

**Міністерство освіти і науки України  
Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова**

**МИТРОФАНОВ Олександр Сергійович**



**УДК 621.431**

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ  
СИНТЕЗ-ГАЗУ В ГАЗОПОРШНЕВИХ ДВИГУНАХ**

**Спеціальність 05.05.03 – Двигуни та енергетичні установки**

**Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

**Миколаїв – 2014**

Дисертація є рукописом.

Робота виконана у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України, м. Миколаїв.

Науковий керівник — доктор технічних наук, професор  
**Тимошевський Борис Георгійович**,  
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Міністерство освіти і науки України, м. Миколаїв, завідувач кафедри «Двигуни внутрішнього згоряння»

Офіційні опоненти — доктор технічних наук, професор  
**Варбанець Роман Анатолійович**,  
Одеський національний морський університет, Міністерство освіти і науки України, м. Одеса завідувач кафедри «Суднові енергетичні установки і технічна експлуатація»;

кандидат технічних наук, доцент  
**Білоусов Євген Вікторович**,  
Херсонська державна морська академія, Міністерство освіти і науки України, декан факультету суднової енергетики ХДМА, доцент кафедри «Експлуатація суднових енергетичних установок та загальноінженерна підготовка»

Захист відбудеться \_\_\_\_\_ 2014 р. о \_\_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 38.060.01 у Національному університеті кораблебудування МОН України за адресою: Україна, 54025, м. Миколаїв, просп. Героїв Сталінграда 9, корп. 1, ауд. 360.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету кораблебудування МОН України за адресою: Україна, 54025, м. Миколаїв, просп. Героїв Сталінграда 9.

Автореферат розіслано \_\_\_\_\_ 2014 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
Д 38.060.01,  
д-р техн. наук, професор



А. П. Шевцов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми дослідження.** Інтерес до проблеми економії палива зростає з кожним роком у всіх промислово розвинених країнах. На сьогодні світова спільнота схвильована тією обставиною, що велика частина енергії виробляється з невідновлювального джерела – органічного палива (нафти, вугілля, природного газу), використання якого невинно збільшує вміст парникових газів на планеті, частка яких у повітрі останніми роками значно зросла. Інтерес обумовлений тим, що при збільшенні обсягів використання вартість виробництва енергії з органічного палива з кожним роком зростає. Якщо раніше енергоресурси у вигляді органічного палива у ряді країн, у тому числі й в Україні, були більш-менш доступними, то в даний час їх стає все важче добувати. Таким чином, для підтримки необхідного енергетичного потенціалу України потрібно з кожним роком витрачати все більші кошти. Саме обмеженість запасів викопних ресурсів визначає ту велику увагу, яку приділяють можливості застосування альтернативного палива в транспортних установках.

На найближчі десятиліття для малих і середніх транспортних установок перспективними типами двигунів вважаються дизельні двигуни внутрішнього згоряння й двигуни з примусовим іскровим запаленням. Сучасні двигуни внутрішнього згоряння є досить досконалими тепловими машинами, які застосовуються практично у всіх галузях промисловості, транспорту та сільському господарстві. За рівнем ККД і екологічного впливу на навколишнє середовище (лише до 1 % відпрацьованих газів ДВЗ містять токсичні елементи) їм немає рівних серед інших теплових машин.

Одним з перспективних видів альтернативного палива для ДВЗ є синтез-газ, який може бути отриманий з різного виду сировини і різними способами. Синтез-газ, наприклад, може бути одержаний шляхом газифікації вугілля, парової конверсії різних вуглеводнів (метилового та етилового спиртів, метану тощо), а також одним з найбільш раціональних способів – термохімічною утилізацією тепла. Здебільшого синтез-газ містить у собі суміш CO і  $H_2$ , однак у залежності від умов отримання і застосовуваної сировини до його складу може входити і ряд інших компонентів. Саме склад визначає відмітні особливості організації робочого процесу ДВЗ у порівнянні із застосуванням звичайних нафтових палив.

Результати теоретичних оцінок ефективності використання у двигунах синтез-газу в даний час підтверджено експериментальними дослідженнями при частковій заміні дизельного палива продуктами конверсії, а також використанні синтез-газу в двигунах з примусовим запаленням. Однак у результаті аналізу вітчизняних та зарубіжних літературних джерел не вдалося виявити достатньо повних і надійних експериментальних і теоретичних даних стосовно особливостей організації робочого циклу двигунів, що працюють на синтез-газі. Крім того, процеси, що проходять у ДВЗ при згорянні, – не достатньо вивчені, а також у неповній мірі розкриті взаємозв'язок і вплив складу синтез-газу на основні параметри робочого циклу двигунів.

Таким чином, робота в напрямку підвищення ефективності ДВЗ, що працюють на синтез-газі, шляхом вивчення та ефективної організації процесу згоряння є актуальною на сьогодні та становить практичний інтерес.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана у відповідності до тематичного плану фундаментальних науково-дослідницьких держбюджетних і госпдоговірних робіт Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова:

– № 1572 «Розробка складу, компоновки та визначення техніко-економічних показників системи автономного електропостачання на основі турбопоршневих двигунів, які використовують альтернативне паливо» (ДР № 0106U002654);

– № 1560 «Експериментальне дослідження показників турбопоршневих двигунів систем автономного електропостачання при роботі на альтернативних паливах» (ДР № 0105U005949).

**Метою наукового дослідження** є підвищення ефективних параметрів роботи двигуна з іскровим запаленням, що працює на синтез-газі, шляхом раціональної організації робочого процесу; вивчення особливостей процесу згоряння та встановлення взаємозв'язку між складом синтез-газу й швидкістю тепловиділення; встановлення впливу складових синтез-газу на основні параметри робочого циклу двигуна; визначення раціонального співвідношення параметрів робочого процесу ДВЗ, що забезпечить прийнятні питомі витрати палива, потужність двигуна та його екологічність при заданих умовах експлуатації.

**Основні задачі наукового дослідження:**

– аналіз шляхів підвищення ефективних показників двигунів для виділення найбільш раціональних при використанні синтез-газу;

– створення експериментального стенда, комп'ютеризованої системи вимірювань і реєстрації даних для вивчення робочого процесу в ДВЗ;

– на базі результатів фізичного моделювання дослідження характеристик тепловиділення;

– на основі експериментальних досліджень удосконалення математичної моделі процесу згоряння синтез-газу в ДВЗ;

– дослідження впливу складу синтез-газу, а також параметрів роботи двигуна на ефективні показники ДВЗ з іскровим запалюванням;

– розробка практичних рекомендацій для проектування нових та конвертації вже існуючих ДВЗ, що працюють на синтез-газі.

**Об'єктом дослідження** є робочий процес двигуна з іскровим запаленням, що працює на синтез-газі.

**Предметом дослідження** є параметри робочого процесу, характеристики тепловиділення при використанні синтез-газу.

**Методи дослідження.** В основу дисертаційної роботи покладені традиційні методи системних досліджень складних технічних систем, якими є транспортні енергетичні установки:

– метод зіставлення і науково-технічного прогнозування використовувався при порівнянні об'єктів, які виконують однакові функції з різною ефективністю;

– метод фізичного моделювання (експериментального дослідження) робочого процесу ДВЗ з іскровим запаленням при роботі на різних видах палива (бензині, пропані, водні, синтез-газі);

– методи математичного моделювання з розробкою розрахункових алгоритмів і відповідних розрахункових програм використовувалися для створення математичної моделі процесу згоряння синтез-газу, яка інтегрувалася у загальну модель робочого циклу ДВЗ;

– методи планування та обробки експерименту використовувалися при проведенні натурних і стендових випробуваннях ДВЗ, що працює на синтез-газі.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

1. *Уперше* отримані експериментальні індикаторні діаграми та навантажувальні характеристики двигунів з іскровим запаленням 4Ч 8,2/7 і 2Ч 7,2/6 з різним значенням коефіцієнта надлишку повітря при роботі на синтез-газі, які дозволили визначити характеристики тепловиділення при згорянні.

2. *Уперше* експериментально встановлено, що для двигунів з іскровим запаленням транспортних енергетичних установок з об'ємом циліндра 240...500 см<sup>3</sup>, працюючих на синтез-газі, значення показника згоряння  $m$  має змінний характер, та визначені межі його змінення (так, значення  $m$  лежить у межах 1,56...5,46).

3. *Уперше* на базі експериментальних даних визначені залежності для знаходження значень показника характеру згоряння  $m$  і тривалості згоряння  $\varphi_z$  у напівемпіричному рівнянні І.І. Вібе для двигунів з іскровим запаленням з об'ємом циліндра 240...500 см<sup>3</sup>, що працюють на синтез-газі з вмістом водню 30...100 % за об'ємом та коефіцієнтом надлишку повітря  $\alpha = 1,0...2,2$ .

4. *Удосконалена* математична модель процесу згоряння синтез-газу в циліндрі ДВЗ з іскровим запаленням на базі експериментальних даних, яка інтегрується у загальну математичну модель робочого циклу, що дозволяє адекватно визначати індикаторні показники двигуна. Використання запропонованих рівнянь для знаходження змінного значення показника згоряння  $m$  та тривалості згоряння  $\varphi_z$  дозволяє досягти максимальної середньоквадратичної похибки визначення тиску в циліндрі та індикаторних показників ДВЗ 5...12 %.

5. *Здобув подальший розвиток* підхід, запропонований професором А. П. Марченком, щодо визначення показника характеру згоряння  $m$  та тривалості згоряння  $\varphi_z$  у напівемпіричному рівнянні І.І. Вібе для двигунів з іскровим запаленням.

**Достовірність отриманих у роботі результатів та висновків** забезпечується застосуванням сучасних розрахунково-експериментальних засобів та методів, а також коректною постановкою задачі дослідження. Розрахунковий аналіз виконувався на базі вдосконалених математичних моделей та програм розрахунку, які в достатньому обсязі враховують реальні фізичні особливості процесів, що досліджувалися. Розрахункові параметри робочого процесу ДВЗ, що працює на синтез-газі, зіставлялися з експериментальними значеннями, що були отримані під час експериментальних досліджень. Відхилення експериментальних і розрахункових значень індикаторного тиску в циліндрі ДВЗ та інших параметрів роботи двигуна не перевищувало 5,5 %. Отримані у роботі результати є логічними і не суперечать практиці використання альтернативних палив у ДВЗ, а також даним інших авторів.

#### **Практичне значення отриманих результатів:**

– розроблена та впроваджена в практику проектування математична модель робочого процесу ДВЗ з іскровим запаленням, що працює на синтез-газі;

- розроблена та реалізована у вигляді програми методика розрахунку робочого процесу ДВЗ, що працює на синтез-газі;
- розроблені практичні рекомендації щодо налаштування паливної апаратури, способу сумішоутворення, фаз газорозподілу, які дозволяють конвертувати існуючі та проектувати нові ДВЗ із метою ефективного використання синтез-газу;
- методика та програма розрахунку робочого циклу ДВЗ, що працює на синтез-газі, а також експериментальний стенд для моторних випробувань різних видів альтернативних палив використовуються у навчальному процесі кафедри «Двигуни внутрішнього згоряння» Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова при читанні лекцій, на практичних заняттях, при курсовому та дипломному проектуванні.

**Особистий внесок автора** полягає в аналізі задач, які пов'язані з ефективним використанням альтернативних палив у ДВЗ, а саме синтез-газу.

На базі двигунів з іскровим запаленням 4Ч 8,2/7 і 2Ч 7,2/6 створено експериментальні установки, на яких особисто здобувачем проведені дослідження, що пов'язані з визначенням основних параметрів робочого циклу та характеристик двигуна при використанні синтез-газу, а також здійснена перевірка адекватності запропонованої математичної моделі. Здобувач особисто проводив експериментальні дослідження роботи двигуна на різних видах альтернативних палив та обробляв їх результати.

Особисто здобувачем визначені задачі моделювання й основні параметри математичної моделі. Розроблена здобувачем математична модель згоряння дозволяє враховувати вплив складу синтез-газу на швидкість та характер кривої тепловиділення. Запропоновані рівняння основних параметрів напівемпіричної залежності тепловиділення І.І. Вібе враховують як склад використовованого синтез-газу (вміст водню), так і коефіцієнт надлишку повітря. Запропоновані рівняння дозволяють значно підвищити точність математичної моделі робочого циклу ДВЗ.

**Апробація результатів дисертації.** Основні теоретичні та експериментальні результати дисертації були представлені на науково-практичних семінарах кафедри ДВЗ Національного університету кораблебудування (НУК, м. Миколаїв) у 2008–2013 рр. та наступних наукових конференціях, де отримали позитивну оцінку наукової спільноти:

I Міжнародній науково-технічній конференції «Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціювання та рефрижерації» 2008 р. (НУК, м. Миколаїв);

IV, V, VI Міжнародних науково-технічних конференціях «Суднова енергетика: стан та проблеми» 2009, 2011, 2013 р. (НУК, м. Миколаїв);

II Міжнародних науково-технічних конференціях «Муніципальна енергетика: проблеми, рішення» 2009 р. (НУК, м. Миколаїв);

Науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, присвяченій 90-річчю Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова 2010 р. (м. Миколаїв);

XVI, XVIII Міжнародних Конгреса двигунобудівників 2011, 2013 рр. (с. Рибаче, АР Крим);

«Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» – II Міжнародній науково-технічній конференції, присвяченій 20-річчю незалежності України, 2011 р. (НУК, м. Миколаїв);

«Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» – III Міжнародній науково-технічній конференції, присвяченій 75-річчю Миколаївської області, 2012 р. (НУК, м. Миколаїв);

II Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасний стан та проблеми двигунобудування» 2012 р. (НУК, м. Миколаїв),

IV, V Всеукраїнських науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення» в 2011, 2013 р. (ППП НУК, м. Первомайськ);

Всеукраїнській науково-практичній конференції: "Сучасні енергетичні установи на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування", 2012 р. (Херсонська державна морська академія, м. Херсон).

**Публікації.** За темою дисертації у фахових наукових виданнях і журналах, які входять до переліку, затвердженого ДАК МОН України, опубліковано 8 статей, з них 3 – одноосібні. Ці роботи у достатній мірі відображають зміст дисертації та її основні результати.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаної літератури зі 102 найменувань та 3 додатків. Загальний об'єм дисертації викладено на 176 сторінках. Робота ілюстрована 98 рисунками та 23 таблицями.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність роботи, сформульовані мета й завдання дослідження, викладені наукова новизна, практичне значення одержаних результатів, зазначений особистий внесок здобувача, наведені дані про апробацію результатів дисертаційної роботи та публікації за темою дослідження.

У **першому розділі** проаналізовані шляхи отримання та використання синтез-газу як альтернативного палива для двигунів внутрішнього згоряння і встановлено, що ефективна організація робочого процесу в цілому та процесу згоряння зокрема є одним з перспективних напрямків підвищення паливо-економічних та екологічних показників двигуна.

Використання синтез-газу в ДВЗ, отриманого шляхом термохімічної утилізації тепла, дозволяє більш раціонально використовувати енергію палива та утилізувати як теплоту, втрачену з відхідними газами, так і інші теплові втрати.

Розгорнутий аналіз вітчизняних та зарубіжних публікацій дозволив установити, що робочий процес двигуна, який працює на синтез-газі, досліджений у недостатній мірі, а також немає чітких рекомендацій щодо оптимальних параметрів робочого циклу. Тому процеси сумішоутворення й згоряння синтез-газу в циліндрі двигуна потребують подальшого теоретичного та експериментального дослідження для визначення раціональних параметрів робочого циклу, які б забезпечили найвигідніше співвідношення витрати альтернативного палива, потужності двигуна й екологічних показників ДВЗ.

У **другому розділі** розроблена технологічна карта наукового дослідження, що дозволяє логічно пов'язати запит практики, головну та допоміжні задачі дослідження, основні наукові результати, практичну цінність та впровадження результатів роботи. Засобами реалізації наукового дослідження стали теоретичні та експериментальні методи дослідження: зіставлення і науково-технічного прогнозування, прямої аналогії, фізичного моделювання, математичного моделювання. Розгляд теоретичних і експериментальних методів дослідження дозволив визначити необхідний набір засобів математичного моделювання, а також виділити критерії, що визначають методику проведення експериментальних робіт.

Задачі експериментального дослідження сформульовані у відповідності до цілей роботи, а методи проведення цього дослідження дають змогу перевірити адекватність математичної моделі та експериментально встановити вплив основних параметрів робочого циклу на швидкість тепловиділення в ДВЗ.

Задачі та методика математичного моделювання, які прийняті в роботі, дозволили розробити модель процесу тепловиділення, адекватну дійсним процесам згоряння синтез-газу різного складу.

У **третьому розділі** наведені відомості про експериментальні стенди, системи вимірювання, реєстрації результатів та основні результати експериментальних досліджень.

Експериментальні дослідження виконувалися для досягнення наступних цілей:

- визначення дійсних ефективних показників двигуна, меж змінення та шляхів їх підвищення при роботі двигунів з іскровим запаленням на синтез-газі;
- одержання експериментальних залежностей, необхідних для уточнення та підвищення точності розрахунків робочого циклу ДВЗ при використанні синтез-газу;
- одержання достовірних даних для підтвердження результатів числових розрахунків, виконаних при математичному моделюванні робочого циклу.

Для реалізації поставлених цілей виконані такі роботи:

1. На базі експериментального стенда з термохімічним реактором парової конверсії біоетанолу з прямим пропусканням електричного струму отримано синтез-газ, який використовувався при дослідженнях робочого циклу ДВЗ. Склад синтез-газу визначався за допомогою газового хроматографа NeoCHROM Class B. Експериментальна установка дала змогу отримати синтез-газ густиною  $0,63 \text{ кг/м}^3$  та складом 43 %  $\text{H}_2$ , 34 %  $\text{CO}$ , 23 %  $\text{CH}_4$ .

2. Виконані моторні випробування використання синтез-газу в транспортному двигуні 4Ч 8,2/7 та двигуні 2Ч 7,2/6, що працює на генератор електричного струму, на спеціально створених стендах у лабораторії перспективних енергетичних технологій НУК ім. адм. Макарова (рис. 1). Це чотиритактні бензинові двигуни із зовнішнім сумішоутворенням, які переобладнано на газове паливо.

Усі значення зміни тиску в циліндрі та температур відпрацьованих газів під час експериментальних випробувань вимірювалися за допомогою датчиків, сигнали яких реєструвалися та оброблялися комп'ютером. Для зняття індикаторних діаграм використовувалися спеціалізовані датчики динамічного тиску неперервної дії «OPTRAND» (модель F 333 94-Q-1) та «Kistler» (модель 7613C), які використовуються для безперебійного, безперервного, тривалого вимірювання тиску у важких

умовах і перетворення цієї величини в цифровий або аналоговий уніфікований сигнал постійного струму на виході.

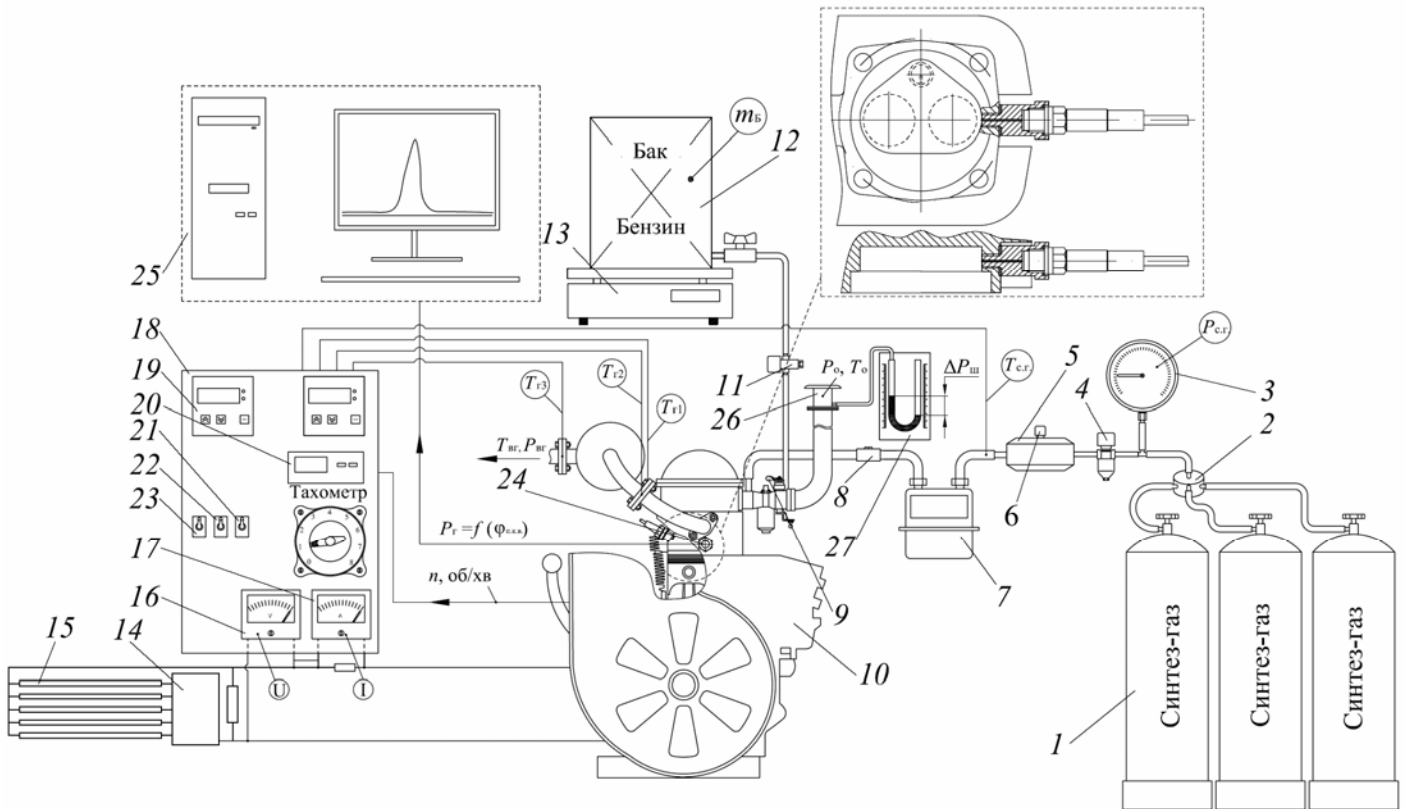


Рис. 1. Схема експериментального стенда:

1 – балони із синтез-газом; 2 – загальний ресивер; 3 – манометр; 4 – електромагнітний газовий клапан з фільтром; 5 – редуктор низького тиску; 6 – електромагнітний клапан; 7 – газовий лічильник; 8 – регулятор якості сумішоутворення; 9 – дросельна заслінка; 10 – двигун з іскровим запалюванням 2Ч 7,2 / 6 (4Ч 8,2/7); 11 – електромагнітний бензиновий клапан; 12 – бак з паливом; 13 – ваги; 14 – система керування навантаженням; 15 – блок ТЕНів; 16 – вольтметр; 17 – амперметр; 18 – панель приладів; 19 – прилад 2ТРМ1; 20 – тахометр; 21 – тумблер увімкнення бензинового електромагнітного клапана; 22 – тумблер увімкнення електромагнітного газового клапана; 23 – тумблер увімкнення електромагнітного газового пускового клапана; 24 – датчик тиску; 25 – ПК; 26 – витратомірна шайба; 27 – U-подібний манометр

На базі аналізу та оцінки похибок вимірювань під час проведення експериментальних досліджень було встановлено, що максимальна інструментальна похибка не перевищує 5,5 %. Ця похибка є прийнятною для експериментального дослідження робочих процесів ДВЗ.

На основі експериментальних даних, що оброблені з використанням комп'ютерних програм, отримано характеристики зміни індикаторних показників двигуна, а також індикаторні діаграми при використанні бензину, пропану, водню та синтез-газу при різних умовах роботи. На рис. 2 наведені результати експериментальних досліджень основних параметрів роботи двигуна в залежності від режиму навантаження при роботі на синтез-газі за навантажувальною характеристикою при

частоті обертання колінчастого вала  $n = 3000$  об/хв. Коефіцієнт надлишку повітря склав  $1,25 \dots 1,96$ .

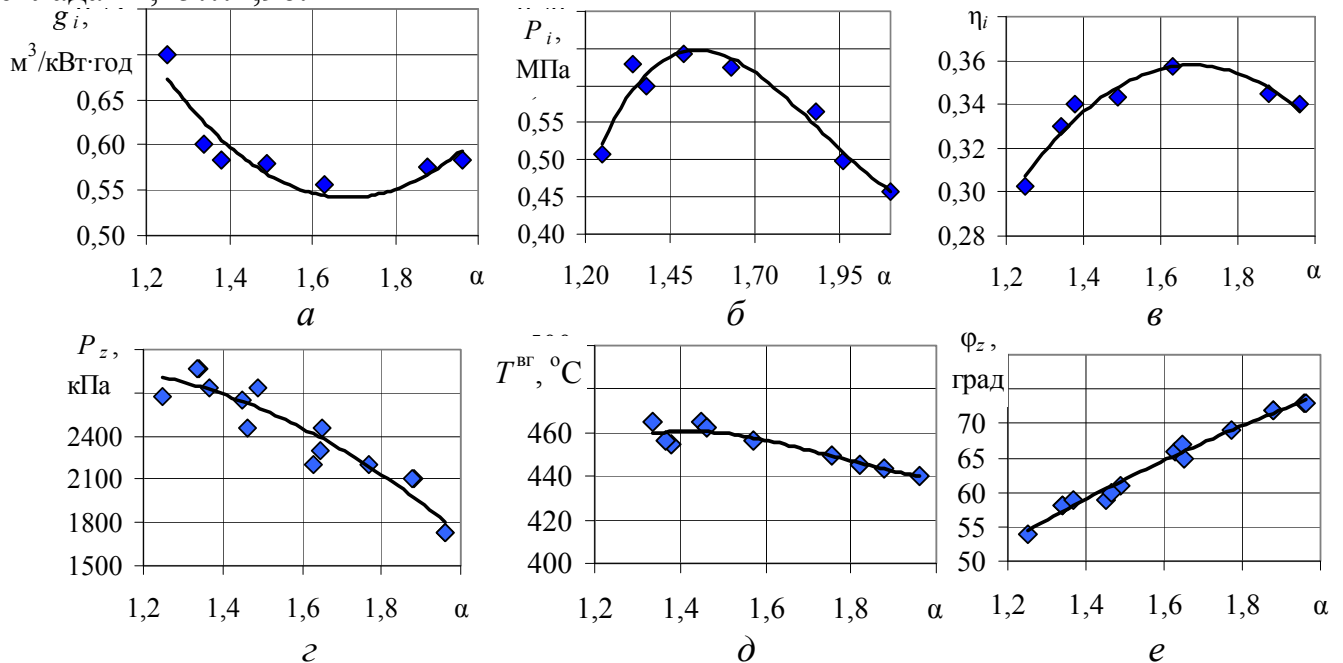


Рис. 2. Параметри роботи двигуна за навантажувальною характеристикою при використанні синтез-газу: *a* – питома індикаторна витрата палива; *б* – середній індикаторний тиск; *в* – індикаторний ККД; *г* – максимальний тиск згоряння; *д* – температура відпрацьованих газів; *е* – тривалість згоряння

На рис. 3 подано згорнуті та розгорнуті індикаторні діаграми двигуна 2Ч 7,2/6 на різних режимах роботи при використанні водню та синтез-газу при різному значенні коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$ . Коефіцієнт надлишку повітря при роботі на водні склав  $1,46 \dots 1,72$ , а при роботі на синтез-газі –  $1,25 \dots 1,96$ .

Експериментально встановлено, що внаслідок низької густини водню, частка якого у складі синтез-газу значна, спостерігається зменшення потужності двигуна до 40 % порівняно з використанням звичайного бензину та пропану. Для забезпечення необхідної потужності двигуна потрібно збільшити циклову дозу палива. Однак при зовнішньому сумішоутворенні забезпечити це неможливо, тому більш перспективним для двигунів, що працюють на синтез-газі та водні, є внутрішнє сумішоутворення – впорскування стисненого газоподібного палива в циліндр двигуна при закритих впускних і випускних клапанах.

При роботі двигуна на синтез-газі внаслідок значного вмісту водню збільшуються межі займання паливоповітряної суміші, що в свою чергу, призводить до збільшення індикаторного ККД. Збільшення індикаторного ККД циклу при збільшенні  $\alpha$  пов'язане, насамперед, зі зниженням теплоємності та тепловмісту продуктів згоряння, що, у свою чергу, зменшує частку термодинамічних втрат. Так, індикаторний ККД збільшується з 0,33 на бензині та 0,31 на пропані до 0,36 на синтез-газі (збільшується до 9,1 %).

При роботі двигуна на синтез-газі та водні з коефіцієнтом надлишку повітря  $1 \dots 1,25$  спостерігається більш жорстка робота, а також відбувається зміщення положення максимуму згоряння у бік ВМТ (див. рис. 3).

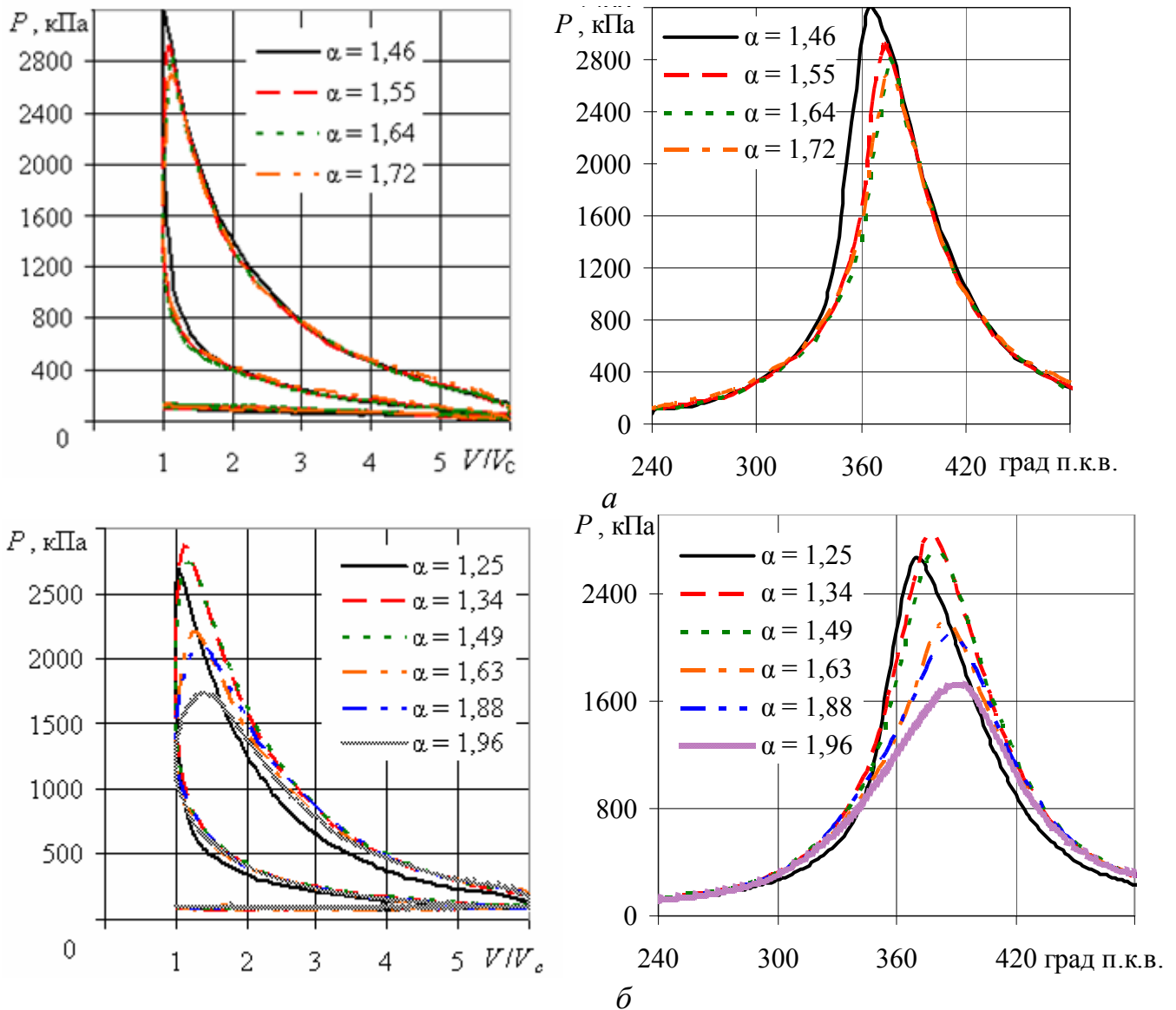


Рис. 3. Експериментальні індикаторні діаграми двигуна 2Ч 7,2/6:  
 а – при роботі на водні; б – при роботі на синтез-газі

При використанні  $\alpha$ , близьких до стехіометричного співвідношення, спостерігається зниження всіх основних показників роботи двигуна. Установлено, що нормальна робота двигуна забезпечується при використанні коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha = 1,35 \dots 1,75$ , при цьому значення індикаторного ККД має максимальні значення, а питома індикаторна витрата палива – мінімальні.

Збільшення  $\alpha$ , при використанні синтез-газу призводить до деякого зниження температури ВГ, що, в свою чергу, також позитивно впливає на екологічні показники ДВЗ. Значення температури відпрацьованих газів при використанні звичайного палива та синтез-газу знаходяться у межах, здатних забезпечити проходження реакції конверсії різних видів сировини для отримання синтез-газу.

У четвертому розділі обґрунтовані вимоги до математичної моделі робочого циклу двигуна, що працює на синтез-газі. Відповідно до цих умов була доопрацьована математична модель робочого циклу двигуна, що працює на звичайному паливі. Базова математична модель була розроблена на кафедрі ДВЗ Національного уні-

верситету кораблебудування імені адмірала Макарова під керівництвом професора Ю.Л. Мошенцева на основі праць таких авторів, як М.М. Глагольєв, Н.К. Шокотов, Н.Ф. Разлейцев, Р.М. Петриченко, В.Г. Семенов, О.П. Марченко, К.І. Генкін, Н.В. Іноземцев, В.К. Кошкін, Н.Н. Семенов, Б.М. Гончар, Б.В. Пугачов, І.І. Вібе та ін.

В основу числового розрахунку робочого процесу у відкритій термодинамічній системі покладено універсальне узагальнене диференціальне рівняння, загальний вигляд якого запропоновано канд. техн. наук, доц. Д.С. Мінчевим:

$$\frac{dp}{d\phi} = p \left( \frac{\frac{dQ_x}{d\phi}}{c_v T M} + \frac{\sum_1^{n_1} dI_j}{c_v T M} + \frac{dv}{M/\mu} - \frac{\frac{d(c_v)_T}{d\phi}}{c_v} - \frac{c_{vm}}{c_v} \frac{\sum_1^{n_1} dM}{M d\phi} - k \frac{d \ln V}{V d\phi} - \frac{\sum_1^{n_2} \frac{dQ_{cmi}}{d\phi}}{c_v T M} \right).$$

У наведеному рівнянні  $Q_n$  – нижча теплота згоряння палива;  $dQ_{cti}$  – обмін теплоти зі стінками теплосприймаючих поверхонь;  $dI_j$  – елементарна ентальпія мас, що надходять або залишають циліндр;  $q_{ц}$  – циклова доза палива;  $x$  – частка згорілого палива;  $c_v$ ,  $c_{vm}$  – питома ізохорна істинна та середня теплоємність робочого тіла відповідно;  $T$ ,  $p$  – відповідно температура й тиск робочого тіла;  $v$  – молярна маса;  $\mu$  – молекулярна маса;  $\phi$  – змінне значення кута повороту колінчастого вала;  $k$  – показник адіабати;  $n$  – частота обертання колінчастого вала;  $dM$  – елементарна маса, що надходить або залишає циліндр.

На базі експериментальних даних проаналізовано вплив кута випередження запалення  $\Theta$ , ступеня стиснення  $\varepsilon$  та коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$  на процес згоряння. Установлено, що саме  $\alpha$  значно впливає на значення  $m$ , а також на тривалість згоряння. При цьому характер кривої зміни показника  $m$  залишається однаковим незалежно від значення  $\alpha$ ,  $\varepsilon$ ,  $\Theta$ .

Процес тепловиділення для двигунів з іскровим запалюванням описується на базі напівемпіричного рівняння, запропонованого професором І.І. Вібе, яке досить адекватно працює для двигунів, що використовують звичайне паливо, оскільки вміщує в собі значну кількість оброблених експериментальних даних. Однак застосування його для розрахунку двигунів, що працюють на синтез-газі, призводить до значних відхилень між розрахунковими та експериментальними даними.

З метою уточнення математичної моделі розрахунку процесу згоряння синтез-газу за приклад було взято підхід використання змінного значення параметра  $m$ , запропонованого дослідницьким колективом під керівництвом д-ра техн. наук, проф. О.П. Марченком при використанні чистого водню. Даний підхід отримав подальший розвиток та дозволив отримати більш надійні характеристики тепловиділення й ефективні показники двигуна.

На основі аналізу й обробки експериментальних індикаторних діаграм, отриманих на двигунах 4Ч 8,2/7 і 2Ч 7,2/6, що працюють на синтез-газі та водні, для розрахунку при математичному моделюванні було запропоновано залежності для знаходження змінного значення  $m$  (межі змінення якого складають 1,56...5,46) і тривалос-

ті згоряння  $\varphi_z$ . Запропоновані рівняння враховують вміст водню у складі синтез-газу, а також коефіцієнт надлишку повітря:

– показник згоряння 
$$m_i = a\varphi_i \frac{\varphi_z'}{\varphi_z} + b;$$

$$a = 0,2532\alpha^3 - 1,2593\alpha^2 + 2,0906\alpha - 1,1149;$$

$$b = 0,659\alpha^3 - 3,4831\alpha^2 + 6,3403\alpha - 2,1937;$$

– тривалість згоряння 
$$\varphi_z = \varphi_z' + \Delta\varphi;$$

$$\varphi_z' = -10,186\alpha^2 + 59,464\alpha - 4,1447;$$

$$\Delta\varphi = -434,6C_{H_2}^3 + 1080,2C_{H_2}^2 + 907,85C_{H_2} + 225,19,$$

де  $\varphi_i$  – змінне значення кута періоду згоряння;  $C_{H_2}$  – концентрація водню за об'ємом у складі синтез-газу.

При виборі коефіцієнтів  $a$  і  $b$  у рівнянні для визначення  $m$ , а також їх співвідношення за параметр оцінки було взято досягнення мінімального значення середньоквадратичної похибки визначення тиску в циліндрі ДВЗ  $S$ , а також мінімальної похибки визначення індикаторних параметрів двигуна. На рис. 4 наведено приклад поверхонь та поля розподілу середньоквадратичної похибки визначення тиску в залежності від коефіцієнта надлишку повітря.

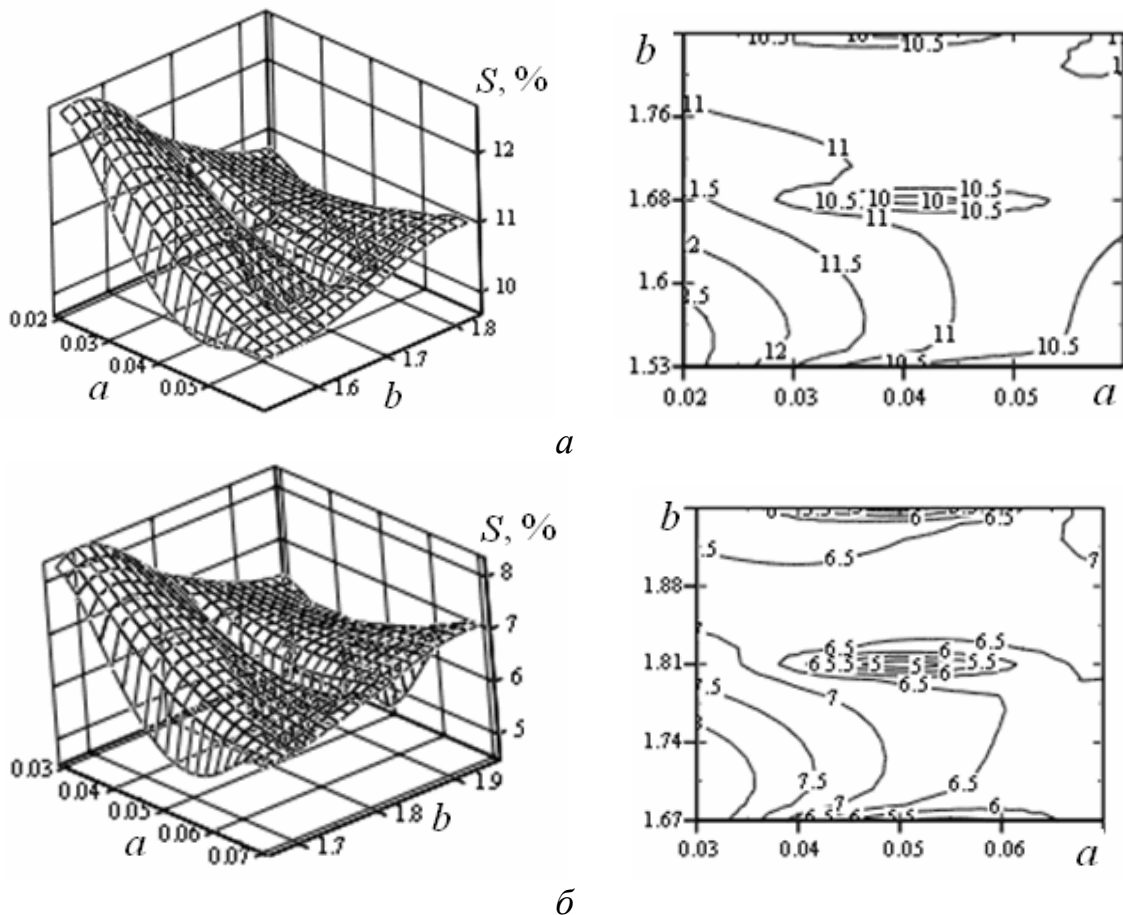


Рис. 4. Поверхні та поля розподілу середньоквадратичної похибки  $S$  визначення тиску в залежності від коефіцієнта надлишку повітря:  $a - \alpha = 1,49$ ;  $b - \alpha = 1,96$

У результаті маємо уточнене рівняння І.І. Вібе для визначення швидкості тепловиділення при згорянні синтез-газу:

$$\frac{dx}{d\varphi} = -\frac{C}{\varphi_z} \left( \frac{\varphi_i}{\varphi_z} \right)^{a\varphi_i + b} \exp C \left( \frac{\varphi_i}{\varphi_z} \right)^{a\varphi_i + b + 1} \left( a\varphi_i \ln \left( \frac{\varphi_i}{\varphi_z} \right) + a\varphi_i + b + 1 \right)$$

На рис. 5 наведені відносні характеристики тепловиділення та характеристики відносної швидкості тепловиділення, які було отримано на основі обробки індикаторних діаграм і запропонованого вище підходу щодо визначення змінного значення показника характеру згоряння (рис. 6).

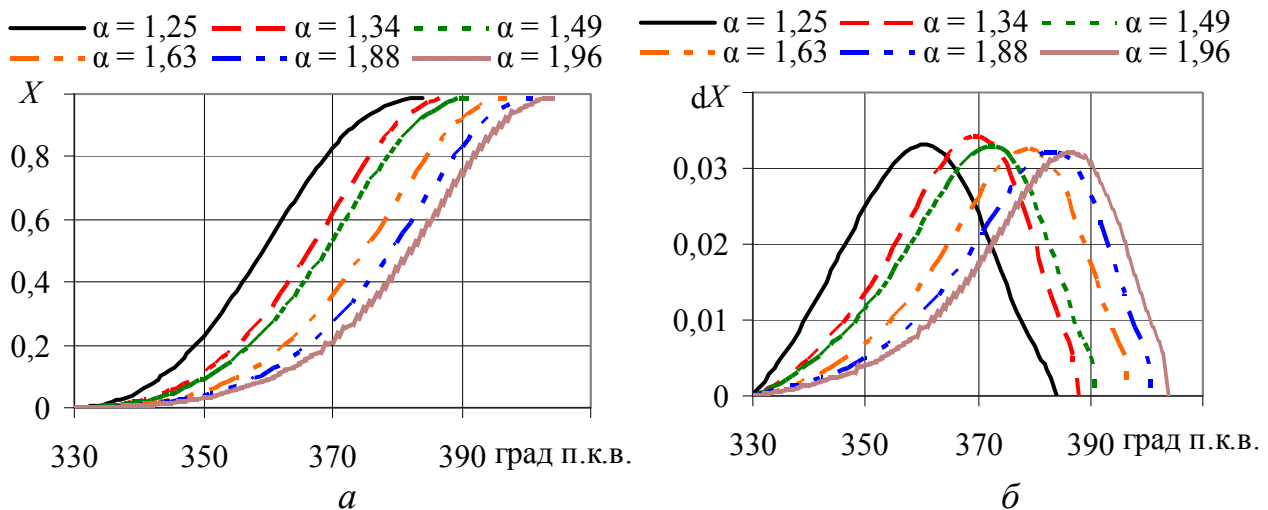


Рис. 5. Характеристики тепловиділення:

*a* – відносні характеристики тепловиділення ; *б* – відносна швидкість тепловиділення

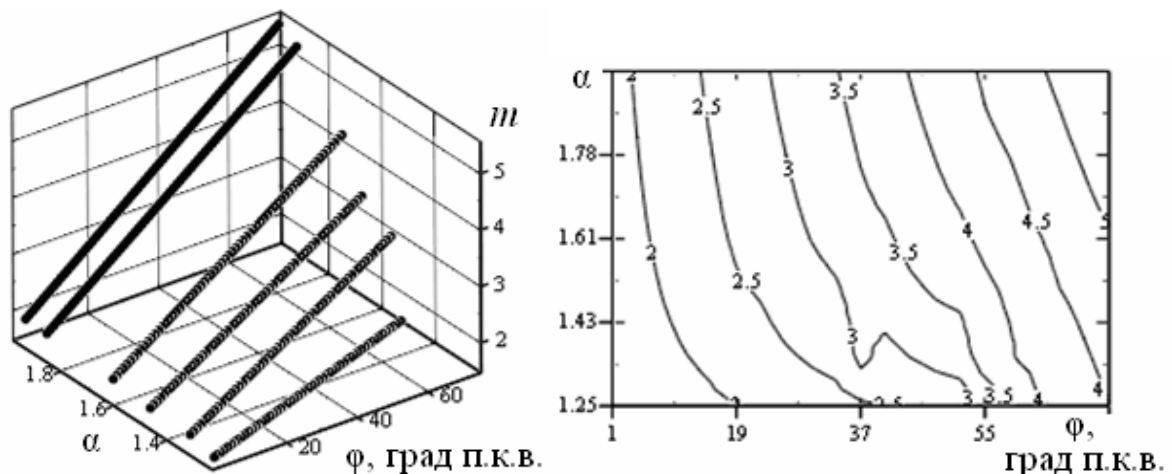


Рис. 6. Показник характеру згоряння *m* у напівемпіричному рівнянні І.І. Вібе

Для оцінки **адекватності** моделі виконане зіставлення розрахункових (при використанні сталого та змінного значень *m*) і експериментальних значень тиску газів у циліндрі двигуна 2Ч 7,2/6. Методика перевірки була наступна. Математична модель налаштовувалася на один з режимів роботи двигуна за експериментом, при цьому середньоквадратична похибка складала 4...5 %. Потім без переналаштування математичної моделі здійснювалося моделювання інших режимів роботи двигуна

при зміні параметрів та умов його роботи. Отримане середньоквадратичне відхилення розрахункових та експериментальних даних не перевищувало 12,5 %, що свідчить про адекватність уточненої математичної моделі з похибкою, прийнятною для практичних інженерних розрахунків.

На рис. 7 наведені експериментальні та модельні індикаторні діаграми двигуна 2Ч 7,2/6 при роботі на синтез-газі при різному значенні  $\alpha$ .

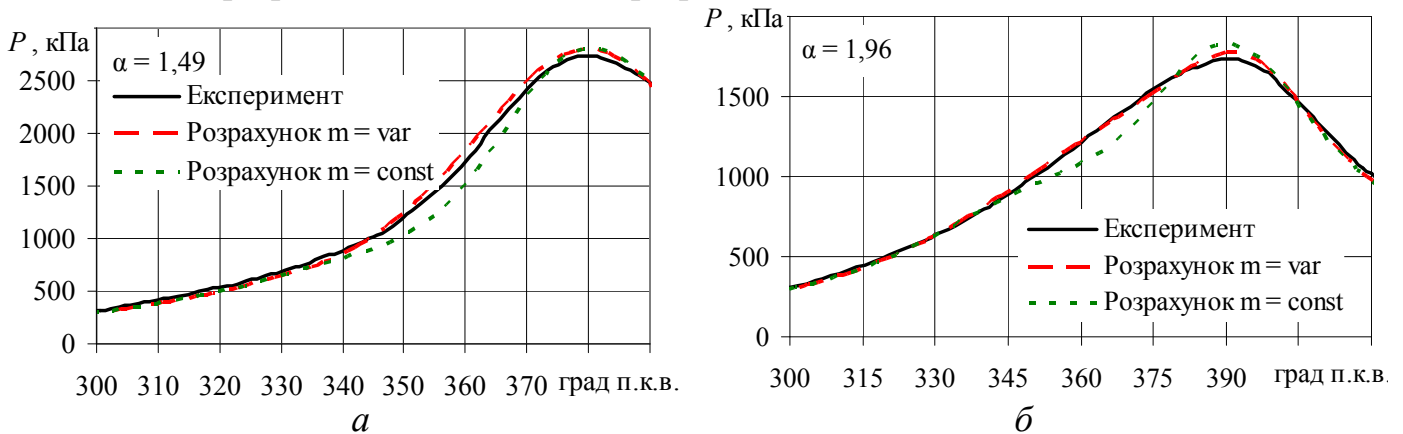


Рис. 7. Розрахункові та експериментальні індикаторні діаграми двигуна 2Ч 7,2/6 при роботі на синтез-газі: а –  $\alpha = 1,49$ ; б –  $\alpha = 1,96$

При використанні змінного  $m$  максимальна відносна середньоквадратична похибка визначення тиску в циліндрі зменшується на 4,5 %, а також значно підвищується точність визначення індикаторних показників двигуна. Так, точність визначення середнього індикаторного тиску та індикаторного ККД підвищується на 5,5 %, точність визначення максимального тиску та температури при згорянні підвищується на 2 %.

У п'ятому розділі виконані аналіз, дослідження та обґрунтування шляхів підвищення ефективності використання синтез-газу в ДВЗ з іскровим запаленням.

На базі уточнених рівнянь тепловиділення було виконано математичне моделювання робочого циклу двигунів K7J 710 фірми Renault та BVX фірми Volkswagen при різному вмісті водню в складі синтез-газу.

Для реалізації поставлених цілей здійснено наступне:

1. Визначено **вплив водню у складі синтез-газу** на індикаторні показники ДВЗ з іскровим запаленням.

У зв'язку з тим, що склад синтезу-газу може змінюватися у залежності від різних факторів (вихідної сировини, способу отримання, температури та тиску в реакторі, тривалості перебування і т. д.), необхідно виділити діапазон вмісту водню та оксиду вуглецю, який відповідав би найбільш вигідним значенням потужності двигуна, витрати палива та ефективного ККД. Так, згідно з отриманими залежностями (рис. 8) значення вмісту водню в складі синтез-газу повинно складати 60...80 % за об'ємом.

Максимальне значення індикаторної роботи відповідає вмісту водню 67 % за об'ємом, при цій же концентрації спостерігаються максимум індикаторної потужності, середнього індикаторного тиску і мінімум питомої індикаторної витрати палива.

2. Досліджено **вплив фаз газорозподілу** на робочий процес й індикаторні показники двигуна, що працює на синтез-газі.

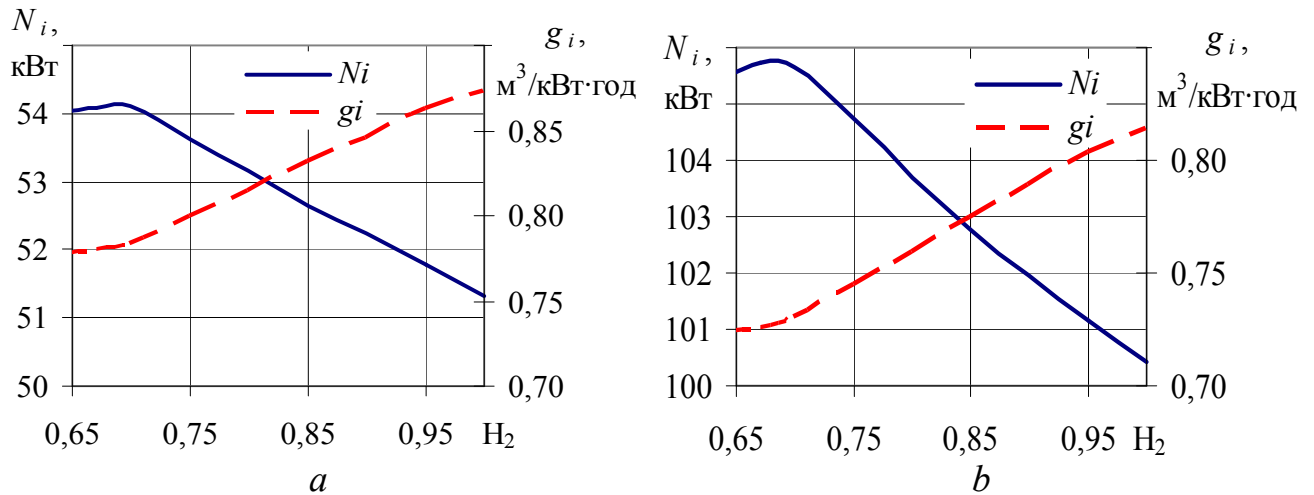


Рис. 8. Індикаторні показники роботи двигуна при різному складі синтез-газу:  
 а – двигун К7J 710; б – двигун BVX

Процес газообміну в ДВЗ складається з випуску з циліндра продуктів згоряння та наповнення циліндра свіжим зарядом. Від правильно підібраних фаз газорозподілу, тобто від своєчасності відкриття й закриття впускних і випускних клапанів, у значній мірі залежать ККД, потужність, крутний момент, економічність й екологічність двигуна.

Змінюючи фази газорозподілу, було встановлено зміну ефективної потужності двигуна та обрані найбільш раціональні співвідношення фаз. Так, наприклад, для двигуна BVX було збільшено кут перекриття клапанів із  $12^\circ$  до  $48^\circ$  зі зміщенням його за ВМТ на  $18^\circ$ , зменшено кут закриття впускного клапана на  $18^\circ$  та збільшено кут відкриття випускного клапана на  $14^\circ$ .

Раціонально підібрані фази газорозподілу дозволили отримати наступне:

- індикаторна потужність двигуна К7J 710 збільшилася на 4,48 % (із 54,1 до 56,5 кВт), двигуна BVX – на 5,3 % (із 105,7 до 111,63 кВт);
- питома індикаторна витрата палива двигуна К7J 710 зменшилася з 0,781 до 0,774  $\text{m}^3/(\text{kW}\cdot\text{год})$ , двигуна BVX – з 0,726 до 0,719  $\text{m}^3/(\text{kW}\cdot\text{год})$ ;
- індикаторний ККД для обох двигунів збільшився приблизно на 1,2 %;
- коефіцієнт залишкових газів двигуна К7J 710 зменшився з 0,063 до 0,054, двигуна BVX із 0,058 до 0,044.

3. Досліджено **використання внутрішнього сумішоутворення** на робочий процес й індикаторні показники при використанні синтез-газу.

Зовнішнє сумішоутворення, застосовуване при спалюванні синтез-газу, є безперспективним через зниження потужності двигуна в порівнянні з використанням рідкого палива на 10,41 %, оскільки для забезпечення рівної потужності необхідно забезпечити подачу й згоряння більшої кількості суміші. Більш перспективним є внутрішнє сумішоутворення – впорскування стисненого газоподібного палива в циліндр двигуна при закритих впускних і випускних клапанах. Однак забезпечити рівну потужність все одно неможливо внаслідок наступних факторів:

- при використанні синтез-газу необхідне значення коефіцієнта надлишку повітря складає 1,35...1,75, тобто значно більше, ніж при використанні бензину;

– теплота згоряння синтез-газу (24,08 МДж/кг при 67 % вмісту водню) нижча за бензин на 42,35 %.

Однак використання внутрішнього сумішоутворення дозволяє досить суттєво збільшити потужність та підвищити ряд інших показників двигуна:

- індикаторна потужність двигуна K7J 710 збільшилася на 7,74 % (із 54,1 до 58,6 кВт), двигуна BVX – на 9,71 % (із 105,7 до 126,35 кВт);
- середній індикаторний тиск двигуна K7J 710 збільшився із 848,88 до 920,55 кПа, двигуна BVX – із 1065,54 до 1180,18 кПа;
- середня індикаторна робота для двигуна K7J 710 збільшилася з 0,295 до 0,320 кДж, двигуна BVX із 0,529 до 0,585 кДж.

Також у **п'ятому розділі** розглянуто впровадження результатів дослідження на підприємствах галузі (ТОВ «Енерготехнологія», машинобудівному підприємстві ПрАТ «МОТОР-ПЛЮС»), а також у навчальному процесі кафедри «Двигуни внутрішнього згоряння» Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

**У додатках** наведені акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

## ВИСНОВКИ

У роботі поставлена і вирішена важлива **науково-практична задача** підвищення ефективних показників та поліпшення екологічних параметрів газопоршневих двигунів, що працюють на синтез-газі, за рахунок дослідження й раціональної організації процесу згоряння. Отримані наступні результати:

1. Аналіз вітчизняної та зарубіжної літератури дозволив установити можливість використання синтез-газу як альтернативного палива для двигунів, що дозволило визначити перелік проблем, що виникають при його застосуванні, а також встановити раціональні шляхи подальшого підвищення ефективності використання синтез-газу в ДВЗ.

2. Експериментально встановлено, що в результаті збільшення меж займання паливоповітряної суміші при роботі двигуна на синтез-газі раціональна організація робочого процесу дозволила збільшити індикаторний ККД двигуна із 0,33 на бензині та 0,31 на пропані до 0,36 на синтез-газі (збільшення на 9,1 %).

3. Експериментально встановлено, що при роботі двигуна на синтез-газі з коефіцієнтом надлишку повітря  $\alpha = 1$  спостерігається більш жорстка робота, а також відбувається зміщення максимуму згоряння в бік ВМТ. Урахування цих особливостей і вибір коефіцієнта надлишку повітря в межах  $\alpha = 1,35 \dots 1,75$  забезпечили нормальну роботу двигуна, при цьому значення індикаторного ККД має максимум, а питома індикаторна витрата палива має мінімальні значення.

4. Установлено та експериментально підтверджено, що для двигунів з іскровим запаленням транспортних енергетичних установок об'ємом циліндра 240...500 см<sup>3</sup>, що працюють на синтез-газі, значення показника згоряння  $m$  у напівемпіричному рівнянні тепловиділення І.І. Вібе має змінний характер, що більш відповідає реальному закону тепловиділення при експериментальних дослідженнях. Визначено межі його зміни  $m = 1,56 \dots 5,46$  залежно від складу синтез-газу та коефіцієнта надлишку

повітря. Це дозволило адекватно визначати параметри роботи двигуна.

5. Запропоновані залежності для розрахунку значень показника згоряння  $m$  і тривалості згоряння  $\varphi_z$  при коефіцієнті надлишку повітря  $\alpha = 1,0...2,2$ , що дозволило отримати надійні дані для визначення показника характеру згоряння за кутом повороту колінчастого вала та розрахунку тепловиділення двигунів з іскровим запаленням об'ємом циліндра  $240...500 \text{ см}^3$ , які працюють на синтез-газі з вмістом водню  $30...100 \%$  за об'ємом.

6. На базі отриманих експериментальних даних та підходу, запропонованого професором А. П. Марченком, до визначення показника характеру згоряння  $m$  і тривалості згоряння  $\varphi_z$  у напівемпіричному рівнянні І.І. Вібе для двигунів з іскровим запаленням удосконалена математична модель процесу згоряння синтез-газу в циліндрі ДВЗ, яка дозволила адекватно визначати індикаторні показники двигуна та зменшити максимальну середньоквадратичну похибку визначення тиску в циліндрі до  $4,5 \%$  і підвищити точність визначення індикаторних показників ДВЗ до  $5 \%$ .

7. Установлено раціональний діапазон складу синтез-газу  $60...80 \%$  водню і відповідно  $40...20 \%$  СО за об'ємом (при цьому максимум ефективних показників забезпечується при  $67 \%$  вмісті водню), який забезпечив прийнятні значення потужності, максимального тиску згоряння, витрати палива, а також ефективного ККД.

8. Підтверджено, що внаслідок низької густини синтез-газу фази газорозподілу вимагають корегування. Так, раціонально підібрані фази газорозподілу ДВЗ з іскровим запалюванням дозволили підвищити ефективну потужність двигуна на  $5,3 \%$ .

9. Визначено, що використання внутрішнього сумішоутворення (вприскування стисненого газоподібного палива в циліндр двигуна при закритих впускних і випускних клапанах) забезпечило збільшення потужності двигуна з іскровим запалюванням, що працює на синтез-газі, на  $9,71 \%$ .

10. Результати дослідження впроваджені та використовуються в ТОВ «Енерготехнологія», машинобудівному підприємстві ПрАТ «МОТОР-ПЛЮС», а також навчальному процесі кафедри ДВЗ НУК при читанні курсу лекцій, проведенні практичних, індивідуальних і лабораторних занять з дисциплін «Теорія ДВЗ», «Теорія робочих процесів ДВЗ», курсовому і дипломному проектуванні.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. **Митрофанов О. С.** Аналіз роботи поршневого двигуна на альтернативному паливі [Текст] / О. С. Митрофанов // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2009. – № 4 (427). – С. 127–132.

2. **Митрофанов О. С.** Ефективність двигуна внутрішнього згоряння 4Ч 8,2/7, що працює на синтез-газі [Текст] / О. С. Митрофанов // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2010. – № 3 (432). – С. 122–126.

3. **Митрофанов О. С.** Математичне моделювання робочого циклу поршневого двигуна, що працює на синтез-газі [Електронний ресурс] / О. С. Митрофанов // Вісник Національного університету кораблебудування. – Миколаїв : НУК, 2010. – № 3. – 11 с. – Режим доступу: [ev.nuos.edu.ua](http://ev.nuos.edu.ua).

4. Експериментальне дослідження параметрів поршневого ДВЗ із системою термохімічної конверсії біоетанолу [Текст] / Б. Г. Тимошевський, М. Р. Ткач, О. С. Митрофанов, А. С. Познанський, А. Ю. Проскурін // Двигатели внутреннего сгорания : Всеукраинский научно-технический журнал. – 2011. – № 2. – С. 3–8.

Здобувачу належить проектування та створення стенда із системою вимірювань для дослідження параметрів робочого циклу ДВЗ з іскровим запаленням, що працює на синтез-газі, а також обробка й аналіз результатів випробувань.

5. **Тимошевський Б. Г.** Математичне моделювання процесу згоряння синтез-газу в циліндрі ДВЗ [Текст] / Б. Г. Тимошевський, М. Р. Ткач, О. С. Митрофанов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 10 (87). – С. 178–183.

Здобувачем виконано аналіз, розробка алгоритму та математичної моделі розрахунку тепловиділення на базі двозонної моделі.

6. Характеристики экспериментальной системы конверсии биоэтанола ДВС 2Ч 7,2/6 [Текст] / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, А. С. Митрофанов, А. С. Познанский, А. Ю. Проскурин // Двигатели внутреннего сгорания : Всеукраинский научно-технический журнал. – 2013. – № 1. – С. 28–32.

Здобувачу належить обробка та аналіз результатів експериментальних досліджень теплових втрат, а також визначення властивостей синтез-газу при різних складі й витраті суміші біоетанолу та води.

7. Показатели эффективности двигателя с искровым зажиганием 2Ч 7,2/6 при работе на синтез-газе [Текст] / Б. Г. Тимошевский, М. Р. Ткач, А. С. Митрофанов, А. С. Познанский, А. Ю. Проскурин // Двигатели внутреннего сгорания : Всеукраинский научно-технический журнал. – 2013. – № 2. – С. 13–17.

Здобувачу належить проведення випробувань двигуна з іскровим запаленням, що працює на бензині, пропані та синтез-газі, а також обробка, аналіз і порівняння експериментальних індикаторних діаграм при роботі двигуна на різних видах палива та різному значенні коефіцієнта надлишку повітря.

8. Экспериментальное исследование особенностей работы искрового ДВС с системой термохимической паровой конверсии биоэтанола [Текст] / Б. Г. Тимошевский, М. Р. Ткач, А. С. Митрофанов, А. С. Познанский, А. Ю. Проскурин // Motrol. – 2013. – Vol. 15, nr 2. – С. 157–163.

Здобувачу належить проведення випробувань двигуна з іскровим запаленням, що працює на бензині, пропані та синтез-газі (при різному значенні коефіцієнта надлишку повітря), а також обробка й аналіз експериментальних індикаторних діаграм.

9. **Митрофанов А. С.** Перспективы использования синтез-газа в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания [Текст] / А. С. Митрофанов // Матеріали І Міжнародної науково-технічної конференції «Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціювання та рефрижерації». – Миколаїв : НУК, 2008. – С. 225–227.

10. **Митрофанов А. С.** Стенд для экспериментального исследования рабочих процессов в двигателе внутреннего сгорания при работе на водородосодержащем газе [Текст] / А. С. Митрофанов, А. С. Познанский, А. Ю. Проскурин // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми». – Миколаїв : НУК, 2009. – С. 105–106.

Здобувачу належить розробка та наладка експериментального стенда, проведення досліджень показників роботи ДВЗ.

11. **Митрофанов А. С.** Результаты математического моделирования энергетической установки с ДВС при работе на водородосодержащем газе [Текст] / А. С. Митрофанов, А. С. Познанский, А. Ю. Проскурин // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми». – Миколаїв : НУК, 2009. – С. 107–108.

Здобувачу належить отримання характеристики роботи поршневого ДВЗ на синтез-газі.

12. **Митрофанов А. С.** Исследование термохимической регенерации теплоты отходящих газов поршневого газового двигателя [Текст] / А. С. Митрофанов, А. С. Познанский, А. Ю. Проскурин // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми». – Миколаїв : НУК, 2009. – С. 108–109.

Здобувачу належить аналіз можливостей отримання синтез-газу з біоетанолу шляхом термохімічної регенерації теплоти відпрацьованих газів.

13. **Митрофанов А. С.** Результаты математического моделирования рабочего процесса ДВС при работе на продуктах паровой конверсии этанола [Текст] / А. С. Митрофанов, А. С. Познанский, А. Ю. Проскурин // Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції «Муніципальна енергетика: проблеми, рішення». – Миколаїв : НУК, 2009. – С. 155–156.

Здобувачу належить отримання характеристики роботи поршневого ДВЗ на продуктах парової конверсії етанолу.

14. **Митрофанов А. С.** Математическая модель рабочего процесса двигателя, работающего на синтез-газе [Текст] / А. С. Митрофанов // Матеріали Науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, присвяченої 90-річчю Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова. – Миколаїв : НУК, 2010.

15. Ефективність використання термохімічної конверсії біоетанолу в сучасних ДВЗ [Текст] / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевський, О. С. Митрофанов, А. С. Познанський, А. Ю. Проскурін // Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці, присвяченої 20-річчю незалежності України». – Миколаїв : НУК, 2011. – С. 237–238.

Здобувачу належить аналіз ефективності використання термохімічної конверсії біоетанолу.

16. **Ткач М. Р.** Дослідження особливостей робочого процесу ДВЗ з іскровим запаленням, що працює на синтез-газі різного складу [Текст] / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевський, О. С. Митрофанов // Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці, присвяченої 20-річчю незалежності України». – Миколаїв : НУК, 2011. – С. 239–241.

Здобувачу належить аналіз та дослідження особливостей робочого процесу ДВЗ, що працює на синтез-газі.

17. **Тимошевський Б. Г.** Деякі аспекти математичного моделювання процесу згоряння синтез-газу у ДВЗ [Текст] / Б. Г. Тимошевський, М. Р. Ткач, О. С. Митро-

фанов // Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми». – Миколаїв : НУК, 2011. – С. 71–74.

Здобувачем виконано аналіз та розробку алгоритму математичної моделі розрахунку процесу згоряння синтез-газу в ДВЗ.

18. **Тимошевський Б. Г.** Особливості процесу згоряння синтез-газу різного складу в ДВЗ 4Ч 8,2/7,0 [Текст] / Б. Г. Тимошевський, М. Р. Ткач, О. С. Митрофанов // Матеріали IV Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення». – Первомайськ : ППІ НУК, 2011. – С. 179–180.

Здобувачу належить аналіз та виявлення особливостей процесу згоряння синтез-газу різного складу в ДВЗ.

19. **Ткач М. Р.** Дослідження особливостей робочого процесу ДВЗ з іскровим запаленням, що працює на синтез-газі різного складу [Текст] / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевський, О. С. Митрофанов // Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 20-річчю незалежності України «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». – Миколаїв : НУК, 2011. – С. 239–241.

Здобувачу належить розробка математичної моделі процесу згоряння синтез-газу.

20. **Тимошевський Б. Г.** Дослідження особливостей згоряння водневмісних палив у ДВЗ [Текст] / Б. Г. Тимошевський, М. Р. Ткач, О. С. Митрофанов // Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасний стан та проблеми двигунобудування». – Миколаїв : НУК, 2012. – С. 105–108.

Здобувачем визначено вплив параметрів роботи ДВЗ на характеристики тепло-виділення при роботі на водневмісних паливах.

21. Деякі результати експериментального дослідження реактора для термохімічної конверсії біоетанолу як альтернативного палива для суднових енергетичних установок [Текст] / Б. Г. Тимошевський, М. Р. Ткач, А. Ю. Проскурін, О. С. Митрофанов, А. С. Познанський // Матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 75-річчю Миколаївської області «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». – Миколаїв : НУК, 2012. – С. 239–240.

Здобувачу належить участь у проведенні, обробка та аналіз результатів експериментальних досліджень реактора для термохімічної конверсії біоетанолу.

22. Експериментальні показники дослідження реактора для термохімічної конверсії біоетанолу як альтернативного палива для суднових енергетичних установок [Текст] / Б. Г. Тимошевський, М. Р. Ткач, А. Ю. Проскурін, О. С. Митрофанов, А. С. Познанський // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування». – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2012. – С. 69–70.

Здобувачу належить дослідження параметрів реактора термохімічної конверсії біоетанолу.

23. Экспериментальное исследование параметров поршневого ДВС при работе на водородосодержащем газе [Текст] / Б. Г. Тимошевский, М. Р. Ткач, С. М. Доценко, А. С. Митрофанов, А. С. Познанский, А. Ю. Проскурин // Матеріали V Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Сучасні проблеми

двигунобудування: стан, ідеї, рішення». – Первомайськ : ППІ НУК, 2013. – С. 199–203.

Здобувачу належить проведення досліджень параметрів поршневого ДВЗ з іскровим запаленням на різних видах палива (бензин, пропан, синтез-газ), а також обробка результатів експерименту.

24. Особенности работы поршневого ДВС с добавками синтез-газа [Текст] / Б. Г. Тимошевский, М. Р. Ткач, А. С. Митрофанов, А. С. Познанский, А. Ю. Проскурин // Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми». – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 187–188.

Здобувачу належить обробка результатів експериментальних досліджень поршневого ДВЗ з іскровим запаленням при роботі з додаванням синтез-газу до бензину.

## АНОТАЦІЯ

**Митрофанов О. С. Підвищення ефективності використання синтез-газу в газопоршневих двигунах.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – Двигуни та енергетичні установки. – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – Миколаїв, 2014.

Дисертація присвячена вирішенню задачі підвищення ефективних показників та поліпшення екологічних параметрів газопоршневих двигунів, що працюють на альтернативному паливі – синтез-газі, за рахунок експериментального дослідження й раціональної організації процесу згоряння.

Проаналізовані та визначені найбільш перспективні шляхи підвищення ефективних показників двигунів з іскровим запаленням при використанні синтез-газу як палива.

Отримані експериментальні індикаторні діаграми і навантажувальні характеристики двигунів з іскровим запаленням 4Ч 8,2/7 і 2Ч 7,2/6 з різним значенням коефіцієнта надлишку повітря ( $\alpha = 1,0 \dots 2,2$ ) при роботі на синтез-газі й водні.

На основі аналізу та обробки експериментальних індикаторних діаграм при роботі двигунів на водні й синтез-газі, для розрахунку при математичному моделюванні робочого циклу двигунів з іскровим запаленням з об'ємом циліндра 240...500 см<sup>3</sup>, були запропоновані залежності для знаходження значень показника характеру згоряння  $m$  і тривалості згоряння  $\varphi_z$  у напівемпіричному рівнянні І.І. Вібе. Дані рівняння враховують вміст водню у складі синтез-газу в межах 30...100 % за об'ємом і коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha = 1,0 \dots 2,2$ .

Розроблено практичні рекомендації щодо налаштування паливної апаратури, способу сумішоутворення, фаз газорозподілу, які дозволяють конвертувати існуючі та проектувати нові ДВЗ із метою ефективного використання синтез-газу. Застосування скорегованих фаз газорозподілу дозволяє підвищити ефективну потужність двигуна при використанні синтез-газу на 5,3 %, а застосування внутрішнього сумішоутворення – на 9,7 %.

**Ключові слова:** альтернативне паливо, синтез-газ, характеристики тепловиділення при згорянні, робочий процес, показник характеру згоряння, тривалість згоряння.

## АННОТАЦИЯ

**Митрофанов А. С. Повышение эффективности использования синтез-газа в газопоршневых двигателях. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – Двигатели и энергетические установки. – Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова. – Николаев, 2014.

Диссертация посвящена решению задачи повышения эффективных показателей и улучшения экологических параметров газопоршневых двигателей, работающих на альтернативном топливе – синтез-газе, за счет экспериментального исследования и рациональной организации процесса сгорания.

Проанализированы и определены наиболее перспективные пути повышения эффективных показателей двигателей с искровым зажиганием при использовании синтез-газа в качестве топлива.

Получены экспериментальные индикаторные диаграммы и нагрузочные характеристики двигателей с искровым зажиганием 4Ч 8,2/7 и 2Ч 7,2/6 с разным значением коэффициента избытка воздуха ( $\alpha = 1,0 \dots 2,2$ ) при работе на синтез-газе и водороде. Полученные экспериментальные данные позволили определить особенности процесса сгорания синтез-газа в ДВС и уточнить математическую модель расчета рабочего цикла за счет уточнения расчета процесса сгорания. Рациональная организация рабочего процесса двигателя, работающего на синтез-газе, позволила увеличить индикаторный КПД двигателя на 9,1 %. Применение коэффициента избытка воздуха в пределах  $\alpha = 1,35 \dots 1,75$  обеспечило нормальную работу двигателя, при этом значение индикаторного КПД имеет максимум, а удельный индикаторный расход топлива имеет минимальные значения.

На основе анализа и обработки экспериментальных индикаторных диаграмм при работе двигателей на водороде и синтез-газе, для расчета при математическом моделировании рабочего цикла двигателей с искровым зажиганием с объемом цилиндра  $240 \dots 500 \text{ см}^3$ , были предложены зависимости для нахождения значений показателя характера сгорания  $m$  и продолжительности сгорания  $\varphi_z$  в полуэмпирическом уравнении И.И. Вибе. Данные уравнения учитывают содержание водорода в составе синтез-газа в пределах 30...100 % по объему и коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,0 \dots 2,2$ . При определении коэффициентов уравнений для нахождения  $m$  и  $\varphi_z$  за параметр оценки было взято достижение минимального значения среднеквадратической погрешности определения давления в цилиндре ДВС, а также минимальной погрешности определения индикаторных параметров двигателя.

Усовершенствованная на базе экспериментальных данных математическая модель процесса сгорания синтез-газа в цилиндре ДВС, которая интегрируется в общую математическую модель рабочего цикла, позволила адекватно определять изменение давления в цилиндре, а также индикаторные показатели двигателя. Применение предложенных зависимостей позволило значительно повысить точность расчетов при моделировании и достичь максимальную среднеквадратичную погрешность определения давления в цилиндре и определения индикаторных показателей ДВС в пределах 5...12 %.

Разработаны практические рекомендации по настройке топливной аппаратуры, способу смесеобразования, фазам газораспределения, которые позволяют конвертировать существующие и проектировать новые ДВС с целью эффективного использования синтез-газа. Вследствие низкой плотности синтез-газа фазы газораспределения требуют корректировки. Так, применение скорректированных фаз газораспределения позволяет повысить эффективную мощность двигателя при использовании синтез-газа на 5,3 %. Применение внутреннего смесеобразования (впрыск сжатого газа в цилиндр двигателя при закрытых впускных и выпускных клапанах) позволяет повысить мощность двигателя при работе на синтез-газе на 9,7 %.

**Ключевые слова:** альтернативное топливо, синтез-газ, характеристики тепловыделения при сгорании, рабочий процесс, показатель характера сгорания, продолжительность сгорания.

## ABSTRACT

**Mytrofanov A. S. Increasing efficiency of synthesis-gas usage in reciprocating engines.** – Manuscript.

Thesis for the candidate degree in technical sciences on specialty 05.05.03 – Engines and power plants. – Admiral Makarov National University of Shipbuilding. – Mykolaiv, 2014.

Thesis deals with the problem of increasing the effective and improved environmental performance piston engines running with alternative fuel – synthesis-gas, through experimental research and rational organization of the combustion process.

Analyzed and identified the most promising ways to improve the performance of spark ignition engines using synthesis-gas.

The obtained experimental indicator diagram and load characteristics of engines with spark ignition 4Ч 8,2/7 and 2Ч 7,2/6, with different coefficient of excess air ( $\alpha = 1,0 \dots 2,2$ ) working on the synthesis-gas and hydrogen.

For the mathematical simulation of the cylinder volume 240 ... 500 cm<sup>3</sup> spark-ignition engines of based on the analysis and processing of experimental indicator diagrams of engine working on hydrogen and synthesis-gas, have been proposed equations to find the values of the combustion parameter  $m$  and  $\varphi_z$  in semi empirical equation I.I. Wiebe. The proposed equations take into account the content of hydrogen in the synthesis gas within 30...100 % in volume and the excess air coefficient  $\alpha = 1,0 \dots 2,2$ .

The proposed equations for finding  $m$  and  $\varphi_z$  in semi empirical equation I.I. Wiebe substantially improved the accuracy of the calculations in the simulation and allows achieve maximum mean square error of determination of the pressure in the cylinder and the definition of indicator parameters engine within 5...12 %.

Practical recommendations for setting up the fuel equipment, method of mixing, variable valve timing, which allow you to convert existing and new engine design to make effective use of synthesis-gas. Using the adjusted valve timing allows increase in engine output by using synthesis-gas by 5,3 %, while the use of internal mixing of 9,7 %.

**Keywords:** alternative fuel, synthesis-gas, heat combustion characteristics, workflow component, nature of combustion, the duration of combustion.

**МИТРОФАНОВ** Олександр Сергійович

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ  
СИНТЕЗ-ГАЗУ В ГАЗОПОРШНЕВИХ ДВИГУНАХ**

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук за спеціальністю  
05.05.03 – Двигуни та енергетичні установки

Підписано до друку 15.05.2014. Папір офсет. Формат 60х84/16.  
Гарнітура «Таймс». Друк ризограф. Ум. друк. арк. 0,9.  
Тираж 100 прим. Зам. № 5005.

---

Віддруковано з готових оригінал-макетів  
у поліграфічному підприємстві ПП фірма «Різо-графіка»  
54017, м. Миколаїв, пр., Леніна, 94/2.  
Свідоцтво А01 № 492190