

© А. А. Лісовал, докт. техн. наук,
професор, професор кафедри двигунів і
теплотехніки,
e-mail: li-dvz@ibigmir.net,
ORCID: 0000-0001-6168-4010
(Національний транспортний
університет)

© А. А. Лісовал, докт. техн. наук,
професор, професор кафедри
двигателів і теплотехніки,
e-mail: li-dvz@ibigmir.net,
ORCID: 0000-0001-6168-4010
(Национальный транспортный
университет)

© Anatolii Lisoval, Doctor of Technical
Science (D.Sc.), Professor of Department
of Engines and Thermal Engineering,
e-mail: li-dvz@ibigmir.net,
ORCID: 0000-0001-6168-4010
(National Transport University)

ЗАСТОСУВАННЯ СУМІШЕЙ БІОГАЗУ З МЕТАНОМ У ГАЗОВОМУ ДВИГУНІ

ПРИМЕНЕНИЕ СМЕСЕЙ БИОГОЗА С МЕТАНОМ В ГАЗОВОМ ДВИГАТЕЛЕ

USE OF BIO-GAS AND METAN MIXTURES IN A GAS ENGINE

Анотація. Виконано аналіз наукових робіт у напрямі створення в Україні газових двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ), які працюють на природному газі, біогазі. Спростити трудомісткість експериментальних робіт можна за допомогою модельного газу - суміші природного і вуглекислого газів. Були проведені дослідження 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 від навантаження електростанції для створення алгоритму управління подачею газового палива.

Ключові слова: двигун внутрішнього згорання, газовий поршневій двигун, метан, модельний газ, регулювання складу газового палива.

Аннотация. Выполнен анализ научных работ по разработке в Украине газовых двигателей внутреннего сгорания (ДВС), которые работают на природном газе, биогазе. Уменьшить трудоемкость экспериментальных работ можно применением модельного газа - смеси природного и углекислого газов. Были выполнены исследования на газоелектрической установке с номинальной мощностью 30 кВт. Обобщены результаты исследований по применению модельного газа в газовом ДВС, который работал на привод электростанции, разработаны рекомендации по добавкам биогаза к природному газу в зависимости от нагрузки на электростанции для создания алгоритма управления подачей газового топлива.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, газовый поршневой двигатель, метан, модельный газ, регулирование состава газового топлива.

Abstract. The analysis of scientific works in the field of development in Ukraine of gas-powered internal combustion engines operating on natural gas and biogas has been made. It is possible to simplify the labor intensity of experimental works by using a model gas - a mixture of natural and carbon dioxide gases. Researches were carried out on a gas-electric unit with a rated power of 30 kW. It is summarized the results of the research on the use of model gas in a gas combustion engine that operates for the power unit drive, it is developed recommendations on the addition of biogas to natural gas depending on the power unit load with the purpose to create an algorithm for controlling the supply of gas fuel.

Keywords: internal combustion engine, gas piston engine, methane, model gas, gas composition regulation.

Вступ

Застосування малих електростанцій на місцевому регіональному рівні постійно набуває поширення. Лідерами в процесах розвитку малої енергетики є європейські країни. Внесок малих 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).

У сучасних когенераційних установках на основі поршневих двигунів коефіцієнт використання теплоти від згорання палива може досягати 85...90% [2, 3]. Економія палива за вироблення

енергії може досягати 40% порівняно з роздільним виробництвом аналогічної кількості електроенергії та теплової енергії (наприклад, у котельні) [3].

Актуальним питанням для України є застосування мобільних енергетичних установок із генерацією електричної, теплової енергії, а влітку і холоду. Споживачами таких енергоустановок є агропромислові та житлово-комунальні комплекси, державна служба з надзвичайних ситуацій, автотранспортні та оборонні підприємства тощо. На установках з величинами потужності 3...300 кВт найчастіше як урухомник електрогенератора застосовують автомобільні ДВЗ. Такі ДВЗ конвертують для роботи на газових паливах і обладнують когенераційним контуром і електрогенератором, або ще абсорбційним термічним трансформатором для полігенерації (для перетворення тепла в холод) [4].

У когенераційних установках використовують альтернативні газові палива. До їх числа в Україні насамперед відносять біогаз і шахтний газ. У газових двигунах можна застосовувати суміші природного газу (метану) і біогазу.

Використання біогазу як моторного палива відоме давно. Виробництво біогазу – результат хімічного процесу метанового бродіння у спеціальних хімічних реакторах або розкладання органічних відходів на сміттєвих полігонах. Залежно від природи сировини склад біогазу різний, і відповідно калорійність палива буде теж різною. Вважають, що біогаз – це низькокалорійне паливо, що має у своєму складі такі компоненти: 50...80% метану, 25...50% вуглекислого газу, 1...5% водню і 0,3...3% азоту [5].

Застосування біогазу як моторного палива, безумовно, розширює асортимент газових палив. Однак використання низькокалорійного газового палива можливе тільки за умови певної концентрації в ньому горючої (метанової) складової або примусового збільшення кількості горючих компонентів – "збагаченні". Виконувати такі умови повинна автоматична система регулювання подачі газового палива.

Основна частина

Аналіз попередніх досліджень газових ДВЗ та їхніх систем

Співробітники кафедри двигунів і теплотехніки НТУ та Інституту газу НАН України (ІГ НАНУ) з 2000 року працюють над створенням і дослідженням когенераційних установок з потужністю урухомника до 200 кВт і систем автоматичного регулювання для таких установок. В

НТУ розроблено методику розрахунку когенераційного обладнання на основі теорії теплового балансу поршневого ДВЗ [6]. В ІГ НАНУ накопичений великий досвід зі створення когенераційних установок і газових двигунів, систем автоматики для їхньої роботи. Крім вітчизняних автомобільних двигунів, була здійснена конвертація транспортних дизелів MAN, Perkins, Doosan у газові ДВЗ.

Виконано аналіз наукових публікацій за останні 10 років у напрямі створення в Україні газових ДВЗ, які працюють на природному газі, біогазі або подібних низькокалорійних паливах.

У лабораторії Харківського національного автомобільно-дорожного університету автомобільний дизель 6Ч13/14 конвертовано в суто газовий двигун. Для роботи на природному газі ступінь стиснення зменшено до 11,8 одиниць, розроблено систему запалювання з більш інтенсивним іскроутворенням. Стендові випробування підтвердили стійку роботу газового ДВЗ на збіднених сумішах за $\alpha = 1,4...1,6$. Запропоновано систему подачі газу з електронним управлінням, апробовано методику визначення витрати газового палива [7].

У Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" проведено комплексні теоретичні та експериментальні дослідження із застосування низькокалорійного газу в газових ДВЗ, конвертованих із транспортних дизелів моделі Д100. Автори робіт розглядали можливість використання таких конвертованих двигунів як урухомник електростанцій потужністю 1100...2500 кВт [8]. Основною особливістю конвертації є застосування форкамерно-факельного процесу згорання газового палива. Цей процес згорання газових палив нині застосовують провідні моторобудівні фірми. Для забезпечення номінальної потужності авторами запропоновані конструктивні заходи, які збільшують циклову подачу низькокалорійного палива – шахтного газу.

Найбільш близькими до тематики досліджень є результати випробувань добавки синтез-газу до бензину та етанолу, проведених у Національному університеті кораблебудування ім. Макарова [9, 10]. Теоретичні та експериментальні дослідження здійснені в широкому діапазоні складу суміші $\alpha = 1,0...2,2$ за різних кількісних добавок синтез-газу. Виконано дослідження робочого процесу, токсичності викидів відпрацьованих газів. Стендові випробування проведені на автомобільних двигунах 2Ч7.2/6 і 4Ч10.16/9.1 з іскро-

вим запалюванням. Авторами встановлено, що до основного палива можна додавати до 65 % синтез-газу. Однак зазначимо, що фізико-хімічні властивості синтез-газу ближчі до нафтового газу (пропан-бутану).

В Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАНУ було виконано теоретичні дослідження із застосування біогазу як добавки до природного газу в поршневих ДВЗ [11]. Автори роботи за дослідженнями робочого процесу газового ДВЗ прогнозують не тільки енергетичні, паливно-економічні показники, але і токсичність за компонентами відпрацьованих газів транспортного дизеля, конвертованого в газовий ДВЗ за різного процентного співвідношення метан-біогаз.

Спростити трудомісткість експериментальних робіт можна за допомогою модельного газу – суміші природного і вуглекислого газів. Дослідники в роботі [1] моделювали біогаз, змішуючи природний і вуглекислий. За умови збільшення частки CO_2 в модельному газі зменшується концентрація викидів NO_x у відпрацьованих газах. Зі збільшення частки CO_2 в модельному газі до 30 % і далі зростає концентрація викидів CO . Подальше зростання CO_2 в модельному газі до 40 % призводить до збільшення викидів вуглеводнів у відпрацьованих газах ДВЗ.

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

Методика, обладнання та результати експериментальних досліджень із застосуванням модельного газу

Для вирішення поставлених завдань раніше в ІГ НАНУ були проведені дослідження на газоелектричній установці з номінальною потужністю 30 кВт. Спочатку ця установка була оснащена автомобільним бензиновим двигуном 8Ч10/8.8 з іскровим запалюванням і електрогенератором. Базовий ДВЗ було конвертовано в суто газовий двигун ($\epsilon = 8,5$).

Система подачі газового палива має дві основні складові: лінію подачі безпосередньо газового палива та аварійний відсічний контур. В аварійному відсічному контурі встановлений електромагнітний клапан, який спрацьовує за наяв-

ності надлишкового тиску в лінії подачі газового палива. За відсутності газового палива автоматично перебивається вся загальна газова магістраль до двигуна. Загальний вигляд розробленої системи дозування газового палива показано на **рис. 1**.

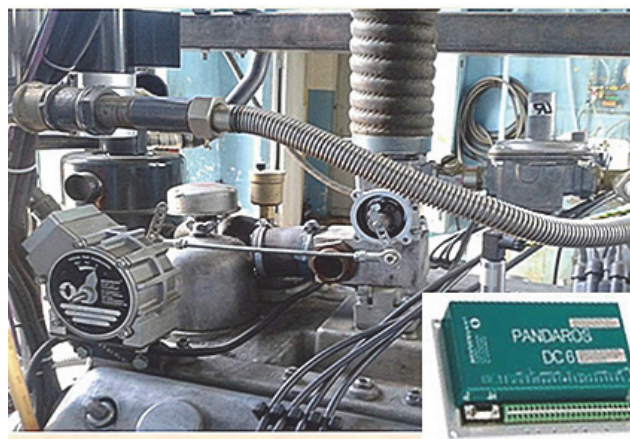


Рис. 1. Фото системи дозування газового палива з мікропроцесорним блоком управління

Регулювання і дозування газоповітряної суміші здійснюється в спеціальному газовому змішувачі за допомогою дросельної заслінки. Привід дросельної заслінки газового змішувача забезпечує електромеханічний виконавчий орган StG 2010-SV (крайній лівий вузол на **рис. 1**) із мікропроцесорним управлінням від блоку Pandaros фірми HEINZMANN. Схему розробленої системи дозування газового палива на основі вузлів фірми HEINZMANN показано на **рис. 2**.

Регулювання кількості газоповітряної суміші здійснюється за допомогою дросельної заслінки

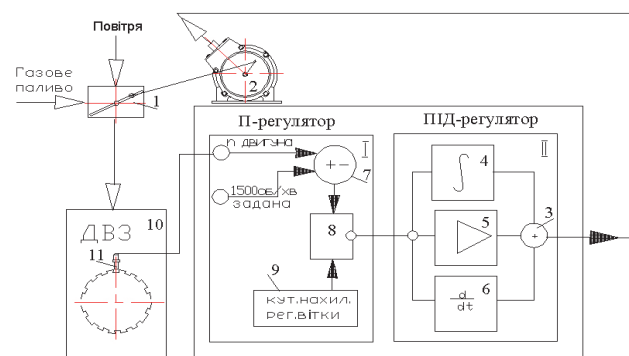


Рис. 2. Схема системи дозування газового палива: 1 – дросельна заслінка; 2 – виконавчий орган; 3 – суматор ПІД-регулятора; 4-6 – інтегральна, пропорційна, диференціальна складові ПІД-регулятора; 7-9 – програмні блоки; 10 – двигун; 11 – індуктивний датчик.

1, яка встановлена у газовому змішувачі. Урухо- мник дросельної заслінки газового змішувача з'єднаний із виконавчим органом 2 поворотним електромагнітом зі зворотним зв'язком за поло- женням вихідного вала. Виконавчий орган 2 отримує сигнали управління від мікропроцесор- ного блоку Pandaros.

Мікропроцесорний блок має дві функціональні складові: пропорційний регулятор частоти обер- тання колінчастого вала газового ДВЗ з програм- ними блоками 7-9 для порівняння фактичної час- тоти обертання із заданою; ПІД-регулятор вико- навчого органу 2 з інтегральною 5 пропорційною 6 і диференціальною 7 складовими.

Після попереднього очищення в газовий змі- шувач надходить атмосферне повітря і газове паливо з редуктора (клапана) нульового тиску. Цей редуктор стабілізує тиск газового палива на вході в газовий змішувач. Для змішування при- родного і вуглекислого газів, тобто для створен- ня модельного газу, було доопрацьовано констру- кцію камери редуктора нульового тиску.

Для фізичного моделювання суміші біогазу з природним газом під час утворення модельного газу збільшували об'ємну частку вуглекислого газу до 30 % зі зменшенням зовнішнього наван- таження. Розрахунковим шляхом визначали ана- логічне співвідношення стиснутого природного газу (СПГ) і добавки біогазу. Для розрахунку прийняли, що в СПГ міститься 90,5% метану, а в біогазі – 60% метану і 40% вуглекислого газу.

За умови збільшення в модельному газі об'єм- ної частки вуглекислого газу понад 34% в уста- лених режимах роботи спостерігали погіршення процесу згорання, що було зафіксовано за інди- ціювання циліндра ДВЗ.

Пропорційний регулятор блоку Pandaros у пе- ріод випробувань підтримував частоту обертан- ня колінчастого вала газового двигуна зі ступе- нем нерівномірності 0,3%, що відповідає коли- ванням частоти електричного струму в межах 50- 50,15 Гц. Критеріями налаштування ПІД-регуля- тора були: стійкість роботи газового ДВЗ; міні- мальна тривалість перехідного процесу і не бі- льше одного перерегулювання за "миттєвого" скидання/накидання 100% зовнішнього наван- таження. Зовнішнє навантаження створювалося реостатами. Під час роботи з модельним газом налаштування регулятора не змінювали.

У **табл. 1** наведено результати стендових ви- пробувань застосування модельного газу в газо- вому двигуні 8Ч10/8.8, що працює на урухомлен- ня 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

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 ство- рення алгоритму управління подачею суміші біо- газу і природного газу залежно від зміни наван- таження.

Рекомендації щодо контролю налаштувань газової апаратури в умовах експлуатації

Крім індиціювання робочого процесу і дослі- джень перехідних режимів проведено газовий аналіз відпрацьованих газів за різних наван- тажень. Газовий аналіз проводили із забором проб відпрацьованих газів до каталітичного нейтра- лізатора і після нього. Такі дослідження вико- нані і під час роботи газового ДВЗ на СПГ, і роботи на модельному газі. Концентрації шкід- ливих речовин визначалися в лабораторії ДП "ДержавтотрансНДІпроект". Попередньо проби відпрацьованих газів відібрані у спеціальні те- рмічні мішки.

Результати газового аналізу відпрацьованих газів у процесі роботи на модельному газі пред- ставлені у статті частково – лише потрібні для контролю в умовах експлуатації правильного налаштування газового обладнання двигуна.

Для підтвердження правильності налашту- вання газового обладнання вибрано три експлу- атаційні режими електростанції: яловий (холо- стий) хід, 50% навантаження, номінальний ре- жим.

Значення концентрацій CO у відпрацьованих газах були дуже маленькі, а значення CO₂ зміню- валися за налаштування на незначну величину.

Встановлено, що найбільш інформативними і доступними для застосування в умовах експлу-

атації є значення концентрацій вуглеводнів та залишкового кисню у відпрацьованих газах, визначені до каталітичного нейтралізатора.

Рекомендовані значення концентрацій вуглеводнів і O_2 для перевірки налаштувань газової апаратури в умовах роботи з добавками біогазу до СПГ наведено в **табл. 2 і 3**.

Таблиця 2

Концентрації вуглеводнів у відпрацьованих газах ДВЗ в умовах роботи з добавками біогазу до СПГ

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

Таблиця 3

Концентрації O_2 і NO_x у відпрацьованих газах ДВЗ в умовах роботи з добавками біогазу до СПГ

Режим роботи електростанції	O_2 , %	NO_x , млн ⁻¹
яловий (холостий) хід	4...5	до 15
50% навантаження	4...8	до 450
номінальний режим	2...4	до 1000

Наведені в **табл. 3** значення викидів NO_x теж можна використовувати для контролю налаштування газової апаратури, але для цього необхідним є відповідний газоаналізатор для визначення концентрацій NO_x .

Висновки

1. Аналіз публікацій показав необхідність прийняття в Україні регламентів на склад і ступінь очищення біогазу. Такі стандарти діють у країнах ЄС. У Норвегії і Данії вироблений біогаз очищають до вмісту 95% метану і, за необхідності, подають у загальну транспортну магістраль природного газу.

2. Проведено стендові дослідження газового двигуна на модельному газі. Підтверджено можливість застосування в поршневих ДВЗ з іскровим запалюванням біогазу зі вмістом 60% метану як добавки до природного газу. Зі зменшен-

ням навантаження частка біогазу може збільшуватися і заміщувати до 85% природного газу.

3. У процесі роботи 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: яловий (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

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. Деянин С. Н., Чумаков В. Л., Марков В. А. Биогаз – альтернативное топливо для дизелей // Транспорт на альтернативном топливе. – 2012. – № 2(26). – С. 68 – 73.
6. Долганов К. Є., Лісовал А. А., П'ятничко О. І., Майфет Ю. П. Система живлення для переобладнання дизеля в газовий двигун // Вісник НТУ-ТАУ. – 2002. – Вип. №7. – С. 295 – 299.
7. Врублевский А. Н., Дзюбенко А. А., Липинский М. С., Кузьменко А. П., Подляшук С. О. Определение цикловой подачи газового топлива с электронным управлением топливopодачи // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2014. – №2. – С. 33 – 37.
8. 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.
9. Тимошевский Б. Г., Ткач М. Р., Познанский А. С., Митрофанов А. С., Проскурин А. Ю. Характеристики процесса сторания двигателя 2Ч7,2/6 с добавками до 65 % синтез-газа к бензину // Двигуни внутрішнього згоряння. -2015. – №1. – С. 33 – 37.
10. 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. DOI: 10.20998/0419-8719.2018.2.01.
11. 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. DOI: 10.20998/0419-8719.2018.1.02.

References

1. Klimentko, V. N., Mazur, A. I., Sabashuk, P. P. (2008), "Kogeneratsionnyye sistemy s teplovymi dvigateliyami.

- Spravochnoye posobiye. Chast' 1. Obshchiye voprosy kogeneratsionnykh tekhnologiy", "IPTS ALKON NAN Ukrainy", Kiev, 559 p.
2. Pershin, S. A. (2016), "Optimizatsiya paramyetrov kogeneratsionnoy ustanovki", New University: a series of "technical sciences". No.5-6, pp.77-90.
 3. Razuvayev, A. V. (2010), "Tselysoobraznost' primyenyeniya sistyem utilizatsii tyepla DVS", Turbines and diesel engines. No.1, pp.48-50.
 4. Verbovskyy, V. S., Hrytsyuk, I. V., Adrov, D. S., Krasnokutska, Z. I. (2014), "Osoblyvosti peredpuskovoho prohrivu statsionarnoho hazovoho dvyhuna z vykorystanniam teplovoho akumulyatora z fazovym perekhodom", Internal combustion engines. No.2, pp.85-90.
 5. Devyanin, S. N., Chumakov, V. L., Markov, V. A. (2012), "Biogaz – al'tyernativnoye toplivo dlya dizyeley", Transport on alternative fuel. No.2 (26), pp.68-73.
 6. Dolganov, K. Ye., Lisoval, A. A., Pyatnychko, O. I., Mayfet Yu. P. (2002), "Systema zhyvlennya dlya pereobladnannya dyzelya v hazovyy dvyhun", Bulletin of NTU-TAU. Vol. 7, pp. 295-299.
 7. Vrublevsky, A. N., Dzyubenko, A. A., Lipinsky, M. S., Kuzmenko, A. P., Podlyashchuk, S.O. (2014), "Opredeleniye tsyklovooy podachi gazovoho topliva s eleyektronnym upravlyeniyem toplivopodachi, Internal combustion engines". No.2, pp. 33-37.
 8. Marchenko, A. P., Osetrov, O. O., Kravchenko, S.S. (2015), "Zabezpechennya nominal'noyi potuzhnosti statsionarnoho hazovoho dvyhuna pry vykorystanni nyz'kokaloriynykh hazovykh palyv", Internal combustion engines. No.1, pp. 15-33.
 9. Timosheevskiy, B. G., Tkach, M. R., Poznyanskiy, A. S., Mitrofanov, A. S., Proskurin, A. Yu. (2015), "Characteristics of the combustion process of a 2CH7.2/6 engine with additives up to 65 % synthesis gas to gasoline", ["Kharakteristiki protsyessa sgoraniya dvygatyelya 2CH7,2/6 s dobavkami do 65 % sintez-gaza k benzynu"], Internal combustion engines. No.1, pp.33-37.
 10. Tkach, M. R., Timoshevsky, B. G., Mitrofanov, A. S., Poznansky, A. S., Proskurin, A. Yu. (2018), "Pidvyshchennya efektyvnosti DVZ malotonnazhnykh suden zastosuvanniam dobavok syntez-hazu", Internal combustion engines. No.2, pp.3-6. DOI: 10.20998/0419-87192018.2.01.
 11. Bgantsev, V. M., Levterov, A. M., Gladkova, N. Yu. (2018), "Rozrakhunkove vyznachennya vplyvu skladu biohazu na kharakterystyky transportnoho dvyhuna", Internal combustion engines. No.1, pp. 7-14. DOI: 10.20998/0419-87192018.1.02.