

Нові рішення у сучасній техніці та технологіях

УДК 621.431.36

DOI: 10.31471/1993-9868-2020-1(33)-101-108

АНАЛІЗ ЗАЛИШКОВИХ ГАЗІВ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ПРИ РОБОТІ НА БІОГАЗІ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ДОВКІЛЛЯ

Т. В. Дикун*, В. І. Артим, Я. М. Дем'янчук, Ф. В. Козак, Л. І. Гаєва

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727148,
e-mail: esm@iung.edu.ua

Враховуючи обмежені ресурси України в паливі нафтового походження для двигунів внутрішнього згорання, використання альтернативних палив є досить актуальним. Одним з джерел їх є біогаз з вторинних продуктів тваринництва і сміттєзвалищ. Україна має значні обсяги цих поновлювальних джерел, а їх потенціал сягає більше 100 млн тонн умовного палива. На жаль, цей ресурс використовується мало. В розвинених країнах біогаз широко використовується для виробництва електроенергії в енергетичних установках з ДВЗ. На сьогоднішній день у США обсяг видобутку біогазу становить близько 500 млн м³/рік, Франції – 40 млн м³/рік. В Чехії, Австрії, Данії, Фінляндії та інших країнах біогаз використовується як моторне паливо. Концерни Volvo, Scania виробляють автобуси, що працюють на біогазі. В Україні газ з сміттєзвалищ і вторинних продуктів тваринництва здебільшого викидається в атмосферу або спалюється на факелах, забруднюючи навколишнє повітря. Це спричиняє додаткову емісію парникового газу CO₂. Відомо, що основним джерелом забруднення атмосфери є автотранспорт. Токсичними є відпрацьовані, тобто залишкові гази. Світовим парком автотранспорту щорічно викидається до 260 млн. тонн оксиду карбону, 40 млн. тонн легких вуглеводнів, оксиди нітрогену та ін. Склад залишкових газів ДВЗ залежить від компонентного складу джерел одержання палива і, звичайно, від режиму роботи ДВЗ. В наведеній статті проаналізовано склад залишкових газів ДВЗ при роботі на біогазі і узагальнено вплив їх на довкілля. На основі аналітичних розрахунків визначено, як змінюється кількість складових залишкових газів у залежності від коефіцієнта надлишку повітря та відсоткового вмісту метану в біогазі. Подано рекомендації щодо покращення роботи ДВЗ на біогазі шляхом використання його в сумішах з природним газом. За результатами досліджень побудовано відповідні графічні залежності.

Ключові слова: природний газ, біогаз, сміттєзвалище, екологія, склад біогазу, відхідні гази, коефіцієнт надлишку повітря, чадний газ.

Учитывая ограниченные ресурсы Украины в топливе нефтяного происхождения для двигателей внутреннего сгорания, использование альтернативных топлив является достаточно актуальным. Одним из их источников является биогаз из вторичных продуктов животноводства и мусорных свалок. Украина имеет значительные объемы этих возобновляемых источников, а их потенциал превышает 100 млн тонн условного топлива. К сожалению, этот ресурс используется мало. В развитых странах биогаз широко используется для производства электроэнергии в энергетических установках с ДВЗ. На сегодняшний день в США объем добычи биогаза представляет около 500 млн м³/год, Франции – 40 млн м³/год. В Чехии, Австрии, Дании, Финляндии и других странах биогаз используется в качестве моторного топлива. Концерны Volvo, Scania производят автобусы, работающие на биогазе. В Украине газ из мусорных свалок и вторичных продуктов животноводства обычно выбрасывается в атмосферу или сжигается на факелах, загрязняя окружающий воздух. Это вызывает дополнительную эмиссию парникового газа CO₂. Известно,

что основным источником загрязнения атмосферы является автотранспорт. Токсичными являются отработанные (остаточные) газы. Мировым парком автотранспорта ежегодно выбрасывается до 260 млн тонн оксида карбона, 40 млн тонн летучих углеводородов, оксиды азота и др. Состав остаточных газов ДВЗ зависит от компонентного состава источников получения топлива и, конечно, от режима работы ДВЗ. В приведенной статье проанализирован состав остаточных газов ДВЗ при работе на биогазе и обобщено влияние их на окружающую среду. На основе аналитических расчетов определено, как изменяется количество составных остаточных газов в зависимости от коэффициента избытка воздуха и процентного содержания метана в биогазе. Даны рекомендации по улучшению работы ДВЗ на биогазе путем использования его в смесях с природным газом. По результатам исследований построены соответствующие графические зависимости.

Ключевые слова: природный газ, биогаз, мусорный полигон, экология, состав биогаза, остаточные газы, коэффициент избытка воздуха, угарный газ.

Given the limited resources of Ukraine in petroleum fuels for internal combustion engines, the use of alternative fuels is quite relevant. One of their sources is biogas from livestock by-products and garbage dump. Ukraine has significant volumes of these renewable sources, the potential of which reaches more than 100 million tons of conventional fuel. Unfortunately, this resource is rarely used. In developed countries, biogas is widely used for electricity generation in power plants with internal combustion engines. Today in the United States the volume of biogas production is about 500 million m³ / year, in France – 40 million m³ / year. In the Czech Republic, Austria, Denmark, Finland and other countries, biogas is used as a motor fuel. Business Concerns Volvo, Scania produce buses running on biogas. In Ukraine, gas from landfills and livestock by-products is mostly released into the atmosphere or burned by flares, polluting the surrounding air. This causes additional greenhouse gas emissions. It is known that the main source of air pollution is vehicles. Exhaust, i.e. residual gases are considered toxic. The World Motor Vehicle Park annually emits up to 260 million tons of carbon monoxide, 40 million tons of volatile hydrocarbons, nitrogen oxides and others. The composition of the residual gases of the internal combustion engine depends on the component composition of the sources of fuel and, of course, on the mode of operation of the internal combustion engine. In the given article the structure of residual gases of internal combustion engines at work on biogas is analyzed and their influence on environment is generalized. Based on analytical calculations, it is determined how the amount of residual gas components changes depending on the excess air ratio and the percentage of methane in biogas. Recommendations for improving the performance of internal combustion engines on biogas by using it in mixtures with natural gas are given. According to the research results, the corresponding graphical dependences are constructed.

Keywords: natural gas, biogas, garbage dump, ecology, composition of biogas, remaining gases, coefficient of surplus of air, carbon monoxide.

Вступ

Значний ріст кількості автомобілів в країні, обмежені ресурси України в паливі нафтового походження для двигунів внутрішнього згоряння робить питання пошуку альтернативних джерел палив досить актуальним. Одним з напрямків пошуку цих джерел є виробництво і використання біогазу з вторинних продуктів тваринництва і сміттєзвалищ. Україна має значні обсяги власних поновлювальних джерел, потенціал яких сягає 100 млн тон умовного палива. Обсяги використання цих енергоресурсів становить не більше 0,02%. На жаль, цей цінний ресурс в кількості до 1 млрд м³ на рік викидається в атмосферу, забруднюючи її, або спалюється в факельних установках. Виробництво енергії з біогазу не шкідливе для оточуючого середовища, оскільки не спричиняє додаткову емісію парникового газу CO₂ і зменшує кількість органічних відходів. На відміну від енергії вітру і сонячного випромінювання, біогаз можна отримувати незалежно від кліматичних і погодних умов, а, на відміну від викопних

джерел енергії, біогаз в Україні має дуже високий відновлюваний потенціал.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Біогазові технології розвиваються швидкими темпами в країнах Європейського союзу, вартість біогазових установок яких оцінюється в 3 млрд. доларів. Там 75% біогазу виробляється з відходів сільського господарства, в тому числі 17% – з органічних відходів підприємств і домогосподарств і 8% – на каналізаційних очисних спорудах. Перше місце в Європі за кількістю біогазових установок належить Німеччині, де їх налічується понад 9000. В Данії біогаз забезпечує майже 20 % енергоспоживання. Високими темпами розвивається ринок біогазу в Великобританії, Швеції, Норвегії, Італії, Польщі.

В Австрії, Чехії, Данії, Фінляндії, Угорщині, Франції біогаз використовується як моторне паливо, в тому числі і в суміші з природним газом. Volvo і Scania виробляють автобуси з двигунами, які працюють на біогазі. Ці автобуси використовують в містах Берн, Базель,

Таблиця 1 – Компоненти залишкових газів

	Компоненти	Вміст компонента, %		
		Карбюраторний двигун	Дизельний двигун	Двигун, що працює на біогазі при $\alpha > 1$
Токсичні				
1	CO	0,5÷12 %	1,0÷10,0 %	0,5÷11
2	C _n H _m	0,2÷0,3 %	0,009÷0,5 %	
3	NO ₂	до 0,8 %	0,0002÷0,5 %	до 0,8 %
4	Альдегіди	0,2 мг/л	0,001÷0,09	0,1÷0,15 мг/м ³
5	Сажа	до 0,04 г/м ³	мг/л	--
6	Бензопірен	10÷20 мг/м ³	0,01÷1,1 г/м ³	--
7	H ₂	до 5,0 %	до 10 мг/м ³	
Не токсичні				
1	CO ₂	5,0÷12 %	1,0÷10,0 %	30÷40 %
2	H ₂ O	3,0÷5,5 %	0,5÷4,0 %	3÷4 %
3	N ₂	74÷77 %	76÷78 %	74÷77 %
4	O ₂	0,3÷8,0 %	2÷18,1 %	--

Женева, Люцерн і Лозанна. Швейцарська асоціація газової індустрії повідомляє, що вже в 2010 р. більше 10% автотранспорту Швейцарії працювало на біогазі [1]. Муніципалітет Осло в 2009 р. перевів на біогаз 80 міських автобусів. В найближчий час на біогаз буде переведено до 400 автобусів.

В Україні розвиток біогазової енергетики залишається ще на початковій стадії. Основна причина цього – відсутність достатньої державної підтримки її [2].

Перший біогазовий комплекс з'явився в Україні ще в 1993 р. на свинофермі комбінату «Запоріжсталь». У вересні 2013 р. в Івано-Франківській області був запущений біогазовий завод ТОВ «Даноша». Це дало можливість вирішити проблему утилізації відходів свиногомплексу і забезпечити його електричною енергією власного виробництва. Щорічна економія природного газу на виробництві склала 1,6 млн м³ [3].

Враховуючи, що основу біогазу становить метан (CH₄), його використовують як моторне паливо для ДВЗ після необхідної очистки.

Автомобільний транспорт є вагомим джерелом забруднення навколишнього середовища. У зв'язку з тим, що кількість автомашин невинно зростає, збільшується кількість і викидів шкідливих продуктів в атмосферу. Основна частка токсичних речовин надходить в навколишнє середовище з залишкових газів ДВЗ [4]

Компоненти залишкових газів від ДВЗ наведено в табл.1.

Крім них в атмосферу викидаються оксиди сірки, нітрогену, сажа, канцерогенний бензопі-

рен C₂₀H₁₂, частинки незгорілого палива. На склад залишкових газів впливають вид палива, присадок, використаних оливі, технічний стан двигуна, умови експлуатації автомобіля і, звичайно, режим роботи двигуна. Найбільш токсичними складовими залишкових газів є оксид карбону і оксид нітрогену.

Вплив залишкових газів на довкілля

Автотранспорт є основним джерелом забруднення атмосфери. Токсичними викидами є, в основному, відпрацьовані і картерні гази, кількісний склад яких показано в таблиці 1. Світовим парком автомобілів з ДВЗ щорічно викидається оксиду карбону – 260 млн тонн, летких вуглеводнів – 40 млн тонн, оксидів нітрогену – 20 млн тонн.

Найбільш небезпечними викидами є оксид карбону CO, оксид нітрогену NO₂, вуглеводні сполуки, альдегіди, сажа.

В деяких містах США концентрація CO досягає до 200 мг/м³ протягом коротких періодів, при максимально допустимих разових концентраціях 40 мг/м³.

Оксид карбону CO утворюється в ДВЗ при роботі їх на багатих паливо-повітряних сумішах ($\alpha < 1$). Причиною цього є нестача кисню для повного окислення карбону. Він є високотоксичним і зберігається в атмосфері від 0,1 до 5 років. Другою причиною утворення CO є нестача часу на процес згоряння, через що він не встигає доокислитися до діоксиду карбону. Збільшення концентрації оксиду карбону відбувається і через припинення реакції окислення в суміші, що знаходиться поблизу стінки камери згоряння, де проходить гасіння полум'я. При

$\alpha > 1$ концентрація CO в залишкових газах стабілізується на рівні 0,2÷0,3 % і далі практично не залежить від складу суміші. Оксид карбону (чадний газ), потрапляючи в легені та кров, «зв'язує» кров'яні тілця, що призводить до кисневого голодування тканин організму і навіть до смерті [5,6].

Діоксид карбону CO₂ – неотруйний газ без кольору і запаху. Він є природною складовою атмосфери, має парникові властивості, тобто сприяє утриманню тепла на поверхні землі і робить основний внесок в глобальне потепління.

Загалом в залишкових газах двигунів є декілька сотень різновидів вуглеводневих сполук. Вони складаються з ароматичних C_nH_{2n} та інших вуглеводів. Є в залишкових газах і органічні пероксиди, і альдегіди (недоокислені вуглеводні, наприклад альдегіди – формальдегід H₂C та акролеї C₂H₃ – CHO). Вони нестійкі і можуть об'єднуватися, утворюючи поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ). Серед них найбільш токсичним є бензопірен, який спричиняє ракові захворювання. Вуглеводневі структури, що потрапили в атмосферу, є складовою смогу в великих містах. Інтенсивний смог викликає алергічні реакції, подразнення слизової оболонки, приступи бронхіальної астми. Найбільш небезпечним для навколишнього середовища і людини є оксид нітрогену. Він утворюється в результаті збільшення температури згоряння. Це відбувається при високих коефіцієнтах надлишку повітря. Основним методом зниження вмісту оксиду нітрогену є установлення на автомобілі каталітичного нейтралізатора. Але при цьому висуваються високі вимоги до якості палива. Вплив оксиду нітрогену проявляється в стратосфері і тропосфері, стаючи причиною руйнування захисного озонового шару землі, зростання біологічно активної радіації і ставить під загрозу існування біосфери. Зберігається він в атмосфері протягом 3÷4 днів. В той же час оксид нітрогену забезпечує, в певних дозах, нормальний кровоток, контролює м'язевий ріст, може ефективно перешкоджати тромбозу кровоносних судин.

Сполуки сірки викидаються в атмосферу в вигляді діоксиду сірки SO₂. Це безбарвний газ з гострим запахом. При контакті з вологою утворюються кислоти H₂SO₃ і H₂SO₄. Забруднення ними призводить до уповільнення росту і загибелі рослин, зниження продуктивності тваринництва, прискоренню процесів корозії металів і руйнування будівельних конструкцій. Діоксид сірки навіть в малих концентраціях (20÷30 мг/м³) створює неприємний смак, подразнює слизові оболонки очей і дихальних шляхів,

знижує опірність до респіраторних захворювань.

Формулювання цілей статті

1. Проаналізувати особливості складу залишкових газів ДВЗ при роботі на біогазі, їх кількісний і якісний склад.
2. Узагальнити вплив залишкових газів на довкілля.
3. Визначити, як змінюється склад залишкових газів залежно від коефіцієнта надлишку повітря α та відсоткового вмісту метану в біогазі.

Розрахунок окремих компонентів викидних газів при роботі ДВЗ на біогазі

Усереднений склад біогазу з побутових відходів [6]:

$$\text{CH}_4 - 65 \div 70\%; \text{CO}_2 - 24 \div 35\%; \text{O}_2 - 1,5 \div 4,0\%; \\ \text{N}_2 - 1,5 \div 6,0\%; \text{H}_2\text{S} - 0,05 \div 0,1\%; \text{H}_2\text{O} - 1,5 \div 2,5.$$

Компонентний склад біогазу з вторинних продуктів тваринництва складає: CH₄ – 50÷70%; CO₂ – 30÷40%; N₂ – 0,2%; H₂S – 0,1÷0,15%; хлору – 0÷5 мг/м³.

Склад газу залежить від компонентного складу побутових відходів і вторинних продуктів тваринництва. Для розрахунків приймаємо такі об'ємні частки основних складових: CH₄ – 65% об.; CO₂ – 35% об.; O₂ – 2,0%; N₂ – 2,5%; H₂S – 0,05%; H₂O – 2,5%.

Теоретично необхідна кількість повітря L_o , $\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$ для згоряння 1 кіломоля біогазу

$$L_o = \frac{1}{0,21} \sum \left(n + \frac{m}{4} - \frac{r}{2} \right) C_n H_m O_r \quad (1)$$

кмоль повітря / кмоль газу

де m, n, r – кількість кіломоляв карбону, гідрогену і оксигену в біогазі.

Коефіцієнт надлишку повітря α

$$\alpha_T = \frac{V_{\text{пов}}}{V_T \cdot L_o}, \quad (2)$$

де $V_{\text{пов}}$ – дійсна кількість повітря, що надійшла в двигун, м³/год;

V_T – витрата біогазу, м³/год.

Склад і кількість продуктів згоряння для випадку $\alpha > 1$ [3]:

кількість вуглекислого газу, кмоль

$$M_{\text{CO}_2} = \sum (n M_{C_n H_m O_r});$$

кількість водяної пари, кмоль

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = \sum \left(\frac{m}{2} M_{C_n H_m O_r} \right); \quad (3)$$

кількість кисню, кмоль;

$$M_{\text{O}_2} = 0,21(\alpha - 1)L_o;$$

кількість азоту, кмоль;

$$M_{N_2} = 0,79\alpha L_o + M_{N_2'},$$

де $M_{N_2'}$ – кількість N_2 , що міститься в біогазі.

Загальна кількість продуктів згоряння в біогазі у кіло молях, віднесених до кіломоляв біогазу

$$M_{зг} = \sum \left(n + \frac{m}{4} \right) M_{C_n H_m O_r} + M_{N_2'} + (\alpha - 0,21)L_o. \quad (4)$$

Найбільш небезпечним, з точки зору викидів, є робота двигунів внутрішнього згоряння на багатих сумішах. Склад продуктів згоряння визначимо для випадку, коли коефіцієнт надлишку повітря $\alpha < 1$:

кількість вуглекислого газу, кмоль

$$M'_{CO_2} = \sum (n M_{C_n H_m O_r}) - 0,42 \frac{1-\alpha}{1+k} L_o ;$$

кількість чадного газу, кмоль

$$M'_{CO} = 0,42 \frac{1-\alpha}{1+k} L_o ;$$

кількість водяної пари, кмоль

$$M'_{H_2O} = \sum \left(\frac{m}{2} M_{C_n H_m O_r} \right) - 0,42 \frac{1-\alpha}{1+k} L_o ; \quad (5)$$

кількість водню, кмоль;

$$M'_{H_2} = 0,42k \frac{1-\alpha}{1+k} L_o ;$$

кількість азоту, кмоль

$$M'_{N_2} = 0,79\alpha L_o .$$

Коефіцієнт k характеризує співвідношення кількості вільного H_2 і CO у відхідних газах. Для біогазу він приймається $k = \frac{H_2}{CO} = 0,45 \div 0,5$ [7].

Кількість залишкових газів характеризується коефіцієнтом залишкових газів $\gamma_{г}$

$$\gamma_{г} = \frac{M_{зг}}{M_{сз}}, \quad M_{сз} = \alpha L_o + \frac{1}{m_n}, \quad (6)$$

де $M_{зг}$ – кількість залишкових газів (в кіломолях);

$M_{сз}$ – кількість свіжої суміші в кіломолях, що дійсно надійшла в циліндр (для двигунів без наддуву при P_o і T_o).

P_o і T_o – тиск і температура навколишнього середовища.

Після перетворень, з врахуванням рівняння стану, отримаємо

$$\gamma_{г} = \frac{1}{(\varepsilon-1)\eta_v} \frac{P_{г} T_o}{P_o T_{г}}, \quad (7)$$

де $P_{г}$, $T_{г}$ – тиск і температура залишкових газів;

η_v – коефіцієнт наповнення

$$\eta_v = \frac{M_{сз}}{M_h} = \frac{G_{сз}}{V_h \cdot \rho}, \quad (8)$$

де ρ – густина свіжого заряду, $\frac{м^3}{м^3}$;

V_h – робочий об'єм циліндра;

M_h – теоретично можлива кількість суміші, яка може заповнити циліндр.

Кількість продуктів згоряння суттєво залежить від коефіцієнта надлишку повітря α і η_v .

На основі формул 1–8 з врахуванням складу біогазу і з використанням програм розрахунку і оптимізації ДВЗ [2] виконано розрахунки. За їх результатами побудовано графіки, які зображені на рисунках (1–6). При розрахунках використовувалися технічні характеристики двигуна ЗІЛ-130:

- потужність – 111,85 кВт;
- крутний момент – 401 Н·м;
- робочий об'єм – 6 л;
- міра стиску – 6.25.

Висновки

Біогаз може слугувати одним з альтернативних палив для ДВЗ, враховуючи, що основним компонентом його є метан. Використання біогазу для ДВЗ має суттєвий екологічний ефект, оскільки в атмосферу буде викидатися менше оксиду і діоксиду карбону, оксидів нітрогену. Склад і кількість продуктів згоряння при використанні біогазу як палива для ДВЗ залежить значною мірою від відсотків метану і коефіцієнта надлишку повітря. При збільшенні α від 0,8 до 1,0 кількість CO зменшується на 81 %, тобто ДВЗ повинні працювати на збіднених сумішах. За рахунок збільшення на 25 % метану в суміші з біогазом кількість CO у відхідних газах при $\alpha=0,8$ збільшується незначно (з 0,018 до 0,023 $\frac{м^3}{м^3}$).

Оскільки дослідження проводились при $\alpha=0,8$, зростання кількості H_2 і CO_2 в продуктах згоряння закономірне через непоповне згоряння палива.

Для покращення показників роботи ДВЗ на біогазі рекомендується додавати до нього природний газ – метан.

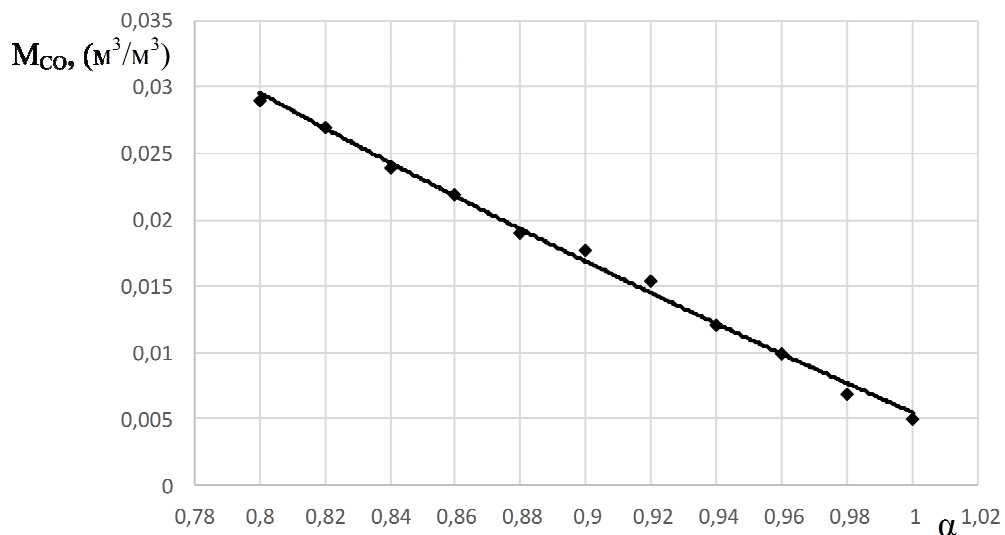


Рисунок 1 – Залежність кількості CO у відхідних газах від коефіцієнта надлишку повітря

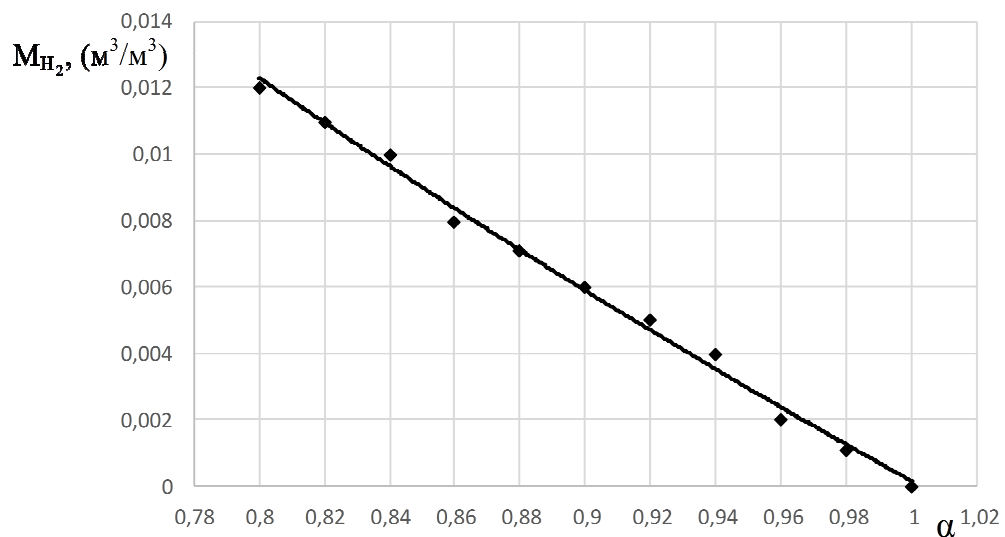


Рисунок 2 – Залежність кількості H2 у відхідних газах від коефіцієнта надлишку повітря

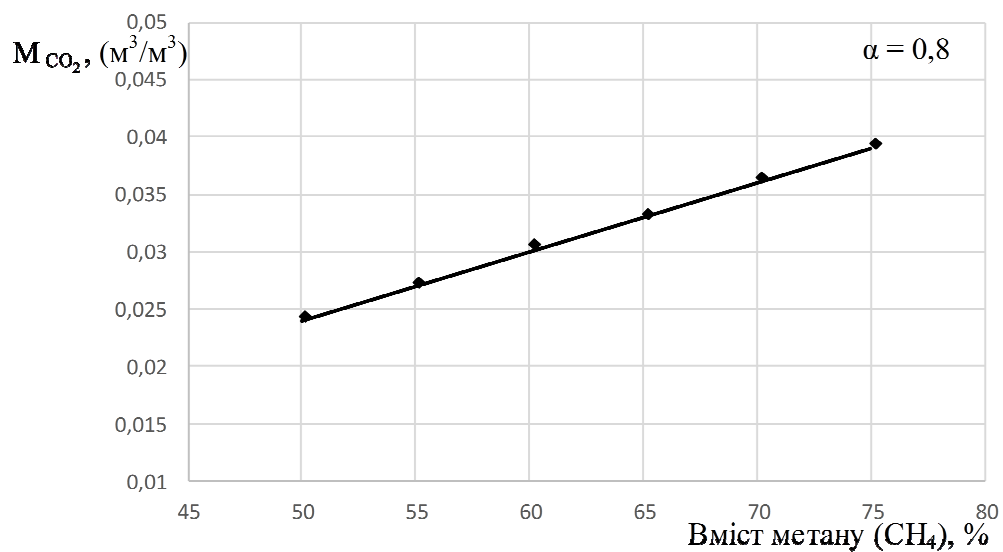


Рисунок 3 – Залежність кількості CO2 у відхідних газах від кількості метану в біогазі

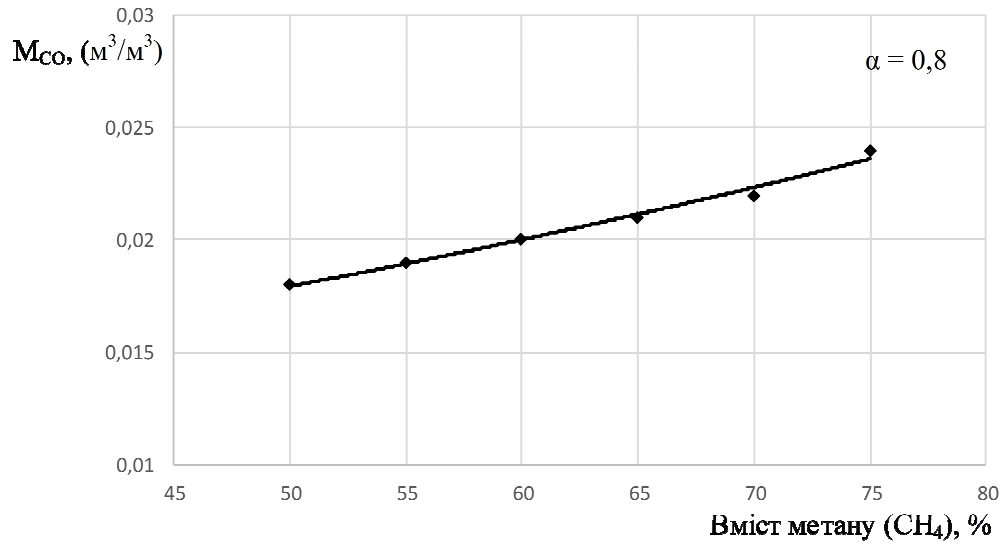


Рисунок 4 – Залежність кількості CO у відхідних газах від кількості метану в біогазі

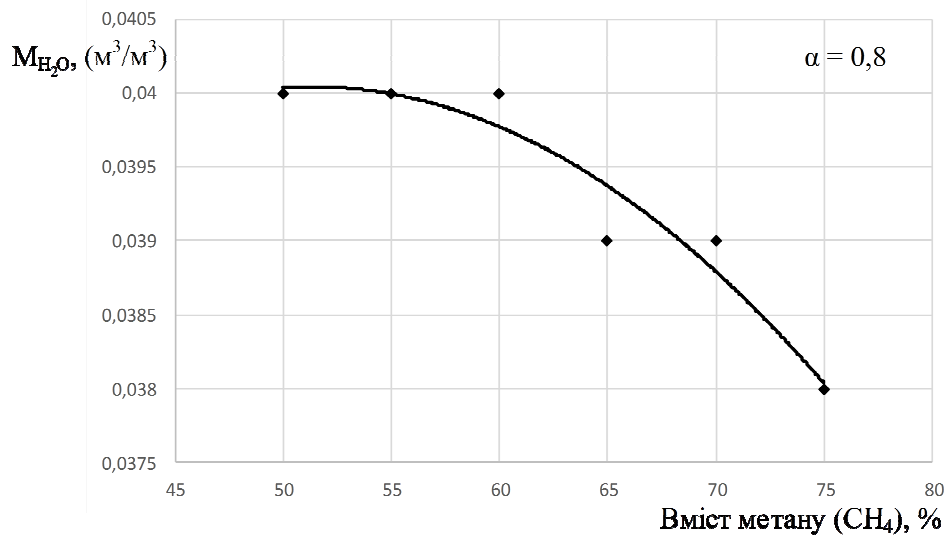


Рисунок 5 – Залежність кількості H₂O у відхідних газах від кількості метану в біогазі

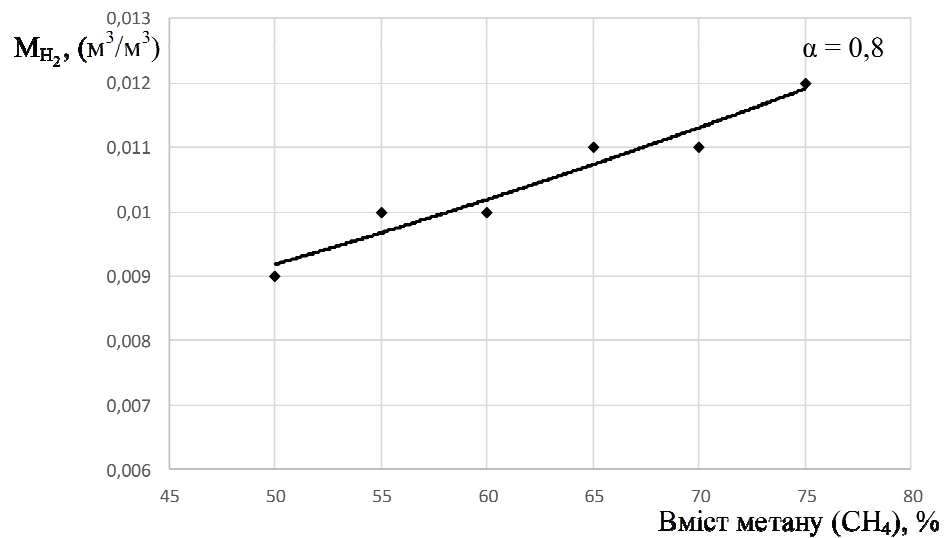


Рисунок 6 – Залежність кількості H₂ у відхідних газах від кількості метану в біогазі

Література

References

1. European Biogas Association (Електрон. ресурс). URL: <https://www.europeanbiogas.eu/>

2. Козак Ф.В., Дикун Т.В., Гаєва Л.І., Лучинський В.В. Біогаз з відходів та вторинних продуктів тваринництва як автомобільне паливо. *Нафтогазова енергетика*, 2016. № 2 (26). С. 89-94.

3. Гелетуґа Г.Г., Железная Т.А., Олейник Е.Н. Перспективы производства тепловой энергии из биомассы в Украине. *Промышленная теплотехника*. 2013. Т.35. № 5. С. 48-55.

4. Абрамчук Ф.І., Гутаревич Ю.Ф., Долганов К.С., Тимченко І.І. Автомобільні двигуни Київ: Арістей, 2006. 453 с.

5. Кулешов А.С. Программа расчета и оптимизации ДВЗ Дизель-РК. М: МВТУ им. Баумана, 2004. 124 с.

6. Дикун Т.В., Гаєва Л.І., Козак Ф.В., Дем'янюк Я.М. Аналіз роботи ДВЗ на біогазі з відходів сміттєзвалищ. *Нафтогазова енергетика*. 2019. № 1 (31). С. 83-90.

7. Зінько Р. В., Бучківський Б. Р., Зіркевич В. М., Андрієнко А. М.. Автомобільні двигуни: навч. посіб. / М-во оборони України, Акад. сухопут. військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного. Л.: АСВ, 2011. 189 с.

1. European Biogas Association (Elektronnyi resurs). URL: <https://www.europeanbiogas.eu/>

2. Kozak F.V., Dykun T.V., Haieva L.I., Luchynskiy V.V. Biohaz z vidkhodiv ta vtorynnykh produktiv tvarynnytstva yak avtomobilne palyvo. *Naftohazova enerhetyka*, 2016. No2 (26). P.89-94. [in Ukrainian]

3. Geletuha G.G., Zheleznaya T.A., Oleynik E.N. Perspektivyi proizvodstva teplovoy energii iz biomassy v Ukraine. *Promyshlennaya teplo-tehnika*. 2013. Vol.35. No 5. P. 48-55. [in Russian]

4. Abramchuk F.I., Hutarevych Yu.F., Dolhanov K.S., Tymchenko I.I. Avtomobilni dvyhuny. Kyiv: Aristei, 2006. 453 p. [in Ukrainian]

5. Kuleshov A.S. Programma rascheta i optimizatsii DVZ Dizel-RK. M: MVTU im. Baumana, 2004. 124 p. [in Russian]

6. Dykun T.V., Haieva L.I., Kozak F.V., Demianchuk Ya.M. Analiz roboty DVZ na biohazii z vidkhodiv smittiezvalyshch. *Naftohazova enerhetyka*, 2019. No 1 (31). P. 83-90. [in Ukrainian]

7. Zinko R.V., Buchkivskiy B.R., Zirkevych V.M., Andriienko A.M. Avtomobilni dvyhuny : navch. posib. / M-vo oborony Ukrainy, Akad. sukhoput. viisk im. hetmana Petra Sahaidachnoho. L.: ASV, 2011. 189 p. [in Ukrainian]