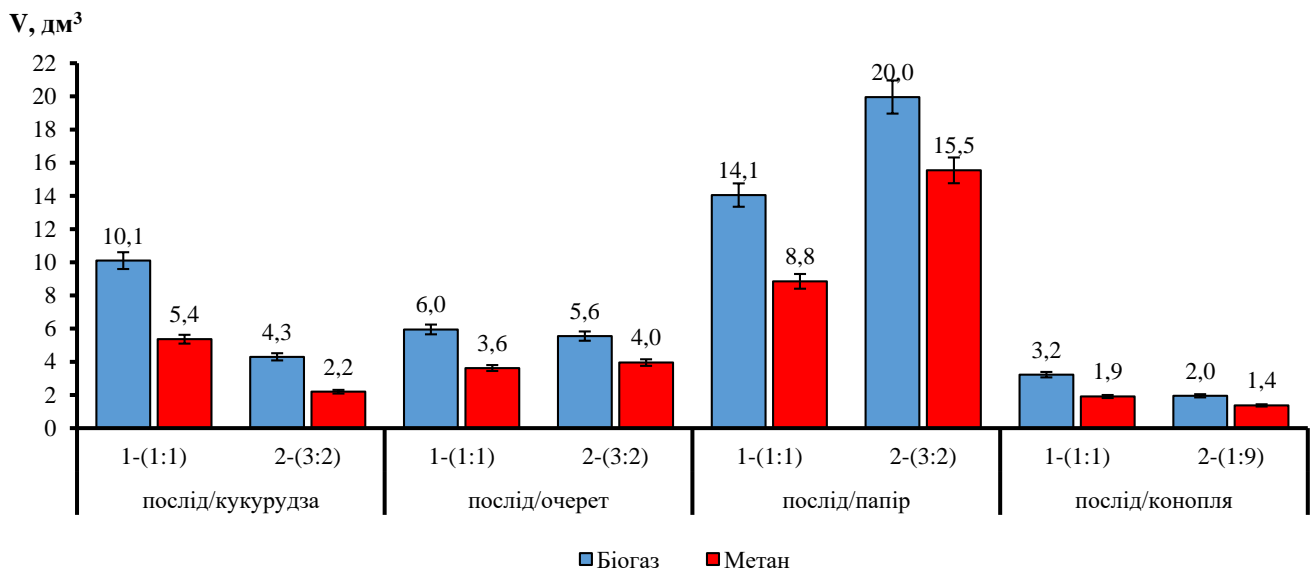


Рис. 6. Загальний вихід біогазу та метану (V) при раціональному співвідношенні послід/целюлозовмісна сировина: 1 – (1:1), 2 – (3:2) – для відходів кукурудзи, очерету та паперу, 1 – (1:1), 2 – (1:9) – для коноплі.

Одержані результати корелюють з виходом біогазу, одержаним іншими дослідниками, для переробки подібних відходів. Найкращий вихід біогазу

206,9 ± 10,4 см³/г СОР характерний для збродження послід/відходи паперу – сировини, структура якої не містить лігніну (рис. 4).

У п'ятому розділі запропоновано технологічні рішення для очищення води після зневоднення зброженої біомаси після ферментації посліду від сполук нітрогену для її повторного використання в анаеробному ферментативному процесі отримання біогазу з посліду.

Вміст іонів амонію та ХСК у воді залежить від косубстрату, що використовується. Показано, що використання косубстратів, що містять більшу кількість лігніну, який обмежує доступ мікроорганізмів до поживних речовин, призводить до підвищеного вмісту іонів амонію у воді після зневоднення зброженої біомаси. Використання косубстратів, що містять значну кількість целюлози, що важко розчиняється, призводить до підвищеного вмісту ХСК, але не впливає на кількість амонійного нітрогену (табл. 1).

Теоретично обґрунтовано, що для очищення води після зневоднення зброженої біомаси з метантенка і підвищення швидкості процесу утилізації азотовмісних сполук раціональним є використання, як іонів амонію, так і нітратів та нітритів, що можна досягти за допомогою аеробно-анаеробного процесу з використанням асоціації мікроорганізмів збагаченої *анаттох*-бактеріями. Також показано, що вода після зневоднення зброженої біомаси коферментації посліду з целюлозовмісною сировиною містить органічні сполуки, які можуть приймати участь у відновленні нітратів, та іони амонію, що застосовуються *анаттох*-бактеріями для відновлення нітритів. Також асоціація мікроорганізмів у анаеробній стадії містить мікроорганізми-денітрифікатори, які сприяють відновленню, як нітратів, так і нітритів, що дає змогу варіації часу окиснення іонів амонію в аеробній стадії.

Таблиця 1.

Вміст сполук нітрогену та ХСК у воді після зневоднення зброженого залишку після коферментації посліду з целюлозовмісною сировиною різного походження

Показник	Послід–паперові відходи (1:1) (I)	Послід–очерет (1:1) (II)	Послід–конопля (1:1) (III)
ХСК, мг О ₂ /дм ³	1200±50	1040±50	1800±100
NO ₂ ⁻ , мг/дм ³	2,0±0,04	1,4±0,03	1,6±0,03
NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	74±3,5	138±7	69±3,5

Запропонований спосіб очищення води після зневоднення зброженої біомаси полягає у розділенні води на два потоки, один з яких поступає в аеротенк, де відбувається утилізація органічних речовин та окиснення іонів амонію до нітритів та нітратів, який потім направляєється до анаеробного ферментера-денітрифікатора, куди також направляєється другий потік.

Встановлено, що підвищення вмісту органічних речовин потребує збільшення терміну знаходження води після зневоднення зброженої біомаси в аеротенку, оскільки процес нітрифікації інтенсивно проходить після утилізації органічних сполук (рис. 7).

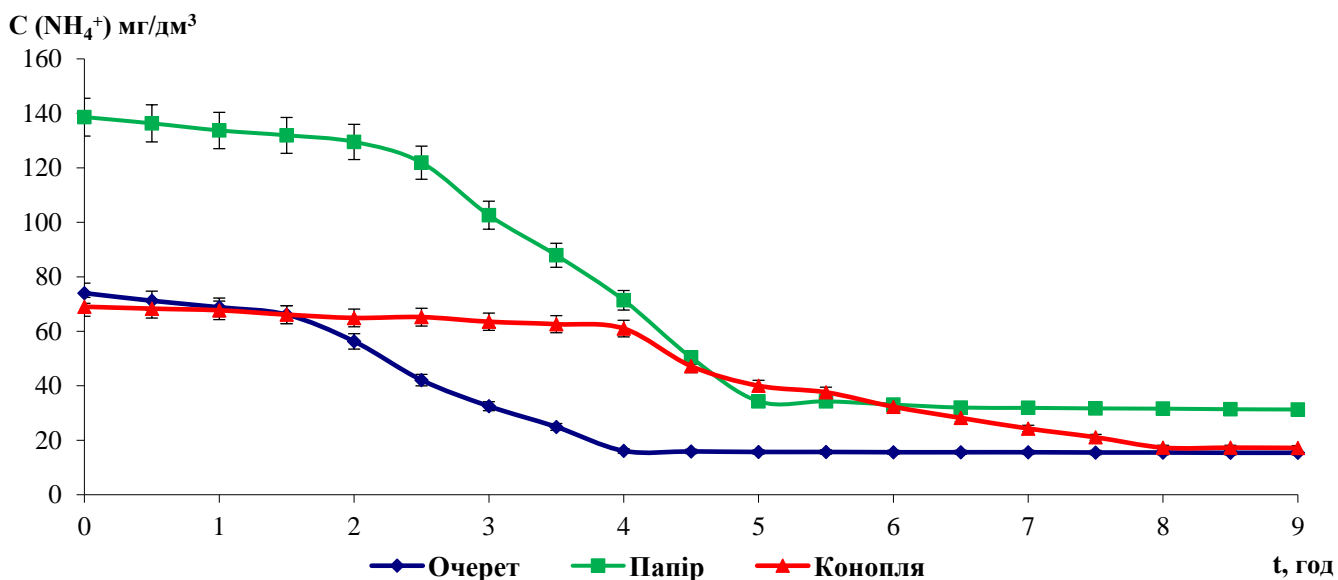


Рис. 7. Зміна концентрації амонійного азоту $C(\text{NH}_4^+)$ в залежності від часу гідравлічного утримання води (t) за використання води після збродження посліду з різними косубстратами.

Одержані результати зниження вмісту іонів амонію в залежності від співвідношення аеробного та анаеробного потоків для води, що одержана за різних целюлозовмісних косубстратів, дозволяють констатувати (рис. 8), що раціональним співвідношенням є співвідношення аеробного до анаеробного потоку 2:1.

$C(\text{N})$, мг/дм³

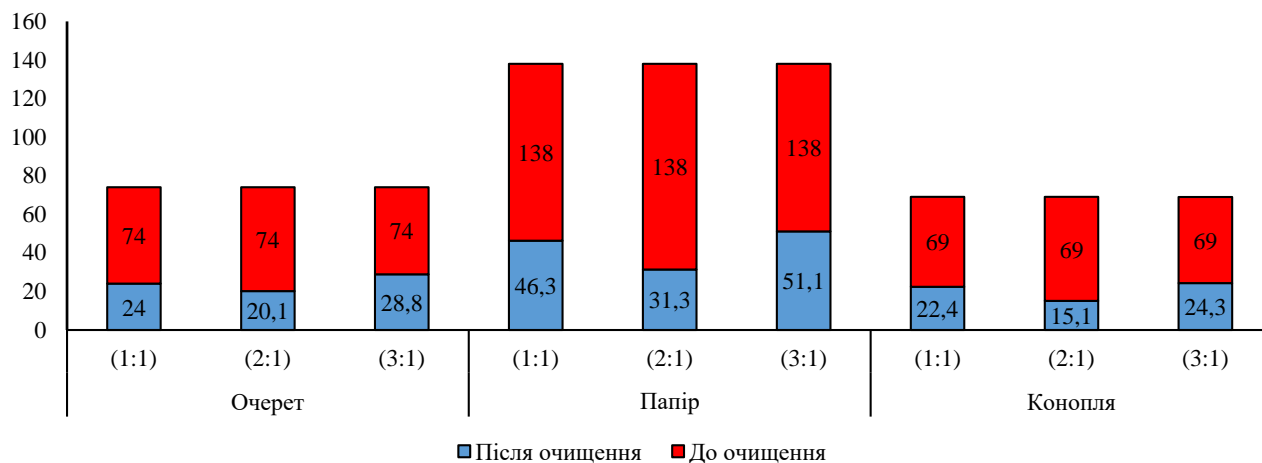


Рис. 8. Ефективність очищення води після зневоднення зброженої біомаси за метанового збродження посліду з очеретом, відходами паперу та коноплі від сполук нітрогену $C(\text{NH}_4^+, \text{NO}_2^-, \text{NO}_3^-)$ за різної концентрації аеробного та анаеробного потоків у співвідношенні: 1:1, 2:1, 3:1, відповідно.

За таких умов ефективність очищення води від органічних сполук після зневоднення зброженої біомаси з усіх систем ферментації за ХСК 70 ÷ 78 % в залежності від косубстрату (рис. 9).

Показано, що ступінь очищення води після зневоднення зброженої біомаси від іонів амонію залежить від часу утримання двох потоків води після зневоднення зброженої біомаси в анаеробному реакторі-денітрифікаторі.



Рис. 9. Показники води після зневоднення збродженої біомаси (XSK) до та після очищення аеробно-анаеробним способом при розділенні потоків у співвідношенні 2:1 за різного гідравлічного утримання води в аеробному реакторі.

та очищення води після зневоднення збродженої біомаси від сполук нітрогену після ферментації.

Визначено, що співвідношення кількості інокуляту до субстрату за сухою речовиною впливає на швидкість виходу процесу в стаціонарний режим, вихід біогазу та його якісний склад в процесі періодичного зброджування (рис. 10).

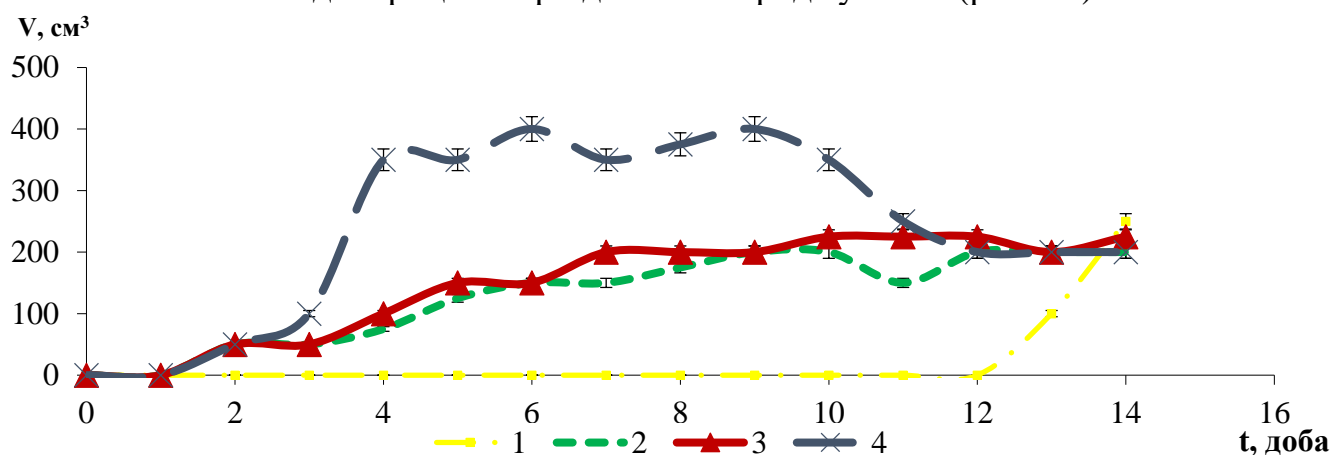


Рис. 10. Динаміка виходу біогазу (V) в процесі ферментації (t) в залежності від співвідношення інокуляту та субстрату (послід з очеретом при співвідношенні 3:2) в перерахунку на COP: 1 – без інокуляту, 2 – 20 % інокуляту, 3 – 40 % – інокуляту, 4 – 60 % – інокуляту.

Обґрунтовано параметри біотехнологічного процесу ферментації посліду з целюлозовмісною сировиною та очищення води після зневоднення збродженої біомаси з метантенку від сполук азоту з концентрацією більше 70 мг/дм³. За одержаними результатами запропоновано технологічну (фрагмент якої наведено на рис. 11) та відповідну їй апаратурну схеми безвідходної біотехнології переробки

Визначені співвідношення аеробного та анаеробного потоків дають змогу знизити вміст амонійного азоту на $78 \pm 3\%$ за 27 год утримання води після зневоднення збродженої біомаси у аеробному та анаеробному реакторах при його початковій концентрації 70 мг/дм³. Підвищення концентрації іонів амонію призводить до збільшення терміну утримання води в анаеробному реакторі.

У шостому розділі наведено біотехнологічний процес одержання біогазу при ферментації посліду з целюлозовмісною сировиною

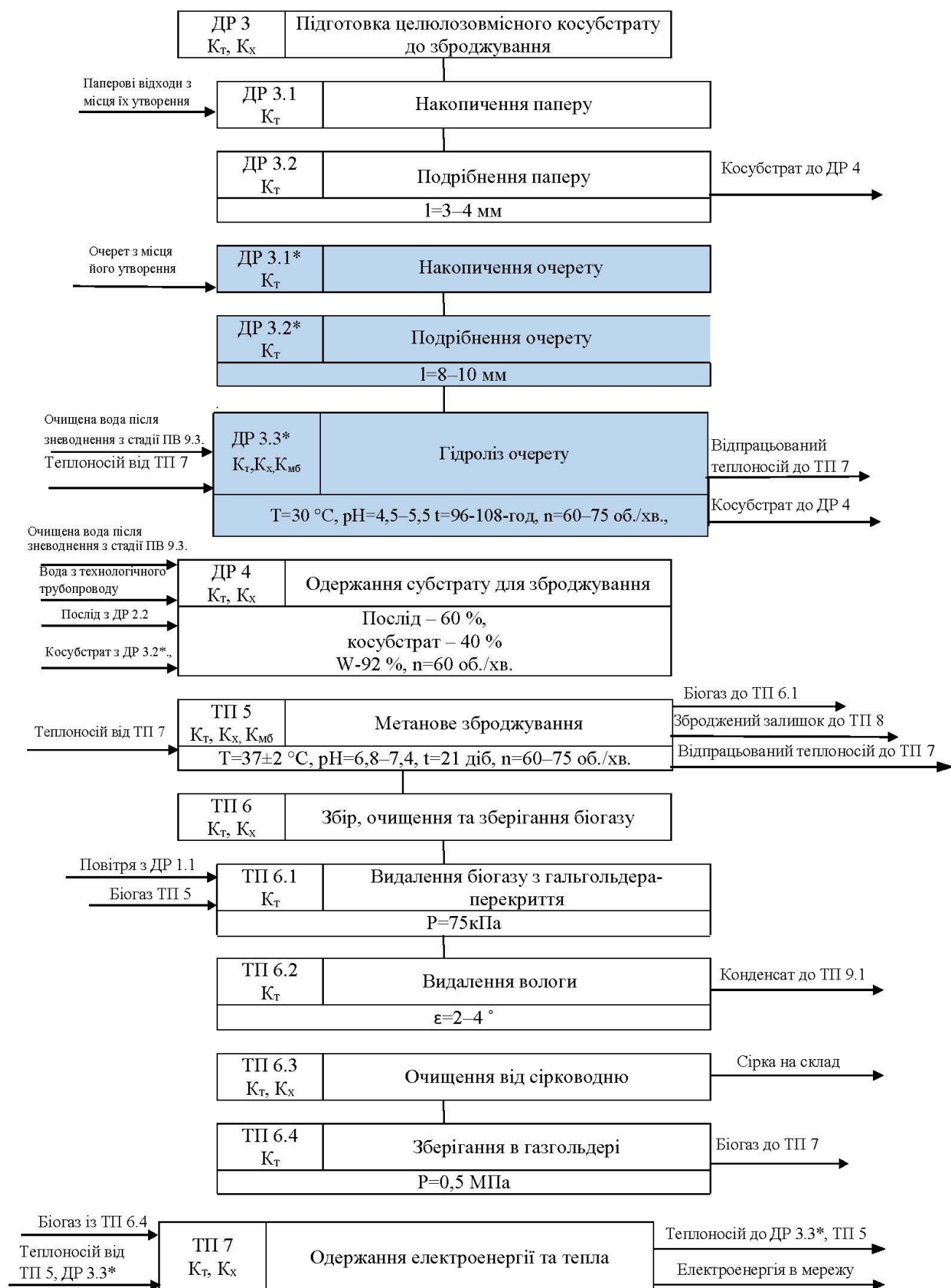


Рис. 11. Фрагмент технологічної схеми отримання біогазу при коферментації посліду птахів з целюлозовмісним косубстратом.

пташиного посліду та відходів паперу або очерету з отриманням біогазу з подальшою його когенерацією в електричну енергію та теплоносій.

Показано, що заміна відходів кукурудзи на очерет або відходи паперу дають змогу підвищити енергетичну ємність біогазу до 24 та 28 МДж/м³, відповідно, що на 22 % та 36 % більше, ніж за традиційною технологією. При цьому збільшується вміст посліду на 25 % у субстраті без зниження швидкості процесу ферментації для відходів паперу.

У додатках наведено акт впровадження технологічних рішень у проектну документацію технології отримання біогазу з посліду та очищення води після зневоднення зброженої біомаси від сполук нітрогену, акт використання одержаних результатів у навчальному процесі, програма розрахунку математичної моделі, підбір обладнання та техніко-економічні показники виробництва біогазу.

ВИСНОВКИ

Отримані теоретичні та експериментальні результати стали підґрунтям для вирішення важливої науково-технологічної проблеми утилізації посліду та очищення води після зневоднення зброженої біомаси від іонів амонію для її повторного використання в метантенках, що дозволило створити ефективну біотехнологію одержання біогазу при коферментації посліду з целюлозовмісною сировиною.

1. Встановлено залежність виходу біогазу від компонентного складу целюлозовмісного косубстрату при ферментації посліду. Підвищення вмісту лігніну та нерозчинної целюлози у косубстраті (очерет та конопля) знижує швидкість розкладу сировини і вихід біогазу на 40 % при співвідношенні послід/косубстрат 1:1, але підвищує вміст метану у біогазі на 19 % за використання очерету по відношенню до традиційного косубстрату – відходів кукурудзи. При підвищенні вмісту посліду у субстраті до 60 %, вихід біогазу за використання як косубстрату очерету переважає його вихід за використання кукурудзи на 29 %, що дає змогу замінити кукурудзу на очерет для одержання біогазу з посліду.

2. Найбільший вихід біогазу $207,0 \pm 10,4$ см³/г СОР характерний для косубстрату, який не містить лігніну, – відходів паперу при співвідношенні послід/папір (3:2). За такого співвідношення вміст метану у біогазі досягає $78 \pm 3,9$ %. При підвищенні або зниженні вмісту паперу вихід біогазу та вміст метану в ньому знижується до $146,4 \pm 7,3$ см³/г СОР та 63 %, відповідно. Використання паперу та очерету дає змогу підвищити вміст посліду у субстраті.

3. Теоретично обґрунтовано і запропоновано математичний вираз та розроблено на його основі програму, яка дозволяє цілеспрямовано проводити дослідження впливу метаболітів на процес продукування метану з урахуванням змінної концентрації ацетату і пов'язаним з цим зміною значення рН. Достовірність результатів, отриманих за використання запропонованої моделі, підтверджено експериментальними даними.

4. Визначено, що швидкість перетворення субстрату у біогаз залежить від співвідношення інокуляту до субстрату за сухою речовиною. Визначено, що для підвищення виходу біогазу та вмісту метану в ньому співвідношення інокулят/субстрат повинно бути не менше 1:1.

5. Обґрунтовано та експериментально визначено параметри анаеробно-аеробного способу очищення води після зневоднення зброженої біомаси від іонів амонію при розділенні потоків у співвідношенні аеробного до анаеробного – 2:1. Ефективність очищення за такого співвідношення досягає $78,1 \pm 3,9$ % при вихідній концентрації NH_4^+ – 70 мг/дм³ за 27 год. Встановлено, що гідравлічний час утримання в аеробному реакторі залежить від концентрації органічних речовин у воді після зневоднення зброженої біомаси і збільшується на 1 год. при збільшенні ХСК на 600 мг O_2 /дм³. Підвищення вмісту іонів амонію вдвічі збільшує термін гідравлічного утримання води в анаеробному реакторі у 1,5 – 1,7 разів.

6. Розроблено технологічну та апаратурну схеми безвідходної технології одержання біогазу при коферментації пташиного посліду з подальшою його когенерацією з отриманням електричної енергії та теплоносія. Запропонована технологія в порівнянні з іншими дозволяє повторне використання води в технологічному процесі після її очищення від сполук азоту, що дає змогу зменшити собівартість утилізації пташиного посліду та зменшити навантаження на навколишнє середовище. Розроблені технологічні рішення впроваджено у проектну документацію в розділі «Технологія виробництва» ТОВ «Про Інжиніринг Груп» (акт впровадження від 19.04.2017 р.). Наукові результати роботи впроваджено у навчальному процесі спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія» спеціалізації «Екологічна біотехнологія та біоенергетика» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря. Сікорського» (акт впровадження від 10.04.2017 р.).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових наукових виданнях України та інших країн

1. Golub N. Technology of anaerobic-aerobic purification of wastewater from nitrogen compounds after obtaining biogas / N. Golub, O. Kozlovets // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2016. – V. 10. – № 3. – P. 35–40. (Фахове видання з технічних наук. Входить до міжнародних наукометричних баз: Scopus, РІНЦ, EBSCO, DOAJ, Index Copernicus, Library.ru, WorldCat, BASE, CAS, Driver). (Особистий внесок дисертанта: проводив дослідження процесу очищення вод після зневоднення зброженої біомаси, запропонував принципіальну технологічну схему очищення).

2. Голуб Н. Б. Совместное метановое сбраживание помета домашних птиц и отходов аграрно-промышленных комплексов / Н. Б. Голуб, А. А. Козловец // Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – Вып. 163. – № 23. – С. 67–72. (Іноземне фахове видання). (Особистий внесок дисертанта: брав участь у проведенні експерименту та написанні статті).

3. Голуб Н. Б. Математичне моделювання продукування метану в процесі ферментації / Н. Б. Голуб, О. А. Козловець // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2014. – № 3. – С.21–25. (Фахове видання з технічних наук. Входить до міжнародних наукометричних баз: WorldCat, Google Scholar, OpenAIRE, DOAJ, EBSCO тощо). (Особистий внесок дисертанта: брав участь у проведенні експерименту, запропонував математичну модель процесу).

4. Хрокало Л. А. Визначення компонентного складу біогазу валюмометричним методом / Л. А. Хрокало, Т. І. Обушенко, Є. С. Перерва, О. А. Козловець // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2013. – № 3. – С. 93–99. (Фахове видання з технічних наук. Входить до міжнародних наукометричних баз: WorldCat, Google Scholar, OpenAIRE, DOAJ, EBSCO то). *(Особистий внесок дисертанта: брав участь у проведенні експерименту та збірці установки для проведення аналізу біогазу, приймав участь в написанні статті).*

Патенти

5. Патент України на винахід № 114766 UA, C02F 11/02, C02F 11/04, C02F 3/30, A62D 3/00, A62D 3/02. Спосіб очищення стічної води для одержання оборотної води для продукування біогазу з пташиного посліду / Голуб Н. Б. (UA), Козловець О. А. (UA). – Заявка а 2016 03011, 23.03.2016; Оп. 25.07.2017. – Бюл. № 14. *(Особистий внесок дисертанта: проводив патентний пошук найближчих аналогів, брав участь у підготовці патенту).*

6. Патент України на корисну модель № 98656 UA, C02F 11/04. Лабораторна біогазова установка / Голуб Н. Б. (UA), Козловець О. А. (UA). – Заявка № 2014 07871, 14.07.2014; Оп. 12.05.2015. – Бюл. № 9. *(Особистий внесок дисертанта: проводив патентний пошук найближчих аналогів, брав участь у підготовці патенту).*

Статті у інших виданнях

7. Голуб Н. Б. Анаеробна коферментація пташиного посліду з целюлозовмісними відходами / Н. Б. Голуб, О. А. Козловець // Відновлювана енергетика. – 2016. – Вип. 46. – № 3. – С. 81–93. *(Особистий внесок дисертанта: сконструював дослідну установку та досліджував вплив різних видів косубстратів на процес утворення біогазу).*

8. Голуб Н. Б. Комплексна технологія очищення стічних вод птахофабрик та фільтрату після їх анаеробного зброджування / Н. Б. Голуб, О. А. Козловець, Шинкарчук М. В. Потапова М. В. // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – 2016. – № 27. – С. 70–77. *(Особистий внесок дисертанта: проводив дослідження процесу очищення вод після зневоднення збродженої біомаси, брав участь у написанні статті).*

9. Голуб Н. Б. Вплив коферментації сировини на вихід біогазу / Н. Б. Голуб, І. Г. Лелеко, О. А. Козловець // Відновлювана енергетика. – 2015. – Вип. 41. – № 2. – С. 87–92. *(Особистий внесок дисертанта: брав участь в проведенні експерименту, брав участь в написанні статті).*

Тези доповідей

10. Голуб Н. Б. Комплексна технологія Культивування мікроводоростей *Chlorella vulgaris* з використанням біогазу в якості живильного середовища / Н. Б. Голуб, М. В. Шинкарчук, І. І. Левтун, О. А. Козловець // Матеріали XVIII міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті». (27-29 вересня 2017 р.). – м. Київ, 2017. – С. 734–736. *(Особистий внесок дисертанта: приймав участь у проведенні експерименту, написанні тез).*

11. Голуб Н. Б. Вплив концентрації та умов обробки жировмісної сировини на вихід біогазу / Н. Б. Голуб, М. В. Шинкарчук, О. А. Козловець // Матеріали XVIII міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті». (27-29 вересня 2017 р.). – м. Київ, 2017. – С. 722–725. (Особистий внесок дисертанта: приймав участь у проведенні експерименту, написанні тез).

12. Голуб Н. Б. Біотехнологія отримання біопалива з органічних відходів шкіряного виробництва / Н. Б. Голуб, М. В. Шинкарчук, О. А. Козловець // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Біотехнологія: досвід, традиції та інновації» (15-16 грудня 2016 р.). – м. Київ, 2016. – С. 227–233. (Особистий внесок дисертанта: приймав участь у проведенні експерименту та підготовці тез).

13. Голуб Н. Б. Анаеробно-аеробне очищення стічної води від сполук нітрогену / Н. Б. Голуб, О. А. Козловець // Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти» (26-28 жовтня 2016 р.). – м. Київ, 2016. – С. 70–71. (Особистий внесок дисертанта: приймав участь у проведенні експерименту, написанні тез).

14. Шинкарчук М. В. Перспективи використання відходів шкіряної промисловості для отримання біогазу в Україні / М. В. Шинкарчук, О. А. Козловець // Матеріали XIX міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» (12-13 травня 2016 р.). – м. Київ, 2016. – С. 137–138. (Особистий внесок дисертанта: приймав участь у проведенні експерименту, обговоренні та написанні тез).

15. Kozlovets O. Technology of anaerobic-aerobic treatment wastewater from nitrogen compound after biogas production / O. Kozlovets, D. Voyevoda, N. Golub // 8th Easter European young water professionals conference (11-14 may 2016). – Gdansk (Poland), 2016. – P. 213–214. (Особистий внесок дисертанта: приймав участь у проведенні експерименту, розробці технології та написанні тез).

16. Козловець О. А. Вплив дози інокуляту на анаеробну переробку пташиного посліду / О. А. Козловець, Н. Б. Голуб, М. В. Шинкарчук // Матеріали XIX міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» (12-13 травня 2016 р.). – м. Київ, 2016. – С. 95–96. (Особистий внесок дисертанта: приймав участь у проведенні експерименту, написанні тез).

17. Козловець О. А. Перспективи використання біомаси різного походження для отримання біогазу / О. А. Козловець, Н. Б. Голуб, М. В. Шинкарчук // Матеріали X Всеукраїнської науково-практичної конференції «Біотехнологія XXI століття» (21 квітня 2016 р.). – м. Київ, 2016. – С. 148–149. (Особистий внесок дисертанта: приймав участь у проведенні експерименту, написанні тез).

18. Голуб Н. Б. Шляхи підвищення вмісту метану в біогазі при анаеробній переробці пташиного посліду / Н. Б. Голуб, О. А. Козловець, М. В. Шинкарчук // Матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті». – м. Київ, 2015. – С. 526–530. (Особистий внесок дисертанта: приймав участь у проведенні експерименту, написанні тез).

19. Козловець О. А. Комплексна технологія переробки сирого осаду та спалювання його накопичень на мулових майданчиках з одержанням енергоносіїв /

О. А. Козловець, О. С. Панченко // Матеріали міжнародного конгресу ЕТЕВК-2015 (8-12 червня). – м. Чорноморськ, 2015. – С. 210–214. (Особистий внесок дисертанта: побудував наукову гіпотезу, написання тез).

20. Козловець О. А. Математичне моделювання процесу вирощування мікроводоростей за використання біогазу / О. А. Козловець, І. І. Левтун, Д. В. Воєвода, Н. Б. Голуб // Всеукраїнська науково-практична конференція «Біотехнологія ХХІ століття» (24 квітня 2015 р.). – м. Київ, 2015. – С. 146. (Особистий внесок дисертанта: приймав участь в експерименті та обговоренні математичної моделі).

21. Козловець О. А. Об'єднання процесу очищення біогазу від вуглекислоти з процесом культивування мікроводоростей *Chlorella vulgaris* / О. А. Козловець, І. І. Левтун, Д. В. Воєвода, Н. Б. Голуб // Матеріали ІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції «Біотехнологія ХХІ століття» (24 квітня 2015 р.). – м. Київ, 2015. – С. 147. (Особистий внесок дисертанта: брав участь у проведенні експерименту і підготовці тез).

22. Потапова М. В. Одержання біогазу з пташиного посліду та відходів спиртового виробництва / М. В. Потапова, О. А. Козловець // Матеріали ІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції «Біотехнологія ХХІ століття» (24 квітня 2015 р.). – м. Київ, 2015. – С. 160. (Особистий внесок дисертанта: брав участь у обговоренні експерименту та підготовці тез).

23. Козловець О. А. Технологічне рішення підвищення енергоємності біогазу / О. А. Козловець, І. І. Левтун, Н. Б. Голуб // Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у ХХІ столітті». – м. Київ, 2015. – С. 341–344. (Особистий внесок дисертанта: приймав участь у проведенні експерименту, приймав участь у підготовці тез).

24. Козловець О. А. Перспективи математичного моделювання процесу метанового зброджування / О. А. Козловець, Н. Б. Голуб // Матеріали ХVІІІ Всеукраїнської науково-практичної конференції «Біотехнологія ХХІ століття» (24 квітня 2014 р.). – м. Київ, 2014. – С. 121. (Особистий внесок дисертанта: брав участь в створенні теорії математичної моделі та підготовці тез).

25. Голуб Н. Б. Вплив концентрації ацетату на процес утворення біогазу // Н. Б. Голуб, О. А. Козловець // Матеріали ХV міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у ХХІ столітті». – м. Київ, 2014. – С. 358–360. (Особистий внесок дисертанта: приймав участь у проведенні експерименту, побудові математичної моделі та написанні тез).

26. Козловець О. А. Проектування лабораторної біогазової установки для зброджування широкого спектру субстратів / О. А. Козловець, І. І. Левтун // Матеріали ХVІІ Всеукраїнської науково-практичної конференції «Біотехнологія ХХІ століття» (24 квітня 2013 р.). – м. Київ, 2013. – С. 155–156. (Особистий внесок дисертанта: брав участь підготовці тез).

27. Козловець О. А. Аналіз відходів птахівництва як сировини для одержання біогазу / О. А. Козловець // Матеріали ХVІІ Всеукраїнської науково-практичної конференції «Біотехнологія ХХІ століття» (5 квітня 2012 р.). – м. Київ, 2012. – С. 176–177.

28. Козловець О. А. Перспективи використання біогазових установок в Україні / О. А. Козловець // Матеріали XIV міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» (18-22 травня 2011 р.). – м. Київ, 2011. – С. 226–227.

29. Козловець О. А. Перспективи проектування установок з сумісного зброджування рослинної біомаси та відходів тваринництва в Україні / О. А. Козловець // Матеріали VI Всеукраїнської студентської наукової конференції «Сучасні проблеми природничих наук» (5-6 квітня 2011 р.). – м. Ніжин, 2011. – С.103.

АНОТАЦІЯ

Козловець О. А. Біотехнологія одержання біогазу при коферментації посліду птахів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 03.00.20 – біотехнологія. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ, 2018.

Дисертація присвячена науково-технічним основам біотехнології переробки пташиного посліду з отриманням біогазу та очищення води після зневоднення збродженої біомаси за метанового зброджування з метою її повторного використання в технологічному процесі.

Визначено залежність продукування асоціацією мікроорганізмів біогазу (метану) від компонентного складу целюлозовмісної сировини при коферментації посліду, що дозволяє підвищити вихід цільового продукту;

Показано вплив структури косубстрату на вміст сполук нітрогену у воді в процесі отримання біогазу з посліду.

Визначено технологічні режими анаеробно-аеробного очищення води після зневоднення збродженої біомаси для її повторного використання у технологічному процесі зброджування.

Запропоновано математичну модель залежності виходу біогазу від вмісту ацетату в середовищі зброджування, що дає змогу прогнозувати перебіг процесу метанового зброджування.

Ключові слова: біогаз, зброджування пташиного посліду, целюлозовмісний косубстрат, вода після зневоднення збродженої біомаси.

SUMMARY

Kozlovets O. A. Biotechnology for obtaining biogas during co-fermentation of bird droppings. – As a manuscript.

Thesis for a Candidate of Technical Sciences degree in specialty 03.00.20 – biotechnology. – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute», Kiev, 2018.

The thesis is devoted to the scientific and technical fundamentals of biotechnology for processing bird droppings with the production of biogas and wastewater treatment after methane fermentation in order to reuse it in the technological process.

The dependence of the production of biogas (methane) by the association of microorganisms on the component composition of cellulose-containing raw materials

during co-fermentation of litter is determined, it is possible to increase the yield of the target product.

The influence of the structure of the co-substrate on the content of nitrogen compounds in wastewater in the process of obtaining biogas from litter is shown.

Technological regimes of anaerobic-aerobic sewage treatment for its reuse in the technological process of fermentation are proposed.

A mathematical model of the dependence of the output of biogas on the content of acetate in the fermentation medium is proposed, which makes it possible to predict the course of the methane fermentation process.

Keywords: biogas, fermentation of bird droppings, cellulose-containing co-extrusions, water after dehydration of fermented biomass.

АННОТАЦИЯ

Козловец А. А. Биотехнология получения биогаза при коферментации помета птиц. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 03.00.20 – биотехнология. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Киев, 2018.

Диссертация посвящена научно-техническим основам биотехнологии переработки птичьего помета с получением биогаза и очистки воды обезвоживания сброженной биомассы с целью ее повторного использования в технологическом процессе.

В работе определена зависимость выхода биогаза от компонентного состава целлюлозосодержащих косубстрата при коферментации помета. Показано, что повышение содержания лигнина и нерастворимой целлюлозы в косубстрата (камыш и конопля) снижает скорость разложения сырья и выход биогаза на 40 % при соотношении помет / косубстрата 1:1, но повышает содержание метана в биогазе на 19 % за использование камыша по отношению к традиционному косубстрата - отходов кукурузы. При повышении содержания помета в субстрате до 60 %, выход биогаза за использование как косубстрата тростника превосходит его выход за использование кукурузы на 29 %, что позволяет заменить кукурузу на тростник для получения биогаза из помета.

Экспериментально обосновано влияние структуры косубстрата на содержание соединений азота в воде в процессе получения биогаза из помета.

Показано математическое соотношение и разработана на его основе программа, которая позволяет целенаправленно проводить исследования влияния метаболитов на процесс выработки метана с учетом переменной концентрации ацетата и связанным с этим изменением значения рН. Достоверность результатов, полученных при использовании предложенной модели, подтверждено экспериментальными данными.

Экспериментально определено, что при использовании отходов бумаги и камыша, как косубстрата при сбраживании помета (соотношение 3:2) увеличивается выход биогаза и метана при снижении содержания целлюлозосодержащих сырья (соотношение 1:1) на 40 % и 67 %. В случае использования камыша при одинаковом выходе биогаза концентрация выход метана больше на 10 %. Использование отходов

бумаги и камыша позволяет снизить концентрацию целлюлозосодержащих сырья при ферментации помета.

Показано, что переработка конопли на биогаз с добавлением помета как сырья, обеспечивает питательную среду компонентами питания, является нерентабельной вследствие низкой скорости образования биогаза.

Экспериментально доказано, что скорость преобразования субстрата в биогаз зависит от соотношения инокулята к субстрату по сухому веществу. Экспериментальными определено, что для повышения выхода биогаза и содержания метана в нем соотношение инокулят / субстрат должно быть не менее 1:1.

Показано и экспериментально определено параметры анаэробно-аэробной способа очистки воды после обезвоживания сброженной биомассы от ионов аммония при разделении потоков в соотношении аэробной к анаэробного – 2:1. Эффективность очистки при таком соотношении достигает $78 \pm 3,9$ % при исходной концентрации NH_4^+ – 70 мг/дм³ за 27 ч. Установлено, что гидравлический время содержания в аэробном реакторе зависит от концентрации органических веществ в воде после обезвоживания сброженной биомассы и увеличивается на 1 ч. при увеличении ХПК на 600 мг O_2 /дм³. Экспериментально установлено, что повышение содержания ионов аммония в два раза увеличивает срок гидравлического содержания воды в анаэробном реакторе в 1,5 – 1,7 раз.

Предложена технологическая и аппаратурную схемы безотходной технологии получения биогаза при коферментации птичьего помета с последующей его когенерацией с получением электрической энергии и теплоносителя. Предложенная технология по сравнению с другими позволяет повторное использование воды в технологическом процессе после ее очистки от соединений азота, позволяет уменьшить себестоимость утилизации птичьего помета и уменьшить нагрузку на окружающую среду.

Ключевые слова: биогаз, сбраживания птичьего помета, целлюлозосодержащий ко субстрат, вода после обезвоживания переброженной биомассы.

Підписано до друку 25.01.2018. Формат 148×210мм.
Папір офісний. Друк цифровий. Тираж 100 прим.
Видавництво по вул. А.Антонова, 5а, оф. 105а 03186, м.
Київ. Свідоцтво про внесення до державного реєстру
Серія В03 № 465168 від 11.09.2008 р.