

УДК 662.76:504.064:683.95:662.614.2 (045)

ЕКОЛОГІЧНІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ АСПЕКТИ СПАЛЮВАННЯ БІОГАЗУ В АТМОСФЕРНИХ ПАЛЬНИКАХ

В.В. ГОРУПА

Національний авіаційний університет, м. Київ

В роботі представлено результати теоретичних розрахунків ККД використання палива (біогазу) η_f . Проведено розрахунок теоретичної температури горіння палива. Визначені питомі викиди оксидів азоту NO_x та діоксиду вуглецю CO_2 приведені на одиницю корисної енергії. В якості досліджуваного палива використовувалась суміш метану та діоксиду вуглецю.

Ключові слова: атмосферний пальник, біогаз, діоксид вуглецю, метан, продукти згоряння, оксиди азоту.

В Україні у 2017 році використано 62 147 тис. м³ біогазу [1]. Виробництво біогазу займає важливе місце в структурі відновлювальної енергетики. На відміну від сонячної та вітрової енергетики, виробництво біогазу (біометану) може нести базове навантаження (акумулявання) у відновлювальній енергетиці в цілому та енергетиці держави зокрема. Можливість акумулявання енергії при застосуванні біогазових технологій («біогаз → теплова енергія», «біогаз → електрична + теплова енергія») забезпечується різноманіттям сировинної бази; продукування біогазу не залежить від наявності вітру та інтенсивності сонячного випромінювання. В розвинених країнах світу стрімкими темпами збільшується кількість установок та об'єми біогазу, що генерується. На рис. 1 представлена встановлена потужність біогазових установок (МВт), що працюють за «зеленим тарифом», в Україні по роках.

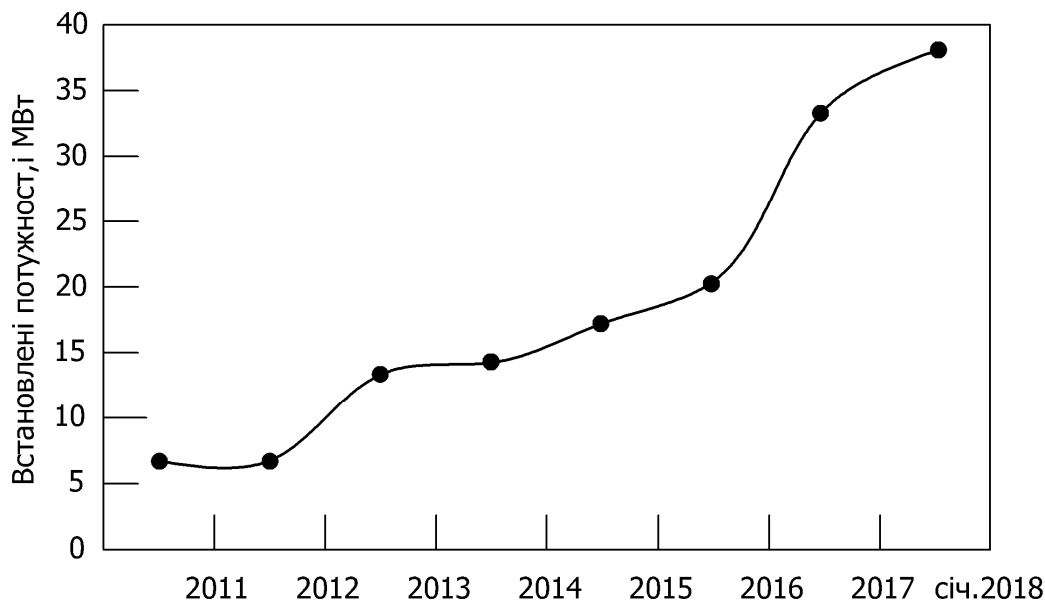


Рис. 1. Динаміка зростання потужності біогазових установок, що працюють за «зеленим тарифом» [1]

Варто зауважити, що відповідно до Директиви №2009/28/ЄС «Про сприяння використанню енергії з відновлюваних джерел» перед Україною стоять зобов'язання щодо збільшення частки відновлювальних джерел енергії в національному енергетичному балансі (11 % до 2020 року). Європейський вектор розвитку держави та виконання умов Директиви сприятимуть збільшенню обсягів виробництва біогазу в державі.

В Україні прийняті закони, що також стимулюють впровадження біогазових установок, регламентують відносини між усіма особами, що приймають участь у виробництві біогазу [2–3]. До прийняття цих законів, впровадження біогазових установок здійснювалось, головним чином, з ціллю забезпечення енергетичними ресурсами (теплова, електрична енергія) власних потреб підприємств.

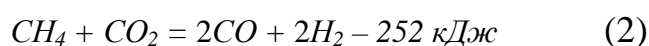
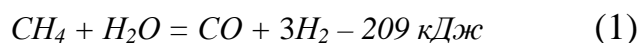
Динаміка росту встановленої потужності біогазових установок (рис. 1) свідчить, що в Україні зростає та зростатиме надалі генерація біогазу та кількість біогазових установок.

В Україні найбільш поширеним є виробництво біогазу в агропромисловому комплексі на підприємствах, які володіють значними

обсягами сировинної бази (гній великої рогатої худоби, свинячий гній, курячий послід, кукурудзяний силос, трав'яний силос, силос цукрового та кормового буряку та інша сировина, придатна для переробки в біогаз.). Одні з найбільших біогазових установок побудовані на птахофабриках агрохолдингу «Миронівський хлібопродукт» (ПрАТ "Оріль-Лідер" 5 МВт), цукровому виробництві (м. Рокитне цукровий завод 2,5 МВт) та інших підприємствах.

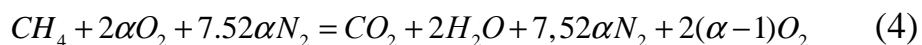
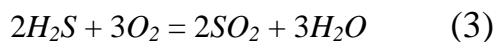
Біогаз являє собою суміш метану (CH_4 : 50 – 75 % об.), діоксиду вуглецю (CO_2 : 25–50 % об.), водяної пари (H_2O : 0–10 % об.), азоту (N_2 : 0,01–5 % об.), кисню (O_2 : 0,0 – 2 % об.), водню (H_2 : 0–1 % об.), аміаку (NH_3 : 0,01–2,5 мг/м³) та сірководню (H_2S : 10–30.000 мг/м³) [4]. Із перерахованих компонентів метан є основним горючим газом цієї суміші, нижча теплота згоряння якого становить 35,88 МДж/м³, що еквівалентно потужності ≈ 10 КВт/год. [5]. Варіювання частки метану та інших компонентів в суміші залежить від сировини, з якої був отриманий біогаз.

Під час проектування біогазових установок та їх технологічних параметрів необхідно намагатися максимально збільшувати вміст метану та зменшувати вміст інших «баластових» компонентів. Діоксид вуглецю CO_2 , атомарний азот N_2 , водяна пара H_2O в загальному знижують енергетичну цінність біогазу та можуть погіршувати показники процесів його використання. Проте, деякий вміст водяної пари може покращувати екологічні характеристики процесу, а саме: зменшувати викиди оксидів азоту та збільшувати коефіцієнт корисної дії (ККД) в разі спалювання біогазу в конденсаційному котлі. Наявність водяної пари та діоксиду вуглецю (1–2) може забезпечити реакцію пароводяної конверсії метану при відповідних умовах [6] :



Присутність в незначній кількості в біогазі сірководню, горючого компоненту суміші, негативно впливає на процес спалювання. В продуктах згоряння метану в повітрі, утворюється водяна пара, яка реагує з продуктами реакції сірководню з киснем (3–4), утворюючи розчини сульфатної кислоти. В

подальшому сульфідна кислота може викликати корозію металевих частин котлів, двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ), трактів відведення продуктів горіння, в яких відбувається згорання біогазу.



Значна частина біогазу, головним чином та, яка отримується на підприємствах малої та середньої потужності, не перетворюється в електричну енергію за допомогою когенераційних чи тригенераційних установок. В цих випадках біогаз використовується як горючий газ для спалювання в котлах різної конструкції. Біогаз після відповідного ступеня очищення використовують як горючий газ для роботи котлів, що генерують теплову енергію для забезпечення технологічних процесів виробництва та його санітарно-технічних норм будівель підприємства в прохолодну пору року. Для котлів невеликої потужності (до 30 кВт), як правило, встановлюють атмосферні пальники з ежекцією первинного повітря для приготування горючої суміші. Для пальників такого типу є важливим якісне приготування суміші: однорідне переміщення горючого газу в певних пропорціях до первинного повітря, яке характеризується коефіцієнтом первинного надлишку повітря λ_{pr} . В процесі горіння склад попередньо підготовленої суміші буде впливати на межі стійкості полум'я, а саме на його проскок, відрив, повисання, та появу жовтих язиків полум'я. Виходячи з того, що основними компонентами біогазу є CH_4 та CO_2 в різному варіативному співвідношенні, важливою для стійкості процесів горіння є гомогенність хімічного складу суміші в часі. Біогаз зі складом ($CH_4 = 90\%$, $CO_2 = 10\%$) не потребуватиме особливих налаштувань для атмосферних пальників. При зменшенні вмісту метану, для забезпечення стійкості горіння потрібно змінювати коефіцієнт первинного надлишку повітря λ_{pr} .

У суміші газів, з яких може складатися біогаз, головним горючим газом є метан: його частка в суміші буде визначати енергетичні показники процесів його використання. На рис. 2 зображено графік залежності ККД використання

палива (варіювання об'ємного % CH_4 та CO_2) η_f в залежності від температури продуктів згоряння на виході з камери $T_{\text{вих}}$. Для розрахунку ККД використовувався вираз 5 [7].

$$h_f = \frac{I_{T_{\text{м}}\text{CH}_4+\text{CO}_2} - I_{T_{\text{вих}}\text{CH}_4+\text{CO}_2}}{I_{T_{\text{м}}\text{CH}_4} - I_{298\text{CH}_4}} \quad (5)$$

де: $I_{T_{\text{м}}\text{CH}_4+\text{CO}_2}$ – ентальпія паливної суміші при теоретичній температурі горіння, кДж/кг; $I_{T_{\text{вих}}\text{CH}_4+\text{CO}_2}$ – ентальпія продуктів згоряння на виході з камери горіння кДж/кг; $I_{T_{\text{м}}\text{CH}_4}$ – ентальпія метану при теоретичній температурі горіння кДж/кг; $I_{298\text{CH}_4}$ – ентальпія продуктів згоряння метану в повітрі за нормальних умов ($T = 298\text{K}$, $P = 0,101325\text{ МПа}$), кДж/кг.

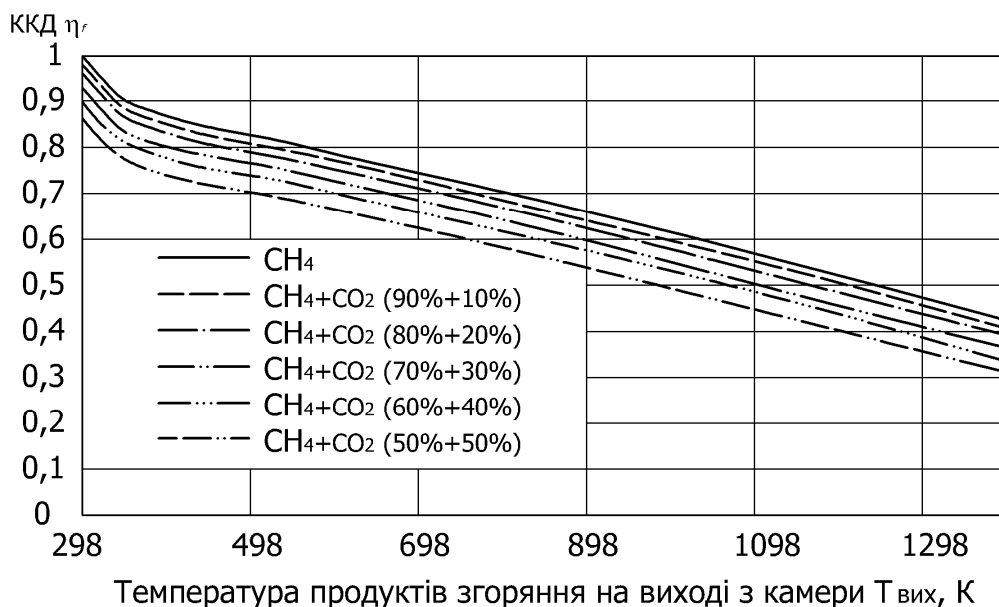


Рис 2. Залежність ККД використання енергії (η_f), від температури продуктів згоряння $T_{\text{вих}}$ на виході з камери. Паливо: метан та його суміш з діоксидом вуглецю; окислювач: повітря $T_{\text{нов}} = 298\text{K}$, коефіцієнт надлишку повітря $\lambda = 1,0$

Розрахункові значення ентальпій, теоретичних температур горіння суміші, були отримані за допомогою програмного комплексу «FUELS», розробленого проф. Сорокою Б.С. в Інституті газу НАН України. В табл. 1 приведені значення отриманих теоретичних температур горіння суміші в залежності від варіювання основних компонентів суміші (CH_4 та CO_2).

Теоретичні температури згоряння біогазу при варіюванні вмісту метану в суміші

	Концентрація метану в біогазі, %					
	100	90	80	70	60	50
T_t (K)	2221	2199	2173	2141	2099	2044

В процесах спалювання завжди важливими є екологічна складова та числові значення емісії оксидів азоту NO_x , діоксиду вуглецю CO_2 та моно оксиду вуглецю CO . Важливе практичне значення має розрахунок питомих викидів оксидів азоту та діоксиду вуглецю [8]. Автор даної праці розробив та описав методику визначення питомих викидів. У відповідності до даної публікації питомі викиди відповідних компонентів продуктів згоряння розраховуються відповідно до виразів 6 та 7.

$$C_{CO_2}'' = \frac{10^{-2} D_{CO_2} M_{CO_2}}{(\Delta I_{g.T} - \Delta I_{g.fl}) M_{g.T}} \quad (6)$$

$$C_{NOx}'' = \frac{10^{-2} D_{NO} M_{NO} + D_{NO_2} M_{NO_2}}{(\Delta I_{g.T} - \Delta I_{g.fl}) M_{g.T}} \quad (7)$$

де: D_{CO_2} D_{NO} D_{NO_2} – частки CO_2 , NO та NO_2 , в продуктах згоряння відповідно; M_{CO_2} M_{NO} M_{NO_2} – молекулярні маси відповідних компонентів, г/моль; $\Delta I_{g.T}$ – ентальпія палива ($CH_4 + CO_2$) при теоретичній температурі горіння кДж/кг; $\Delta I_{g.fl}$ – ентальпія продуктів згоряння на виході з камери, кДж/кг; $M_{g.T}$ молекулярна маса продуктів згоряння відповідної суміші, г/моль.

На рис. 3 та рис. 4 зображені графіки залежності питомих викидів оксидів азоту C_{NOx}'' та діоксиду вуглецю C_{CO_2}'' , розрахованих за методикою проф. Сороки Б.С. Динаміка зміни питомих викидів C_{NOx}'' та C_{CO_2}'' визначалась для метану та його сумішей з діоксидом вуглецю, вміст метану в суміші 80 %, 70 % та 60 % відповідно.

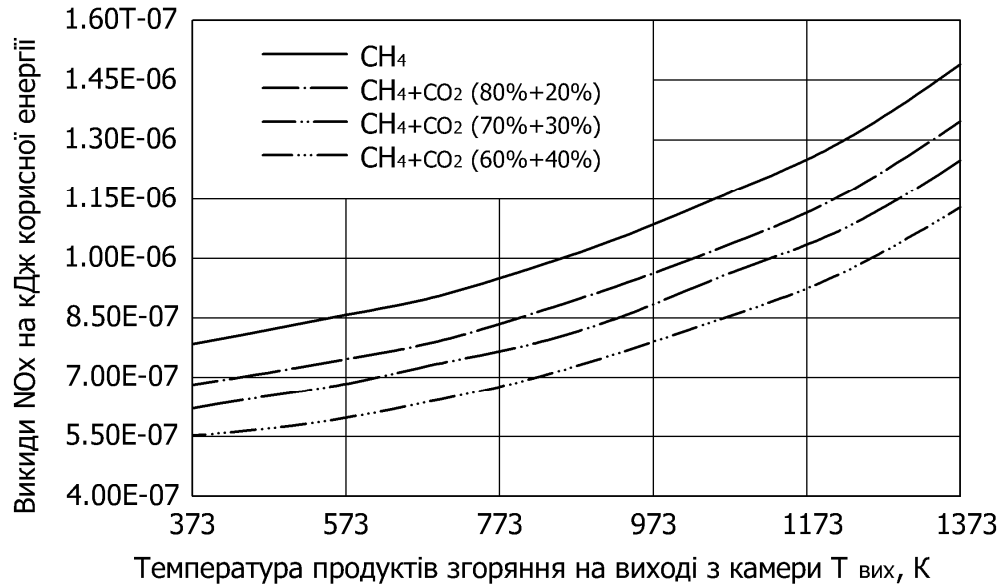


Рис. 3. Залежність питомих викидів оксидів азоту C_{NO_x}'' від температури продуктів згорання на виході з камери $T_{вих}$

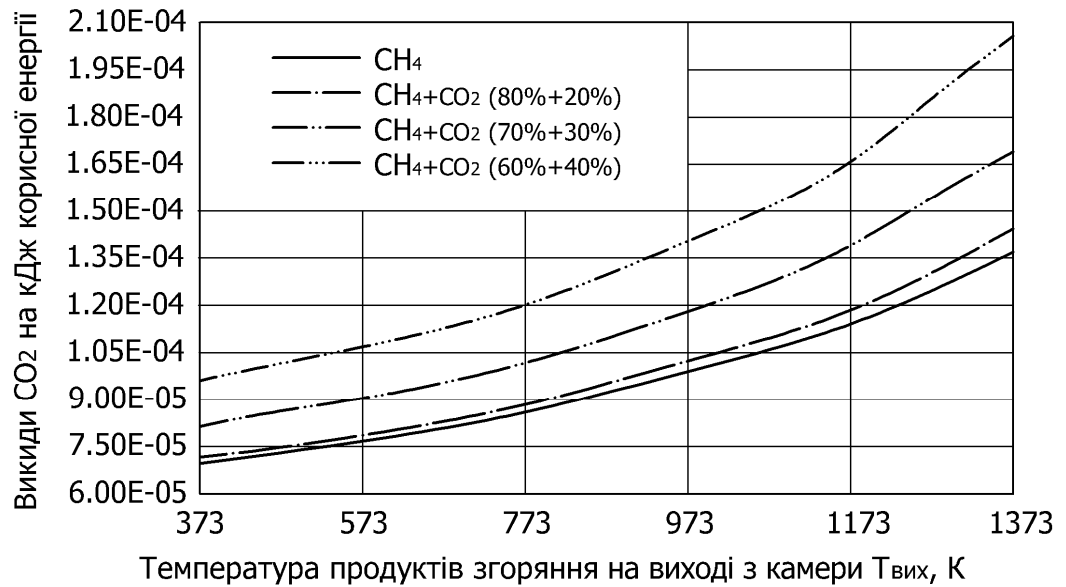


Рис. 4. Залежність питомих викидів діоксиду вуглецю C_{CO_2}'' від температури продуктів згорання на виході з камери $T_{вих}$

ВИСНОВКИ

В результаті проведених розрахунків можна зробити наступні висновки:

1. У випадку вмісту діоксиду вуглецю в біогазі у кількості 10 % (CH_4 – 90 %, CO_2 = 10 %) ККД використання палива \approx 90%, що наближено дорівнює енергетичним показникам для систем, які працюють на природному газі. Збільшення кількості CO_2 та відповідно зменшення CH_4 в суміші біогазу

призводить до суттєвого зниження ККД використання палива, для суміші ($\text{CH}_4 = 60\%$, $\text{CO}_2 = 40\%$) та температури продуктів згорання на виході з камери 698К ККД використання палива становить $\approx 65\%$.

2. Розрахункові значення питомих викидів C''_{NO_x} , приведених на кДж корисної енергії в суміші метану та діоксиду вуглецю, мають тенденцію до зниження із збільшенням вмісту діоксиду вуглецю. Збільшенням вмісту CO_2 знижує теоретичну температуру горіння і, як наслідок, зменшує оксиди азоту NO_x , які є характерними для високих температур горіння. Для суміші ($\text{CH}_4 = 60\%$, $\text{CO}_2 = 40\%$) вміст C''_{NO_x} зменшується на 30%. Зрозумілими та прогнозованими є результати розрахунків питомих викидів C''_{CO_2} приведених на кДж корисної енергії, із збільшенням вмісту CO_2 їх кількість збільшується, проте, потрібно зауважити що при вмісті $\text{CO}_2 = 20\%$ питомі викиди збільшуються на 5%.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Використання палива в Україні та по регіонах у 2017 році [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.ukrstat.gov.ua/>
2. Закон України Про внесення змін до Закону України "Про тепlopостачання" щодо стимулювання виробництва теплової енергії з альтернативних джерел енергії [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1959-19>.
3. Закон України Про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електроенергії з альтернативних джерел енергії [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/514-19>.
4. Виробництво і використання біогазу в Україні [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.uabio.org/materials/analytics/275-biogas-arzinger-handbook>.
5. Иссерлин А.С. Основы сжигания газового топлива: Справочное руководство / А.С. Иссерлин. – Л.: Недра, 1980. – 271 с.

6. Бондаренко Б.И. Межфазный углеродообмен: термодинамика и процессы переноса / Бондаренко Б.И., Сорока Б.С., Безуглый В.К. – К: Наукова думка, 2013. – 224 с.

7. Сорока Б.С. Сравнительный энергоэкологический анализ использования альтернативных газовых топлив различного происхождения / Сорока Б.С., Корниенко А.В. // Альтернативная энергетика и экология. – С.: НТЦ ТАТА. – 2012. – №7 (111). – С. 105–113.

8. Сорока Б.С. Оценка энергоэкологических характеристик использования топлива при замещении природного газа технологическим газовым топливом / Сорока Б.С., Воробьев Н.В. // Матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювальна енергетика та енергоефективність у XXI столітті» – К.: ІВЕ НАН України. – 2016. – С. 218–221.

ENVIRONMENTAL AND ENERGY ASPECTS COMBUSTION OF LANDFILL GAS (BIOGAS) IN THE ATMOSPHERIC BURNER

V.V. HORUPA

National Aviations University, Kyiv

The paper presents the results of theoretical calculations of the efficiency of the use of fuel (biogas) η_f . The calculation of the theoretical temperature of the combustion of fuel is carried out. Calculated emissions of nitrogen oxides NO_x and carbon dioxide CO_2 are given per unit of energy. The fuel used was a mixture of methane and carbon dioxide.

Key words: atmospheric burner, biogas (landfill gas), carbon dioxide, methane, combustion products, nitrogen oxides

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СЖИГАНИЯ БИОГАЗА В АТМОСФЕРНЫХ ГОРЕЛКАХ.

В.В. ГОРУПА

Национальный авиационный университет, г. Киев

В работе представлены результаты теоретических расчетов КПД использования топлива η_f (биогаза). Проведен расчет теоретической температуры сжигания топлива. Определены удельные выбросы оксидов азота NO_x и углекислого газа CO_2 приведенных на единицу полезной энергии. В качестве исследуемого топлива использовалась смесь метана и углекислого газа.

Ключевые слова: атмосферная горелка, биогаз, диоксид углерода, метан, продукты сжигания, оксиды азота