

УДК 620.92

ТЕХНОЛОГІЯ ОДЕРЖАННЯ БІОГАЗУ З ПІСЛЯСПИРТОВОЇ БАРДИ

Н.Б. Голуб, доктор технічних наук, професор, **М.В. Потапова**, аспірант.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»
03056 м. Київ, пр-т Перемоги 37.

Технологія переробки післяспирткової барди з одержанням біогазу містить декілька етапів: напрацювання високопродуктивного посівного матеріалу, змішування косубстратів в контактному резервуарі, два ступеня анаеробного зброджування, що чергуються стадіями відстоювання. Ця технологічна схема дозволяє досягти допустимих концентрацій забруднень ($X_{CK} \leq 500$ мг O_2 / dm^3) для аеробного доочищення висококонцентрованих стічних вод спиртзаводу. Також двоступеневий процес дозволяє досягти високого ступеня конверсії органічних забруднень в енергоносії – біогаз. Вихід біогазу – 380 ± 20 cm^3 / г СОР, вміст метану – $70 \pm 2\%$. Бібл. 10, рис. 2.

Ключові слова: післяспиртова барда, біогаз, анаеробне зброджування, послід, метан, коферментація, відходи.

TECHNOLOGY OF BIOGAS PRODUCTION FROM DISTILLERY SPENT WASH

N. Golub, doctor of technical science, professor, **M. Potapova**, postgraduate student.

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
03056, 37 Peremohy Avenue, Kyiv, Ukraine.

The technology of processing distillery spent wash for the biogas production involves several steps: development of highly-efficient seed material, mixing of cosubstrates in a contact tank, two stages of anaerobic digestion, alternating with the stages of sedimentation. This technological scheme allows reaching permissible concentrations of contaminants ($COD \leq 500$ mg O_2/dm^3) for aerobic pretreatment of highly concentrated distillery wastewater. Also, the two-stage process allows to achieve a high degree of conversion of organic contaminants into the energy carrier – biogas. The biogas output is 380 ± 20 cm^3 / g of dry organic weight, the methane content is $70 \pm 2\%$. References 10, fig. 2.

Keywords: distillery spent wash, biogas, anaerobic digestion, poultry manure, methane, cofermentation, waste.



Н.Б. Голуб
N. Golub

Відомості про автора: професор кафедри екобіотехнології та біоенергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», доктор технічних наук, доцент, старший науковий співробітник.

Освіта: Київський державний університет ім. Т. Шевченка.

Публікації: монографія, підручник і 3 навчальних посібники з грифом Міністерства освіти і науки України, 57 статей, 11 патентів.

ORCID: 0000-0003-1448-1872

Контакти:

тел /факс +38 (044) 406-81-84
e-mail: golubnb@ukr.net

Information about the author: professor of Ecological Biotechnology and Bioenergetics Department of The National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Doctor of Technical Science, assistant professor, research fellow.

Education: graduated from the Taras Shevchenko National University of Kyiv.

Publications: monograph, textbook and 3 manuals approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine, 57 articles, 11 patents.

ORCID: 0000-0003-1448-1872

Contacts: phone /fax +38 (044) 406-81-84
e-mail: golubnb@ukr.net



М.В. Потапова
M. Potapova

Відомості про автора: аспірант кафедри екобіотехнології та біоенергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського».

Освіта: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського».

Публікації: 5.

ORCID: 0000-0001-9689-3912

Контакти: тел /факс +38 (044) 406-81-84

e-mail: maryana.potapova2@gmail.com

Information about the author: postgraduate student of Ecological Biotechnology and Bioenergetics Department of the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».

Education: graduated from the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».

Publications: 5.

ORCID: 0000-0001-9689-3912

Contacts: phone /fax +38 (044) 406-81-84

e-mail: maryana.potapova2@gmail.com

Перелік використаних позначень та скорочень:

ХСК – хімічне споживання кисню, мг O_2 /дм³;

СОР – суха органічна речовина;

ПСБ – післяспиртова барда;

GC< – післяспиртова барда;

DDG – суха барда (dried distillers grains).

Вступ. Нинішні проблеми сьогодення – антропогенний вплив на навколишнє середовище відходів промисловості та побуту і виснаження природних ресурсів, – спонукають до створення безвідходних циклів виробництва та розширення використання альтернативних джерел енергії. Спирт окрім харчової, хімічної та фармацевтичної промисловостей можна використовувати як паливо для карбюраторних двигунів або домішку до бензинів, яка підвищує октанове число і знижує кількість антидетонаторів. В процесі виробництва спирту утворюється широкий спектр відходів, які містять різні класи органічних речовин: сивушні масла, етероальдегідна фракція, післяспиртова барда, вуглекислий газ, дріжджі-сахароміцети. Більшість із них повторно використовують на самому спиртовому виробництві чи в інших галузях народного господарства, на відміну від післяспиртової барди, яка раніше використовувалася в кормових цілях, а зараз, майже в повному обсязі, розміщується на полях фільтрації [1].

Післяспиртова барда (ПСБ) є основним відходом спиртової галузі і утворюється у великих обсягах – 8–15 дм³ на 1 дм³ спирту. Така висококонцентрована стічна вода характеризується високим умістом органічних забруднень, які містяться в розчиненому та нерозчиненому стані, показники ХСК та БСК досягають рівня 40–150 г/дм³ та 20–90 г/дм³, відповідно. ПСБ на виході має кислу реакцію середовища – рН = 3,7–

4,6, значення якої швидко знижується в процесі зберігання [1, 7].

Сьогодні альтернативою фізико-хімічним методам переробки ПСБ є її біологічна утилізація, а саме, анаеробна переробка з одержанням біогазу, який можна використати для потреб виробництва.

Серед необхідних умов перебігу анаеробного процесу метаноутворення є нейтральне або слабколужне значення рН = 6,8–8, та вміст елементів живлення мікроорганізмів, основним показником якого є співвідношення C:N = (30-25):1. Післяспиртова барда має високу концентрацію органічних речовин, які легко розкладаються, але містить недостатню кількість нітрогену, що унеможливує інтенсивний перебіг процесу утворення метану. Низький вміст нітрогену та кисле значення рН розчину інгібують процес метаногенезу.

У ряді досліджень коригування співвідношення елементів живлення проводили шляхом введення в реакційне середовище різних хімічних речовин: сечовини, фосфату (KH_2PO_4) та мікроелементів [1]; $FeCl_3 \cdot 6H_2O$, нікелю та цинку, вапняного добрива, мікрокристалічної целюлози (Avicel PH 101), соломи [2]; $(NH_4)_2HPO_4$ та сечовини [3]. Іншим методом досягнення оптимального співвідношення поживних речовин є коферментація. У роботах [2, 6] як ко-субстрат використовували коров'ячий гній, в роботі [9] – відпрацьований анаеробний мул біологічної ста-

нції очистки стічної води спиртаводу або очисних споруд міста.

Для коригування значення рН пропонується додавати в реактор такі речовини: розчин CaCO_3 [3], 40% NaOH та 20% H_2SO_4 [4], NaHCO_3 [5].

Таким чином, технології, що пропонуються для зброджування ПСБ, містять стадії деструкції органічних речовин та метаноутворення, які проводять в анаеробному реакторі з перемішуванням. Для забезпечення мікроелементами при запуску процесу використовують коров'ячий гній чи анаеробний активний мул очисних станцій. Для регулювання значення рН використовуються хімічні речовини. За таких умов спостерігається низька швидкість ферментації і вихід біогазу. Використання неорганічних солей знижує рентабельність процесу з огляду на велику кількість ПСБ, що утворюються в процесі виробництва спирту.

Іншим напрямком переробки ПСБ є її попереднє розділення на тверду та рідку фазу. Тверду фазу висушують і з неї одержують корм – сушену барду (DDG – dried distillers grains) [10]. Рідка фаза направляється на анаеробне зброджування, яке проводиться в дві стадії з попередньою ацидофікацією. В цій технології також використовуються хімічні речовини для підтримання необхідного для процесу метаногенезу значення рН.

Таким чином, розробка технологічних рішень, які б дали змогу проводити процес очищення висококонцентрованої стічної води (утилізації ПСБ) з одночасним одержанням біогазу без додавання хімічних реагентів є актуальною проблемою.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка технологічної схеми очищення висококонцентрованих стічних вод спиртового виробництва з одночасним одержанням біогазу.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі задачі:

- визначити умови перебігу процесу утилізації післяспиртової барди з одержанням біогазу;
- встановити параметри (співвідношення ко-субстратів за сухою органічною речовиною, рН, t^0 , швидкість перемішування) процесу ко-ферментації відходів спиртового виробництва – післяспиртової барди, стічної води, і також посліду птахів.

Виклад основного матеріалу. Умови перебігу процесу утилізації післяспиртової барди.

Оскільки основними проблемами утилізації післяспиртової барди в біогаз є низьке значення рН розчину та недостатня кількість сполук нітрогену для розвитку мікроорганізмів, пропонується проводити ко-ферментаційний процес, в якому в якості ко-субстрату використовувати послід птахів. Послід обрано виходячи з того, що він має високий вміст сполук нітрогену і може забезпечити необхідне співвідношення C:N в сировині та лужне значення рН середовища, що дозволяє корегувати значення рН без внесення додаткових хімічних джерел. Тому коригуючою речовиною для процесу бродиння ПСБ обрано послід птахів [8].

В процесі виробництва спирту також утворюється стічна вода, яка має близьке до нейтрального значення рН і вміст органічної речовини за ХСК $0,9 \text{ г O}_2/\text{дм}^3$ (сухої органічної речовини 0,3%). Вона також потребує очищення перед надходженням до каналізаційної мережі і може слугувати додатковим субстратом для отримання біогазу. Оскільки стічної води утворюється у 2 рази менше, ніж ПСБ, то її можна використовувати для розведення утвореної суміші послід/ПСБ і для доведення вмісту субстрату за сухою органічною речовиною до 10%, – що сприяє раціональному перебігу процесу метаногенезу.

Було встановлено, що за використання співвідношення за сухою речовиною стічна вода/ПСБ/послід 0,2:1:7 вихід біогазу найвищий і складає $265 \text{ см}^3/\text{г}$ сухої органічної речовини (COP) з умістом метану $72 \pm 2\%$.

Тому перед запуском процесу ферментації необхідно здійснити змішування компонентів субстрату. При цьому головним критерієм для створюваного співвідношення є нейтральне значення рН та концентрація COP – до 10%.

Одержання інокуляту для виробництва біогазу. Асоціація анаеробних мікроорганізмів, що здійснюють зброджування відходів спиртових виробництв, в основному представлена гідролітичними бактеріями групи Firmicutes, кислотопродукуючими бактеріями групи Proteobacteria, метаногенами роду Methanosaeta spp. та порядком архей Methanobacteriales.

Для продуктивного виробництва біогазу із післяспиртової барди як інокулянт пропонується використовувати інокулянт з наявних метантенків – зброжені в анаеробних умовах відходи тварин або посліду з різними видами рослинної сировини. У разі відсутності готового інокуляту суміш посліду, післяспиртової барди та целюлозовмісних відходів зброжують протягом 20 діб у реакторі, де буде відбуватися перша стадія ферментації. Нарощування інокуляту відбувається в анаеробному реакторі при перемішуванні, швидкість перемішування 100 об/хв. Температура процесу відповідає температурі, що встановлюється в реакторі одержання біогазу і дорівнює 40 ± 2 °С. Для збільшення швидкості продукування біогазу та вмісту метану в ньому інокулянт може бути збагачений спеціально вирощеними мікроорганізмами роду *Methanosaeta* spp.

Технологічний процес очищення висококонцентрованої стічної води та одержання біогазу із ПСБ. В контактному резервуарі відбувається змішування ПСБ, яка має температуру 80 °С, стічної води, посліду та інокуляту у визначеному співвідношенні. При цьому відбувається охолодження суміші до 55 °С. Для досягнення

однорідної суміші використовують перемішування протягом 15 хв. при швидкості обертів мішалки 150 об/хв.

Концентрація інокуляту, що вноситься під час запуску реактора, за сухою органічною речовиною повинна становити 20÷25% від загального вмісту органічної речовини. Така кількість посівного матеріалу дозволяє швидко запустити процес ферментації і вийти на стаціонарний режим. Для ефективної неперервної роботи реактора вміст інокуляту може бути збільшено у 2–3 рази.

Внесення посліду збільшує концентрацію органічної речовини і, відповідно, термін знаходження стічної води у ферментері для зниження значення ХСК. Тому пропонується проводити анаеробне очищення стічної води і отримання біогазу у двостадійному процесі. Перша стадія необхідна для стабілізації значення рН в процесі ферментації спочатку за рахунок введення посліду і наступної саморегуляції процесу за рахунок зміни метаболізму мікроорганізмів. Оскільки відомо, що зміна метаболічних шляхів залежить від факторів середовища: рН, парціального тиску водню, наявності кислот, CO₂ та інше. На рис. 1. наведено метаболічні шляхи перетворення цукрів.

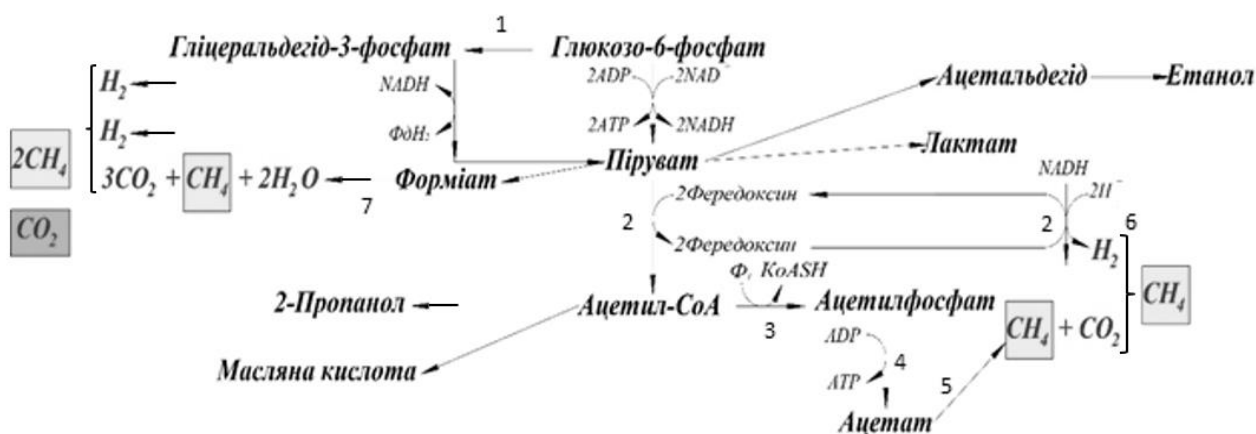
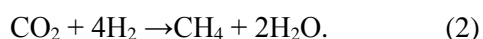
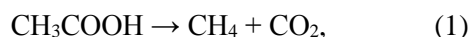


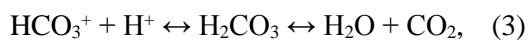
Рис. 1. Метаболічні шляхи перетворення цукрів: 1 – фосфоглюкомутаза, 2 – піруватсинтаза, 3 – фосфат–ацетилтрансфераза, 4 – ацетаткіназа, 5 – коензим–М, 6 – NADH: ферредоксин–оксидоредуктаза + гідрогеназа, 7 – форміатдегідрогеназа.

Fig. 1. Metabolic pathways for the conversion of sugars: 1 – phosphoglucomutase, 2 – pyruvate synthase, 3 – phosphate acetyltransferase, 4 – acetate kinase, 5 – coenzyme-M, 6 – NADH: ferredoxin-oxidoreductase + hydrogenase, 7 – formate dehydrogenase.

Внаслідок зниження значення рН до 6,5 сповільнюється процес метаногенезу за рахунок накопичення кислот. При цьому підвищується швидкість процесу гідролізу високомолекулярних речовин, що призводить до збільшення кількості низькомолекулярних речовин, таких як піруват, гліцеральдегід-3-фосфат, форміат тощо. При цьому одночасно відбувається процес метаноутворення за реакціями:



Накопичення нейтральних продуктів та перетворення оцтової кислоти та CO_2 у метан сприяє підвищенню значення рН. Також в реакторі утворюється гідрокарбонатна буферна система:



яка стабілізує значення рН. Також стабілізації значення рН сприяють амінні сполуки, що утворюються внаслідок перетворення білків та інших азотвміщуючих речовин, що містяться в посліді.

Такі процеси дозволяють періодично (1–2 рази на добу) визначений період замінювати встановлену кількість суміші на нову порцію ПСБ без додавання посліду. Це дозволяє підтримувати постійну концентрацію органічних речовин, що в свою чергу сприяє високому виходу біогазу. Тривалість очищення висококонцентрованої стічної води в першому ферментері без додавання нових порцій посліду 10–15 діб за умови постійної заміни частини субстрату на нову ПСБ. Значення рН в середовищі реактора становить $7 \pm 0,5$, що є оптимальним для процесу метаногенезу.

Процес анаеробного зброджування поводить в мезофільному режимі – $t^0 = 40 \pm 2$ °С, оскільки за такої температури спостерігається високий вихід біогазу з високим умістом метану в ньому. Температура підтримується за рахунок періодичного введення ПСБ з температурою 80 °С.

Для інтенсифікації масообмінних процесів та усереднення температури реактор містить перемішувальні пристрої. Швидкість перемішування 100 об/хв. Процес перемішування дозволяє уникати формування застійних зон та кірки на поверхні реакційної суміші. Також механічне пере-

мішування сприяє швидшому вивільненню пухирців газу, що додатково перемішує субстрат.

Для високого виходу біогазу та вмісту метану в ньому, а також виведення значення рН до $7 \pm 0,5$, в першому ферментері постійно підтримується достатньо висока концентрація СОР. Для досягнення необхідного ступеня очищення висококонцентрованих стічних вод (ПСБ) спиртзаводу та максимальної конверсії забруднювальних речовин в біогаз пропонується проводити ферментацію рідкої фракції у другому ферментері.

Для цього за допомогою насоса реакційна суміш спрямовується в анаеробний відстійник, де відбувається розділення фаз. Осад, який містить анаеробні мікроорганізми та не зброджені органічні речовини, спрямовується до першого реактора на подальше анаеробне зброджування, а рідка фаза – до другого ферментера. В разі утворення надлишкового анаеробного мулу, він відправляється на стадію осушування для можливого подальшого використання його в якості добрива.

У другий ферментер стічна вода подається знизу реактора. Для підвищення ефективності процесу та збільшення концентрації асоціації мікроорганізмів активного мулу необхідно використовувати або гранульований активний мул або іммобілізовану на інертному носії асоціацію мікроорганізмів. Для утворення гранул активного мулу у метантенк вводять центри грануляції (активоване вугілля, силікагель, FeCl_3 , дробина тощо).

В метантенку другого ступеня анаеробного зброджування відбувається подальший розклад розчинених у середовищі органічних речовин з отриманням біогазу та очищенням стічних вод. Тут зберігаються такі ж параметри процесу, як і в реакторі першого ступеня: $t^0 = 40 \pm 2$ °С, швидкість перемішування 100 об/хв, рН = $7 \pm 0,5$. Реактор оснащено системою підігріву за рахунок температури післяспиртової барди. Час знаходження води в реакторі залежить від вихідної концентрації забруднювальних речовин та концентрації активного мулу. Маючи значення ХСК 6 г O_2 / дм^3 і вміст активного гранульованого мулу у другому реакторі 10 ± 1 г / дм^3 , питома швидкість очищення стічної води досягала 30 ± 2 мг ХСК / (г·год).

Біогаз, що утворюється на першому та другому ступені анаеробного зброджування, накопи-

чується в газгольдерах мокрого типу, з яких через систему очищення від води та H₂S подається на когенераційну установку. Вихід біогазу при зброджуванні післяспиртової барди з пташиним послідом становить 380±20 см³/г СОР з вмістом метану в ньому 70±2%.

Очищена вода поступає в анаеробний другий відстійник, звідки частина надлишкового мулу рухається до другого ферментера, а частина на осушування. Осад з відстійників першого та другого ступеня після підсушування на мулових майданчиках є добривом, яке може застосовуватися для підвищення врожайності зернових культур, що використовуються для виробництва спирту.

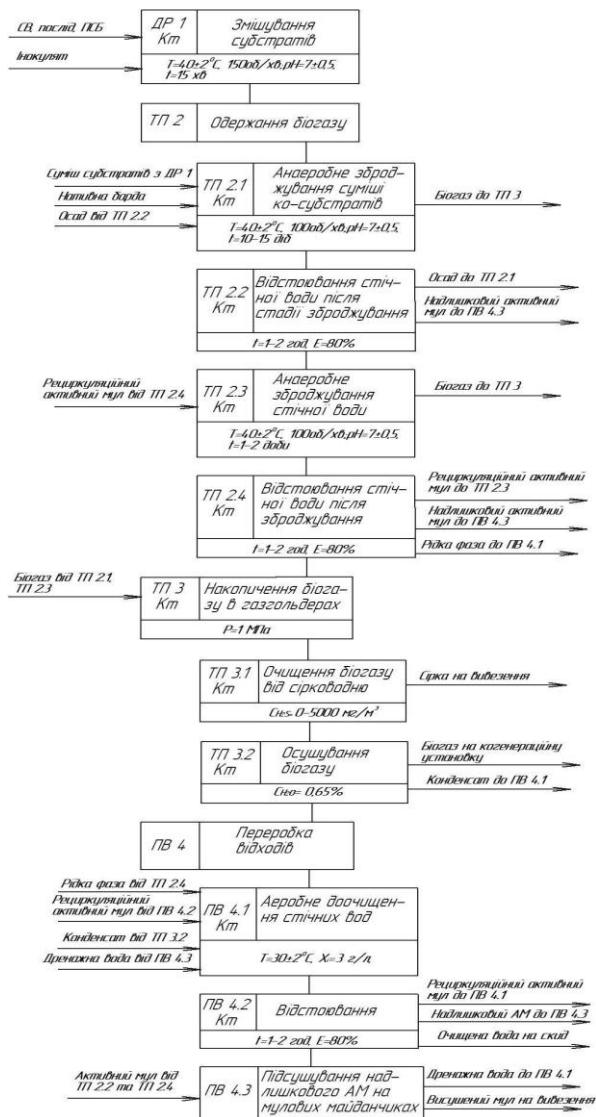


Рис. 2. Технологічна схема одержання біогазу з післяспиртової барди.

Fig. 2 Process map of biogas production from distillery spent wash.

Після очищення стічної води в анаеробному реакторі до значень ХСК, які не перевищують 500 мг О₂/дм³, стічна вода направляється на доочищення в аеробний реактор. Очищена до норм скиду вода після відстоювання у третьому відстійнику надходить до каналізаційної мережі. Дренажна вода з мулових майданчиків також спрямовується до аеротенків.

Технологічна схема одержання біогазу з відходів спиртового виробництва та очищення висококонцентрованої стічної води наведена на рис. 2.

Висновки. 1. Використання посліду як ко-субстрату дозволяє корегувати значення рН середовища, забезпечує мікроорганізми необхідними мікроелементами та дає можливість створити співвідношення С:N (30:1) для забезпечення раціональних параметрів процесу зброджування післяспиртової барди з утворенням метану.

2. Висока температура післяспиртової барди (80–90 °С) та генерація тепла при метаногенезі дозволяє проводити ферментативний процес в мезофільному режимі (t⁰=40±2 °С) без використання додаткових енергоресурсів для підігріву.

3. Запропонована двостадійна технологічна схема утилізації відходів спиртового виробництва при коферментації з послідом дозволяє отримати енергоносій – біогаз з виходом 380±20 см³/г СОР з вмістом метану в ньому 70±2% та очистити концентровані стічні води до норм, які використовуються в аеробному процесі очищення стічних вод.

1. Mohana S., Acharya Bh.K., Madamwar D. Distillery Spent Wash: Treatment Technologies and Potential Applications. Journal of Hazardous Materials. – 2009. – Vol. 163, №1. – P. 2–25.

2. Moraes B.S., Triolo J.M., Lecona V.P., Zaiat M., Sommer S.G. Biogas Production Within The Bioethanol Production Chain: Use of Co-substrates For Anaerobic Digestion of Sugar Beet Vinasse. Bioresource Technology. – 2015. – Vol. 190. – P. 227–234.

3. Prakash N.B., Sockan V., Sitarama Raju V. Anaerobic Digestion of Distillery Spent Wash. Journal of Science and Technology. – 2014. – Vol. 4. – №3. – P. 134–140.

4. Silva C.E., Abud A.K. Anaerobic Biodigestion of Sugarcane Vinasse Under Mesophilic Conditions Using Manure As Inoculum [Електронний ресурс]. SciELO. 2016. Режим доступу: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1980-993X2016000400763&script=sci_arttext (20.09.2017).

5. Syaichurrozi I., Budiyo V., Sumardiono S. Predicting Kinetic Model of Biogas Production and Biodegradability Organic Materials: Biogas Production From Vinasse At Variation of COD/N Ratio. *Bioresource Technology*. – 2013. – №149. – P. 390–397.

6. Westerholma M., Hansson M., Schnürer A. Improved Biogas Production From Whole Stillage By Co-digestion With Cattle Manure. *Bioresource Technology*. – 2012. – №114. – P. 314–319.

7. Wilkie A.C., Riedesel K.J., Owens J.M. Stillage Characterization and Anaerobic Treatment of Ethanol Stillage From Conventional and Cellulosic Feedstocks. *Biomass and Bioenergy*. – 2000. – №19. – P. 63–102.

8. Голуб Н.Б., Потапова М.В. Вплив співвідношення косубстратів на вихід біогазу при утилізації післяспиртової барди. *Відновлювана енергетика*. – 2017. – №2(49). – С. 90-97.

9. Дыганова Р.Я., Беляева Ю.С. Экспериментальное определение оптимального состава комплексного субстрата для анаэробного сбраживания в спиртовой промышленности. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2014. – Т. 16. – №1(6). – С. 1737–1740.

10. Кузнецов И.Н., Ручай Н.С. Анализ мирового опыта в технологии переработки послеспиртовой барды. *Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 4: Химия, технология органических веществ и биотехнология*. – 2010. – Т. 1, №4. – С. 294 – 301.

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОГАЗА С ПОСЛЕСПИРТОВОЙ БАРДЫ

Н.Б. Голуб, доктор технических наук, профессор, **М.В. Потапова**, аспирант.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского»
03056 г. Киев, пр-т Перемоги, 37.

Технология переработки послеспиртовой барды с получением биогаза включает в себя несколько этапов: наработка высокопроизводительного посевного материала, смешивание косубстратов в контактном резервуаре, две ступени анаэробного сбраживания, чередующиеся стадиями отстаивания. Данная технологическая схема позволяет достичь допустимых концентраций загрязнений ($X_{CK} \leq 500 \text{ мг/дм}^3$) для аэробной доочистки высококонцентрированных сточных вод спиртзавода. Также двухступенчатый процесс позволяет достичь высокой степени конверсии органических загрязнений в энергоноситель – биогаз. Выход биогаза – $380 \pm 20 \text{ см}^3 / \text{г СОР}$, содержание метана – $70 \pm 2\%$. Библ. 10, рис. 2.

Ключевые слова: послеспиртовая барда, биогаз, анаэробное сбраживание, помет, метан, коферментация, отходы.

REFERENCES

1. Mohana S., Acharya Bh.K., Madamwar D. Distillery Spent Wash: Treatment Technologies and Potential Applications. *Journal of Hazardous Materials*. – 2009. – Vol. 163, №1. – P. 2–25.

2. Moraes B.S., Triolo J.M., Lecona V.P., Zaiat M., Sommer S.G. Biogas Production Within The Bioethanol Production Chain: Use of Co-substrates For Anaerobic Digestion of Sugar Beet Vinasse. *Bioresource Technology*. – 2015. – Vol. 190. – P. 227–234.

3. Prakash N.B., Sockan V., Sitarama Raju V. Anaerobic Digestion of Distillery Spent Wash. *Journal of Science and Technology*. – 2014. – Vol. 4. – №3. – P. 134–140.

4. Silva C.E., Abud A.K. Anaerobic Biodigestion of Sugarcane Vinasse Under Mesophilic Conditions Using Manure As Inoculum [Электронный ресурс]. *SciELO*. 2016. Режим доступа: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1980-993X2016000400763&script=sci_arttext (20.09.2017).

5. Syaichurrozi I., Budiyo V., Sumardiono S. Predicting Kinetic Model of Biogas Production and Biodegradability Organic Materials: Biogas Production From Vinasse At Variation of COD/N Ratio. *Bioresource Technology*. – 2013. – №149. – P. 390–397.

6. Westerholma M., Hansson M., Schnürer A. Improved Biogas Production From Whole Stillage By Co-digestion With Cattle Manure. *Bioresource Technology*. – 2012. – №114. – P. 314–319.

7. Wilkie A.C., Riedesel K.J., Owens J.M. Stillage Characterization and Anaerobic Treatment of Ethanol Stillage From Conventional and Cellulosic Feedstocks. *Biomass and Bioenergy*. – 2000. – №19. – P. 63–102.

8. Golub N., Potapova M. Influence Of The Cosubstrates Ratio To The Output of Biogas Under Utilization of Distillery Spent Wash. *Vidnovluvana energetika*. – 2017. – №2(49). – С. 90–97 (Ukr.)

9. Dyganova R., Belyaeva Yu. Experimental Determination of The Optimal Composition of A Complex Substrate For Anaerobic Digestion In The Alcohol Industry. *Izvestiya of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. – 2014. – Vol. 16. – №1(6). – P. 1737–1740 (Rus.)

10. Kuznetsov I., Ruchai N. Analysis of The World Experience In The Technology of Distillery Spent Wash Processing. *Proceedings of BSTU. Series 4: Chemistry, organic matter technology and biotechnology*. – 2010. – Vol. 1. – №4. – P. 294–301 (Rus.)

SYNOPSIS

Today, considering the problems of anthropogenic impact on the environment and depletion of natural resources, the development of technological schemes that are the basis for the creation of technologies for the waste processing with the simultaneous receipt of alternative energy sources is relevant.

The alcohol industry has a problem with the utilization of distillery spent wash (DSW), which is formed in large quantities in the process of alcohol production. The use of anaerobic fermentation will allow not only to clear highly concentrated wastewater but also to obtain biogas. The problem of using anaerobic fermentation of pure form of DSW lies in its low pH values, which makes it impossible for fermentation processes and insufficient content of nitrogen compounds to be necessary for the development of microorganisms-destroyers and methane

producers. Unlike the investigated methods, where chemicals are used to neutralize pH and provide nutrients, we propose to carry out the process of DSW co-fermentation with a poultry manure.

The purpose of the work is to develop a technological scheme for the purification of highly concentrated distillery wastewater with the simultaneous production of biogas.

The proposed technological scheme consists of two stages of fermentation, which allows a high yield of biogas at the expense of a balanced content of nutrients and a dry organic matter content in the first fermenter and stabilizes the pH at the level of $7,0 \pm 0,5$. In order to achieve the required degree of purification of highly concentrated distillery wastewater (DSW) and the maximum conversion of pollutants into biogas, fermentation of the liquid fraction, after separation of the solid residue, is carried out in a second fermenter.

The rational parameters of the anaerobic fermentation of DSW for obtaining the maximum biogas yield are established: the ratio for dry organic matter of wastewater /DSW /poultry manure – 0.2: 1: 7, the concentration of dry organic matter in the first fermenter - up to 10%, temperature – 40 ± 2 °C, stirring rate – 100 rpm, pH= $7,0 \pm 0,5$.

With the use of the given technological scheme, the output of biogas is 380 ± 20 cm³ /g of dry organic matter, the content of methane in biogas – $70 \pm 2\%$. The COD of water after the solid phase removal after the second fermenter is 500 ± 20 mg O₂ /dm³.

РЕФЕРАТ

Сьогодні на фоні проблем антропогенного впливу на навколишнє середовище та виснаження природних ресурсів, розробка технологічних схем, які є підґрунтям для створення технологій переробки відходів з одночасним одержанням альтернативних джерел енергії, є актуальною.

Спиртова промисловість має проблему утилізації післяспиртової барди (ПСБ), яка утворюється у великому обся-

зі в процесі виробництва спирту. Використання процесів анаеробної ферментації дозволить не тільки очистити висококонцентровану стічну воду, а і одержати біогаз. Проблема використання процесу анаеробного зброджування барди в чистому вигляді полягає у її низьких значеннях pH, що унеможливає ферментаційні процеси, та у недостатньому вмісті сполук нітрогену, які необхідні для розвитку мікроорганізмів-деструкторів і продуцентів метану. На відміну від досліджуваних способів, де використовують хімічні речовини для нейтралізації pH та забезпечення живильними речовинами, нами пропонується проводити процес коферментації ПСБ з пташиним послідом.

Метою роботи є розробка технологічної схеми очищення висококонцентрованих стічних вод спиртового виробництва з одночасним одержанням біогазу.

Запропонована технологічна схема складається з двох стадій ферментації, що дозволяє в першому ферментері за рахунок збалансованого вмісту поживних речовин і вмісту сухої органічної речовини 10% одержувати високий вихід біогазу та стабілізувати значення pH на рівні $7,0 \pm 0,5$. Для досягнення необхідного ступеня очищення висококонцентрованих стічних вод (ПСБ) спиртзаводу та максимальної конверсії забруднювальних речовин у біогаз, ферментацію рідкої фракції, після відокремлення твердого залишку, проводять у другому ферментері.

Встановлено раціональні параметри процесу анаеробного зброджування ПСБ для отримання максимального виходу біогазу: співвідношення за сухою речовиною стічна вода /ПСБ /послід – 0,2:1:7, концентрація СОР в першому ферментері – до 10%, температура – 40 ± 2 °C, швидкість перемішування – 100 об /хв, pH= $7,0 \pm 0,5$.

За використання наведеної технологічної схеми вихід біогазу становить 380 ± 20 см³ /г СОР, вміст метану в ньому – $70 \pm 2\%$. Показник ХСК води після виділення твердої фази після другого ферментера складає 500 ± 20 мг O₂ /дм³.

Стаття надійшла до редакції 23.01.18

Остаточна версія 08.06.18