

Коваленко В.Л., Лапікова О. І. Гуцалова В.І. Кузнецова А.В.

**Експериментальне визначення впливу постійного електричного поля на вихід біогазу та сухої органічної речовини субстрату***Kovalenko V., Lapikova O., Gutcalova V.I., Kuznetsova A.***Experimental determination of the influence of a constant electric field on the output of biogas and substrate varieties****Мета.** Дослідити ефективність стимуляції виходу біогазу з коров'ячого субстрату під впливом постійного електричного поля визначеної напруженості при мезофільному температурному режимі.**Методика.** Проведення експериментальних досліджень на базі лабораторної біогазової установки, що складається з двох реакторів, розміщених всередині термостату та під'єднаних до системи збору та утримання біогазу, що дозволяє визначати його об'єм та хімічний склад. Один з реакторів обладнаний системою впливу на субстрат постійним електричним полем. Оптимальна інтенсивність останнього була визначена попередніми експериментами. Дослідження проводились на коров'ячому субстраті при мезофільному режимі і включали в себе визначення динаміки виходу біогазу, зміни його хімічного складу та загальної ступені деградації сухої органічної речовини.**Результати.** В результаті досліджень було встановлено, що вихід біогазу з одиниці сухої органічної речовини під впливом постійного електричного поля збільшився на 11,3%, деградація останньої зростає на 12,2%, а сумарний об'єм біогазу (без врахування CO<sub>2</sub>) збільшився на 8,2%. Також слід зазначити, що лаг-фаза при цьому скоротилася на 12,2%.**Наукова новизна.** Комплексні дослідження впливу постійного електричного поля на процес біометаногенезу з вимірюванням хімічного складу отриманого біогазу та визначенням ступеню деградації сухої органічної речовини раніше не проводились.**Практична значущість.** Проведена робота дозволяє зробити висновок, що вплив постійного електричного поля визначеної інтенсивності дійсно стимулює процес виділення біогазу, при цьому не впливаючи суттєво на його склад. Цей метод інтенсифікації біометаногенезу може бути застосований на промислових установках для підвищення їх ефективності.**Ключові слова:** біогаз, біометаногенез, біоенергетика, біогазова установка, хімічний склад**Objective.** To investigate the effectiveness of stimulation of biogas release from cow substrate under influence of constant electric field of certain tension at mesophilic temperature regime.**Methodology.** Experimental research based on a laboratory biogas plant consisting of two reactors housed inside a thermostat and connected to gas-holder system to determine its volume and chemical composition. One of the reactors is equipped with a system of exposure to substrate by constant electric field. The optimum intensity of electric field was determined by previous experiments. The research was performed on a cow's substrate under mesophilic regimen and included determination of the dynamics of biogas output, changes in its chemical composition, and overall degree of dry organic matter destruction.**Findings.** The research has shown that biogas output per unit of dry organic matter under influence of constant electric field increased by 11.3%, the destruction of the latter increased by 12.2%, and the total volume of biogas (excluding CO<sub>2</sub>) increased by 8, 2%. It should also be noted that the lag phase was reduced by 12.2%.**Originality.** Complex research of influence of constant electric field on biomethanogenesis with measurement of chemical composition of obtained biogas and determination of degree of dry organic matter destruction has not been conducted before.**Practical value.** The work allowed us to conclude that the influence of constant electric field of certain intensity really stimulates the process of biogas production, without significantly affecting its composition. This method of biomethanogenesis intensification can be applied in industrial plants to increase their efficiency.**Keywords:** biogas, biomethanogenesis, bioenergy, biogasplant, chemical composition

В умовах дефіциту паливних викопних ресурсів завдання пошуку альтернативних джерел енергії та вдосконалення систем їх отримання є одним з найбільш актуальних. Особливо гостро воно постає для України, адже залежність від імпорту енергоносіїв є одним з суттєвих важелів економічного та політичного тиску. В цих умовах зміцнення енергетичної галузі та розбудова ефективних систем отримання, транспортування та споживання енергії становиться питанням національної безпеки. Так як обсяги видобування традиційного палива обмежені обсягами та доступністю родовищ, потужністю обладнання та транспортної системи, саме розвиток альтернативної енергетики може компенсувати потребу в додатковій закупівлі енергоресурсів.

Серед галузей альтернативної енергетики однією з найбільш перспективних можна вважати виробництво біогазу внаслідок збродження субстрату тваринного походження. Станом на 2019 рік в Україні нараховувалось 3339,3 тис. голів великої рогатої худоби, 6024,8 тис. – свиней, поголів'я птиці – 211,6 млн. голів, що свідчить про високий рівень розвитку тваринництва в державі [1].

Враховуючи вихід гною з утримання однієї голови великої рогатої худоби (ВРХ), свині та птиці на рік, виходу біогазу, який можливо отримати з 1 тони субстрату в залежності від його джерела, та вмісту у ньому метану [2], можна провести оцінку потенціалу отримання біогазу з відходів тваринництва, наведену в таблиці 1.

Коваленко Віктор Леонідович – доц. ЗНУ  
Лапікова Олена Ігорівна – асистент ЗНУ  
Гуцалова В.І. - ЗНУ  
Кузнецова Аліса Віталіївна - ДНУ.

Kovalenko V. - Ph.D., Assoc ZNU  
Lapikova O. – assistant ZNU  
Gutsalova V. - ZNU  
Kuznetsova A. - DNU

Табл. 1 Потенціал отримання біогазу з відходів тваринництва в Україні

	Поголів'я, млн. голів	Вихід гною або посліду, м <sup>3</sup> /тварино-місце/рік	Вихід біогазу, Нм <sup>3</sup> /т субстрату	Вміст метану, %	Вихід біогазу, млн. Нм <sup>3</sup> /рік		Вихід біометану млн. Нм <sup>3</sup> /рік
					min	max	
ВРХ	3,34	7,5 – 21,0	25	60	647,98	1814,35	388,8
Свині	6,02	1,2 – 6,0	28	65	191,27	956,34	124,3
Птиця	211,6	7,5(×100 тварино-місце на рік)	140	64	1924,97	1924,97	1232

Як бачимо, з відходів тваринництва можливо отримувати від 2764,22 до 4695,66 млн. Нм<sup>3</sup> біогазу, або від 1745,1 млн. Нм<sup>3</sup> метану на рік, що складає більше чверті поточного річного споживання газу в Україні. На жаль, на даний момент цей потенціал використовується не більше ніж на 6%.

Слід також зазначити, що біогаз за складом є наближеним до природного газу та може бути використаним для побутових і промислових потреб. Спосіб його отримання з субстрату тваринного походження екологічно чистим та не шкідливим для зовнішнього середовища, а також є ефективним варіантом переробки відходів ферм та сільськогосподарських підприємств.

Втім, при всій привабливості біогазової енергетики, є ряд проблем, які гальмують її розвиток. Зокрема, більшість біогазових реакторів в Україні працюють при мезофільному або термофільному температурних режимах для стимулювання більш інтенсивного виходу біогазу. Це зумовлює великі витрати станції на власні потреби, які у зимовий період можуть сягати до 30% від продюкованого газу. Це негативно впливає на ефективність виробництва та підвищує вартість результуючого продукту, наближуючи до вартості природного газу [3].

Відомі на сьогодні та розповсюджені на практиці методи інтенсифікації біометаногенезу, такі як підігрів, перемішування та додавання ензимів, вичерпали себе. Водночас, є потенційно ефективні способи впливу на процес утворення біогазу, які потребують додаткового вивчення та подальшого розвитку. Одним з них є вплив на субстрат електричним полем.

Електричні поля широко застосовують в сучасній біотехнології, в тому числі – для стимуляції або пригнічення росту окремих мікробіологічних культур. [4] Ці ефекти можна пояснити багатofакторним впливом електричного поля на діяльність мікроорганізму: посилення або послаблення проходимості клітинної мембрани, пришвидшення або уповільнення трансклітинного обміну речовин, їх засвоєння органами мікроорганізму та відведення продуктів життєдіяльності, стимуляція або гальмування процесів росту та розмноження тощо.

Особливо часто вплив електричних полів використовується в легкій та харчовій промисловості, медицині та сільському господарстві (при попередній обробці зернових культур, знезараженні сточних вод тощо). Втім, потенціал їх використання може бути значно ширшим. Зокрема, хоч відомі експерименти з

окремими штамами мікроорганізмів, що входять до складу коров'ячого, свиного або курячого перегною, фундаментальні дослідження впливу електричних полів на процес бродіння органічної речовини та на субстрат в цілому в Україні та світі не виконувались [5].

Важливість таких системних експериментів зумовлюється тим, що у складі субстрату перебуває близько 190 типів мікроорганізмів [6]. Цей склад залежить, у першу чергу, від джерела гною. Різні типи мікроорганізмів активні на різних етапах біометаногенезу: при гідролізі складних багатовуглецевих сполук (білків, ліпідів, полісахаридів) та ферментації моносахаридів і органічних кислот; при ферментації моносахаридів, спиртів та інших низькомолекулярних сполук; при розкладанні залишків – саме на цій стадії бродіння виділяється метан. Крім того, від умов проведення процесу (наявності або відсутності повітря, температури) залежить, які мікроорганізми будуть активні, а які перебуватимуть в анабіозі або взагалі загинуть. Саме тому потрібно встановити таку інтенсивність електричного поля, яка була б прийнятною для всіх мікроорганізмів, задіяних у біометаногенезі, та призвела до підвищення виходу біогазу, збереження його якісного складу та скоротила процес бродіння.

Качан Ю.Г., Коваленко В.Л. та Лапікова О.І. провели експерименти з дослідження впливу постійного електричного поля на процес утворення біогазу під час анаеробного метанового бродіння коров'ячого гною. Дослідження проводилися при мезофільному температурному режимі (+35 °С), так як він потребує менших енергетичних витрат на власні потреби у порівнянні з термофільним за рахунок необхідності дотримання нижчих температур і є доцільним з енергетичної точки зору, а також найчастіше застосовується у промислових установках великого об'єму, й розрахованих на супутнє виробництво органічних добрив включно.

Для проведення зазначених експериментів і подальшого встановлення оптимального діапазону напруженості поля розроблено та реалізовано лабораторну біогазову установку зменшених розмірів, яка дозволяє варіювати температуру, інтенсивність перемішування і рівень напруженості електричного поля. Об'єм застосованого реактору – 3 дм<sup>3</sup>. Серія експериментів передбачала проведення контрольного циклу біометаногенезу без впливу електричного поля та подальше його повторення з таким впливом різної інтенсивності з постійним замірюванням обсягу виділеного біогазу протягом циклу.

На основі аналізу отриманих результатів було визначено оптимальне значення інтенсивності електричного поля, за якого вихід біогазу був максимальним. За умов мезофільного температурного режиму (+35 °С) та стандартній вологості субстрату (95-97 %) оптимальна інтенсивність електричного поля становила 0,95 В/см [7]. Проведення повторних експериментів за тих самих умов показало подібні результати. Відхилення кількості зібраного біогазу як в динаміці, так і в цілому за цикл не перевищувало 2,5%, що дозволило вважати результати досліджень ідентичними та достовірними.

Нажаль, у цій роботі не було визначено концентрацію метану в біогазі та ступінь деструкції сухої органічної речовини, що не дозволило в повній мірі оцінити ефективність та доцільність стимулювання біометаногенезу постійним електричним полем.

Тому, метою виконання наступних експериментальних досліджень було визначити вихід біогазу, концентрацію метану в біогазі, ступінь деструкції сухої органічної речовини при заданому оптимальному значенні інтенсивності електричного поля.

Дослідження виконувались на модернізованій лабораторній біогазовій установці, схема якої зображена на рис. 1.

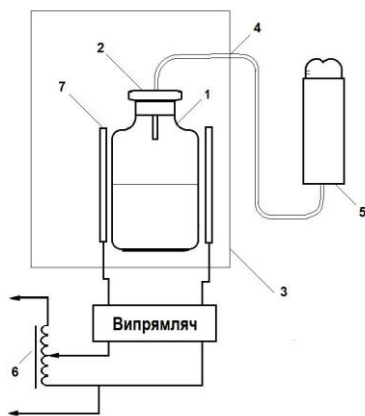


Рис. 1 Лабораторна біогазова установка  
1 – реактор, 2 – герметична кришка, 3 – термостат, 4 – патрубок, 5 – газгольдер-свідометр, 6 – лабораторний автотрансформатор, 7 – пластини, 8 – випрямляч змінного струму

Установка складається з термостата 3, в якому розміщені два реактори 1 об'ємом 3 дм<sup>3</sup>. Реактори герметично закриті кришками 2 з гнучкими вивідними патрубками 4, виконаними з прозорого полівінілхлориду, що з'єднуються з газгольдерами 5 об'ємом 2 дм<sup>3</sup>. Нерухома частина газгольдерів виставлена горизонтально і заповнена п'яти відсотковим розчином NaCl для запобігання розчинення вуглекислого газу у воді. На рухомій частині газгольдерів нанесені позначки для визначення об'єму біогазу. Для відбору біогазу на аналіз в газоаналізаторі були змонтовані коркові газові крани. Нагрівання і кон-

троль температури в теплоізолюваному термостаті здійснюється за допомогою електричного нагрівача, обладнаного терморегулятором. Температура повітря в термостаті вимірюється цифровим термометром «РТ-10/ПО1».

Електричне поле створюється двома напівкруглими алюмінієвими пластинами 7 висотою 13 см і шириною 10 см, які розташовані навколо реактору 1 на ізоляційному каркасі. Напруга на пластинах, а отже, і напруженість електричного поля регулюється за рахунок лабораторного автотрансформатора 6 та контролюється за показами вольтметра. Змінний струм мережі випрямляється за допомогою діодного мосту 8.

Для проведення експерименту було підготовлено два однакові за складом субстрати, що містили коров'ячий гній, розбавлений дистильованою водою до вологості 92,2 %. Об'єм субстрату становив 2/3 від загального об'єму реакторів. Експеримент був виконаний за мезофільного режиму, температура в термостаті підтримувалась на рівні 35±1 °С. Навколо одного з реакторів було створено постійне електричне поле з інтенсивністю 0,95 В/см.

Під час бродіння вимірювали об'єм виробленого біогазу та приводили до нормальних умов для сухого газу. Визначали концентрацію метану і вуглекислого газу в біогазі, а також вимірювали значення сухої речовини в субстраті, вміст золи в сухому залишку, значення сухої органічної речовини свіжого та переробленого субстратів та ступінь деструкції сухої органічної речовини.

Динаміка виходу біогазу протягом всього періоду бродіння наведена на рис. 2. Вона дозволяє оцінити кумулятивний вихід біогазу в перерахунку на одиницю свіжої (внесеної) сухої органічної речовини (COP) з впливом постійного електричного поля та без нього.

Для контрольного зразку (субстрату, що не зазнавав впливу електричного поля) тривалість лаг-фази становила 14 діб. Станом на 34-ту добу бродіння було отримано 141,9 см<sup>3</sup>/г COP біогазу з наступним складом: 39,2 % вуглекислого газу; 58,8 % метану; 2 % інших газів. Ступінь деструкції COP склала 33,5%.

Для субстрату, що зазнавав впливу постійного електричного поля інтенсивністю 0,95 В/см, тривалість лаг-фази склала 12 діб. Станом на 34-ту добу бродіння було отримано 157,9 см<sup>3</sup>/г COP біогазу з наступним складом: 40,9 % вуглекислого газу; 57,1 % метану; 2 % інші гази. Ступінь деструкції COP в цьому випадку становила 37,6%, що на 12,2 % більше за контрольний зразок.

Враховуючи вихід біогазу та його склад масо, що вихід метану при переробці субстрату, до якого було застосоване постійне електричне поле збільшився на 8,2 % у порівнянні з контрольним субстратом.

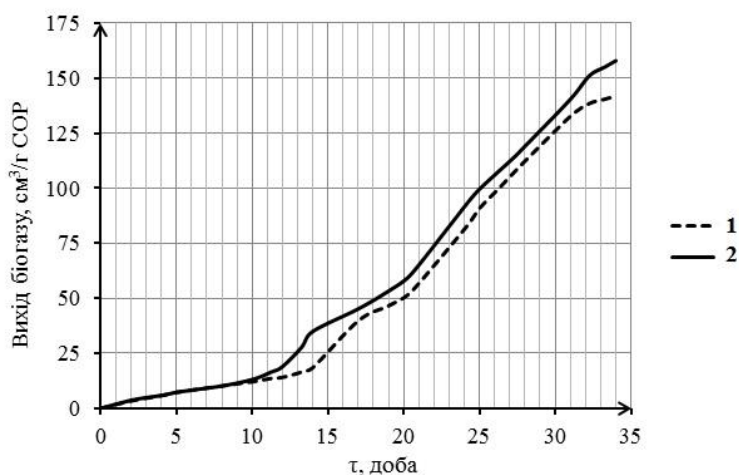


Рис. 2 Кумулятивний вихід біогазу з одиниці об'єму субстрату: 1 – без впливу електричного поля; 2 – з впливом постійного електричного поля

Достовірність одержаних результатів підтверджується їхнім порівнянням з результатами інших дослідників за однакових умов бродіння. Зокрема, О. Денніс показав, що вихід біогазу з коров'ячого

гною без використання інокуляту становить 130 см<sup>3</sup>/г СОР на 30-ту добу бродіння [8].

В табл. 2 зведено інтегральні показники процесу бродіння.

Табл. 2 Інтегральні показники процесу бродіння

Найменування	Контрольний зразок	Субстрат з впливом електричного поля
Тривалість лаг-фази	14 діб	12 діб Коротша на 16,7 %
Вихід біогазу з одиниці сухої органічної речовини (СОР)	141,9 см <sup>3</sup> /г СОР	157,9 см <sup>3</sup> /г СОР Більше на 11,3 %
Середня концентрація вуглекислого газу в біогазі	39,2 %	40,9 %
Усього біогазу без урахування вуглекислого газу	8880	9600 Більше на 8,2 %
Деструкція СОР	33,5 %	37,6 % Більше на 12,2 %

Висновок: Отже за наведеними показниками процесу утворення біогазу з органічних речовин коров'ячого гною, постійне електричне поле у внутрішньому просторі реактора позитивно діє на процес під час переробки субстрату, зокрема встановлено: утворилось на 11,3 % біогазу більше; утворилось на 8,2 % метану більше; розкладено на 12,2 % СОР більше;

тривалість лаг-фази на 16,7% коротша порівняно з контрольним субстратом.

Отримані результати свідчать про те, що постійне електричне поле у внутрішньому просторі реактора сприяє збільшенню виходу біогазу та метану, збільшенню деструкції СОР та скороченню лаг-фази процесу бродіння.

**Бібліографічний опис:**

1. Державна служба статистики України. Тваринництво України. Статистичний збірник. – К.: 2019
2. Баадер В. Биогаз: теория и практика (пер. с нем. и предисловия М.И. Серебряного.) / В. Баадер, Е. Доне, М. Бренндерфер // М.: Колос, 1982. –148 с.
3. Лапікова О.І. Аналіз ефективності та перспектив розвитку біогазової енергетики [Текст] / В. Л. Коваленко, Ю.Г. Качан, О.І. Лапікова // Енергетика: економіка, технології, екологія. – Київ: НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка» – №3. – 2015.- С.79-83.
4. Hunt R.W., Zavalin A., Bhatnagar A., Chinnasamy S., Das K.C. Electromagnetic Biostimulation of Living Cultures for Biotechnology, Biofuel and Bioenergy Applications. International Journal of Molecular Sciences, Int. J. Mol. Sci. 2009.
5. Montgomery L. Pretreatment of feedstock for enhanced biogas production / L. Montgomery, G. Bachmann //
6. Качан Ю.Г., Коваленко В.Л., Лапікова О.І. Щодо впливу електричних полів та мікрохвильового випромінювання на задіяні в біометаногенезі мікроорганізми // Енергетика: економіка, технології, екологія. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – №4 – С. 38-43.

7. Kachan Yu.G., Kovalenko V.L., Lapikova O.I. Efficiency of Application of Electric Fields in Biogas Plants at Different Temperature Modes // IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) – Kharkiv, Institute of Electrical and Electronics Engineers, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” – 2018. – P. 286.
8. Denis O.E. Effect of inoculums on biogas yield / O.E. Denis // Journal of Applied Chemistry. – 2015. Vol. 8. Is. 2. – P. 5–8.

#### REFERENCE

1. Derzhavna sluzhba statistiki Ukraini. Tvarinnictvo Ukraini. Statistichnij zbirnik. – K.: 2019
2. Baader V. Biogaz: teoriya i praktika (per. s nem. i predisloviya M.I. Serebryanogo.) / V. Baader, E. Done, M. Brennderfer // M.: Kolos, 1982. – 148 s.
3. Lapikova O.I. Analiz efekтивности ta perspektiv rozvitku biogazovoyi energetiki [Tekst] / V. L. Kovalenko, Yu.G. Kachan, O.I. Lapikova // Energetika: ekonomika, tehnologiyi, ekologiya. – Kiyiv: NTUU «KPI» VPI VPK «Politehnika» – №3. – 2015.- S.79-83.
4. Hunt R.W., Zavalin A., Bhatnagar A., Chinnasamy S., Das K.C. Electromagnetic Biostimulation of Living Cultures for Biotechnology, Biofuel and Bioenergy Applications. International Journal of Molecular Sciences, Int. J. Mol. Sci. 2009.
5. Montgomery L. Pretreatment of feedstock for enhanced biogas production / L. Montgomery, G. Bachmann //
6. Kachan Yu.G., Kovalenko V.L., Lapikova O.I. Shodo vplivu elektrichnih poliv ta mikrohvilovogo viprominyuvannya na zadiyani v biometanogenezi mikroorganizmi // Energetika: ekonomika, tehnologiyi, ekologiya. – K.: NTUU «KPI», 2016. – №4 – S. 38-43.
7. Kachan Yu.G., Kovalenko V.L., Lapikova O.I. Efficiency of Application of Electric Fields in Biogas Plants at Different Temperature Modes // IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) – Kharkiv, Institute of Electrical and Electronics Engineers, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” – 2018. – P. 286.
8. Denis O.E. Effect of inoculums on biogas yield / O.E. Denis // Journal of Applied Chemistry. – 2015. Vol. 8. Is. 2. – P. 5–8.

*Стаття поступила: 17.01.2019*