

УДК 621.433.2

ARTICLE HISTORY

Received 25.10.2021

Accepted 04.11.2021

Лісовал Анатолій Анатолійович
Національний транспортний університет, Київ, Україна
li-dvz@bigmir.net

ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛЬНОГО ГАЗУ В ДОСЛІДЖЕННЯХ ГАЗОВОГО ДВИГУНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Lisoval Anatolii
National Transport University, Kyiv, Ukraine
li-dvz@bigmir.net

USE OF A MODEL GAS FOR RESEARCHES OF THE GAS ENGINE AT THE ELECTRIC GENERATOR

Резюме – Виконано аналіз наукових робіт за останні десять років у напрямі створення в Україні газових двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ), які працюють на природному газі, біогазі або подібних низькокалорійних паливах. Дослідження виконано на газоелектричній установці з номінальною потужністю 30 кВт. Узагальнено результати досліджень застосування модельного газу в газовому ДВЗ, що працює на привід електростанції. Розроблено рекомендації щодо добавок біогазу до природного газу залежно навантаження електростанції для створення алгоритму управління подачею газового палива.

Abstract – The analysis of scientific works for the last ten years in the field of development at Ukraine of gas-powered internal combustion engines operating on natural gas, biogas or similar low-calorific fuels has been made. Researches were carried out on a gas-electric plant with a rated power of 30 kW. It summarizes the results of the research on the use of model gas in a gas combustion engine that operates on the power plant drive. Developed recommendations on the addition of biogas to natural gas depending on the power plant load to create an algorithm for controlling the supply of gas fuel.

DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-63-72

Внесок малих мобільних і стаціонарних електростанцій у виробництво електричної і теплової енергії поступово зростає [1]. І це не просто електростанції, а когенераційні установки. Найпоширенішим джерелом для вироблення енергії в таких когенераційних установках є дизель, а зараз конкуренцію йому складають газові двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ). На нових судах також зростає використання газового палива. Таким паливом, в першу чергу, є природний газ.

В сучасних когенераційних установках на основі поршневих двигунів коефіцієнт використання теплоти від згорання палива може досягати 85 ... 90 % [2, 3]. Економія палива при виробленні енергії може досягати 40 % у порівнянні з роздільним виробництвом аналогічної кількості електроенергії і теплової енергії [3].

Сьогодні актуальним питанням для України є застосування мобільних енергетичних установок з генерацією електричної, теплової енергії, а влітку і холоду. На установках з величинами потужності 3 ... 300 кВт найбільш часто у якості приводу електрогенератора застосовують транспортні ДВЗ. Такі ДВЗ конвертують для роботи на газових паливах і обладнують когенераційним контуром і електрогенератором, або ще абсорбційним термічним трансформатором при полігенерації (для перетворення тепла в холод) [4].

В когенераційних установках можна використовувати альтернативні газові палива. До їх числа в Україні, перш за все, відносять біогаз і шахтний газ. В газових двигунах можливо застосовувати суміші природного газу (метану) і біогазу.

Використання біогазу як моторного палива відомо давно. Виробництво біогазу здійснюється в результаті процесу бродіння відходів біологічної діяльності людини, тварин в спеціальних хімічних реакторах або в результаті розкладання органічних відходів на сміттєвих полігонах. Залежно від природи сировини склад біогазу різний і відповідно калорійність палива буде теж різною. Прийнято вважати, що біогаз – це низькокалорійне паливо, яке складається з таких основних компонентів: 50 ... 80 % метану, 25 ... 50 % вуглекислого газу, 1 ... 5 % водню і 0,3 ... 3 % азоту [5].

Застосування біогазу в якості моторного палива, безумовно, розширює асортимент газових палив, однак, використання низькокалорійних газових палив можливо тільки при певній концентрації в ньому горючої (метанової) складової або примусовому збільшенні кількості горючих компонентів – «збагаченні». Виконувати останні умови повинна автоматична система регулювання

подачі газового палива.

Кафедра двигунів і теплотехніки Національного транспортного університету (НТУ) та Інститут газу НАН України (ІГ НАНУ) з 2000 р працюють над створенням когенераційних установок з потужністю приводу до 200 кВт і систем автоматичного регулювання для таких установок. В ІГ НАНУ накопичений практичний досвід із створення когенераційних установок і газових двигунів, систем автоматики для їх роботи. Крім вітчизняних двигунів здійснена конвертація транспортних дизелів MAN, Perkins, Doosan в газів ДВЗ.

У лабораторії Харківського національного автомобільно-дорожного університету автотракторний дизель 6Ч13/14 був конвертований в газовий двигун. Для роботи на природному газі ступінь стискання зменшено до 11,8 одиниць, розроблена система запалювання з більш інтенсивним іскроутворенням. Стендові випробування підтвердили стійку роботу газового ДВЗ на збіднених сумішах при $\alpha = 1,4 \dots 1,6$. Запропоновано систему подачі газу з електронним управлінням, апробовано методику визначення витрати газового палива [6].

В Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» проведені комплексні теоретичні та експериментальні дослідження із застосування низькокалорійного газу в газових ДВЗ, конвертованих з транспортних дизелів моделі Д100. Розглянута можливість використання таких конвертованих двигунів у якості приводу електростанцій потужністю 1100 ... 2500 кВт [7]. Основною особливістю конвертації є застосування форкамерно-факельного процесу згорання газового палива. Цей процес згорання газових палив в теперішній час застосовують провідні моторобудівні фірми. Для забезпечення номінальної потужності запропоновані конструктивні заходи, які збільшують циклову подачу низькокалорійного палива.

Найбільш близькими до тематики досліджень є результати випробувань добавки синтез-газу до бензину і етанолу, проведені в НУК ім. Макарова [8, 9]. Теоретичні та експериментальні дослідження проведені для широкого діапазону складу суміші $\alpha = 1,0 \dots 2,2$ при різних кількісних добавках синтез-газу. Проведено дослідження робочого процесу, токсичності викидів відпрацьованих газів. Стендові випробування були виконані на двигунах 2Ч7,2/6 і 4Ч10,16/9,1 з іскровим запалюванням. Встановлено, що до основного палива можна додавати до 65 % синтез-газу.

Зазначимо, що фізико-хімічні властивості синтез-газу ближчі до нафтового газу (пропан-бутану).

У Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАНУ проведено теоретичні дослідження із застосування біогазу як добавки до природного газу в поршневих ДВЗ [10]. За дослідженням робочого процесу газового ДВЗ прогноуються не тільки енергетичні, паливно-економічні показники, але і токсичність за компонентам відпрацьованих газів транспортного дизеля конвертованого в газовий ДВЗ при різному процентному співвідношенні метан-біогаз.

Спростити трудомісткість експериментальних робіт можна за допомогою модельного газу. В роботі [1] промодельовано біогаз змішуючи природний газ і вуглекислий. При збільшенні частки CO₂ в модельному газі зменшуються концентрації викидів NO_x у відпрацьованих газах. При збільшенні частки CO₂ в модельному газі до 30 % і далі, збільшуються концентрації викидів CO. Подальше зростання CO₂ в модельному газі до 40 % призводить до збільшення викидів вуглеводнів в відпрацьованих газах ДВЗ.

Мета роботи – узагальнити результати проведених досліджень застосування модельного газу в газовому ДВЗ, що працює на привід електростанції, і розробити рекомендації щодо добавок біогазу до природного газу залежно навантаженню електростанції для створення алгоритму управління подачею палива.

Для вирішення поставлених завдань в ІГ НАНУ проведені дослідження на газоелектричній установці з номінальною потужністю 30 кВт. Спочатку ця установка була оснащена бензиновим двигуном 8Ч10/8,8 з іскровим запалюванням і електрогенератором ДГФ82-4Б. Базовий ДВЗ був конвертований в суто газовий двигун (ступінь стискання $\epsilon = 8,5$).

Система подачі газового палива складається з лінії подачі безпосередньо газового палива і аварійного відсічного контуру. В аварійному відсічному контурі був встановлений електромагнітний клапан, який спрацьовує при наявності надлишкового тиску в лінії подачі газового палива. При відсутності газового палива автоматично перекивається вся загальна газова магістраль до двигуна.

Загальний вид розробленої системи дозування газового палива показано на рис. 1.

Регулювання і дозування газоповітряної суміші здійснюється в спеціальному газовому змішувачі за допомогою дросельної заслінки. Привід дросельної заслінки газового змішувача забезпечує електронний виконавчий орган StG 2010-SV (крайній лівий вузол на рис. 1) з мікропроцесорним управлінням від блоку Pandaros фірми HEINZMANN.

У газовий змішувач надходить після очищення атмосферне повітря

і газове паливо з редуктора (клапана) нульового тиску. Редуктор нульового тиску стабілізує тиск газового палива на вході в газовий змішувач. Після деякого доопрацювання конструкції в камері нульового редуктора відбувалося змішування природного і вуглекислого газів, тобто формувався модельний газ.



Рис. 1. Система дозування газового палива з мікропроцесорним блоком управління

Особливістю мікропроцесорного блоку Pandaros є послідовне з'єднання пропорційного регулятора частоти обертання колінчастого вала газового ДВЗ і ПІД-регулятора виконавчого органу, кінематично зв'язаного з дросельною заслінкою. Виконавчий орган StG 2010-SV обладнаний зворотним зв'язком за положенням вихідного поворотного вала, який з'єднаний з дросельною заслінкою. Крім того, виконавчий орган має обмеження за величиною максимального струму управління.

Пропорційна складова регулятора була налаштована на підтримку частоти обертання колінчастого вала (приводу електрогенератора) 1500 хв^{-1} зі ступенем нерівномірності 0,3 %. Переміщення органа керування паливоподачі від холостого ходу до номінального положення при «миттєвому» накиданні 100 % зовнішнього навантаження повинно відбуватись за 1 с. Це значення швидкості

переміщення дросельної заслінки було занесено в пам'ять блоку Pandaros на підставі накопиченого попереднього досвіду.

Налаштування параметрів ПД-регулятора здійснювано на метані в режимі холостого ходу з подальшою перевіркою в динаміці при «миттєвому» скиданні-накиданні 100 % навантаження (навантаження задавалось реостатами). Індивідуальне налаштування ПД-регулятора закінчено вибором двох коригуючих коефіцієнтів, що враховують температурний режим ДВЗ і характер зміни зовнішнього навантаження. Критеріями налаштування були стійкість роботи ДВЗ, мінімальна тривалість перехідного процесу з дотриманням умови – не більше одного перерегулювання. При роботі на модельному газі налаштування регулятора не змінювалися.

Для матеріального моделювання добавок біогазу до природного газу в модельному газі збільшували об'ємну частку вуглекислого газу до 30 % і більше в залежності від зовнішнього навантаження. Розрахунковим шляхом визначили аналогічне співвідношення стисненого природного газу (СПГ) і добавки біогазу. Для розрахунку прийняли, що в СПГ міститься 90 ... 95 % метану, а в біогазі 60 % метану і 40 % вуглекислого газу.

У табл. 1 наведені результати стендових випробувань застосування модельного газу на газовому двигуні 8Ч10/8,8, що працює на привід електрогенератора. Розрахункові величини в табл. 1 можна розглядати як рекомендації щодо можливих добавок біогазу до СПГ в газовому ДВЗ електростанції малої потужності.

Таблиця 1

Рекомендації щодо добавки біогазу в газовий ДВЗ
електростанції малої потужності

Зовнішнє навантаження, %	Співвідношення СПГ / Біогаз	Вміст метану в суміші, %
0...10	15 / 85	63...66
10...40	25 / 75	66...72
40...70	40 / 60	72...78
70...90	65 / 35	78...83
90...100	80 / 20	83...90
100...110	100 / 0	90...95

Результати досліджень є основою для створення алгоритму управління подачею суміші біогазу і природного газу в залежності від зміни навантаження.

Крім індиціювання робочого процесу і досліджень перехідних режимів, проведено газовий аналіз відпрацьованих газів за різних навантажень. Газовий аналіз проведений при заборі проб відпрацьованих газів до каталітичного нейтралізатора і після нього. Такі дослідження виконані і при роботі газового ДВЗ на СПГ, і при роботі на модельному газі. Концентрації шкідливих речовин визначалися на японському комплексному газоаналізаторі МЕХА в лабораторії ДП «ДержавтотрансНДІпроект». Попередньо проби відпрацьованих газів були відібрані з спеціальні термічні мішки.

Результати газового аналізу відпрацьованих газів при роботі на модельному газі представлені для контролю в умовах експлуатації правильного налаштування газового обладнання двигуна.

Для підтвердження правильності настройки газового обладнання вибрано три експлуатаційних режими роботи електростанції: холостий хід, 50 % навантаження, номінальний режим.

Значення концентрацій CO у відпрацьованих газах були дуже маленькі, а значення CO₂ змінювалися при налаштуванні на незначну величину.

Встановлено, що найбільш інформативними і доступними для застосування в умовах експлуатації є значення концентрацій вуглеводнів та залишкового кисню у відпрацьованих газах, визначені до каталітичного нейтралізатора.

Рекомендовані значення концентрацій вуглеводнів і O₂ для перевірки налаштувань газової апаратури за роботи на добавках біогазу до СПГ наведено в табл. 2 і 3.

Таблиця 2

Концентрації вуглеводнів у відпрацьованих газах ДВЗ
за роботи на добавках біогазу до СПГ

Режим роботи електростанції	Вуглеводні, млн ⁻¹	
	за гексаном	за метаном
холостий хід	до 2400	до 1500
50 % навантаження	до 1800	до 1400
номінальний режим	до 2400	до 2000

Наведені в табл. 3 значення викидів NO_x теж можна використовувати для контролю настройки газової апаратури, але для цього буде потрібно відповідний газоаналізатор для визначення концентрацій NO_x. Наведені значення NO_x підтверджують висновок роботи [1], що зі збільшенням добавки CO₂ в модельному газі концентрація NO_x у відпрацьованих газах зменшується.

Таблиця 3
Концентрації O_2 і NO_x у відпрацьованих газах ДВЗ
за роботи на добавках біогазу до СПГ

Режим роботи електростанції	O_2 , %	NO_x , $млн^{-1}$
холостий хід	4...5	до 15
50 % навантаження	4...8	до 450
номінальний режим	2...4	до 1000

Висновки

1. Аналіз виконаних досліджень показав необхідність прийняття в Україні регламентів на склад і ступінь очищення біогазу. Такі стандарти діють в країнах ЄС. У Норвегії і Данії вироблений біогаз очищається до місту 95 % метану і, за необхідності, подається в загальну транспортну магістраль природного газу.

2. Стендовими дослідженнями газового двигуна на модельному газі підтверджено можливість застосування в поршневих ДВЗ з іскровим запалюванням біогазу з вмістом 60 % метану як добавки до природного газу. Зі зменшенням навантаження частка біогазу може збільшуватися і заміщати до 85 % природного газу.

3. При роботі на добавках біогазу визначені значення концентрацій вуглеводнів та залишкового кисню у відпрацьованих газах для контролю налаштувань газового обладнання ДВЗ в умовах експлуатації. Для електростанцій вибрано три режими перевірки: холостий хід, 50 % навантаження, номінальний режим.

4. Узагальнені результати дослідження застосування модельного газу в ДВЗ дозволяють продовжити роботи з удосконалення автоматичної системи подачі сумішевого газового палива.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Клименко В.Н., Мазур А.И., Сабашук П.П. Когенерационные системы с тепловыми двигателями: справочное пособие. Часть 1. Общие вопросы когенерационных технологий – К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. – 2008. – 559 с.
2. Першин С. А. Оптимизация параметров когенерационной установки // Новый университет: серия "Технические науки". – 2016. – № 5 - 6. – С. 77 – 90.

3. Разуваев А. В. Целесообразность применения систем утилизации тепла ДВС // Турбины и дизели. – 2010. – № 1. – С. 48 – 50.

4. Вербовський В.С., Грицук І.В., Адров Д.С., Краснокутська З.І. Особливості передпускового прогріву стаціонарного газового двигуна з використанням теплового акумулятора з фазовим переходом // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2014. – № 2. – С. 85 – 90.

5. Девянин С.Н., Чумаков В.Л., Марков В.А. Биогаз – альтернативное топливо для дизелей // Транспорт на альтернативном топливе. – 2012. – № 2 (26). – С. 68 – 73.

6. Врублевский А.Н., Дзюбенко А.А., Липинский М.С., Кузьменко А.П., Подляшук С.О. Определение цикловой подачи газового топлива с электронным управлением топливоподачи // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2014. – № 2. – С. 33 – 37.

7. Марченко А.П., Осетров О.О., Кравченко С.С. Забезпечення номінальної потужності стаціонарного газового двигуна при використанні низькокалорійних газових палив // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2015. – № 1. – С. 15 – 33.

8. Тимошевский Б.Г., Ткач М.Р., Познанский А.С., Митрофанов А.С., Проскурин А.Ю. Характеристики процесса сгорания двигателя 2Ч7,2/6 с добавками до 65 % синтез-газа к бензину // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2015. – № 1. – С. 33 – 37.

9. Ткач М.Р., Тимошевський Б.Г., Митрофанов О.С., Познанський А.С., Проскурін А.Ю. Підвищення ефективності ДВЗ малотоннажних суден застосуванням добавок синтез-газу // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2018. – № 2. – С. 3 – 6.

10. Бганцев В.М., Левтеров А.М., Гладкова Н.Ю. Розрахункове визначення впливу складу біогазу на характеристики транспортного двигуна // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2018. – № 1. – С. 7 – 14.

Annotation – The analysis of scientific publications over the past ten years in the direction of creating gas ICEs in Ukraine, operating on natural gas, biogas or similar low-calorie fuels.

The objectives of the work summarize the results of studies on the use of model gas in a gas internal combustion engine operating on a power plant drive. Developed recommendations on biogas additives to natural gas depending on the power plant load, and to develop a fuel control algorithm.

The article provides recommendations on setting up the power system and automatic regulation of a gas engine running on a mixture of natural gas (methane) and biogas. To solve the tasks, a gas-electric installation

with a rated power of 30 kW was tested. Initially, the installation was equipped with an 8-cylinder gasoline engine with spark ignition and an electric generator. The base ICE was converted to purely gas with a compression ratio of 8.5.

In the physical modeling of biogas to natural gas additives in the model gas, the volume fraction of carbon dioxide increased to 30 % with a decrease in the load. By calculation, determined a similar ratio of compressed natural gas and biogas additives. For the calculation, it assumed that natural gas contains 90 ... 95 % methane, and biogas 60 % methane and 40% carbon dioxide.

The possibility of using biogas with 60 % methane as an additive to natural gas in piston ICEs with spark ignition has been confirmed. It was found that with a decrease in load, the biogas fraction increase and replace up to 85 % of natural gas. When working on biogas additives, the values of the concentrations of hydrocarbons and residual oxygen in the exhaust gases were determined to control the setting of the gas equipment of the internal combustion engine. Under operating conditions, three test modes selected for the power plant: idle, 50 % load, rated mode.

The research results can serve as the basis for creating a control algorithm for the supply of biogas additives to natural gas, depending on load changes.