

В.В. Юркова; В.І. Шкляр канд. техн. наук, доцент;  
В.В. Дубровська канд. техн. наук, доцент  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ КОГЕНЕРАЦІЙНИХ УСТАНОВОК НА БІОПАЛИВІ

У статті проведена оцінка енергетичних потоків при роботі біогазових установок на базі газопоршневого двигуна внутрішнього згоряння, які працюють на біогазі з екскрементів великої рогатої худоби або з полігону твердих побутових відходів. Виконано розрахунок енергетичного балансу кожної з двох установок для вирішення питань з постачання теплової та електричної енергії споживачам.

**Ключові слова:** біогаз, енергія, метантенк, втрати теплоти, коефіцієнт теплопередачі, теплота згоряння, субстрат, біогазова когенераційна установка.

**Вступ.** На сьогоднішній день відновлювані джерела енергії (ВДЕ) займають значне місце в енергобалансі країн світу. Як свідчать дані Міжнародного енергетичного агентства [1], 13,1% первинної енергії в світі виробляється з ВДЕ, більшу частину яких складає біомаса - 9,9%. За період з 1991 р. споживання енергії з ВДЕ в ЄС збільшилося в два рази і складає близько 153 млн. т н.е./рік. Енергія з біомаси складає 107,1 млн. т н.е. (70% від усіх відновлюваних джерел) [2].

У структурі виробництва електроенергії з відновлюваних джерел перше місце займає гідроенергетика (57% всіх ВДЕ), на другому і третьому місцях знаходяться енергія вітру (21%) і біомаси (19%). Всього за рахунок ВДЕ в ЄС в 2020 р. має бути забезпечено 34% загального споживання електроенергії.

Одним з важливих секторів ВДЕ в світі є виробництво та енергетичне використання біогазу. У балансі виробництва електроенергії з ВДЕ в ЄС електроенергія з біогазу становить 4,5%, а в балансі виробництва електроенергії з біомаси - 24,4%. Згідно з офіційним прогнозом Єврокомісії [3] щодо структури виробництва електроенергії з ВДЕ в ЄС в 2020 р. частка електроенергії з біогазу становитиме близько 8%, перевищивши внесок малої гідроенергетики, геотермальної та сонячної енергетики, а також електроенергії з відходів.

Проблема функціонування полігонів твердих побутових відходів (ТПВ) постала досить гостро у наш час. Середній показник утворення ТПВ на одного жителя України складає сьогодні 350-400 кг/людину і має тенденцію до зростання. Низька вартість утилізації відходів призводить до їх накопичення. У товщі відходів, похованих на полігонах, під впливом мікрофлори відбувається біотермічний анаеробний процес розпаду органічної складової відходів. Кінцевим продуктом цього процесу є біогаз, основну об'ємну масу якого становлять метан і діоксид вуглецю. Поряд з названими компонентами біогаз містить водяну пару, оксид вуглецю, оксиди азоту, аміак, вуглеводні, сірководень, фенол і в незначних кількостях інші домішки, що володіють шкідливим впливом на здоров'я людини і навколишнє середовище. При великих концентраціях метану у тілі полігону, виникає загроза вибуху газоповітряної суміші, наслідком якого будуть великі руйнування, пожежі та нещасні випадки. Біохімічне розкладання підвищує температуру відходів до 40-70°C, що активізує процеси хімічного окислення і веде до подальшого підвищення температури. Найчастіше відведення теплоти з товщі звалища недостатній, що призводить до самозаймання відходів. Поширення газу і неприємного запаху відбувається на відстань до 300 - 400 метрів. У продуктах згоряння відходів небезпечних металів, в деяких випадках, у тисячі разів більше, ніж в "звичайному" повітрі. Токсичні метали викидаються у формі солей або оксидів, тобто в стійкому вигляді, і можуть лежати невизначене число років, накопичуючись поступово із пилом. Відкачування біогазу із тіла полігону дозволяє уникнути аварійних ситуацій та мінімізувати викиди у навколишнє середовище.

Відходи тваринництва, як правило, використовуються для підвищення рівня родючості ґрунту у вигляді органічного добрива. Проте, за перший рік внесення гною великої рогатої худоби (ВРХ) рослини використовують лише 30-40% фосфору, 60-70% калію і лише 18% азоту, які містяться у ньому. Повне засвоєння корисних речовин відбувається протягом трьох років. При цьому 70% вуглецю перетворюється на вуглекислий газ, який потрапляє у верхні шари атмосфери. Метанове бродіння гною є вирішенням даної проблеми, оскільки вуглець перетворюється у метан, який разом із вуглекислим газом утворюють біогаз. Також при цьому утворюється цінне органічне добриво. Після нескладної обробки (фільтрація та сушка) його можна реалізовувати в комерційних цілях, що дозволяє збільшити

рентабельність проекту.

**Метою** роботи є аналіз енергетичної ефективності використання біогазу з побутових відходів життєдіяльності людини та відходів тваринництва в когенераційних установках для отримання теплової та електричної енергії.

Значна частина енергії біогазу споживається на власні потреби біогазової установки (БГУ) (підігрів біореакторів, привод механізмів). Основні показники роботи біогазових установок можуть істотно різнитися, що багато в чому визначається використаними субстратами, прийнятим технологічним регламентом, експлуатаційною практикою, цілями і завданнями кожної окремої установки. Ефективність роботи біогазових комплексів багато в чому залежить як від обраної технології, матеріалів і конструкції основних споруд, так і від кліматичних умов у районі їх розташування. Таким чином постає питання визначення та аналізу енергоефективності біогазових комплексів, що працюють на біогазі з різних джерел.

Енергетичний баланс когенераційних технологій утилізації біогазу досліджується у роботі [4]. Дослідженню енергетичного навантаження систем та метантенка присвячена робота [5]. Проте вони розглядають втрати теплової енергії, до яких включають також затрати на перемішування субстрату. Значення втрат теплоти у метантенку у даній роботі визначається як сума втрат на підігрів субстрату до температури бродіння та втрат у навколишнє середовище. Витрати енергії на перемішування враховані у витратах електроенергії.

Для коректності порівняння отриманих результатів дослідження розрахунки проводились на 1000 м<sup>3</sup> біогазу із полігону ТПВ та відходів ВРХ для кліматичних умов Київської області.

Енергетичний потенціал біогазу (брутто) визначається за формулою [4]:

$$Q_1 = oTS \cdot q_{bg} \cdot LHV_{bg} \quad (1)$$

де  $oTS$  – розрахункова доза внесення органічного субстрату, виражена в кг беззолної сухої речовини субстрату за добу;  $q_{bg}$  – питомий вихід біогазу на кг субстрату, нм<sup>3</sup>/кг  $oTS$ ;  $LHV_{bg}$  – нижча теплотворна здатність біогазу, МДж/м<sup>3</sup>.

Оскільки розрахунки приведені до 1000 м<sup>3</sup> біогазу, і для ТПВ вихід  $q_{bg}$  становить в середньому 0,12 м<sup>3</sup>/кг, а для відходів ВРХ - 0,025 м<sup>3</sup>/кг субстрату, то звідси слідує, що для отримання однакової кількості біогазу необхідно використати майже у 5 разів більше відходів ВРХ, ніж ТПВ. Проте його теплотворна здатність становить 6,95 кВт·год/м<sup>3</sup>, а у біогазі з ТПВ- 6,11 кВт·год/м<sup>3</sup>, таким чином енергетичний потенціал біогазу із побутових відходів майже на 12% менший.

Кількість виробленої теплової та електричної енергії визначається за формулами:

$$Q_2 = Q_1 \eta_e \quad (2)$$

$$Q_3 = Q_1 \eta_{th} \quad (3)$$

де  $Q_2$  – вироблена електрична енергія;  $Q_3$  – вироблена тепла енергія;  $\eta_e$  – електричний ККД газопоршневого двигуна (ГПД), %;  $\eta_{th}$  – тепловий ККД ГПД, %.

Електричний ККД когенераційної установки на базі поршневого двигуна внутрішнього згоряння становить вередньому 40%, а тепловий - 46%. У випадку експлуатації установок на біогазі із ТПВ із 1000 м<sup>3</sup> біогазу можна отримати 2494,10 кВт·год електричної та 2832,60 кВт·год теплової енергії, а під час застосування біогазу із відходів тваринництва відповідно 2837 кВт·год та 3222 кВт·год.

Для функціонування власне біогазової станції необхідна як електрична так і тепла енергія. Електрична енергія витрачається на привод насосів, мішалок, компресорів тощо і становить близько 5% виробленої електроенергії. Товарний залишок виробленої електроенергії визначається за формулою:

$$Q_{2'} = 0,95 Q_2 \quad (4)$$

Для системи, що працює на біогазі із ТПВ товарний залишок виробленої електроенергії становить 2369,40 кВт·год, а у разі використання біогазу із відходів тваринництва - 2695,1405 кВт·год.

Що стосується теплової енергії, то потреби у ній для системи, що працює на біогазі ТПВ приймаємо рівними 0, оскільки біогаз збирається системою збору із тіла полігону, на якому не передбачається підведення додаткової теплоти. У системі, що працює на біогазі із відходів ВРХ тепла енергія необхідна для підтримання процесу деструкції органічної речовини в біореакторі. Її споживання носить циклічний характер з максимумом в холодну пору року, та з мінімумом влітку. Біореактори працюють в режимі мезофільного бродіння, який передбачає підтримання температури +38 °С. Для забезпечення необхідних умов протікання процесу слід забезпечити покриття втрат теплоти у навколишнє середовище та підігрів субстрату, який подається у метантенк. Необхідну величину теплової енергії визначають за формулою:

$$Q_4 = k_1 \cdot (t_{in} - t_{ex}) \cdot F_{mt} + q_s \cdot C_s \cdot (t_{in} - t_s) \quad (5)$$

де  $k_1$  – коефіцієнт теплопередачі через ізольовану стінку біореактора, кВт/м<sup>2</sup>·К;  $t_{in}$  – розрахункова температура середовища всередині біореактора, °С;  $t_{ex}$  – розрахункова температура зовнішнього повітря в регіоні розташування біогазової установки, °С;  $F_{mt}$  – площа поверхні тепловіддачі біореактора, м<sup>2</sup>;  $q_s$  – розрахунковий об'єм органічного субстрату, кг/год;  $C_s$  – питома теплоємність органічного субстрату, кВт·год/(кг·К);  $t_s$  – розрахункова температура органічного субстрату на вході в біореактор, °С.

Коефіцієнт теплопередачі  $k_1$  визначається за формулою:

$$k_1 = 1 / (1/\alpha_3 + \sum \delta_i/\lambda_i), \quad (6)$$

де  $\alpha_3$  – коефіцієнти теплообміну на зовнішній поверхні метантенка, Вт/(м<sup>2</sup> К);

$\delta_i$  – товщина стінки метантенка та шару ізолятора, м;

$\lambda_i$  – коефіцієнт теплопровідності стінки метантенка та теплоізоляції, Вт/(м К).

Враховуючи, що швидкість руху субстрату у процесі його механічного перемішування не значна, у розрахунках прийнято, що процес теплообміну на внутрішній поверхні метантенка проходить на умовах вільної конвекції. Значення  $\alpha_3$  залежить від швидкості вітру. Враховуючи кліматичні умови для Київської області, значення  $\alpha_3$  становить 22,95 Вт/(м<sup>2</sup> К) взимку, та 21,98 Вт/(м<sup>2</sup> К) влітку. Метантенк зроблений із сталі товщиною 0,007 м ( $\lambda = 46$  Вт/(м К)) та вкритий шаром ізоляції товщиною 0,08 м ( $\lambda = 0,05$  Вт/(м К)).

Розрахункові температури: середовища всередині біореактора  $t_{in} = 38$  °С; зовнішнього повітря  $t_{ex}$  становить -0,2 °С взимку та 15,64 °С влітку [7].

Тривалість процесу виділення біогазу - 14 діб. Завантаження гною безперервне із щоденною заміною 1/14 біомаси метантенка. Форма метантенка – циліндр. Щоденна норма завантаження субстрату становить 2500 кг. Оскільки вологість субстрату близька до 90%, то густину та теплоємність приймаємо відповідно 1000 кг/м<sup>3</sup> та 1,163 кВт·год/(кг·К). Умовою ефективною роботи метантенка є його неповне завантаження (70% загального об'єму) таким чином, площа поверхні тепловіддачі метантенка становить 280 м<sup>2</sup>. За умови зберігання тваринницьких відходів на відкритому повітрі температура субстрату при вході в біореактор відповідає температурі навколишнього середовища. Таким чином затрати теплової енергії на забезпечення умов протікання процесу виділення біогазу із відходів ВРХ становлять 2377,5 кВт·год взимку та 1391,5 кВт·год влітку. Товарний залишок теплової енергії для систем, що працюють на біогазі із відходів тваринництва визначається за формулою:

$$Q_3' = Q_3 - Q_4 \quad (7)$$

Підставляємо відповідні значення у формулу (7) та визначаємо, що товарний залишок теплової енергії для систем, які працюють на біогазі з відходів ВРХ становить 1020,9 кВт·год взимку та 1830,1 кВт·год влітку.

Сумарне корисне виробництво енергії визначається за формулою:

$$Q_{\Sigma} = Q_2' + Q_3' \quad (8)$$

Враховуючи енергетичні затрати, що присутні у кожній із розглянутих систем, сумарне корисне виробництво енергії для установок, що працюють на біогазі із ТПВ становить 5021,99 кВт·год, а для систем із застосуванням біогазу із відходів тваринництва 3539,7 – 4525,2 кВт·год. Таким чином, ефективність виробництва теплової та електричної енергії з біогазу в природно-кліматичних умовах Київської області за рік становить 85% та 50 – 65 % відповідно. Графік сумарного корисного виробництва енергії когенераційною установкою для кожного з виду палив наведено на рисунку 1.

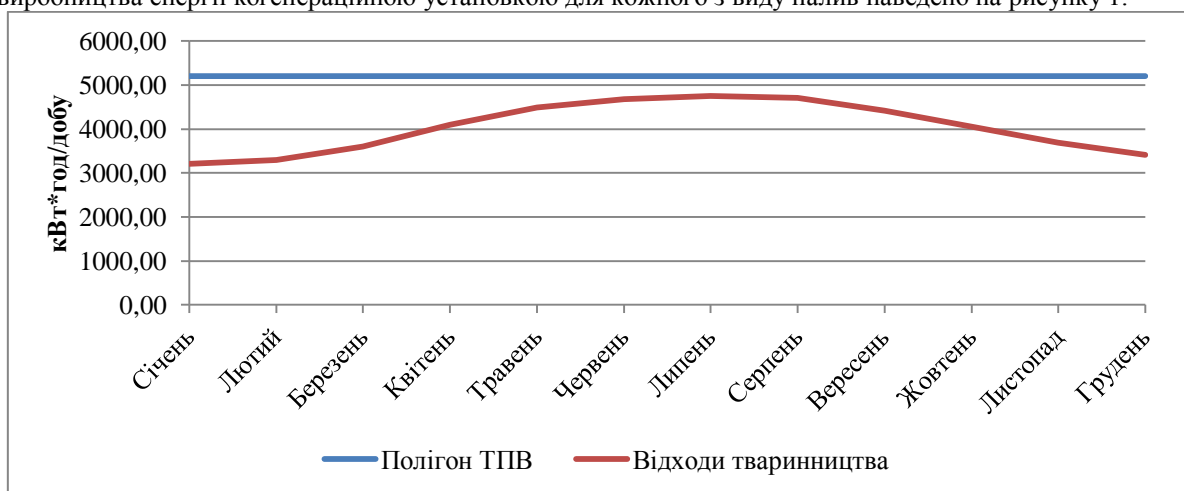


Рис. 1 Сумарне корисне виробництво енергії

**Висновки.** Для отримання однакової кількості біогазу необхідно використати майже в 5 разів більше відходів ВРХ, ніж ТПВ, проте енергетичний потенціал біогазу із відходів ВРХ на 12% більший. При застосуванні системи, що працює з відходами тварин присутні додаткові витрати теплової енергії на підтримання належної температури всередині метантенка, які складають 43 % від загального потенціалу теплової енергії взимку та 74% влітку. Але, не дивлячись на це, в загальному, показники енергетичної ефективності є достатньо високими. Енергетична ефективність кожної з розглянутих систем є доцільною для впровадження та застосування на території України і становить 85% для твердих побутових відходів

та 50– 65 % для відходів тваринництва. До того ж досягається екологічний ефект – утилізація метану. Біогаз приблизно на 60% складається із метану, який у 21 раз перевищує негативний вплив вуглекислого газу, тому його утилізація має дуже важливе значення.

#### Список літератури

1. Renewables Information. IEA 2010; Europe in figures – Eurostat Yearbook 2010: <http://www.iea.org/stats>
2. Renewables Information. IEA, 2010; Eurostat <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>; Solid Biomass Barometer, 2010; EU energy and transport in figures, 2010; AEBIOM Annual Statistical Report , 2011
3. Renewable Energy Road Map. Renewable energies in the 21st century: building a more sustainable future. COM(2006) 848 final, Brussels, 10.01.2007
4. Б. И. Басок, Т.А. Резакова, Д.А. Коломейко, Ю.Б. Матвеев Когенерация в децентрализованной и возобновляемой энергетике – Киев, 2013. – 408с.
5. Амерханов Р.А. Проектирование систем теплоснабжения сельского хозяйства: учебн. для вузов. Под. ред. проф. Б.Х. Драганова / Р.А. Амерханов, Б.Х. Драганов. – Краснодар: 2001. – 200 с
6. <http://www.meteoprog.ua/climate/Kyiv/>

V. Yurkova, V. Shklyar, V. Dubrovskaya,

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

#### ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY BIOFUEL COGENERATION PLANS

*The purpose of this research is to determine the energy efficiency and the feasibility of using biogas from human waste and animal waste in the cogeneration plants to produce heat and electricity. The paper deals with the identification, investigation and assessment of energy flows which were present while working of biogas plants based on gas-piston internal combustion engine. These plants use biogas from cattle excrements and solid waste landfill. The calculation of the energy balance of each of the two systems is done and is developed and defined useful energy production. The work revealed that the biogas of animal waste - is 5 lower than solid household waste, but his energy potential is on 12% higher. When using a system that works with animal waste there are additional costs of thermal energy to maintain proper temperatures inside the digesters , which constitute 43% of the total potential of energy in the winter and 74% in the summer. But in general, the energy efficiency of each of the systems is feasible to implement and use in Ukraine and is 85 % for human waste and 50 - 65 % for animal waste.*

**Keywords:** biogas energy digester, heat loss, heat transfer coefficient, heat of combustion, substrate, biogas cogeneration plant.

1. Renewables Information. IEA 2010; Europe in figures – Eurostat Yearbook 2010: <http://www.iea.org/stats>
2. Renewables Information. IEA, 2010; Eurostat <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>; Solid Biomass Barometer, 2010; EU energy and transport in figures, 2010; AEBIOM Annual Statistical Report , 2011
3. Renewable Energy Road Map. Renewable energies in the 21st century: building a more sustainable future. COM(2006) 848 final, Brussels, 10.01.2007
4. В. И. Басок, Т.А. Резакова, Д.А. Коломейко, Ю.Б. Матвеев *Когенерация в децентрализованной и возобновляемой энергетике* [Cogeneration in decentralization and renewable energy] – Киев, 2013. – 408с
5. . Amerhanov R.A. В.Н. Драганов. *Проектирование систем теплоснабжения сельского хозяйства* [Design of heating systems of agriculture - Krasnodar: 2001. – 200 s
6. <http://www.meteoprog.ua/climate/Kyiv/>

УДК 662.767.2

В.В. Юркова, В.И. Шкляр канд. техн. наук, доцент;

В.В. Дубровская канд. техн. наук, доцент,

Национального технического университета Украины «КПИ»

#### АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК НА БИОТОПЛИВЕ

*В статье проведена оценки энергетических потоков при работе биогазовых установок на базе газопоршневого двигателя внутреннего сгорания, использующих биогаз из экскрементов крупного рогатого скота и с полигона твердых бытовых отходов. Проведен расчет энергетического баланса каждой из двух установок для решения вопросов по снабжению тепловой и электрической энергией потребителей.*

**Ключевые слова:** биогаз, энергия, метантенк, потери теплоты, коэффициент теплопередачи, теплота сгорания, субстрат, биогазовая когенерационная установка.

Надійшла 16.04.2014

Received 16.04.2014