

УДК 621.3.09

**ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ ВПЛИВОМ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ТА УЛЬТРАЗВУКУ**

М. М. Заблодський, доктор технічних наук, професор

Національний університет біоресурсів і природокористування України.

П. Б. Клендій, кандидат технічних наук, доцент

Г. Я. Клендій, старший викладач

ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»

О.П. Дудар, інженер

ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний коледж»

e-mail: pklen_@i.ua

Анотація. Охарактеризовано режими роботи і необхідні технологічні параметри для досягнення високої ефективності роботи біореакторів та отримання максимальної кількості біогазу із одиниці об'єму біомаси. На інтенсивність процесу зброджування і, як наслідок, утворення біогазу впливають чотири групи факторів: біологічні, фізичні, хімічні та організаційно-технологічні. Оскільки оптимізація тих чи інших факторів призводить до зростання енергозатрат і собівартість біогазу наближається до вартості природного, що може бути економічно недоцільним і не дають потрібного ефекту. Тому науковці шукають інших факторів на інтенсифікацію метаногенезу. Одним із таких факторів є електромагнітні поля та ультразвук. У роботі проаналізовано вплив електромагнітних полів та ультразвуку на вихід біогазу. Узагальнено інформацію отриману вітчизняними та зарубіжними вченими в результаті досліджень щодо обробки субстрату електромагнітними полями з різними параметрами та ультразвуком. На основі проведеного аналізу виявлено, що субстрати оброблені електромагнітними полями та ультразвуком збільшують вихід біогазу

Ключові слова: *біогаз, електромагнітне поле, субстрат, ультразвук*

Актуальність. Зростаючий дефіцит паливних ресурсів та збільшення вартості традиційних видів палива (вугілля, нафтопродукти, природний газ тощо), висуває на перший план гостру необхідність пошуку альтернативних

джерел до яких належить біогаз — суміш з 65 % метану, 30 % вуглекислого газу, 1 % сірководню і незначних домішок азоту, кисню, водню і чадного газу [1]. В 1 м³ біогазу міститься енергія, еквівалентна 0,6 м³ природного газу, або 0,74 і 0,66 літри нафти чи дизельного палива, відповідно.

При виробництві метану значна кількість отриманої енергії витрачається на забезпечення процесу бродіння, а саме: дотримання необхідного температурного режиму всередині біореактора та перемішування субстрату, без яких ефективність процесу значно зменшується. Середнє споживання виробленої енергії для забезпечення процесу в самому біореакторі в широтах України становить: теплової — 15-30 %, й додатково електричної — 6-9 % [2]. При цьому після очищення біогазу від негорючих і шкідливих домішок його собівартість наближається до вартості природного, що може бути економічно недоцільним.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Відомо, що утворення біогазу відбувається при температурах від 0 °С до 97 °С і в цьому проміжку виділяють, умовно, три температурні режими [2]: психрофільний (до 20-25 °С), мезофільний (25-40 °С) і термофільний (понад 40 °С). Перший спостерігається в установках без підігріву, в яких відсутній контроль за температурою, і найбільш значне газовиділення відбувається при 23 °С. Другий і третій, для яких оптимальними є 34-37 °С і 52-54 °С, відповідно, притаманні для біогазових установок, що працюють на змішаній сировині тваринного походження. При цьому, інтенсивність виділення метану збільшується із зростанням температури і обмежується утворенням в результаті зброджування вільного аміаку, що сповільнює процес. Тому, на практиці, поширення набули саме останні режими, перевагою яких є підвищена швидкість розкладання сировини і більш високий вихід біогазу, а також практично повне знищення хвороботворних бактерій, що містяться в сировині, що дозволяє використовувати залишки субстрату як біологічні добрива.

Тривалість технологічного циклу переробки біомаси з погляду енергетики є визначальним фактором собівартості виробництва біогазу. Залежно від обраного температурного режиму і складу сировини повний час бродіння може перебувати в таких інтервалах, діб [2]: психрофільний (30-40 і більше), мезофільний (10-20) і термофільний (5-10). При цьому час нагрівання субстрату до максимальної температури, як правило, становить від 46 до 68 годин, а кількість спожитої енергії в цей період перевищує 50 % від загальної потреби на цикл.

Мета дослідження – систематизація та узагальнення інформації, отриманої вітчизняними та зарубіжними науковцями з досліджень інтенсифікації біометаногенезу та підвищення ефективності біогазових установок за рахунок електромагнітного та ультразвукового впливу на субстрат.

Матеріали та методи дослідження. Для досягнення високої ефективності роботи біореакторів та отримання максимальної кількості біогазу із одиниці об'єму біомаси необхідно створити оптимальні технологічні параметри в біореакторі [3]. На інтенсивність процесу зброджування і, як наслідок, утворення біогазу впливають чотири групи факторів: біологічні, фізичні, хімічні та організаційно-технологічні. Структурну схему шляхів інтенсифікації процесу анаеробного бродіння субстрату в біореакторах наведено на рис. 1.



Рис.1. Структурна схема шляхів інтенсифікації процесу анаеробного бродіння субстрату в біореакторах

До біологічних факторів відносяться: склад зброджуваної біомаси (вміст білків, жирів, вуглеводів, лігнінів); склад мікрофлори (кількість і групи мікроорганізмів відповідної стадії розкладання); умови життєдіяльності мікроорганізмів (вміст шкідливих домішок). Фізичні фактори включають: температуру зброджування; тиск у біореакторах; гідравлічний режим. Хімічні фактори визначаються кислотністю середовища (величина рН); вмістом летючих жирних кислот у зброджуваній масі; обсягом і складом біогазу, що утворюється. Організаційно-технологічні фактори передбачають: дозу добового завантаження нових порцій зброджуваної маси; навантаження за беззольною речовиною; вміст у біомасі речовин, що не піддаються переробці.

Приблизно обсяги витрат на власні потреби для конкретної установки можна цінити за технічними характеристиками виробника зазначеного обладнання, представленими в документації, але за їх відсутності або з метою уточнення для певної місцевості ефективність непроточного біореактора можна встановити методом розрахункового експерименту [4]. Як приклад за цією методикою було визначено тепловий баланс для метантенку, в якому цикл метаноутворення триває 19 діб за умов дотримання термофільного режиму та типових кліматичних умов північних регіонів України в зимовий період [5]. Динаміку температури та питомий вихід біогазу на 1 кг сухої біомаси зображено на рис. 2.

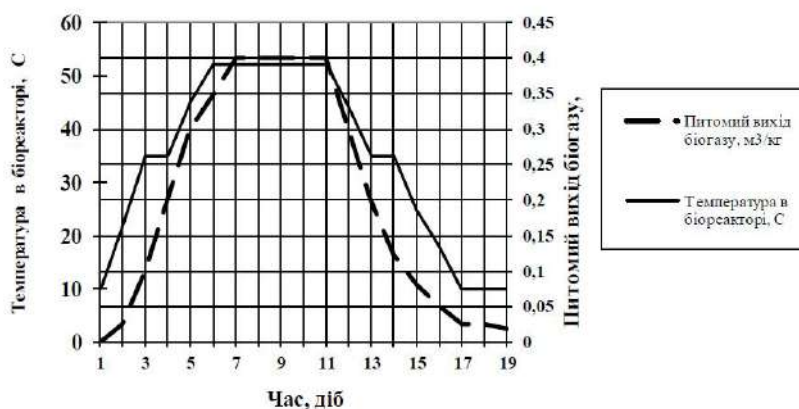


Рис. 2. Динаміка температури та виходу біогазу в реакторі

На інтенсивність процесу зброджування впливають такі параметри, як склад вуглеводневої фракції субстрату і кількість органічного азоту. З існуючих кінетичних моделей модель Канто може бути застосована до ширшого класу початкових субстратів. Вона описується з деякими допущеннями об'ємної швидкості виходу біогазу залежно від найважливіших параметрів процесу анаеробної ферментації [6]:

$$V = \frac{B_0 S}{T} \left(1 - \frac{K}{\mu T - 1 + K} \right) \frac{\text{Нм}^3}{\text{м}^3} \quad (1)$$

де V – об'ємна швидкість виходу біогазу, куб.м/куб.м добу; B_0 – граничний вихід біогазу з одиниці органічної речовини заданого складу при нескінченному часі експозиції, м³/кг; S – початкова концентрація органічної речовини в субстраті, кг/м³; T – час експозиції, діб; μ – максимальна питома швидкість росту мікроорганізмів в заданому процесі ферментації, K – кінетичний параметр.

Кінетичний параметр виражає залежність виходу біогазу від концентрації органічної речовини в субстраті в інтервалі температур від 30 до 60 °С. При концентрації органічної речовини в субстраті 30-100 г/л, $K = 1,5-2,0$; а при 100-150 г/л, до – 2-11,0. Максимальна питома швидкість росту мікроорганізмів описується лінійною функцією в діапазоні температур від 30 до 60 °С. Емпірична формула залежності кінетичного параметра від температури процесу і часу витримки при $T=45$ °С і $T=60$ °С:

$$K = [-0,947-0,5140+0,0112(T)(\Theta)+0,0004(T^2)] [275].$$

Розрахунок максимального виходу біогазу визначається за формулою [6]:

$$\gamma V_{max} = \frac{B_0 S_0 M_n}{(1+\sqrt{K})^2} \quad (2)$$

Залежність величини кінетичного параметра від концентрації органічної речовини в початковому субстраті

$$K=0,5 +0,03 \exp (0,058).$$

Бактерійний баланс в зброджуваному субстраті

$$\frac{dx}{dt} = \mu x - Dx \quad (3)$$

де x – концентрація бактерій, кг/м³; D – швидкість отмирання, 1/добу; μ – швидкість росту, 1/добу.

У наведених формулах фігурує параметр S – концентрація органічної речовини в початковому субстраті і приводяться значення емпіричних коефіцієнтів моделі, що відображають окремі випадки поза залежністю виходу біогазу від складу органічної речовини.

Інженерні моделі для визначення продуктивності біогазу найчастіше є емпіричними і регресійними залежностями, які одержані для конкретної біомаси за певних умов.

Використання електромагнітного НВЧ-випромінювання для підтримки оптимальних теплових режимів під час біометанування дозволяє досягти набагато більш високих технологічних ефектів порівняно зі звичайною системою опалення [7].

Результати досліджень та їх обговорення. Після обробки різних субстратів рослин до ферментації в модельних камерах ферментації, найкращі результати щодо ефективності виробництва біогазу та якості біогазу були зафіксовані в серії з кукурудзяним силосом та силосом з трави. У першому випадку кількість метану, виробленого в технологічній системі, стимульованій мікрохвильовим випромінюванням, становила 15,26 %, а при другому складі субстрату на 12,62 % більше кількості метану, що виробляється в реакторах без обробки [7].

При обробці субстрату (стічні води) ультразвуковим полем вихід біогазу зріс на 20-24 % порівняно з необробленим. При цьому максимальний вихід біогазу 0,92 дм³ спостерігався на 9 день ферментації. Вміст летких жирних кислот знизився до 139 мг СН₃СООН дм⁻³ протягом 20 днів. Нині результати

показують, що ефективність використання ультразвуку залежить від часу синхронізації, типу, а також потужності та частоти [8].

Експериментальні дослідження показали, що суттєвий вплив на процес метанового бродіння має магнітне поле з індукцією 0,38 Тл [9]. Позитивний ефект був досягнутий при найменшому значенні магнітного потоку 173×10^{-3} мВб, а найбільш ефективний варіант при магнітному потоці $3,016 \times 10^{-3}$ мВб. При цьому вихід біогазу зріс на 14 % порівняно з необробленим субстратом.

Електрокінетичний розпад є одним з високовольтних електричних методів. В електричному полі деформують клітинні стінки, завдяки чому їх вміст легко доступний бактеріям [10]. Значення напруги коливається від 10 до 100 кВ. Величина генеруючого струму не перевищує 250 мА. Руйнування структури біомаси в процесі електрокінетичного розпаду зумовлює скорочення часу утримання субстрату в резервуарі та прискорення виробництва біогазу, причому найбільше виробництва біогазу склало 18 %. Вторинний, але дуже значний для енергетичного балансу ефект - це відчутне зменшення споживання енергії змішувачами в метантенках. Це пояснюється зниженням в'язкості біомаси після розпаду і може призвести до економії енергії до 20-30 % від раніше зазначеного споживання.

Ефект є від попередньої обробки субстрату (пташиний послід) мікрохвильовим випромінюванням та ультразвуком [11]. Для дослідження були використані чотири реактори з об'ємом 2 л. Реактори експлуатували з гідравлічним утримувачем 30 днів і перемішували двічі на день. Дослідження показали, що обробка субстратів мікрохвильовим випромінюванням та ультразвуком викликало збільшення виробництва біогазу приблизно на 10-12 %.

Висновки і перспективи. У результаті аналізу наукових досліджень, що проводилися над різними субстратами при використанні електричного, мікрохвильового та ультразвукового впливу, встановлено, що існує пряма залежність біологічних ефектів в них від характеристик зазначених полів:

напруженості, частоти, форми імпульсу, типу модуляції і тривалості. Встановлено, що правильно підібрані параметри останніх можуть стимулювати процес виробництва біогазу та підвищити ефективність біогазових установок у цілому. Однак, через безсистемність та вибіркковість експериментів, а також явно випадковий їх характер і не оптимальність з точки зору енергетичного критерію, є необхідність подальшого уточнення та узагальнення параметрів інтенсифікації біометаногенезу на кожному його етапі, що дозволить, в перспективі, створити інструментарій динамічного керування зазначеним процесом на більш енергоефективному рівні.

Список літератури

1. Баадер В., Донэ Е., Брендерфельд М. Биогаз: теория и практика. – М., 1982. – 148 с.
2. Эдер Б., Шульц Х. Биогазовые установки. Практическое пособие: под научной редакцией Реддиха И.А. – ZorgBiogas, 2011. – 268 с/
3. Ратушняк Г. С. Енергоефективні технологічні процеси та обладнання біоконверсії: монографія / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 148 с.
4. Полищук В.Н. Энергетический баланс метантенка биогазовой установки / Полищук В. Н., Дубровин В. А., Полищук А.В. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.sworld.com.ua/konfer34/512.pdf.
5. Петров С. В. Применение электротехнологий при метановом сбраживании отходов / С. В. Петров, И. В. Решетникова, В. С. Вохмин // Инженерный вестник Дона. – 2012. – №3.
6. Майстренко О. Ю. Біогазові установки та методи їх розрахунку / О. Ю. Майстренко, Ю. В. Куріс, О. В. Ряснова. – Запоріжжя: Запорізька державна інженерна академія. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: rusnauka.com/26_NII_2009/Tecnic/52007.doc.htm.
7. The Effect of Microwave Radiation on Biogas Production Efficiency Using Different Plant Substrates / Marcin Zieliński, Marcin Dębowski, Mirosław Krzemieniewski. – World academy of science, engineering and technology, January 1999.
8. Ultrasonic Disintegration of Sewage Sludge to Increase Biogas Generation / I. Zawieja, L. Wolny // Chem. Biochem. Eng. Q., 27 (4) 491–497 (2013).
9. Effect of Constant Magnetic Field (CMF) with Various Values of Magnetic Induction on Effectiveness of Dairy Wastewater Treatment under Anaerobic Conditions / Marcin Zieliński, Marcin Dębowski, Mirosław Krzemieniewski, Magda Dudek, Anna Grala // Department of Environment Protection, University of Warmia

and Mazury in Olsztyn, Prawocheńskiego 1, 10-957 Olsztyn, Poland Received: 4 July 2012 Accepted: 25 September 2013.

10. Technology of Electro kinetic Disintegration of Virginia Fan petals (Sidahermaphrodita) Biomass in a Biogas Production System // World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Energy and Power Engineering Vol. 10, No.4, 2016.

11. Effect of substrate pretreatment on biogas production through anaerobic digestion of food waste / Marcin Dębowski, Mirosław Krzemieniewski // Article in International Journal of Hydrogen Energy, 42(42), · July 2017.

References

1. Baader V., Doné E., Brenderfeld, M. (1982). Biogaz: teoriya i praktika [Biogas: Theory and Practice]. Moskow, 148.

2. Eder, B., Schultz, H. (2011). Biogazovyye ustanovki. Prakticheskoye posobiye [Biogasplants. Practical manual]. ZorgBiogas, 268.

3. Ratuszniak, G.S., Anokhin, K.V. (2013). Enerhoefektyvni tekhnolohichni protsesy ta obladnannia biokonversii: monohrafiia [Energy-efficient technological processes and equipment of bioconversion: monograph]. Vinnitsa: VNTU, 148.

4. Polischuk, V M, Dubrovin, V A, Polischuk, A V. (2014). Energeticheskyy balans metantenka biogazovoy ustanovki [Energy balance of the methanetank of a biogas plant]. Available at: www.sworld.com.ua/konfer34/512.pdf.

5. Petrov, S. V, Reshetnikova, I. V., Vohmin V. S. (2012). Primeneniye elektrotekhnologiy pri metanovom sbrzhivaniy otkhodov [Application of electrotechnologies in methane fossilization of waste], Inzhenernyy vestnik Dona, 3.

6. Maystrenko; O. Yu., Curis; Yu. V., Rjasnova, O. V. (2009). Biohazovi ustanovky ta metody yikh rozrakhunku [Biogas plants and methods for their calculation]. Zaporizhzhia: Zaporizka derzhavna inzhenerna akademiia. Available at: rusnauka.com/26_NII_2009/Tecnic/52007.doc.htm.

7. Zieliński, Marcin, Dębowski, Marcin, Krzemieniewski, Mirosław (1999). The Effect of Microwave Radiation on Biogas Production Efficiency Using Different Plant Substrates. World academy of science, engineering and technology/

8. Zawieja, I., Wolny, L. (2013). Ultrasonic Disintegration of Sewage Sludge to Increase Biogas Generation. Chem. Biochem. Eng. Q., 27 (4), 491–497.

9. Zieliński, Marcin, Dębowski, Marcin, Krzemieniewski, Mirosław, Dudek, Magda, Grala, Anna (2012). Effect of Constant Magnetic Field (CMF) with Various Values of Magnetic Induction on Effectiveness of Dairy Wastewater Treatment under Anaerobic Conditions. Department of Environment Protection, University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Prawocheńskiego 1, 10-957 Olsztyn, Poland Received: 4.

10. Technology of Electro kinetic Disintegration of Virginia Fan petals (Sidahermaphrodita) Biomass in a Biogas Production System (2016). World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Energy and Power Engineering, 10 (4).

11. Dębowski, Marcin, Krzemieniewski, Mirosław (2017). Effect of substrate pretreatment on biogas production through anaerobic digestion of food waste. Article in International Journal of Hydrogen Energy, 42 (42).

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА БИОГАЗА ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И УЛЬТРАЗВУКА

Н.Н. Заблодский, П.Б. Клендий, Г.Я. Клендий, О.П. Дударь

Аннотация. *Охарактеризованы режимы работы и необходимые технологические параметры для достижения высокой эффективности работы биореакторов и получения максимального количества биогаза с единицы объема биомассы. На интенсивность процесса сбраживания и, как следствие, образование биогаза влияют четыре группы факторов: биологические, физические, химические и организационно-технологические. Поскольку оптимизация тех или иных факторов приводит к росту энергозатрат и себестоимости биогаза приближается к стоимости природного, что может быть экономически нецелесообразным и не дают нужного эффекта. Поэтому ученые ищут других факторов на интенсификацию метаногенеза. Одним из таких факторов являются электромагнитные поля и ультразвук. В работе проанализировано влияние электромагнитных полей и ультразвука на выход биогаза. Обобщена информация, полученная отечественными и зарубежными учеными в результате исследований по обработке субстрата электромагнитными полями с различными параметрами и ультразвуком. На основе проведенного анализа выявлено, что субстраты, обработанные электромагнитными полями и ультразвуком, увеличивают выход биогаза.*

Ключевые слова: *биогаз, электромагнитное поле, субстрат, ультразвук*

INTENSIFICATION OF PRODUCTION OF BIOGAS BY EXPOSURE OF ELECTROMAGNETIC FIELD AND ULTRASOUND

N. Zablodsky, P. Klendiy, G. Klendiy, O. Dudar

Abstract. *The article describes the operating modes and the necessary technological parameters for achieving high efficiency of bioreactors and obtaining the maximum amount of biogas per unit volume of biomass. The intensity of the digestion process and, consequently, the formation of biogas is influenced by four groups of factors: biological, physical, chemical, and organizational-technological. As optimization of these or other factors leads to increased energy costs and the cost of biogas approaches the cost of natural, which may be economically inappropriate and do not give the desired effect. Therefore, scientists are looking for other factors to intensify methanogenesis. One of these factors is electromagnetic fields and ultrasound. The work analyzes the influence of electromagnetic fields and ultrasound on biogas output. Generalized information obtained by domestic and foreign scientists*

as a result of studies on substrate treatment by electromagnetic fields with different parameters and ultrasound. On the basis of the analysis, it was found that substrates treated with electromagnetic fields and ultrasound increased the biogas output.

Key words: *biogas, electromagnetic field, substrate, ultrasound*