

УДК 628.32:628.385:663.142

ПЕРЕРОБКА КОНДЕНСАТУ ГАЗОГЕНЕРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ В БІОГАЗ

В.П.Клюс, канд.техн.наук,

Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 02094, м. Київ, вул. Гната Хоткевича 20А,
тел./факс +38-044-206-28-09, e-mail: biomassa@ukr.net
ORCID: 0000-0001-8536-3211

Г.О.Четверик,

Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 02094, м. Київ, вул. Гната Хоткевича 20А,
тел./факс +38-044-206-28-09, e-mail: biomassa@ukr.net
ORCID: 0000-0001-9398-1968

Питання утилізації рідких відходів газогенераторних установок набуває актуальності з розвитком газифікації твердого палива, зокрема, біомаси. Наведено результати експериментальних досліджень сумісного бродіння гнойових відходів з конденсатом газогенераторної установки, що містить нерозчинну смолу. Визначено вихід та динаміку утворення метану залежно від концентрації конденсату. Оцінено ступінь деструкції органіки конденсату в субстратах. Показано, що при утилізації конденсату сумісно з гнойовими стоками збільшується вихід метану. При цьому концентрація конденсату в субстраті становила 4-8%. Наведено напрямки використання відпрацьованого субстрату. Бібл. 14, табл. 6, рис. 2.

Ключові слова: біогаз, біомаса, анаеробне бродіння, субстрат, газифікація, конденсат.

CONVERSION OF THE TAR WATER FROM SYNGAS PLANT INTO BIOGAS

Kliys V., PhD,

Institute of Renewable Energy of NAS of Ukraine, Hnata Khotkevycha, 20A, 02094, Kyiv, Ukraine,
phone/fax +38-044-206-28-09, e-mail: biomassa@ukr.net
ORCID: 0000-0001-8536-3211

Chetveryk H.,

Institute of Renewable Energy of NAS of Ukraine, Hnata Khotkevycha, 20A, 02094, Kyiv, Ukraine,
phone/fax +38-044-206-28-09, e-mail: biomassa@ukr.net
ORCID: 0000-0001-9398-1968

The utilization of liquid wastes from syngas plant becomes acute with the development of gasification of solid fuels, in particular biomass. There have been presented the experimental results of digestion of manure wastes with tar water from syngas plant. The tar water has insoluble tar. The yield of methane and dynamics of methane formation, which depends on the concentration of tar water, have been determined. The degree of degradation of organic matter of tar water has been estimated. It has been shown that the utilization of condensate with manure increases the yield of methane. The concentration of condensate in the substrates was 4-8%. There have been presented the directions of recycling of the digestate. Ref. 14, tabl. 6, fig. 2.

Keywords: biogas, biomass, anaerobic digestion, substrate, gasification, tar water.



Клюс В.П.
Kliys V.

Відомості про автора: працює в Інституті відновлюваної енергетики НАН України, зав. відділом відновлюваних органічних енергоносіїв, старший науковий співробітник. Кандидат технічних наук (1980 рік).

Область наукової діяльності: біоенергетика, газифікація біомаси, переробка органічних відходів.

Публікації: 65 наукових публікацій, у тому числі 18 патентів.

Information about the author: Institute of Renewable Energy of NAS of Ukraine, head of bioenergy department, senior researcher. PhD since 1980 year.

Research area: bioenergy, gasification of biomass, organic waste utilization.

Publications: 65 scientific publications, including 18 patents.



Четверик Г.О.
Chetveryk H.

Відомості про автора: працює в Інституті відновлюваної енергетики НАН України, науковий співробітник.

Область наукової діяльності: біогаз, переробка органічних відходів.

Публікації: 37 наукових публікацій, у тому числі 3 патенти.

Information about the author: Institute of Renewable Energy of NAS of Ukraine, researcher.

Research area: biogas, organic waste utilization.

Publications: 37 scientific publications, including 3 patents

Перелік використаних позначень та скорочень:

$Y_{\text{л,сум}}$	– сумарний питомий вихід метану, $\text{дм}^3/\text{г ХСК}$,	$m_{\text{COP},k}$	– маса COP переробленого субстрату, г;
P	– метановий потенціал сировини, $\text{дм}^3/\text{г ХСК}$;	I_P	– інтенсивність виходу метану з реактора, $\text{дм}^3/\text{дм}^3 \cdot \text{доба}$;
I_{max}	– максимальна інтенсивність виходу метану, $\text{дм}^3/\text{г ХСК} \cdot \text{доба}$;	$k_{\text{ХСК}}$	– ступінь деструкції органічної речовини субстрату;
L	– тривалість лаг-фази, доба;	k_{COP}	– ступінь деструкції сухої органічної речовини;
τ	– тривалість бродіння, доба;	$Y(S_1 + S_2)$	– об'єм метану, що утворюється з субстрату, дм^3 ;
V_P	– об'єм робочої частини реактора, наповненої субстратом, дм^3 ;	$Y(S_1)$	– об'єм метану, що утворюється з гною, дм^3 ;
ХСК_S	– значення ХСК субстрату, г $\text{O}_2/\text{дм}^3$;	$Y(S_2)$	– об'єм метану, що утворюється з конденсату, дм^3 ;
$Y_{\text{сум}}$	– сумарний вихід метану, дм^3 ;	ХСК	– хімічне споживання кисню;
$m_{\text{Org},n}$	– маса органічної речовини у свіжому субстраті, г ХСК;	г ХСК	– означає масу органіки, для окислення якої необхідно г кисню;
m_{Org}	– маса органічної речовини у реакторі, г ХСК;	COP	– суха органічна речовина;
ХСК_n	– значення ХСК свіжого субстрату, г $\text{O}_2/\text{дм}^3$;	CP	– суха речовина;
ХСК_k	– значення ХСК переробленого субстрату, г $\text{O}_2/\text{дм}^3$;	бк	– біологічно конвертована.
$m_{\text{COP},n}$	– маса COP свіжого субстрату, г;		

Вступ. Наразі актуальною є переробка органічних відходів та біомаси методами біологічної та термічної конверсії для отримання газового палива. Незважаючи на значний біогазовий потенціал сировини, виробництво та споживання біогазу не вийшло на суттєвий рівень. Біогазові установки малої потужності, особливо для невеликих фермерських господарств у сільській місцевості, не знайшли широкого впровадження в Україні. Відсутній досвід їх будівництва та експлуатації. На сьогодні працюють декілька промислових біогазових установок на закордонному обладнанні. В цих установках у якості сировини використовують гноївку, кукурудзяний силос та рослинні рештки. Лише в деяких із них перероб-

ляються в біогаз курячий послід та відходи харчової промисловості [1].

В той же час існує велика група рідких відходів, що містять шкідливі високомолекулярні органічні сполуки, які надто складно утилізувати. Прикладом такого відходу є конденсат, що утворюється при охолодженні генераторного газу на газогенераторній установці. Згідно літературних даних [2, 3] конденсат містить більше 20 органічних сполук (фенол, метиловий спирт, оцтова кислота, смола тощо).

В Радянському Союзі конденсат намагались утилізувати мікробіологічним методом в аеротенках [2]. Проте цей метод не набув поширення через припинення робіт із газифікації твердого

палива в 50-х роках минулого століття. В наш час у світі відбувається відродження газифікації твердого палива. Так, наприклад, у Німеччині, працює біля 400 газогенераторних установок на біомасі, що продукують генераторний газ, який потім у когенераційних установках переробляється в електричну і теплову енергію [4]. Створюються пілотні газогенераторні установки на біомасі і в Україні [5–7]. Знову постає питання утилізації конденсату.

Постановка завдання. В роботі [8] наведено новий спосіб біологічної утилізації конденсату в метантенку. Він полягає в тому, що гарячий генераторний газ барботується через шар рідкого субстрату метантенка, охолоджується, внаслідок чого відбувається конденсація смоли, фенольних сполук, метилового спирту, жирних кислот, водяної пари тощо, які входять до складу генераторного газу, та перемішування рідкого субстрату генераторним газом. Сконденсовані органічні речовини слугують додатковим поживним середовищем для мікробних популяцій.

Було експериментально встановлено можливість утилізації конденсату в анаеробних умовах за мезофільного температурного режиму в кількості до 8% від маси субстрату за час переробки від 30 до 50 діб. Ступінь біологічної деструкції органіки конденсату у наведеній роботі не визначалась.

Метою досліджень цієї роботи є визначення та аналіз показників процесу газоутворення під час сумісного бродіння гнойових відходів та конденсату газогенераторної установки, що містить нерозчинну смолу. До основних показників, що характеризують процес газоутворення, віднесемо такі параметри: вихід метану; динаміку утворення метану; ступінь деструкції органіки гною та конденсату.

Матеріали та методи. Коров'ячий гній, відібраний на приватному домогосподарстві Київської області. В якості інокуляту було взято зброджену масу після анаеробної переробки суміші коров'ячого гною з конденсатом газогенераторної установки. За такої умови мікробні популяції інокуляту адаптовані до анаеробної переробки схожої сировини. Конденсат із смолою, який було отримано під час газифікації тріски в

газогенераторі оберненого процесу з рухомою зоною газифікації. Температура газифікації тріски із вмістом вологи 30% становила 510–590°C.

Методи визначення масової концентрації СОР, об'єму виробленого біогазу та об'ємної концентрації метану в біогазі наведено в роботі [8].

Значення ХСК субстратів визначали фотометричним методом згідно методики виконання вимірювань [9].

Значення рН середовища вимірювали рН-метром РН-009(І).

Параметри процесу бродіння, а саме тривалість лаг-фази та максимальну інтенсивність виходу метану підбирали методом найменших квадратів. Отримані експериментальні дані апроксимували до відомої залежності Гомпертца з обмеженим потенціалом зростання між сумарним виходом метану та тривалістю бродіння [10]:

$$Y_{П,СУМ}(\tau) = P \cdot \exp\left(-\exp\left(\frac{I_{\max} \cdot e \cdot (L - \tau)}{P} + 1\right)\right) \quad (1)$$

Маса органічної речовини в реакторі дорівнює добутку об'єму робочого реактора та значення ХСК субстрату:

$$m_{Орз}(\tau) = V_P \cdot XCK_S(\tau). \quad (2)$$

Сумарний питомий вихід метану зв'язаний із сумарним виходом метану залежністю:

$$Y_{П,СУМ}(\tau) = \frac{Y_{СУМ}(\tau)}{m_{Орз,н}}. \quad (3)$$

Інтенсивність виходу метану визначали за залежністю:

$$I_P(\tau) = \frac{Y_{СУМ}(\tau)}{V_P \cdot \tau}. \quad (4)$$

Ефективність переробки органічних речовин субстрату визначали ступенем їхньої деструкції за залежністю [11, 12]:

$$k_{ХСК} = \frac{XCK_n - XCK_{\kappa}}{XCK_n} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Ефективність переробки гнойових стоків визначали ступенем деструкції СОР [11, 12]:

$$k_{СОР} = \frac{m_{СОР,н} - m_{СОР,\kappa}}{m_{СОР,н}} \cdot 100\%. \quad (6)$$

Сумарний питомий вихід метану з біологічно конвертованої органічної речовини в біогаз визначали за залежністю:

$$Y_{П,СУМ,ХСК_{бк}} = \frac{Y_{П,СУМ}}{k_{ХСК}} \text{ або } Y_{П,СУМ,СОР_{бк}} = \frac{Y_{П,СУМ}}{k_{СОР}}. \quad (7)$$

Вихід метану з органіки конденсату та ступінь її переробки було оцінено, виходячи з припущень [8]:

1. Питомий вихід метану з переробленої органічної речовини гнойових стоків в усіх субстратах однаковий.

2. Явища синергетичного ефекту та незворотних змін у процесі біологічної конверсії органіки не мають місця, тобто справедлива рівність:

$$Y(S_1 + S_2) = Y(S_1) + Y(S_2). \quad (8)$$

Методика проведення експериментів. Було використано експериментальну біогазову установку, схему та фото якої наведено в роботі [8]. Для експериментальних досліджень сумісного бродіння гнойових відходів з конденсатом, що містить смоли, було підготовлено чотири субстрати із вмістом конденсату від 0% до 8%: К-0; К-4; К-6; К-8 відповідно. Також було підготовлено один субстрат, який містив тільки інокулят для визначення залишкового метану в інокуляті. Усі перелічені субстрати було підготовлено у двох ідентичних екземплярах: один – для проведення експерименту, інший – для аналізу на ХСК. Для визначення маси органіки у стічних водах використовується показник ХСК, який показує ступінь забрудненості стічних вод.

Компоненти для приготування субстратів були відібрані з ємностей з інокулятом (об'єм 10 дм³), гноєм (об'єм 6 дм³) та конденсатом (об'єм 1 дм³). Характеристики коров'ячого гною та інокуляту представлено в табл. 1.

Таблиця 1. Вміст СР та СОР у гної та інокуляті

Table 1. TS and VS in the manure and inoculum

Компоненти субстратів	СР, %	Зольність СР, %	СОР, %
Коров'ячий гній	22,87±0,21	37,33±0,3	14,33±0,27
Інокулят	2,7±0,01	27,62±0,22	1,95±0,07

Кожний реактор мав загальний об'єм 1,5 дм³ з об'ємом субстрату 1,05 дм³. Для створення

анаеробних умов у реакторі газовий простір системи реактор – евідіометр продували азотом. Склад контрольного субстрату було підібрано так, щоб співвідношення між СОР гною та СОР інокуляту становило 1:1 (див. табл. 2). Згідно з рекомендаціями, наведеними в роботі [13], за цієї умови виключається уповільнення зростання метаногенних популяцій за рахунок надмірної концентрації жирних кислот.

Таблиця 2. Компоненти контрольного субстрату К-0

Table 2. Compound of control substrate K-0

Складові частини	Маса, г	СОР, г
Коров'ячий гній	89	12,8
Інокулят	653	12,8
Дистильована вода	308	0
Усього	1050	25,6

Відбір необхідної кількості гною, інокуляту та конденсату для приготування субстрату проводили згідно з ДСТУ EN 12048:2005 [14].

Зазначимо, що вміст вологи у субстраті для К-0 становив 96,4%. Інші субстрати відрізнялись від К-0 тим, що в субстраті К-0 було заміщено від 4% до 8% вологи відповідною кількістю конденсату.

Було визначено, що конденсат містить органічні сполуки, значення ХСК яких становить 220±33 г О₂/дм³. Значення ХСК у контрольному субстраті становить 35,14±5,27 г О₂/дм³. В табл. 3 наведено початкові значення ХСК, а також значення рН субстратів.

Таблиця 3. Початковий вміст органіки у субстратах

Table 3. Initial concentration of organic matter in the substrate

Субстрат	ХСК свіжого субстрату, г О ₂ /дм ³	ХСК* конденсату, г О ₂ /дм ³	Частка ХСК конденсату в субстраті, %	рН _п
К-0	35,14±5,27	0	0	7,9±0,1
К-4	43,94±6,59	8,8±1,32	20	7,3±0,1
К-6	48,65±7,3	13,51±2,03	27,8	7,2±0,1
К-8	54,21±8,13	19,07±2,86	35,2	7,1±0,1

*) значення ХСК органіки конденсату було визначено з припущення, що значення ХСК гною у всіх субстратах однакове.

Значення рН конденсату становило 5,5, контрольного субстрату 7,9. Після додавання кон-

денсату до вихідного субстрату значення рН в субстратах становило до 7,3-7,1. Таке незначне зниження рН пояснюється буферними властивостями гною.

Згідно літературних даних для рідкого гною за мезофільного режиму бродіння зазвичай необхідно від 30 до 50 діб до припинення газотворення [11, 12]. Згідно рекомендацій, наведених у роботі [13], тест по визначенню метанового потенціалу сировини вважається завершеним, якщо добове утворення метану не перевищує 1% від сумарного виходу метану за попередній період бродіння.

Станом на 60-й день бродіння добовий вихід метану становив від 0,2% до 1% від сумарного значення за попередній період. Дослід тривав 60 діб за температури, що підтримувалась у межах від 34,8°C до 35,2°C.

Результати та обговорення. Станом на 60-у добу бродіння було отримано $4,17 \pm 0,08$ дм³; $5,85 \pm 0,12$ дм³; $6,11 \pm 0,13$ дм³ та $6,62 \pm 0,14$ дм³ біогазу в субстратах К-0; К-4; К-6; К-8 відповідно. При цьому питома інтенсивність виходу біогазу становить 0,066 дм³/дм³·доба; 0,093 дм³/дм³·доба; 0,097 дм³/дм³·доба та 0,105 дм³/дм³·доба в суб-

стратах К-0; К-4; К-6; К-8 відповідно. Тобто зі збільшенням концентрації конденсату в субстраті вихід біогазу збільшується.

Виявлено закономірність, що добова об'ємна концентрація метану в біогазі для контрольного субстрату збільшується з часом та досягає максимального значення 75% на 60-й день бродіння. Для модельних субстратів з конденсатом на початковому етапі добова об'ємна концентрація метану в біогазі на 10-12-й день бродіння досягає значень 75%, а потім різко падає до 52-67%. Починаючи з 15-22 доби, відбувається стрімке збільшення концентрації метану до рівня 67-75% на кінець експерименту (див. рис. 1).

Середня об'ємна концентрація метану в біогазі становить $56,6 \pm 2,5\%$; $66,2 \pm 2,5\%$; $66,9 \pm 2,5\%$ та $70,2 \pm 2,5\%$ у субстратах К-0; К-4; К-6; К-8 відповідно. Як бачимо, середня об'ємна концентрація метану в біогазі підвищується зі збільшенням концентрації конденсату. Що свідчить про те, що при анаеробній переробці конденсату виділяється більше метану, ніж при анаеробній переробці гною.

Динаміку зміни сумарного питомого виходу метану зображено на рис. 2.

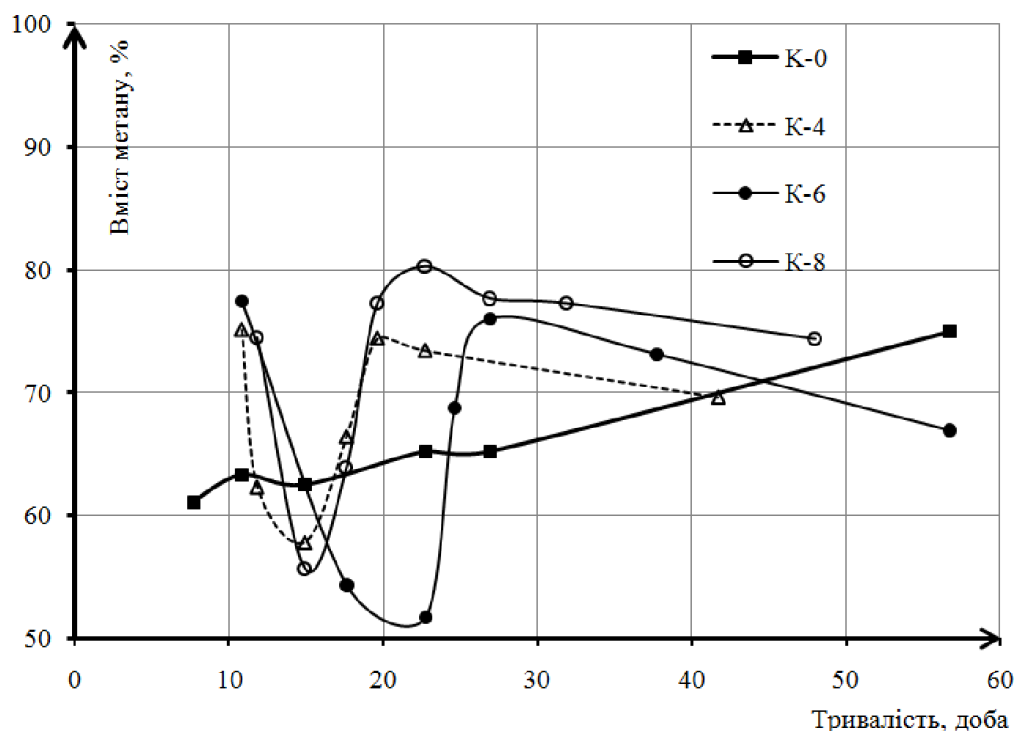


Рис. 1. Динаміка зміни концентрації метану в біогазі.

Fig. 1. Dynamics of methane concentration in the biogas.

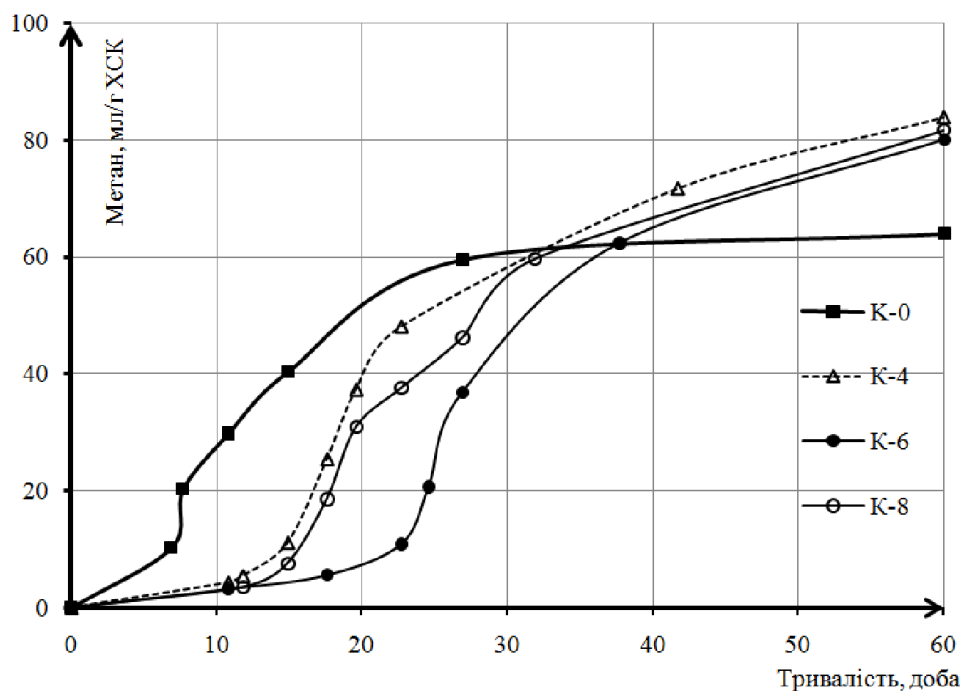


Рис. 2. Динаміка зміни сумарного питомого виходу метану.

Fig. 2. Dynamics of cumulative yield of methane.

Як бачимо, на початку процесу бродіння питомий вихід метану в модельних субстратах менший, ніж у контрольному, оскільки відбуваються мікробіологічні процеси, пов'язані з адаптацією метаноутворюючих бактерій до складових конденсату.

За залежністю (1) було визначено тривалість лаг-фази та максимальну інтенсивність виходу метану (див. табл. 4).

Таблиця 4. Параметри процесу бродіння

Table 4. Parameters of digestion

Субстрат	Тривалість лаг-фази, доба	Максимальна інтенсивність виходу метану, мл/г ХСК·доба	Точність апроксимації, R ²
K-0	4,2	4	0,996
K-4	12,9	5,2	0,992
K-6	19,8	4,6	0,993
K-8	13,5	4,4	0,993

Як бачимо, для модельних субстратів тривалість лаг-фази зростає від 4,2 до

12,9-19,8 діб, максимальна інтенсивність виходу метану зростає від 4 до 4,4-5,2 дм³/г ХСК·доба у порівнянні з контрольным субстратом.

Вихід метану на кінець бродіння зріс у 1,25-1,31 рази зі збільшенням концентрації конденсату (див. рис. 2).

Було визначено ступінь розкладання СОР у субстратах на 60-й день бродіння за залежністю (6). Ступінь деструкції СОР становить 49±0,8%; 34,4±1,1%; 21,1±1,2% та 18±1,3% у субстратах K-0; K-4; K-6 та K-8 відповідно. Отже, в зазначених субстратах бактерії при виборі поживних речовин віддають перевагу органіці, що міститься в конденсаті.

Порівняємо отримані результати з тими, що наведені в роботі [8], в якій розглядався експеримент з конденсатом, що містив виключно розчинну смолу. Ступінь переробки СОР та питомий вихід метану з сировини для обох експериментів суттєво не відрізняється (див. табл. 5).

В табл. 5 наведено значення інтенсивності виходу метану.

Таблиця 5. Порівняння експериментальних результатів

Table 5. Comparison between experimental results

Показники для К-0	Попередній експеримент	Поточний експеримент
Ступінь переробки гною на 60-й день бродіння, %	44	49
Сумарний питомий вихід метану з гною, мл/г СОР	177	184
Субстрат	Інтенсивність виходу метану, $\text{дм}^3/\text{дм}^3 \cdot \text{доба}$	
К-0	0,046	0,066
К-4	0,061	0,093
К-6	0,056	0,097
К-8	0,051	0,105

Як видно, значення інтенсивності виходу метану для контрольного субстрату К-0 у проведених експериментах різні. Це пояснюється тим, що відрізнялась підготовка інокуляту до бродіння. У першому експерименті було взято інокулят безпосередньо з діючої біогазової установки, і він

мав ще достатній метановий потенціал. У другому експерименті було взято адаптований інокулят до схожої сировини, і він був витриманий до повного припинення газоутворення.

Як бачимо, у першому експерименті інтенсивність виходу метану спадає зі збільшенням концентрації конденсату, тоді як у другому експерименті – навпаки, зростає. Це можна пояснити наявністю в конденсаті більшої кількості органіки у вигляді нерозчинної смоли.

Сумарний питомий вихід метану з переробленої органічної речовини гнойових стоків у контрольному субстраті за залежністю (7) становить 374,6 мл/г СОР або 350,1 мл/г ХСК. Було оцінено вихід метану з органіки конденсату та ступінь їхньої переробки за залежністю (5).

В табл. 6 наведено показники процесу метаноутворення для субстратів.

Таблиця 6. Показники процесу метаноутворення

Table 6. Parameters of methane formation

Субстрат	Ступінь переробки СОР, %	Ступінь переробки органіки субстрату, %	Ступінь переробки органіки конденсату, %	Сумарний вихід метану, мл/г ХСК
К-0	49	19,2	-	64
К-4	34,4	25,2	57,4	83,9
К-6	21,1	24	75,4	80,1
К-8	18	24,5	81,5	81,7

Як бачимо, ступінь переробки органіки конденсату збільшується, а ступінь розкладання органіки гнойових стоків зменшується зі збільшенням концентрації конденсату. Це може свідчити про те, що органічні речовини конденсату легше піддаються переробленню мікробними популяціями, ніж органіка гною.

Використання відпрацьованого субстрату.

Зважаючи на високий ступінь деструкції органіки конденсату, відпрацьований субстрат може використовуватись для внесення на поля в якості добрива. У разі перевищення гранично допустимих значень вмісту шкідливих речовин у відпрацьованому субстраті, що передбачено вимогами до рідких добрив у вигляді гнойових стоків, відпрацьований субстрат направляється на поля фільтрації.

На деяких біогазових станціях передбачено розділення відпрацьованого субстрату на тверду та рідку фракції. Тверда фракція висушується та спалюється у котлах. У всякому разі при виборі

напрямку використання відпрацьованого субстрату необхідно виконувати його аналіз на вміст шкідливих речовин.

Висновки. 1. Вперше експериментально встановлено можливість переробки субстрату, що складається з гнойових стоків та конденсату газогенераторної установки, що містить розчинну і нерозчинну смолу, в біогаз. При цьому максимальна частка конденсату в субстраті становить 8%.

2. Експериментально визначено, що при додаванні конденсату до гнойових стоків питомий вихід метану зростає в 1,25-1,31 рази на кінець бродіння.

3. Встановлено, що при додаванні конденсату у гнойовий субстрат ступінь переробки органіки конденсату збільшується, а ступінь розкладання органіки гнойових стоків зменшується. Це може свідчити, що органічні речовини конденсату легше піддаються переробленню мікробними популяціями, ніж органіка гною.

1. Офіційний сайт "Біоенергетична асоціація України" [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.uabio.org>

2. Делягин Н.Н. Водосмоляное хозяйство газогенераторных станций. – М.: Гостоптехиздат, 1959. – 86 с.

3. Канторов М.В. Газогенераторы и газогенераторные станции в металлургической промышленности. – М.: Металлургиздат, 1958. – 467 с.

4. Передерий С. Мини-ТЭС в децентрализованной энергетике / Офіційний сайт інформаційно аналітичного агентства "Инфобіо" [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.infobio.ru>

5. П'яних К.Є. Розвиток наукових засад теплотехнологій заміщення природного газу альтернативними видами палива: автореф. дис. докт. техн. наук: спец. 05.14.06. – К.: Інститут газу НАН України, 2017. – 45 с.

6. Ключ С.В., Жовмір М.М., Маслюкова З.В., Демчина В.П. Визначення основних показників та ефективності часткової газифікації біомаси в газогенераторі щільного шару з оберненим дуттям // Відновлювана енергетика. – К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2016. – № 2. – С. 79-87.

7. Кремнева Е.В., Губинский М.В., Шевченко Г.Л., Адаменко Д.С., Шишко Ю.В. Исследование термического разложения биомассы в режиме фильтрационного горения // Днепр: Металлургическая теплотехника. – 2009. – №1. – С. 126-136.

8. Ключ В.П., Четверик Г.О. Сумісне анаеробне бродіння гнійових відходів та конденсату газогенераторної установки // Відновлювана енергетика. – К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2017. – № 3. – С. 80-86.

9. MBV 081/12-0136-04 "Вимірювання біхроматної окислюваності у пробах природних, питних та стічних водах фотометричним методом з використанням аналізатора рідини Флюорат-02-3М"

10. Angelidaki I., Ellegaard L., Ahring B.K. A mathematical model for dynamic simulation of anaerobic digestion of complex substrates: Focusing on ammonia inhibition // Biore-source Technology. – Amsterdam: Elsevier Sci Ltd., 1993. – No. 42. – P. 159 – 166.

11. Эдер Б., Шульц Х. Биогазовые установки. Практическое пособие. – К.: Зорг Украина, 2011. – 268 с.

12. Дубровскис В.С., Виестур У.Э. Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов. – Рига: Знание, 1988. – 204 с.

13. Automatical methane potential test system. – Lund: "Bioprocess Control Sweden AB", 2016.

14. Добрива тверді та вапнувальні матеріали. Визначення вмісту вологи гравіметричним методом. Висушування за температури 105±2°C: ДСТУ EN 12048:2005. – К.: Держспоживстандарт України, 2006. – 13 с.

ПЕРЕРАБОТКА КОНДЕНСАТА ГАЗОГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ В БИОГАЗ

В.П.Ключ, канд.техн.наук,
Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, 02094,
г. Киев, ул. Гната Хоткевича 20А,
тел./факс +38-044-206-28-09; e-mail: biomassa@ukr.net
ORCID: 0000-0001-8536-3211

Г.А.Четверик,

Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, 02094,
г. Киев, ул. Гната Хоткевича 20А,
тел./факс +38-044-206-28-09, e-mail: biomassa@ukr.net
ORCID: 0000-0001-9398-1968

Вопрос утилизации конденсата газогенераторных установок приобретает актуальность с развитием газификации твердых топлив, в частности, биомассы. Приведены результаты экспериментальных исследований совместного брожения навоза с конденсатом газогенераторной установки, который содержал нерастворенную смолу. Определен выход и динамика образования метана в зависимости от концентрации конденсата. Оценена степень деструкции органики конденсата в субстратах. Показано, что при утилизации конденсата совместно с навозом увеличивается выход метана. При этом концентрация конденсата составляла 4-8%. Приведены направления использования отработанного субстрата. Библ. 14, табл. 6, рис. 2.

Ключевые слова: биогаз, биомасса, анаэробное брожение, субстрат, газификация, конденсат.

REFERENCES

1. Ofitsiynyy sayt "Bioenerhetychna asotsiatsiya Ukrainy". (2017). [Official site "Bioenergetic Association of Ukraine"]. Rezhym dostupu [Access mode]: <http://www.uabio.org> [in Ukr.].

2. Delyagin N.N. (1959). *Vodosmolyanoye khozyaystvo gazogeneratornykh stantsiy* [Water drying facilities of gas generating stations]. Moskva, Rossiyskaya federatsiya: Gostoptekhizdat [in Rus.].

3. Kantorov. M.V. (1958). *Gazogeneratory i gazogeneratornyye stantsii v metallurgicheskoy promyshlennosti* [Gas generators and gas generating stations in the metallurgical industry]. Moskva, Rossiyskaya federatsiya: Metallurgizdat [in Rus.].

4. Perederiy S. (2017). *Mini-TES v detsentralizovannoy energetike*. [Mini-TPP in decentralized energy]. Rezhym dostupu [Access mode]: <http://www.infobio.ru> [in Rus.].

5. Pyanykh K.Y. (2017). *Rozvytok naukovykh zasad teplotekhnolohiy zamishchennya pryrodnoho hazu alternatyvnymy vydamy palyva* [The development of the scientific foundations of heat technology replacing natural gas with alternative fuels]. Kiyev, Ukraina: Instytut hazu NAN Ukrayiny [in Ukr.].

6. Klyus S.V., Zhovmir M.M., Maslyukova Z.V., Demchyna V.P. (2016). *Vyznachennya osnovnykh pokaznykiv ta efektyvnosti chastkovoyi hazyfikatsiyi biomasy v hazoheneratori shchilnoho sharu z obrnenym duttyam* [Determination of the main indicators and the efficiency of partial biomass gasification in a gas-generating unit of a dense layer with an inverse blow]. *Vidnovluyuvaya energetika [Renewable energy]*, 2, 79–87 [in Ukr.].

7. Kremneva Y.V., Gubinskiy M.V., Shevchenko G.L., Adamenko D.S., Shishko Y.V. (2009). *Issledovaniye termicheskogo razlozheniya biomassy v rezhime filtratsionnogo goreniya* [Investigation of the thermal decomposition of biomass in the filtration combustion regime]. *Metallurgicheskaya teplotekhnika [Metallurgical heat engineering]*, 1, 126–136 [in Rus.].

8. Klius V.P., Chetveryk H.O. (2017). Sumisne anaerobne brodinnya gnoyovih vidhodiv ta kondensatu gazogeneratornoyi ustanovki [Anaerobic digestion of mixture of manure with condensate from syngas plant]. *Vidnovluyava energetika [Renewable energy]*, 3, 80–86 [in Ukr.].

9. MVV 081/12-0136-04 Vymiryuvannya bikhromatnoyi oksylyuvannosti u probakh pryrodnykh, pytnykh ta stichnykh vodakh fotometrychnym metodom z vykorystannyam analizatora ridyny Flyuorat-02-3M [Measurement of bichromate oxidation in samples of natural, drinking and sewage waters by photometric method using a fluorate-02-3M liquid analyzer]. [in Ukr.].

10. Angelidaki I., Ellegaard L., Ahring B.K. (1993). Matematychna model dlya dynamichnoho modelyuvannya anaerobnoho peretravlennya skladnykh substrativ: zoseredzhennya uvahy na halmuvanni amiak [A mathematical model for dynamic simulation of anaerobic digestion of complex substrates: Focusing on ammonia inhibition]. *Bioresursnyy tekhnolohiya [Bioresource Technology]*, 42, 159–166 [in Eng.].

11. Eder B., Shults K.H. (2011). *Biogazovyie ustanovki* [Biogas installations]. Kiyev, Ukraina: Zorg Ukraina [in Rus.].

12. Dubrovskis V.S., Viestur U.E. (1988). *Metanovoye sbrzhivaniye selskokhozyaystvennykh otkhodov* [Methane fermentation of agricultural waste]. Riga, Latviya: Znaniye [in Rus.].

13. Avtomatychna systema testuvannya potentsialu metanu. (2016). [Automatic methane potential test system]. – Lund, Shvetsiya: Upravlinnya bioprotseoramy Shvetsiya AB [in Eng.].

14. Dobryva tverdi ta vapnuvalni materialy. Vyznachennya vmistu volohy hravimetrychnym metodom. Vysushuvannya za temperatury 105±2°S: DSTU EN 12048:2005. (2006). [Fertilizers for solid and lime materials. Determination of moisture content by gravimetric method. Drying at 105±2°C: ДСТУ EN 12048:2005.]. Kiyev, Ukraina: Derzhspozhyvstandart Ukrayiny. [in Ukr.].

SYNOPSIS

The purpose of the work is to determine and analyze the yield of methane and dynamics of methane formation during the digestion of manure wastes with the condensate from syngas

plant, which contain an insoluble tar. Evaluate the degree of destruction of manure organic matter and the degree of destruction of condensate organic matter.

Four substrates containing condensate from 0% to 8% were prepared for experimental studies. One additional substrate was also prepared which contained only inoculum to determine the residual methane in the inoculum. Cow manure was taken as a manure wastes. The digestate was taken after anaerobic digestion of a mixture of cow manure and condensate from syngas plant as an inoculum. The condensate containing the insoluble tar was obtained during the gasification of chips in a gasifier of a reverse process with a moving gasification zone.

The value of the volume of produced biogas was determined by the method of extrusion. The value of COD was determined by the photometric method. Parameters of the digestion were selected by the method of least squares approximating the experimental data to the Gompertz dependence with a limited growth potential. The mass concentration of dry matter and ash content were determined according to standard methods. The value of the volumetric carbon dioxide concentration was measured using a chemical gas analyzer. The pH of the medium was measured with pH meter.

The experiment under anaerobic conditions lasted for 60 days at a temperature maintained in the range from 34.8 °C to 35.2 °C. For substrates in which tar water was introduced, a significant increase in the lag phase from 4,2 days in the control substrate (without tar water) to 12,9-19,8 days in model substrates (with tar water) was observed. The yield of methane for model substrates was lower than in the control ones until 32-39 days of digestion. By the end of the experiment the yield of methane in the model substrates was higher in 1.25-1.31 times than in the control ones. It was found that the degree of destruction of manure organic matter decreases and the degree of destruction of condensate organic matter increases.

Summing up the experimental results one can state that it is possible to anaerobe utilize condensate in combination with manure wastes under a mesophilic regime.

Стаття надійшла до редакції 10.11.17
Остаточна версія 08.12.17