

УДК 662.763.3.2

**ПОКРАЩЕНА ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ БІОГАЗУ З УРАХУВАННЯМ
ТЕРМІЧНОЇ ТА БІОТЕХНОЛОГІЧНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ В РЕАКТОРАХ
БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ**

С. А. Шворов, доктор технічних наук, професор

Є. О. Антипов, кандидат технічних наук, старший викладач

В. І. Троханяк, кандидат технічних наук, старший викладач

Національний університет біоресурсів і природокористування України

e-mail: ievgeniy_antypov@ukr.net

Анотація. *Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що в біогазових установках не передбачається застосування різних видів сезонної біомаси. При цьому неоптимальне керування процесом завантаження різних видів субстратів може призвести до значного зменшення виходу біогазу. У цій роботі розглянуто проблему термічної та біотехнологічної стабілізації в реакторах біогазової установки. Запропоновано методіку оптимізації параметрів системи термостабілізації метантенка біогазових установок. Проведено аналіз умов, що впливають на інтенсифікацію процесу метанового зброджування. Визначено ступінь впливу на ефективність виробництва біогазу та його теплової цінності температурного режиму метантенка. Розглянуто основні поняття та означення стосовно цієї проблематики.*

Ключові слова: біогаз, субстрат, метантенк, температурний режим, енергозберігаюча технологія

Актуальність. У будь-якому біотехнологічному процесі основну роль грає біологічний агент - мікроорганізми, його природа і фізіолого-технологічні властивості. При цьому дуже важливим фактором ефективного протікання процесу ферментації є температура маси, що зброджується. Метанова ферментація починається при температурі 6 °С. При більш низькій температурі виділення метану припиняється. Одночасно із ростом температури швидко збільшується виділення газу. Так, при температурі 30 °С виділення біогазу відбувається в 12 разів швидше, ніж при температурі 10 °С. Розрізняють чотири основних рівня характерних температур, при яких може виникати метанове бродіння в реакторах біогазової установки (БГУ): психрофільний режим

12...20 °С; мезофільний - 32...35 °С; термотолерантний - 39...42 °С; термофільний - 52...54 °С. У випадку переходу з одного рівня температур до іншого, відбувається зміна класу бактерій. В цей період спостерігається зменшення продуктивності установки по біогазу оскільки, температура впливає на кількість газу, що можна отримати за визначений проміжок часу, на технологічний час ферментації, а також на склад і якість біогазу та отримуваних добрив. Не дивлячись на те, що процес розкладання целюлози в термофільних умовах проходить в 14 разів інтенсивніше, ніж у мезофільних, а кількість біогазу, що отримується, на 25-30 % вище в термофільних умовах, термофільні процеси мають меншу стабільність, ніж мезофільні, а допустимі коливання температури значно знижуються. Для стабільного розвитку і життєдіяльності бактерій, відхилення температури в реакторі БГУ від номінальної повинно не перевищувати 2,8 °С. Термостабілізація останнього забезпечується різними теплообмінними пристроями та відповідною теплоізоляцією, а самі метантенки повинні мати мінімальну площу поверхні або підземне чи напівпідземне розташування [1].

Аналіз останніх досліджень та публікацій показав, що одним із перспективних напрямків підвищення ефективності функціонування біогазових установок, також, є розробка високоефективної технології, за допомогою якої забезпечується більш інтенсивна переробка різних видів субстратів у біогазових установках. Оскільки, як показує аналіз праць [2, 3], у вже встановленому технологічному процесі не передбачається застосування в БГУ різних видів сезонної біомаси, бо фіксоване дозування вхідних субстратів визначається ще на етапі конструювання БГУ. При цьому, неоптимальне керування процесом завантаження різних видів субстратів може призвести до значного зменшення виходу біогазу.

Мета дослідження – розробка високоефективної технології отримання максимальних об'ємів біогазу шляхом як підготовки вхідних субстратів з оптимальним дозуванням спеціальних домішок, так і збалансованого

використання надлишкової теплової енергії когенераційної установки в літній період.

Матеріали і методи дослідження. Одним із шляхів підвищення енергоефективності роботи БГУ є зменшення затрат енергоносіїв на забезпечення її технологічних процесів з одночасним підвищенням кількості вихідного продукту (біогазу), яку можна забезпечити шляхом оптимального дозування та деструкційної (кавітаційної) обробки різних видів сировини, оптимального підігрівання і перемішування з необхідною інтенсивністю завантаженого субстрату, що забезпечить ефективне використання всього об'єму резервуара БГУ, виключить утворення «мертвих» зон, розшарування осаду, відкладання мінералізованого осаду та появу кірки, а також сприятиме вирівнюванню температурного поля та покращенню газоутворення.

Процес інтенсифікації зброджування полягає в тому, що потік різних видів сировини у роторно-пульсаційному апараті БГУ подрібнюється до необхідного мікроскопічного рівня та гомогенізується. У процесі обробки рвуться зв'язки довгих волокон (лігнін, целюлоза), які зменшуються в розмірах до 0,1 мкм. Тому бактеріям, які беруть участь в процесах утворення біогазу, легше розкласти біогенні матеріали. У результаті вміст метану в біогазі збільшується до 70-75 %.

На рис. 1 представлено структурну схему покращеної технології отримання біогазу. Основою вискоєфективної технології є система керування БГУ, за допомогою якої забезпечується дозування різних видів сировини, подрібнювання її до необхідного мікроскопічного рівня та оптимальне дозування спеціальних домішок, а затрати енергії на термостабілізацію анаеробного бродіння біомаси та на покриття тепловтрат будуть відшкодовані надлишковою тепловою енергією когенераційної установки в літній період. Під домішками в цьому випадку розуміється суміш з ензимів, мікроелементів тощо, застосування яких забезпечує збільшення виходу біогазу від 20 до 40 % без зміни конструкції біогазової станції. На біогазових установках у Німеччині домішки такого типу дають гарантований

вихід біогазу до 45 %. Орієнтовна їх вартість становить близько 42 EUR/кг, при витраті 1-2 кг за добу для біогазової електричної станції з потужністю 1 МВт.

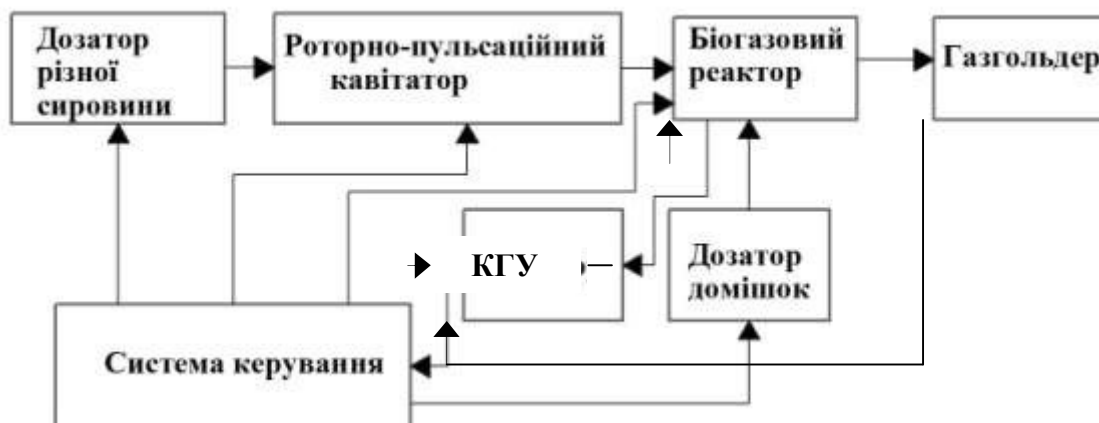


Рис. 1. Структурна схема технології отримання біогазу

Для визначення тепловтрат діючої біогазової установки по місяцях при розрахунку обрано такі вихідні дані:

- біогазова установка постійної дії з термотолерантним режимом роботи (39...42 °С) об'ємом 4х3600 м³, розмір кожного реактору якої: висота 8 м; діаметр 24 м, які ізольовані мінеральною ватою шаром 100 мм, при цьому термічний опір стінки складає 2,38 (м²·К)/Вт [4];
- біомаса займає 85 % всього об'єму реактора;
- параметри вхідної сировини: жом цукрового буряку – 160 т/добу вологістю 75 %, курячий послід – 40 т/добу вологістю 75 %;
- розрахункові температури нової порції біомаси в теплий та холодний період року відповідає температурі навколишнього середовища;
- потужність когенераційної установки (КГУ) по виробництву теплової енергії – 2378 кВт·год.

Результати дослідження та їх обговорення. Як показують результати теоретичних та практичних досліджень, найбільший вихід біометану дають субстрати з високою концентрацією енергії: свіжа трава, бадилля буряка, кукурудза, зернові рослини. Найменший вихід біогазу з органічного сухого субстрату має солома.

У промислових обсягах біогаз отримують переважно з органічних відходів, ґрунтуючись на керованому процесі розкладання різних видів органічної сировини в анаеробних (безкисневих) умовах. Процес виробництва біогазу можна розділити на чотири фази: гідроліз, кислотогенез, ацетогенез та метаногенез.

Під час гідролісної фази в результаті життєдіяльності бактерій стійкі субстанції (протеїни, жири та вуглеводи) розкладаються на прості складові (амінокислоти, глюкозу, жирові кислоти). Отримані під час гідролісної фази прості складові розкладаються на органічні кислоти (оцтову, пропіонову, масляну), спирт, альдегіди, водень, діоксид вуглецю, а також такі гази, як аміак і сірководень. Цей процес протікає доти, поки розвиток бактерій не сповільнюється під впливом утворених кислот. На третій фазі з кислот, утворених під час кислотоутворюючої фази, під впливом ацитогенних груп бактерій виробляється оцтова кислота. На останній фазі оцтова кислота розкладається на метан, вуглекислий газ і воду.

Разом з тим, як уже зазначалось раніше, на кожному етапі є важливим як вплив температурного режиму роботи реактора БГУ, так і ступінь подрібнення частинок субстрату і його перемішування з необхідною інтенсивністю, що забезпечить ефективне використання всього об'єму резервуара БГУ, виключить утворення «мертвих» зон, розшарування осаду, відкладання мінералізованого осаду, появу кірки, сприятиме вирівнюванню температурного поля і покращенню проходження процесів газоутворення.

З огляду на зазначене, на основі застосування вискоефективної технології отримання біогазу на основі деструкційної (кавітаційної) обробки різних видів сировини з оптимальним дозуванням спеціальних домішок забезпечується [5]:

- реалізація необхідного ступеню подрібнення і гомогенізації сировини, що інтенсифікує виробництво біогазу;
- зменшення періоду зброджування біомаси завдяки високій дисперсності біомаси і інтенсифікації процесів анаеробного бродіння;

- економія витрат на будівництво і експлуатацію БГУ;
- інтенсивне вивільнення природних ензимів, які є біологічними каталізаторами процесу зброджування біомаси, що також збільшує обсяг виробленого біогазу;
- стабілізація температурних та біологічних процесів за деструкції біомаси з клітинних і субклітинних матеріалів, що не допускає піноутворення і плаваючої кірки у верхній частині біореактора. Таким чином, увесь корисний об'єм реактора використовується ефективно. Процентний вміст метану в біогазі збільшується до 70-75 %.

За методикою [6] виконано числове моделювання затрат енергоносіїв на забезпечення технологічного процесу запропонованою схемою енергоощадної біогазової установки (див. табл. 1).

1. Питомі затрати енергоносіїв на забезпечення технологічних процесів біогазової установки [8]

Параметри	Холодний період, кВт·год./м ² (м ³)	Теплий період року, кВт·год./м ² (м ³)	Річні, кВт·год./м ² (м ³)
Мезофільний режим			
Тепловтрати через поверхню резервуара	101,38	45,62	147,00
Втрати на підігрів нової порції біомаси	56,77	25,55	82,32
Термотолерантний режим			
Тепловтрати через поверхню резервуара	114,05	58,29	172,34
Втрати на підігрів нової порції біомаси	63,87	32,64	96,51
Термофільний режим			
Тепловтрати через поверхню резервуара	147,00	91,24	238,24
Втрати на підігрів нової порції біомаси	82,33	51,10	133,43

Приймаючи до уваги те, що всі чотири реактори замовника, загальний об'єм біомаси в яких 14445,3 м³, працюють в термотолерантному режимі, а також циклічність завантаження реакторів 2x100 т/добу з інтервалом у 12 годин,

теплова потужність установки для підтримання та прогріву нової порції біомаси за 1 годину, становитиме:

1. У холодну пору року (при середній температурі зовнішнього повітря $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$) [7]: для термотолерантного режиму роботи ($40\text{ }^{\circ}\text{C}$) – $6,5\text{ МВт}\cdot\text{год.}$, термофільного ($53\text{ }^{\circ}\text{C}$) – $8,38\text{ МВт}\cdot\text{год.}$

2. В літній період року (при середній температурі зовнішнього повітря $+17\text{ }^{\circ}\text{C}$) [7]: для термотолерантного режиму роботи – $3,32\text{ МВт}\cdot\text{год.}$, термофільного – $5,2\text{ МВт}\cdot\text{год.}$

Споживана енергія для розігрівання реактора протягом 12 годин, за всіх інших рівних умов, при його роботі в термофільному режимі повинна становити: у першому варіанті $0,83\text{ МВт}\cdot\text{год.}$, у другому $0,52\text{ МВт}\cdot\text{год.}$

Враховуючи різницю у споживаній тепловій потужності першого та другого варіантів, а також номінальну теплову потужність когенераційної установки, час роботи останньої, при роботі реакторів БГУ в термофільному режимі, повинен становити (за умови прогріву нової порції біомаси):

- за 1 годину - як у першому, так і у другому варіанті – по $0,8$ годин;
- за 12 годин: $0,35$ години у першому варіанті, та $0,22$ години – у другому.

Тобто, номінальна теплова потужність когенераційної установки достатня для забезпечення покриття теплового навантаження та здійснення переходу роботи реакторів БГУ з термотолерантного до термофільного режиму навіть у холодний період року. Такий крок не потребує значних капіталовкладень, а економічний ефект від його здійснення призведе до збільшення виходу біогазу, щонайменше в $1,5 - 2$ рази, а звідси, і до зниження вартості 1 кВт встановленої потужності.

Разом з тим, попередні розрахунки показують, що додаткове збільшення товщини шару теплової ізоляції на 50 мм сприяє зниженню теплових втрат через поверхню резервуара на $15...20\%$, що в свою чергу призводить до додаткового скорочення споживання енергії, яке, на прикладі мезофільного режиму роботи,

становить 3,6 % або 21 кВт·год./м³. Термін окупності заходу - менше 6-ти місяців.

У підсумку, аналіз отриманих результатів свідчить, що затрати енергії на інтенсифікацію процесів анаеробного бродіння біомаси для кліматичних умов Київської області можуть досягати до 250 кВт·год/рік на 1 м³ установки для мезофільного режиму та майже 400 кВт·год/рік на 1 м³ - для термофільного режиму роботи БГУ. Ці затрати можуть бути компенсовані за рахунок використання надлишкової теплової енергії КГУ відповідно до запропонованої енергоощадної схеми БГУ і конструкції реактора з покращеною теплоізоляцією.

Висновки і перспективи.

1. Збільшення температурного режиму метанового зброджування веде до збільшення виходу біогазу, однак при цьому також і збільшуються витрати на підігрівання субстрату.

2. При переході влітку і восени на термофільний режим ферментації, при тому ж обсязі метантенка, вихід біогазу збільшиться щонайменше в 1,5 - 2 рази, що додатково веде до зниження вартості 1 кВт встановленої потужності.

3. Споживана енергія для розігрівання реактора протягом 12 годин, за всіх інших рівних умов, при його роботі в термофільному режимі повинна становити: у зимовий період 0,83 МВт·год., у літній - 0,52 МВт·год.

4. Встановлено, що збільшення товщини шару теплової ізоляції на 50 мм сприяє зниженню теплових втрат через поверхню резервуара на 15...20 %, що в свою чергу призводить до скорочення споживання енергії, яке, на прикладі мезофільного режиму роботи, становить 3,6 % або 21 кВт·год./м³. Термін окупності заходу - менше 6-ти місяців.

5. Розраховано час роботи когенераційної установки, який повинен становити (за умови прогріву нової порції біомаси): за 1 годину - як у першому, так і у другому варіанті – по 0,8 годин; за 12 годин: 0,35 години у першому варіанті, та 0,22 години – у другому.

6. Показано, що номінальна теплова потужність когенераційної установки

достатня для забезпечення покриття теплового навантаження та здійснення переходу роботи реакторів БГУ з термотолерантного до термофільного режиму навіть у холодний період року.

7. Знайдено, що затрати енергії на інтенсифікацію процесів анаеробного бродіння біомаси для кліматичних умов Київської області можуть досягати до 250 кВт·год/рік на 1 м³ установки для мезофільного режиму та майже 400 кВт·год/рік на 1 м³ - для термофільного режиму роботи БГУ.

8. Застосування високоефективної технології отримання біогазу на основі деструкційної (кавітаційної) обробки різних видів сировини з оптимальним дозуванням спеціальних домішок не допускає піноутворення і плаваючої кірки у верхній частині біореактора та сприяє більш ефективному використанню всього об'єму реактора БГУ.

Список літератури

1. Поліщук В. М. Вплив режимів метанового бродіння на ефективність виробництва біогазу [Текст] / В. М. Поліщук, М. М. Лободко, О. В. Сидорчук, О. В. Поліщук // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування. - 2013. – № 185, ч. 3. – С. 180-191.

2. Сидоров Ю. І. Сучасні біогазові технології / Ю. І. Сидоров // *Biotechnologia acta.* – 2013. – Vol. 6, №1. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://biot_2013_6_1_6.pdf.

3. Эдер Б. Биогазовые установки. Практическое пособие / Эдер Б., Шульц Х. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.zorg-biogas.com>.

4. Радько І. П. Методика та обладнання для проведення енергетичного аудиту: [Електронний ресурс] / І. П. Радько, В. А. Наливайко, О. В. Окушко, А. В. Міщенко, Є. О. Антипов // *Енергетика та автоматика.* – 2018. – № 1. – С. 123–134. – Режим доступу: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/viewFile/10596/9329>.

5. Стародуб Н. Ф. Розробка високоефективної технології отримання біогазу [Текст] / Н. Ф. Стародуб, С. А. Шворов, Д. С. Комарчук, В. Є. Лукін, В. В. Устимчук // *Енергетика та автоматика.* – 2017. – № 2. – С. 38–50.

6. Ратушняк Г. С. Біогазові установки з відновлюваними джерелами енергії термостабілізації процесу ферментації біомаси [Текст] / Г. С. Ратушняк, О. Г. Лялюк, І. А. Кощєєв. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 110 с.

7. Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Ізмаїловича Срезневського: Кліматичні дані по м. Києву [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.cgo.kiev.ua/index.php?fn=k_klimat&f=kyiv&r=1.

8. Шворов С. А. Науково-технічні рекомендації щодо інтенсифікації процесів

анаеробного зброджуння в реакторах біогазових установок [Текст] / С. А. Шворов, Є. О. Антипов // Енергетика та автоматика. – 2018. – № 3. – С. 95–105.

References

1. Polischuk, V. M., Lobodko, M. M., Sidorchuk, O. V., Polischuk, O. V. (2013). Vplyv rezhymiv metanovoho brodinnya na efektyvnist vyrobnytstva biohazu [The influence of methane fermentation regimes on the efficiency of biogas production]. Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannya, 185, (3), 180-191.
2. Sidorov, Yu. I. (2013). Suchasni biohazovi tekhnolohiyi [Modern biogas technologies]. Biotechnologia acta, 6, 1. – Available at : http://biot_2013_6_1_6.pdf.
3. Eder, B., Schulz, H. (1996). Biogazovyue ustanovki. Prakticheskoye posobiye [Biogas plants. Practical guide]. Zorg Biogas, 268. – Available at : http://zorgbiogas.ru/upload/pdf/Biogas_plants_Practics.pdf.
4. Radko, I. P., Nalyvayko, V. A., Okushko, O. V., Mishchenko, A. V., Antypov, I. O. (2018). Metodyka ta obladdannya dlya provedennya enerhetychnoho audytu [Methodology and equipment for energy audit]. Enerhetyka ta avtomatyka, 1, 123–134. – Available at: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/viewFile/10596/9329>.
5. Starodub, N. F., Shvorov, S. A., Komarchuk, D. S., Lukin, V. Yu., Ustimchuk, V. V. (2017). Rozrobka vysokoefektyvnoyi tekhnolohiyi otrymannya biohazu [Development of High-Efficiency Biogas Production Technology]. Enerhetyka ta avtomatyka, 2, 38–50.
6. Ratushniak, G. S., Lyalyuk, O. G., Koscheyev, I. A. (2017). Biohazovi ustanovky z vidnovlyuvanymy dzherelamy enerhiyi termostabilizatsiyi protsesu fermentatsiyi biomasy [Biogas plants with renewable energy sources for thermostabilization of biomass fermentation process]. Vinnytsya: VNTU, 110.
7. Central geophysical observatory named after Boris Izmailovich Sreznevsky: Climatic data on the city of Kyiv. – Available at: http://www.cgo.kiev.ua/index.php?fn=k_klimat&f=kyiv&p=1.
8. Shvorov, S. A., Antypov, I. O. (2018). Naukovo-tekhnichni rekomendatsiyi shchodo intensyfikatsiyi protsesiv anaerobnoho zbrodzhunnya v reaktorakh biohazovykh ustanovok [Scientific and technical recommendations on the intensification of anaerobic fermentation processes in reactors of biogas installations]. Enerhetyka ta avtomatyka, 3, 95–105.

УЛУЧШЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОГАЗА С УЧЕТОМ ТЕРМИЧЕСКОЙ И БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ В РЕАКТОРАХ БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ

С. А. Шворов, Е. А. Антипов, В. И. Троханяк

Аннотация. *Анализ последних исследований и публикаций показывает, что в биогазовых установках не предвидится применения различных видов сезонной*

биомассы. При этом неоптимальное управления процессом загрузки различных видов субстратов может привести к значительному уменьшению выхода биогаза. В данной работе рассмотрена проблема термической и биотехнологической стабилизации в реакторах биогазовой установки. Предложена методика оптимизации параметров системы термостабилизации метантенка биогазовых установок. Проведен анализ условий, влияющих на интенсификацию процесса метанового сбраживания. Определена степень влияния на эффективность производства биогаза и его тепловую ценность температурного режима метантенка. Рассмотрены основные понятия и определения по этой проблематике.

Ключевые слова: биогаз, субстрат, метантенк, температурный режим, энергосберегающая технология

IMPROVED TECHNOLOGY FOR OBTAINING BIOGAS TAKING INTO ACCOUNT THERMAL AND BIOTECHNOLOGICAL STABILIZATION IN BIOGAS INSTALLATION REACTORS

S. Shvorov, I. Antypov, V. Trohanyak

Abstract. *Analysis of recent research and publications shows that in biogas plants it is not foreseen the use of various types of seasonal biomass. At the same time, non-optimal control of the process of loading different types of substrates can lead to a significant decrease in biogas yield. This paper considers the problem of thermal and biotechnological stabilization in the reactors of a biogas plant. A method for optimizing the parameters of the system of thermostabilization of the digester of biogas plants is proposed. The analysis of conditions affecting the intensification of the methane digestion process has been carried out. The degree of influence on the efficiency of biogas production and its thermal value of the temperature regime of the digester is determined. The basic concepts and definitions on this issue are considered.*

Keywords: *biogas, substrate, methane tank, temperature conditions, energy-saving technology*