

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Проскурін Аркадій Юрійович



УДК 621.431

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕТАНОЛУ В
ПОРШНЕВИХ ДВИГУНАХ ШЛЯХОМ ТЕРМОХІМІЧНОЇ УТИЛІЗАЦІЇ
ТЕПЛОТИ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ

Спеціальність 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Миколаїв – 2016

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в 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 двигунів внутрішнього згоряння

Офіційні опоненти

- доктор технічних наук, професор
Варбанець Роман Анатолійович,
Одеський національний морський університет, Міністерство освіти і науки України, м. Одеса, завідувач кафедри суднових енергетичних установок і технічної експлуатації;
- кандидат технічних наук, доцент
Білоусов Євген Вікторович,
Херсонська державна морська академія, Міністерство освіти і науки України, декан факультету суднової енергетики, доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та загальноінженерної підготовки

Захист відбудеться «3» жовтня 2016 р. о 12.00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 38.060.01 Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою:

ауд. 360, просп. Героїв Сталінграда, 9, м. Миколаїв, 54025.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою:
просп. Героїв Сталінграда, 9, м. Миколаїв, 54025.

Автореферат розісланий «31» серпня 2016 р.

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



А. П. Шевцов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність дослідження. В даний час близько 80% споживання палив нафтового походження витрачається на транспорті різного призначення. У зв'язку з загрозою зменшення запасів нафти в світі, постійним посиленням вимог з охорони навколишнього середовища, а також прагненням до енергетичної безпеки країн-імпортерів паливних ресурсів ведеться активний пошук та впровадження в роботу поршневих двигунів внутрішнього згоряння альтернативних видів палив.

Етанол є найбільш перспективним замінником традиційних нафтових палив для України, який має широку базу біологічно відновлюваної сировини для його виробництва (меляса, зернові культури). Незважаючи на ряд переваг (висока антидетонаційна стійкість, наявність кисню) етанол має істотні недоліки, які стримують його широке розповсюдження в поршневих двигунах. Основні недоліки пов'язані з відмінністю від нафтових палив за фізико-хімічними властивостями, що робить необхідним внесення в конструкцію двигунів істотних змін.

Одним з перспективних способів застосування етанолу в поршневих ДВЗ, який може усунути більшість недоліків, є використання етанолу у вигляді синтез-газу, який отримано термохімічною утилізацією (ТХУ) теплоти відхідних газів (ВГ). ТХУ являє собою сукупність процесів, які спрямовані на використання теплової енергії ВГ для здійснення ендотермічної реакції хімічного перетворення (конверсії) вихідного палива в суміш горючих газів (CO , H_2 , CH_4 та ін. – синтез-газ). В результаті конверсії хімічна енергія отриманого синтез-газу перевищує енергію вихідного палива на величину утилізованої енергії ВГ, яка, таким чином, повторно бере участь в організації робочого циклу. До переваг ТХУ теплоти ВГ відносяться широка сировинна база для отримання синтез-газу, різноманіття способів хімічного перетворення палив, позитивний вплив водню в складі синтез-газу на показники роботи ДВЗ.

В результаті вивчення вітчизняних та зарубіжних публікацій не вдалося виявити досить достовірних та надійних теоретичних й експериментальних даних, які б визначали ефективність комплексного використання в поршневих двигунах синтез-газу, отриманого в системі ТХУ теплоти ВГ з етанолу. Тому процеси, які протікають в поршневих ДВЗ з ТХУ теплоти ВГ, вимагають подальшого теоретичного та експериментального дослідження для визначення раціональних параметрів, які б забезпечили вигідне співвідношення витрат палива, потужності та ефективних показників роботи.

Таким чином, робота в напрямку підвищення ефективності використання етанолу в поршневих двигунах шляхом застосування ТХУ теплоти ВГ є актуальною на сьогоднішній день та становить практичний інтерес.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відповідності до тематичного плану фундаментальних науково-дослідних держбюджетних і госпдоговірних робіт Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова: № 1625 «Розробка наукових основ проектування та створення суднових енерготехнологічних установок», ДР № 0107U000713 (2007-2009 рр); № 1813 «Розробка науково-технічних основ

створення когенераційних установок на основі водневих термохімічних циклів», ДР № 0111U002313 (2011-2013 рр); № 1995 «Розробка та створення зразку комбінованої системи енергопостачання на базі водневих гідридних технологій», ДР № 0111U000306 (2015-2016 рр). У цих роботах здобувач брав участь у якості виконавця на посаді молодшого наукового співробітника.

Метою наукового дослідження є підвищення ефективності використання етанолу в поршневих двигунах, шляхом вдосконалення процесів та параметрів, що протікають при ТХУ теплоти ВГ; визначення раціонального співвідношення параметрів ТХУ теплоти ВГ, що забезпечить прийнятну питому витрату палива, потужність двигуна та його ефективні показники при заданих умовах експлуатації.

Основні задачі наукового дослідження:

- аналіз шляхів підвищення ефективності роботи поршневих ДВЗ при використанні етанолу;
- створення експериментального стенду та комп'ютеризованої системи вимірювань й реєстрації даних для вивчення процесів, що протікають в поршневих ДВЗ, які працюють на етанолі при використанні ТХУ теплоти ВГ;
- вдосконалення математичної моделі поршневого ДВЗ при використанні ТХУ теплоти ВГ;
- на базі експериментальних досліджень перевірка адекватності математичної моделі;
- дослідження потенціалу підвищення паливної економічності поршневих ДВЗ, що працюють на етанолі за рахунок ТХУ теплоти ВГ;
- визначення раціональних меж та областей застосування ТХУ теплоти ВГ в поршневих ДВЗ;
- розробка практичних рекомендацій для проектування нових та конвертації вже існуючих поршневих ДВЗ, які працюють з ТХУ теплоти ВГ.

Об'єкт дослідження – процеси, які протікають в поршневих двигунах працюючих на етанолі з ТХУ теплоти ВГ.

Предмет досліджень – параметри та характеристики процесів, які протікають в поршневих двигунах працюючих на етанолі з ТХУ теплоти ВГ.

Методика та методи дослідження. В основу дисертаційної роботи покладені традиційні методи системних досліджень складних технічних систем, якими є поршневі двигуни: *метод зіставлення та науково-технічного прогнозування* використовувався при порівнянні об'єктів, які виконують однакові функції з різною ефективністю; *метод фізичного моделювання* (експериментального дослідження) робочих процесів поршневого ДВЗ з примусовим запалюванням при використанні ТХУ теплоти ВГ; *методи математичного моделювання* з розробкою розрахункових алгоритмів та відповідних розрахункових програм використовувалися для створення математичної моделі ТХУ теплоти ВГ, яка інтегрувалася у загальну модель поршневого двигуна з ТХУ теплоти ВГ; *методи планування та обробки експерименту* використовувалися при проведенні натурних та стендових випробуваннях поршневого ДВЗ, що працює на синтез-газі та етанолі з ТХУ теплоти ВГ.

Наукові результати, які автор захищає, та їх новизна:

Вперше:

- експериментально та теоретично встановлено, що для поршневих двигунів з примусовим запалюванням з об'ємом циліндра $250...450 \text{ см}^3$, які працюють на етанолі, використання термохімічної утилізації теплоти відхідних газів дозволяє знизити питому витрату палива на $1,2...5,4\%$;

- визначено, що для поршневих двигунів з примусовим запалюванням з об'ємом циліндра $250...450 \text{ см}^3$ при використанні термохімічної утилізації теплоти відхідних газів раціональна різниця температур на вході в пристрій конверсії етанолу складає $20...160 \text{ K}$, що забезпечує граничне значення потужності, при якій досягається зниження питомої витрати палива, в діапазоні $25...75\%$ від номінального навантаження;

- встановлено, що за рахунок використання промислових каталізаторів (на базі Ni, Co, Cu/Zr ; $\text{Pd/Al}_2\text{O}_3$; $\text{Ni/Al}_2\text{O}_3$; $\text{Ni/Y}_2\text{O}_3$), що забезпечують зменшення температури реакції конверсії етанолу на $25...100 \text{ K}$, розширюється діапазон граничних значень потужності поршневих двигунів з термохімічною утилізацією теплоти відхідних газів, при яких досягається зниження питомої витрати палива, в $1,2...1,9$ раз та збільшується допустима різниця температур на вході в пристрій конверсії етанолу в $1,2...1,6$ раз.

Удосконалена математична модель поршневого ДВЗ з примусовим запалюванням при використанні ТХУ теплоти ВГ шляхом уточнення зміни енергії, яка виділяється при згорянні палива, та маси горючої суміші в циліндрі, що дозволило досягти максимальної відносної середньоквадратичної похибки визначення параметрів роботи двигуна $6...12\%$.

Отримало подальший розвиток уявлення про умови та параметри ефективного застосування ТХУ теплоти ВГ стосовно поршневих ДВЗ, що працюють на етанолі шляхом врахування впливу способу конверсії, параметрів утилізаційного пристрою та використання каталізаторів.

Достовірність результатів досліджень 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 роботи поршневого ДВЗ працюючого на етанолі з ТХУ теплоти ВГ зіставлялися з експериментальними значеннями, які були отримані під час експериментальних досліджень. Відхилення експериментальних та розрахункових значень параметрів роботи двигуна не перевищувало 12% . Отримані у роботі результати є логічними та не суперечать практиці використання альтернативних палив у ДВЗ, а також даним інших авторів.

Практичне значення отриманих результатів:

- вдосконалено та впроваджено в практику проектування математичну модель поршневого ДВЗ з примусовим запалюванням, що працює на етанолі з ТХУ теплоти ВГ;

- розроблено та реалізовано у вигляді прикладного програмного пакету методики розрахунку параметрів роботи поршневого ДВЗ, що працює на етанолі з ТХУ теплоти ВГ;

- розроблено практичні рекомендації щодо вибору раціональних параметрів роботи поршневих ДВЗ з ТХУ теплоти ВГ, які дозволяють конвертувати існуючі та проектувати нові установки.

Впровадження результатів досліджень. Результати дисертаційної роботи й методики розрахунку параметрів роботи поршневих ДВЗ, що працюють на етанолі з ТХУ теплоти ВГ використовуються на підприємствах ТДВ «Первомайскдизельмаш» та ПАТ «Чорноморсуднопроект» при виконанні проектно-конструкторських робіт, які пов'язані з використанням альтернативних палив та вторинних енергоресурсів установок з ДВЗ. Програмний пакет розрахунку поршневого ДВЗ з примусовим запалюванням, що працює на етанолі з ТХУ теплоти ВГ, а також експериментальна установка використовуються в науковому та 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 здобувача полягає в аналізі задач, які пов'язані з ефективним використанням етанолу в поршневих ДВЗ з примусовим запалюванням шляхом ТХУ теплоти ВГ. На експериментальних установках особисто здобувачем проведені дослідження, що пов'язані з визначенням можливості реалізації та ефективності застосування ТХУ теплоти ВГ для установки на базі чотирьохтактного ДВЗ з примусовим запалюванням, а також здійснена перевірка адекватності запропонованої математичної моделі. Здобувач особисто проводив експериментальні дослідження роботи двигуна з ТХУ теплоти ВГ та обробляв їх результати. Особисто здобувачем визначені задачі моделювання й основні параметри математичної моделі. Вдосконалена здобувачем математична модель поршневого ДВЗ з ТХУ теплоти ВГ дозволяє розраховувати та досліджувати параметри процесів, що відбуваються в двигуні, визначати потоки енергії та її розподіл, а також здійснювати численні дослідження процесів в широкому діапазоні режимних параметрів.

Апробація результатів роботи. Основні теоретичні та експериментальні результати дисертації були представлені на науково-практичних семінарах кафедри ДВЗ Національного університету кораблебудування (НУК, м. Миколаїв) у 2009–2015 рр. та наступних наукових конференціях, де отримали позитивну оцінку наукової спільноти: IV, V, VI і VII Міжнародних науково-технічних конференціях «Суднова енергетика: стан і проблеми» (Миколаїв, НУК, 2009 р., 2011 р., 2013 р., 2015 р.); II та V Міжнародній науково-технічних конференціях «Муніципальна енергетика: проблеми, рішення» (Миколаїв, НУК, 2009 р., 2013 р.); Науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, присвяченій 90-річчю Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова (Миколаїв, НУК, 2010 р.); XVI, XVIII, XIX, XX Міжнародних Конгресах двигунобудівників (с. Рибаче, АР Крим, с. Коблево, 2011 р., 2013-2015 р.); II, III, V і VI Міжнародних науково-технічних конференціях. «Інновації в суднобудуванні й океанотехніці»

(Миколаїв, НУК, 2011 р., 2012 р., 2014 р., 2015 р.); IV, V Всеукраїнських науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення» (м. Первомайськ, ПП НУК, 2011 р., 2013 р.); II, III Міжнародних науково-технічних конференціях. «Сучасний стан і проблеми двигунобудування» (Миколаїв, НУК, 2012 р., 2014 р.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 28 наукових праць, з них 11 наукових статей у спеціалізованих наукових виданнях по технічним наукам, що входять у перелік, затверджений ДАК МОН України, з яких одна в закордонному виданні і 17 тез міжнародних та всеукраїнських конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із переліку умовних позначень, вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел, анотації та додатків. Обсяг основного тексту дисертаційної роботи становить 142 сторінки, рисунків – 73, таблиць – 12. Список використаних джерел містить 115 найменувань на 13 сторінках. У додатках наведено акти впровадження результатів досліджень.

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 використання етанолу в сучасних поршневих двигунах та встановлено, що найбільш перспективним способом є використання етанолу у вигляді синтез-газу, який отримано за рахунок ТХУ теплоти ВГ. Використання ТХУ теплоти ВГ дозволяє більш раціонально використовувати етанол та підвищує ефективні й економічні показники роботи двигуна та енергетичної установки в цілому.

Розгорнутий аналіз вітчизняних та зарубіжних публікацій дозволив встановити, що процеси, які протікають в поршневих ДВЗ, працюючих на етанолі з ТХУ теплоти ВГ досліджені у недостатній мірі, а також немає чітких рекомендацій щодо оптимальних параметрів роботи двигуна. Тому процеси енергоперетворення в ДВЗ з ТХУ теплоти ВГ потребують подальшого теоретичного та експериментального дослідження.

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 та 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 процесу ТХУ теплоти ВГ на показники роботи ДВЗ.

Задачі та методика математичного моделювання, які прийняті в роботі, дозволили вдосконалити модель поршневого двигуна, що працює на етанолі з ТХУ теплоти ВГ, адекватну дійсним процесам.

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 можливості реалізації та ефективності використання ТХУ теплоти ВГ для установки на базі поршневого ДВЗ з примусовим запалюванням;
- одержання експериментальних залежностей, необхідних для уточнення та підвищення точності розрахунків параметрів роботи поршневого двигуна при використанні ТХУ теплоти ВГ.

Для вирішення поставлених цілей була використана експериментальна установка за допомогою якої досліджувалися особливості роботи чотирьохтактного ДВЗ з примусовим запалюванням 2Ч 7,2/6, що працює на етанолі та синтез-газі з системою ТХУ теплоти ВГ. Установка складається з 2 стендів:

- 1) Експериментальний стенд ТХР-2.0, в якому досліджувались процеси, що протікають при ТХУ теплоти ВГ;
- 2) Експериментальний стенд на базі двигуна із зовнішнім сумішоутворенням 2Ч 7,2/6, в якому досліджувались параметри двигуна при роботі на етанолі та синтез-газі.

Для реалізації поставлених цілей виконані такі роботи:

1. Для проведення експериментальних досліджень процесів, що протікають при ТХУ теплоти ВГ, а також для отримання синтез-газу було створено експериментальний стенд ТХР-2.0 (рис. 1). Стенд дозволяє проводити фізичне моделювання роботи системи ТХУ теплоти ВГ, яка входить до складу поршневого ДВЗ з примусовим запалюванням.

В якості утилізуючого пристрою для конверсії етанолу використовується термохімічний реактор ідеального витіснення, що представляє собою змійовик, виконаний з нержавіючої трубки 12Х18Н10Т (загальна довжина – 6 м, внутрішній діаметр – 7,8 мм, зовнішній діаметр – 9 мм). Підведення теплоти ВГ ДВЗ з температурою 773...973 К, яка необхідна для протікання реакцій конверсії етанолу у синтез-газ, імітується шляхом пропускання через реактор постійного струму від джерела живлення напругою 24...31 В.

Стенд складається з: підсистеми подачі етанолу в термохімічний реактор, енергетичної підсистеми, в якій відбувається ендотермічна реакція конверсії етанолу, підсистеми охолодження та конденсації продуктів конверсії, підсистеми закачування синтез-газу в балони та підсистеми вимірювань, яка дозволяє вимірювати витрату, тиск, густину й температуру всіх теплоносіїв, а також електричне навантаження на реактор.

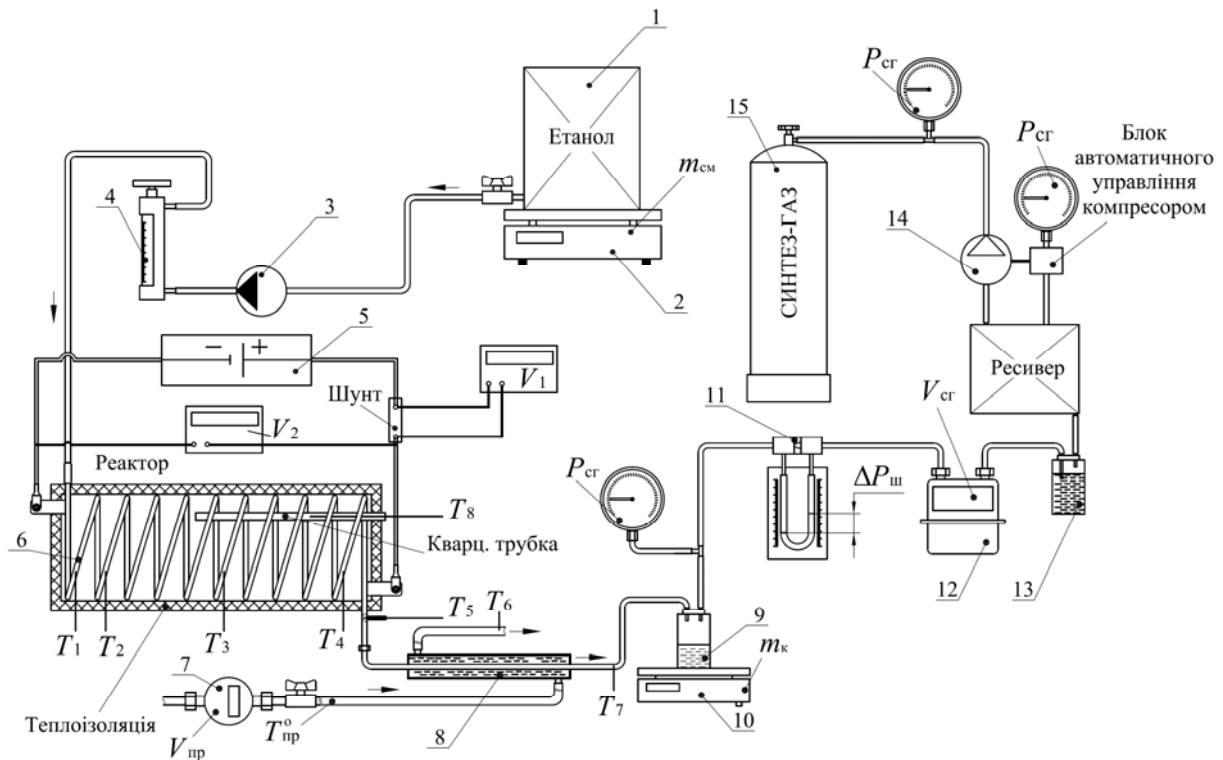


Рис. 1. Схема експериментального стенда ТХР-2.0:

1 – бак з етанолом; 2, 10 – ваги; 3 – насос подачі етанолу в реактор; 4 – ротаметр; 5 – джерело живлення; 6 – термохімічний реактор прямого пропускання струму; 7 – насос подачі охолоджуючої води; 8 – теплообмінник типу «труба в трубі»; 9 – реторта збору конденсату; 11 – витратомірна шайба; 12 – газовий лічильник; 13 – водяний затвор; 14 – компресор; 15 – балони з синтез-газом

2. На експериментальному стенді ТХР-2.0 проведені дослідження основних параметрів процесу конверсії етанолу, в результаті якого утворюється синтез-газ (рис. 2).

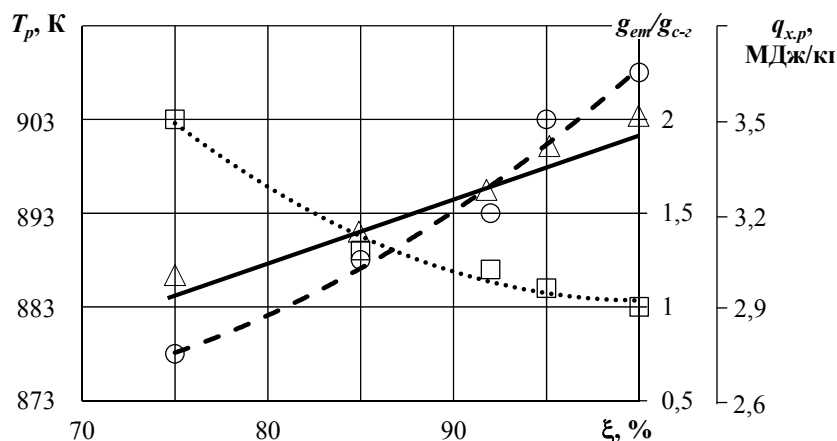


Рис. 2. Основні параметри процесу конверсії етанолу в синтез-газ:

----- залежність ступеня конверсії ξ від температури реакції T_p ;
 – залежність відносної витрати етанолу g_{em}/g_{c-g} на конверсію від ступеня конверсії ξ ; ——— – залежність питомої теплоти хімічної реакції $q_{x.p}$ від ступеня конверсії ξ

Експериментальні дослідження проводилися при температурі навколишнього середовища 298 К та атмосферному тиску 101 кПа. В якості сировини використовувався етанол марки А за ГОСТом 17299-78. Електрична потужність, яка підводилась до реактору, становила 1500 Вт, витрата етанолу змінювалась в межах 0,7...0,9 кг/год.

Повна ступінь конверсії етанолу ($\xi = 1$) була досягнута при температурі реакції $T_p = 908$ К, при цьому відносна витрата етанолу $g_{em}/g_{c-г}$ склала 1, тобто весь рідкий етанол, який надійшов у реактор, повністю перетворився в синтез-газ. Питома теплота хімічної реакції $q_{x.p}$ склала 3,5 МДж/кг. За даними хроматографічного аналізу, який був виконаний в «Екологічній лабораторії НУК» у складі синтез-газу, отриманого при повній конверсії етанолу присутні 3 основні компонента (об.%): водень H_2 (39%), окис вуглецю CO (34%) і метан CH_4 (25%).

3. На експериментальному стенді на базі чотирьохтактного двигуна 2Ч 7,2/6 (рис. 3) проведені дослідження основних параметрів роботи ДВЗ залежно від режиму навантаження при роботі на синтез-газі, який отриманий на стенді ТХР-2.0, та етанолі по навантажувальній характеристиці при номінальній частоті обертання 3000 об/хв (рис. 4).



Рис. 3. Загальний вигляд експериментального стенду та панелі приладів стенда на базі двигуна з примусовим запалюванням 2Ч 7,2/6

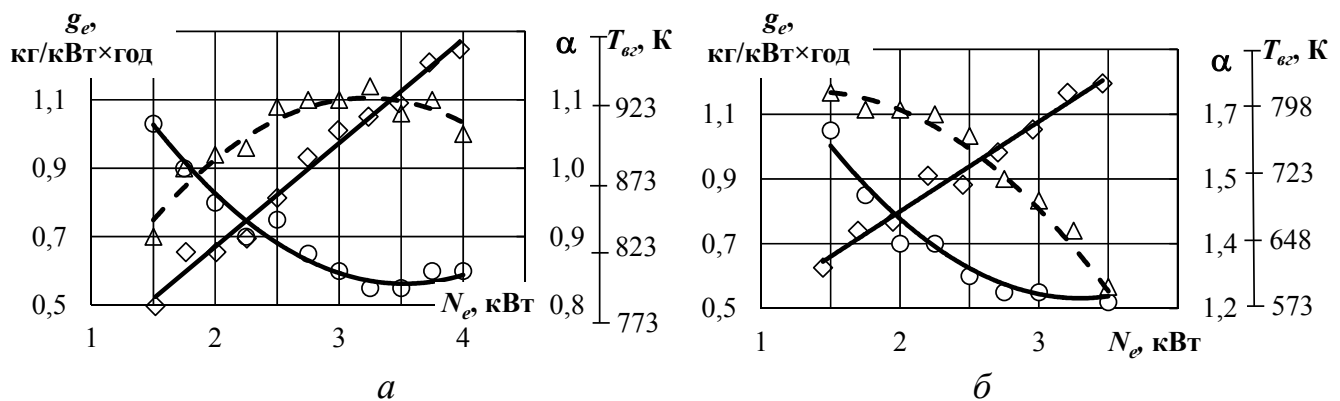


Рис. 4. Основні параметри роботи ДВЗ 2Ч 7,2/6 по навантажувальній характеристиці:

a – робота на етанолі; b – робота на синтез-газі; $\circ$ – питома ефективна витрата палива; $\triangle$ – коефіцієнт надлишку повітря; $\diamond$ – температура ВГ

Згідно з результатами досліджень було виявлено:

- внаслідок наявності у складі синтез-газу великої кількості H_2 і CO значно розширилися межі займання горючої суміші в порівнянні з етанолом, що дозволило працювати двигуну з коефіцієнтом надлишку повітря α на синтез-газі в діапазоні 1,25...1,7, а на етанолі – 0,9...1,1;
- внаслідок збільшення коефіцієнта надлишку повітря при використанні синтез-газу зменшилася температура відхідних газів $T_{\text{вг}}$ у всьому діапазоні роботи двигуна;
- при роботі двигуна на синтез-газі, в порівнянні з етанолом, зменшилася номінальна потужність N_e двигуна на 13%.

4. Для оцінки ефективності та можливості застосування ТХУ теплоти ВГ на ДВЗ 2Ч 7,2/6 порівнювалась питома ефективна витрата палива при роботі двигуна на етанолі і витрата етанолу при роботі на синтез-газі. Також визначалась кількість енергії ВГ, яку необхідно утилізувати для отримання синтез-газу (рис. 5).

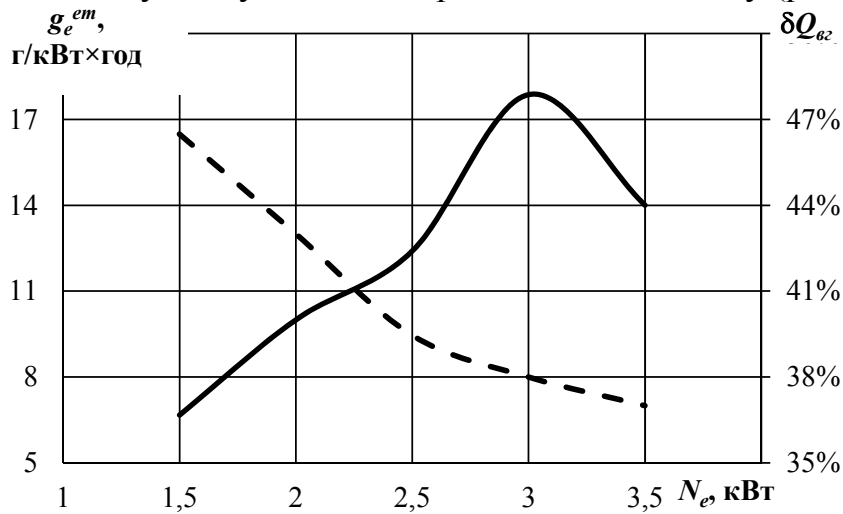


Рис. 5. Оцінка ефективності та можливості застосування ТХУ теплоти ВГ на ДВЗ 2Ч 7,2/6:

— зніження питомої ефективної витрати етанолу при роботі двигуна на синтез-газі; - - - - - кількість енергії ВГ, яку необхідно утилізувати для отримання синтез-газу

За умови здійснення повної конверсії етанолу в синтез-газ, питома ефективна витрата етанолу g_e^{em} при використанні ТХУ знизилась на 6...18 г/(кВт×год) (0,6...2,9%), при цьому кількість енергії, яка необхідна для отримання синтез-газу $\delta Q_{\text{вг}}$ становить 37...46% від теплоти, яка виділяється з ВГ на даному режимі роботи. Сучасні термохімічні пристрої для конверсії палив, згідно з літературними даними, забезпечують даний діапазон утилізації.

Таким чином експериментальні дослідження підтвердили можливість реалізації та ефективність застосування ТХУ теплоти ВГ для двигуна 2Ч 7,2/6, який працює на етанолі.

У **четвертому розділі** обґрунтовані вимоги до математичної моделі поршневого ДВЗ з примусовим запалюванням при використанні ТХУ теплоти ВГ. Відповідно до цих вимог була доопрацьована математична модель робочого циклу двигуна, що працює на синтез-газі та математична модель процесу ТХУ теплоти ВГ.

Математична модель поршневого ДВЗ з примусовим запалюванням при використанні ТХУ теплоти ВГ базується на системі балансових рівнянь потоків енергії та маси в елементах обладнання, які встановлюють співвідношення між термодинамічними та витратними параметрами, що забезпечує задану величину ефективної потужності двигуна та включає в себе рівняння балансу енергії для кожного елемента (1), рівняння балансу витрат для кожного енергоносія кожного елемента (2), рівняння гідравлічного (аеродинамічного) балансу для кожного енергоносія кожного елемента (3), рівняння зміни ентальпії кожного енергоносія в кожному елементі (4).

$$\sum_{i=1}^L (k_n Gh)_i + \sum_{i=1}^L (k_n N)_i = 0 \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^L G_i = 0 \quad (2)$$

$$p_{ex} + (-1)^K \Delta p - p_{блх} = 0 \quad (3)$$

$$h_{ex} + (-1)^K \Delta h - h_{блх} = 0 \quad (4)$$

У наведених рівняннях Δp , Δh – характеристики зміни тиску та ентальпії енергоносіїв в елементах; k_n – коефіцієнт, що враховує втрати енергії відповідного енергоносія в навколишнє середовище. Індекси визначають номери: k – розглянутого елемента, l – розглянутого енергоносія. Загальна кількість елементів – K ; енергоносіїв та видів енергії – L .

Базова математична модель робочого циклу поршневого двигуна з примусовим запалюванням була розроблена на кафедрі ДВЗ НУК 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, А.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.

Математична модель враховує вплив вмісту водню в складі синтез-газу і коефіцієнта надлишку повітря на процес згоряння. 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:

$$\frac{dp}{d\varphi} = p \left(\frac{\frac{dQ_x}{d\varphi}}{c_v T M} + \frac{\frac{\sum_1^{n_1} dI_j}{d\varphi}}{c_v T M} + \frac{\frac{dv}{d\varphi}}{M/\mu} - \frac{\frac{d(c_v)_T}{d\varphi}}{c_v} - \frac{c_{vm}}{c_v} \frac{\sum_1^{n_1} dM}{M d\varphi} - k \frac{\frac{d \ln V}{d\varphi}}{V d\varphi} - \frac{\sum_1^{n_2} \frac{dQ_{cmi}}{d\varphi}}{c_v T M} \right). \quad (5)$$

У наведеному рівнянні Q_H – 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; μ – молекулярна маса; φ – змінне значення кута повороту колінчастого вала; k – показник адіабати; n – частота обертання колінчастого вала; dM – елементарна маса, що надходить або залишає циліндр.

У базовій моделі було уточнено зміну енергії, що виділяється при згоранні палива dQ_x й відповідно маси газу M в циліндрі шляхом урахування утилізованої теплоти ВГ та зміни загального теплового балансу двигуна.

Математична модель процесу ТХУ теплоти ВГ ґрунтується на рівняннях матеріального та енергетичного балансу за елементами, а також на характеристиках процесу перетворення вихідного виду палива в синтез-газ. Математичне моделювання процесу ТХУ теплоти ВГ зводиться до розрахунку параметрів, які визначають виконання необхідних умов утилізації, а саме до визначення кількості енергії, яка необхідна для отримання синтез-газу на даному режимі роботи двигуна $Q_{c.z}^{необ}$ (6).

$$Q_{c.z}^{необ} = Q_{наг} + Q_{вип} + Q_{пер} + Q_{x.p} + Q_{вт} \quad (6)$$

В рівнянні (6) $Q_{наг}$ – кількість енергії, яка витрачається на нагрів рідких вихідних компонентів хімічної реакції до температури кипіння; $Q_{вип}$ – кількість енергії, яка витрачається на випаровування компонентів хімічної реакції; $Q_{пер}$ – кількість енергії, яка витрачається на перегрів газоподібних компонентів хімічної реакції до температури конверсії; $Q_{x.p}$ – кількість енергії, яка витрачається на подолання ендотермічного ефекту реакції хімічного перетворення вихідних компонентів в синтез-газ; $Q_{вт}$ – кількість енергії, яка враховує неминучі теплові втрати в навколишнє середовище через утилізаційний пристрій.

Перевірка умов реалізації ТХУ зводиться до визначення поточного значення необхідної кількості енергії для отримання синтез-газу $Q_{c.z}^{необ}$ та максимальної теплоти відхідних газів, яка може бути утилізована в термохімічному пристрої $Q_{в.г}^{max}$ для даного режиму роботи двигуна та ступеня конверсії. Якщо $Q_{в.г}^{max} \geq Q_{c.z}^{необ}$, то термохімічна утилізація може бути реалізована на даному режимі роботи двигуна. Якщо $Q_{в.г}^{max} \leq Q_{c.z}^{необ}$, то робота двигуна з термохімічною утилізацією теплоти ВГ на даному режимі роботи неможлива. Також порівнюються між собою температури ВГ на даному режимі роботи $T_{вг}$ та температура синтез-газу на виході з утилізаційного пристрою на $T_{c.z}$.

Для оцінки **адекватності** моделі виконане зіставлення розрахункових та експериментальних значень параметрів роботи двигуна 2Ч 7,2/6 з ТХУ теплоти ВГ. Отримане середньоквадратичне відхилення розрахункових та експериментальних даних не перевищувало 12%, що свідчить про адекватність уточненої математичної моделі з похибкою, яка прийнятна для практичних інженерних розрахунків.

У **п'ятому розділі** виконані аналіз, дослідження та обґрунтування шляхів підвищення паливної економічності поршневого чотирьохтактного малолітражного двигуна 2Ч 8,4/6,5 з примусовим запалюванням, що працює на етанолі з ТХУ теплоти ВГ, який входить у склад автономної електростанції.

Для реалізації поставлених цілей здійснено наступне:

1. Визначено **вплив параметрів процесу конверсії етанолу** на паливну економічність поршневого ДВЗ з примусовим запалюванням при ТХУ теплоти ВГ.

На базі математичної моделі робочого циклу визначено основні параметри роботи двигуна при роботі по навантажувальній характеристиці на етанолі і синтез-газі, отриманого при повній конверсії по реакції парового риформінгу і розкладання. Внаслідок зниження коефіцієнта наповнення через низьку густину синтез-газу, номінальна потужність двигуна зменшилася на 12% при роботі двигуна на синтез-газі, в порівнянні з етанолом.

Було виявлено, що питома витрата етанолу g_e при реалізації реакції розкладання знижується при високих ступенях конверсії ξ – 95...100%. За умови здійснення повної конверсії, питома витрата етанолу g_e знижується у всьому діапазоні роботи двигуна на 7...26 г/(кВт×год) (1...5,4%) (рис. 6 а).

При паровому риформінгу питома витрата етанолу g_e знижується на 6...126 г/(кВт×год) (1...23%) завдяки участі води в якості додаткового реагенту, та досягається в широкому діапазоні зміни ступеня конверсії ξ – 80...100% (рис. 6 б).

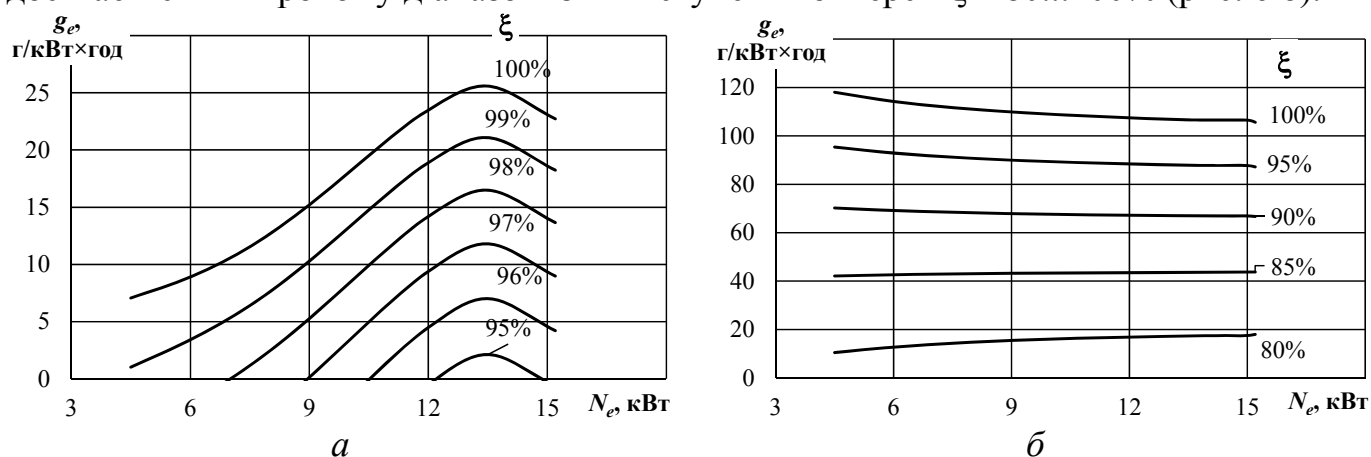


Рис. 6. Зниження питомої витрати етанолу при роботі ДВЗ 2Ч 8,4/6,5 на синтез-газі по навантажувальній характеристиці:

а – синтез-газ, який отримано розкладанням етанолу; *б* – синтез-газ, який отримано паровим риформінгом етанолу

Однак при застосуванні парового риформінгу кількість енергії, яка необхідна для отримання синтез-газу перевищує теплоту, яка виділяється з ВГ на даному режимі роботи у всьому діапазоні зміни навантаження двигуна. Без додаткового джерела теплоти застосування парового риформінгу етанолу на двигуні з ТХУ проблематично. Реакція розкладання значно менш енергетична і тому може бути реалізована в ДВЗ.

2. Визначено **вплив різниці температур на вході в утилізаційний пристрій конверсії етанолу** на паливну економічність двигуна при ТХУ теплоти ВГ.

Проведене узгодження температур ВГ ДВЗ та температур процесу конверсії (рис. 7). Визначено потенціал температур синтез-газу на виході з утилізаційного пристрою при яких досягається паливна економічність. Встановлено, що різниця температур на вході в утилізаційний пристрій конверсії ΔT , при якій досягається зниження питомої витрати етанолу лежить в діапазоні 20...160 К.

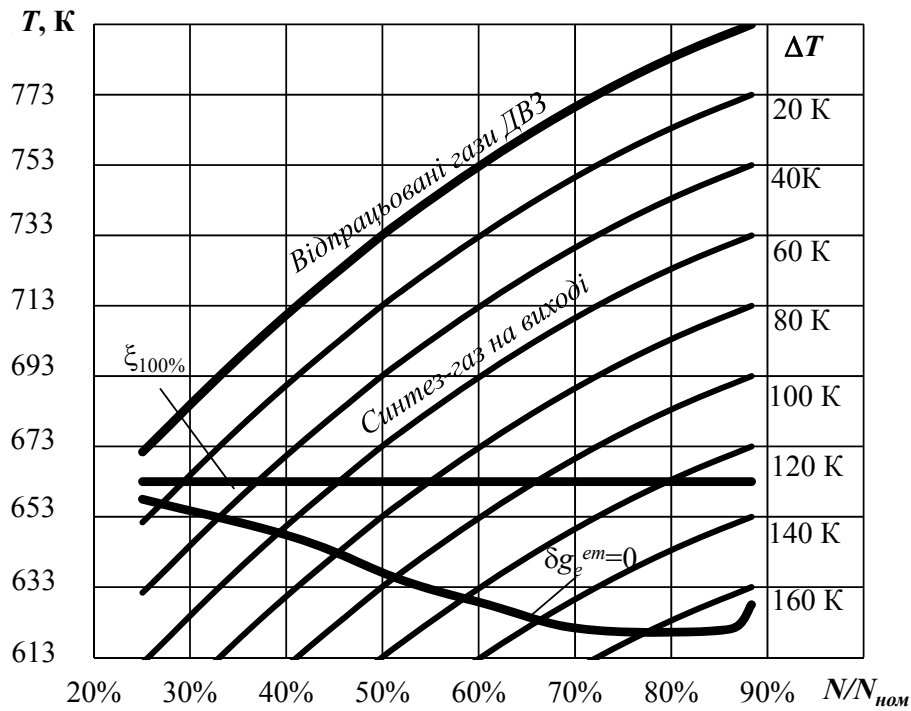


Рис. 7. Потенціал температур синтез-газу на виході з утилізаційного пристрою при яких досягається зниження питомої витрати етанолу

Визначено діапазон роботи ДВЗ 2Ч 8,4/6,5 з ТХУ теплоти ВГ по навантаженню при різних значеннях різниці температур на вході в утилізаційний пристрій та діапазон зниження витрати палива δg_e^{em} (рис. 8). Найбільший діапазон роботи двигуна спостерігається при значенні різниці температур 20 К і становить 25...88% від номінального навантаження, а найменший при 160 К – 75...88%.

Визначено залежності частки теплоти відхідних газів $\delta Q_{вг}$, яку необхідно утилізувати для отримання синтез-газу від режиму навантаження та різниці температур на вході в утилізаційний пристрій ΔT (рис. 9). Граничні значення $\delta Q_{вг}$ лежать в діапазоні 38...44%.

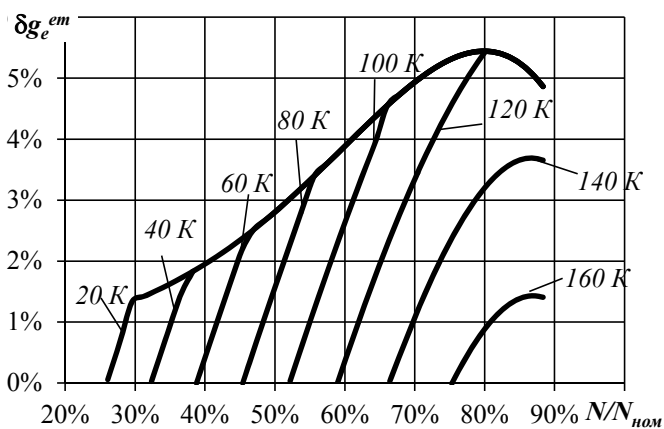


Рис. 8. Діапазон зниження витрати етанолу при роботі ДВЗ 2Ч 8,4/6,5 з ТХУ теплоти ВГ

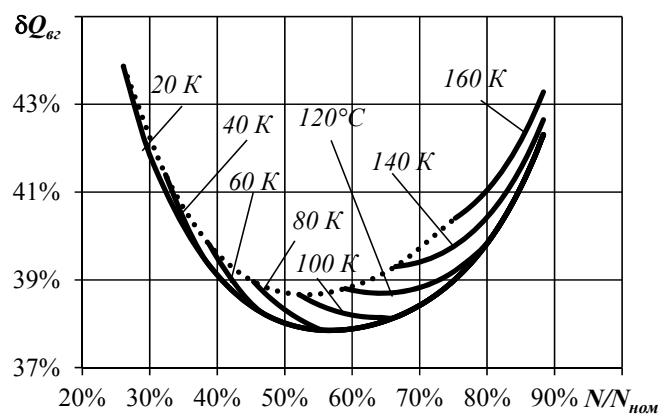


Рис. 9. Частка енергії ВГ ДВЗ 2Ч 8,4/6,5, яку необхідно утилізувати для отримання синтез-газу

3. Досліджено **вплив пониження температури реакції конверсії** на паливну економічність двигуна при ТХУ теплоти ВГ.

Було досліджено вплив зниження температури реакції конверсії етанолу T_p на 25, 50, 75 та 100 K при використанні освоєних промисловістю каталізаторів (Ni,Co,Cu/Zr; Pd/Al₂O₃; Ni/Al₂O₃; Ni/Y₂O₃).

Встановлено, що зниження температури реакції конверсії значно розширює межі значень різниці температур на вході в утилізаційний пристрій ΔT при яких досягається зниження питомої витрати етанолу (рис. 10).

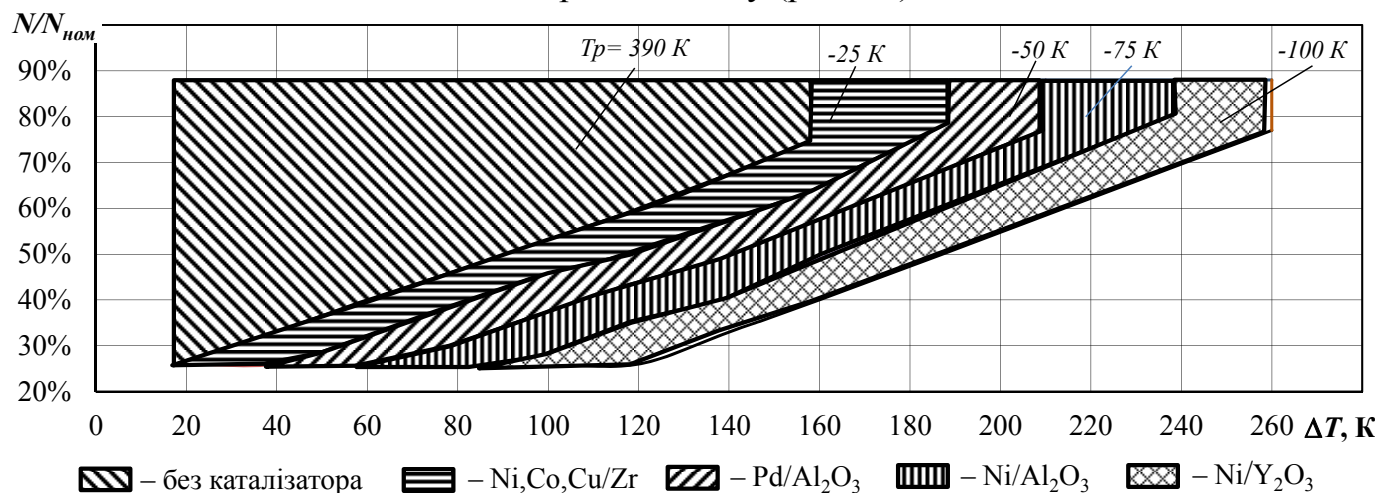


Рис. 10. Вплив зниження температури реакції конверсії на діапазон роботи ДВЗ з ТХУ теплоти ВГ при якому досягається зниження питомої витрати етанолу

При зниженні температури конверсії T_p на 25 K верхня межа різниці температур на вході в утилізаційний пристрій ΔT збільшується в 1,18 раз, на 50 K – в 1,31 раз, на 75 K – в 1,5 рази, на 100 K - в 1,63 раз. Визначено діапазон роботи двигуна з ТХУ по навантаженню. Мінімальне значення потужності, при якій досягається зниження питомої витрати етанолу, для різниці температур на вході в утилізаційний пристрій 40...160 K, при зменшенні температури конверсії на 25...100 K, знижується в 1,2...1,9 раз. Встановлено, що кількість енергії відхідних газів, яку раціонально утилізувати для отримання синтез-газу при зменшенні температури конверсії, знижується на 0,8...3,6%.

У шостому розділі розглянуто впровадження результатів дисертаційного дослідження. На підприємствах ТДВ «Первомайскдизельмаш» та ПАТ «Чорноморсуднопроект» було проведено дослідження ефективності використання синтез-газу, який отримано з етанолу, в енергетичних установках з ДВЗ шляхом термохімічної утилізації теплоти відхідних газів, а також передані практичні рекомендації щодо вибору параметрів роботи установки, схеми та складу устаткування системи утилізації. Результати дисертаційного дослідження використовуються при виконанні проектно-конструкторських робіт, пов'язаних з використанням альтернативних палив та енергії вторинних енергоресурсів поршневих ДВЗ.

У додатках наведені акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

У роботі поставлена та вирішена важлива **науково-практична задача** підвищення ефективності використання етанолу в поршневих двигунах шляхом вдосконалення процесів та параметрів, що протікають при термохімічній утилізації теплоти відхідних газів. Отримані наступні результати:

1. Аналіз вітчизняної та зарубіжної літератури дозволив виявити перелік завдань та проблем, що виникають при використанні етанолу в поршневих двигунах, а також визначити раціональні шляхи подальшого підвищення ефективності використання етанолу шляхом утилізації теплоти відхідних газів.

2. Експериментально перевірена та підтверджена можливість реалізації та ефективність застосування ТХУ теплоти ВГ для поршневого ДВЗ з примусовим запалюванням, що працює на етанолі. Питома витрата етанолу при використанні ТХУ теплоти ВГ знизилась на $6...18 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$ ($0,6...2,9\%$).

3. Удосконалено математичну модель поршневого ДВЗ з примусовим запалюванням при використанні ТХУ теплоти ВГ шляхом уточнення зміни енергії, яка виділяється при згорянні палива та маси горючої суміші в циліндрі, що дозволило досягти максимальної відносної середньоквадратичної похибки визначення параметрів роботи двигуна $6...12\%$.

4. Встановлено, що для поршневих двигунів з об'ємом циліндра $250...450 \text{ см}^3$, що працюють на етанолі, при застосуванні ТХУ теплоти ВГ знижується витрата палива на $1,2...5,4\%$.

5. Визначено, що раціональна різниця температур на вході в утилізаційний пристрій конверсії етанолу, при якій досягається зниження витрати палива поршневого ДВЗ з ТХУ теплоти ВГ, лежить в діапазоні $20...160 \text{ К}$. Найбільший діапазон роботи двигуна досягається при різниці температур 20 К – $25...88\%$ від номінального навантаження, а найменший при 160 К – $75...88\%$. Частка теплоти відхідних газів, яку необхідно утилізувати для ефективної роботи ДВЗ змінюється в межах $38...44\%$.

6. Встановлено, що при зменшенні температури реакції конверсії на $25...100 \text{ К}$ за рахунок застосування каталізаторів (Ni, Co, Cu/Zr ; $\text{Pd/Al}_2\text{O}_3$; $\text{Ni/Al}_2\text{O}_3$; $\text{Ni/Y}_2\text{O}_3$) розширюється діапазон роботи ДВЗ з ТХУ теплоти ВГ по навантажувальній характеристиці. Граничне значення потужності при якій досягається зниження витрати етанолу зменшується в $1,2...1,9$ раз.

7. Встановлено, що при зменшенні температури реакції конверсії на $25...100 \text{ К}$ збільшується допустима різниця температур на вході в утилізаційний пристрій конверсії етанолу, при якій досягається зниження витрати палива, в $1,2...1,6$ разів та зменшується кількість енергії відхідних газів яку раціонально утилізувати на $0,8...3,6\%$.

8. Дістало подальший розвиток уявлення про умови ефективності застосування ТХУ теплоти ВГ стосовно поршневих ДВЗ, що працюють на етанолі, шляхом впливу способу конверсії, параметрів утилізаційного пристрою і використання каталізаторів.

9. Результаты дослідження впроваджені та використовуються в ТДВ «Первомайскдизельмаш», ПАТ «Чорноморсуднопроект», а також науковому та навчальному процесі кафедри ДВЗ НУК при читанні курсу лекцій, проведенні практичних та індивідуальних занять з дисциплін «Палива, мастила та охолоджуючі рідини», «Застосування альтернативних палив у ДВЗ» та «Енергетичні комплекси з ДВЗ», курсовому й дипломному проектуванні.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні результати дисертації опубліковано в наукових спеціалізованих виданнях:

1. **Проскурин А. Ю.** Оценка эффективности газового поршневого двигателя с термохимической утилизацией тепла [Текст] / А. Ю. Проскурин // Вісник НУК. – 2010. – №3. – С. 93-98.
2. **Тимошевский Б. Г.** Эффективность термохимической конверсии углеводородных топлив применяемых в ДВС [Текст] / Б. Г. Тимошевский, М. Р. Ткач, А. Ю. Проскурин // Вісник НУК. – 2011. – №3. – С. 36-42.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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 // An international journal on operation of farm and agri-food industry machinery Motrol. – Lublin-Rzeszow, 2013. – Vol. 15, nr 2. – С. 157–163.
7. Эффективность двигателя 2Ч 7,2/6 при работе на бензине с добавками синтез-газа [Текст] / Б. Г. Тимошевский, М. Р. Ткач, А. Ю. Проскурин, А. С. Митрофанов, А. С. Познанский // Двигатели внутреннего сгорания : Всеукраинский научно-технический журнал. – 2014. – № 1. – С. 18–22.
8. Повышение эффективности двигателя 2Ч 7,2/6, работающего на этаноле с термохимической утилизацией теплоты отходящих газов [Текст] / Б. Г. Тимошевский, М. Р. Ткач, А. Ю. Проскурин, А. С. Митрофанов, А. С. Познанский // Двигатели внутреннего сгорания : Всеукраинский научно-технический журнал. – 2014. – № 2. – С. 19–23.
9. **Митрофанов А. С.** Влияние добавки синтез-газа на скорость нарастания давления при сгорании [Текст] / А. С. Митрофанов, А. С. Познанский, А. Ю. Проскурин // Збірник наукових праць НУК. – 2015. – № 2. – С. 48-52.
10. Эффективность энергетической установки на базе ДВС 1Ч 7,5/6 с термохимической утилизацией тепла отходящих газов / Б. Г. Тимошевский, М. Р. Ткач, А. Ю. Проскурин, А. С. Митрофанов, А. С. Познанский [Текст] // Двигатели внутреннего сгорания : Всеукраинский научно-технический журнал. – 2015. – № 2. – С. 30–34.
11. Характеристики процесса сгорания двигателя 2Ч 7,2/6 с добавками до 65% синтез-газа к бензину [Текст] / Б. Г. Тимошевский, М. Р. Ткач, А. С. Познанский, А. С. Митрофанов, А. Ю.

Проскурин // Двигатели внутреннего сгорания : Всеукраинский научно-технический журнал. – 2015. – № 1. – С. 33–37.

Публікації, в яких додатково викладено зміст дисертації:

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.

13. **Митрофанов А. С.** Разработка экспериментальной установки работающей на продуктах паровой конверсии биоэтанола [Текст] / А. С. Митрофанов, А. С. Познанский, А. Ю. Проскурин // Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції «Муніципальна енергетика: проблеми, рішення». – Миколаїв : НУК, 2009. – С. 157–158.

14. **Проскурин А. Ю.** Математическое моделирование энергетической установки с термохимической утилизацией тепла отходящих газов [Текст] / А. Ю. Проскурин // 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.

16. **Тимошевський Б. Г.** Ефективність термохімічної конверсії газоподібних та спиртових палив, які використовуються в ДВЗ [Текст] / Б. Г. Тимошевський, М. Р. Ткач, А. Ю. Проскурін // Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми». – Миколаїв : НУК, 2011. – С. 74–77.

17. **Тимошевський Б. Г.** Ефективність парової конверсії вуглеводневих палив в ДВЗ [Текст] / Б. Г. Тимошевський, М. Р. Ткач, О. С. Проскурін // Матеріали IV Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення». – Первомайськ : ППІ НУК, 2011. – С. 220.

18. **Тимошевський Б. Г.** Повышение эффективности использования альтернативных топлив в современных ДВС путем термохимической утилизации тепла отходящих газов [Текст] / Б. Г. Тимошевский, М. Р. Ткач, А. Ю. Проскурин // Сучасний стан та проблеми двигунобудування: матеріали міжнар. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2012. – С. 109–113.

19. Деякі результати експериментального дослідження реактора для термохімічної конверсії біоетанолу як альтернативного палива для судових 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.

20. 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.

21. Результаты исследований параметров работы ДВС 2Ч 7,2/6 с системой термохимической паровой конверсии биоэтанола [Текст] / Б. Г. Тимошевский, М. Р. Ткач, А. С. Митрофанов, А. С. Познанский, А. Ю. Проскурин // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування». – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2013. – С. 312–315.

22. 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.

23. Підвищення ефективності стаціонарних енергетичних установок з ДВЗ на основі використання синтез-газу [Текст] / Б. Г. Тимошевський, М. Р. Ткач, О. С. Митрофанов, А. С. Познанський А. Ю. Проскурін // Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції «Муніципальна енергетика: проблеми, рішення». – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 142–143.

24. Повышение эффективности работы поршневого ДВС 2Ч 7,2/6 путем использования добавок синтез-газа к бензину [Текст] / Б. Г. Тимошевский, М. Р. Ткач, А. Ю. Проскурин, А. С. Митрофанов, А. С. Познанский // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування». – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2014. – С. 122–124.

25. Деякі результати експериментального дослідження ефективності використання термохімічної утилізації тепла для поршневого ДВЗ з примусовим запалюванням [Текст] / Б. Г. Тимошевський, М. Р. Ткач, А. Ю. Проскурін, О. С. Митрофанов, А. С. Познанський // V Міжнародна науково-технічна конференція: «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» – Миколаїв : НУК, 2014. – С. 190–192.

26. Математическая модель энергетической установки на базе поршневого ДВС с термохимической утилизацией тепла отходящих газов [Текст] / Б. Г. Тимошевский, М. Р. Ткач, А. Ю. Проскурин, А. С. Митрофанов, А. С. Познанский // Сучасний стан та проблеми двигунобудування: матеріали міжнар. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2014 – С. 91–94.

27. Підвищення паливної економічності енергетичної установки на базі двигуна 1Ч 7,5/6 за рахунок термохімічної утилізації тепла [Текст] / Б. Г. Тимошевський, М. Р. Ткач, А. Ю. Проскурін, О. С. Митрофанов, А. С. Познанський // VI Міжнародна науково-технічна конференція: «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» – Миколаїв : НУК, 2015. – С. 190–193.

28. Підвищення ефективності енергетичної установки на базі двигуна 1Ч 7,5/6 з термохімічною утилізацією тепла відпрацьованих газів [Текст] / Б. Г. Тимошевський, М. Р. Ткач, А. Ю. Проскурін, О. С. Митрофанов, А. С. Познанський // Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми», присвяченої 75-річчю кафедри ССЕУ. – Миколаїв : НУК, 2015. – Ч. 2. – С. 53–56.

Особистий внесок здобувача у працях, що опубліковані у співавторстві: [2] – визначення основних показників процесу парової конверсії вуглеводневих палив; [3, 7] – обробка результатів випробувань; [4] – визначення впливу об'ємного вмісту біоетанолу на температуру синтез-газу на виході з реактора; [5] – визначення впливу теплотворної здатності синтез-газу та густини водню на зменшення потужності двигуна; [6] – визначення впливу витрати суміші «біоетанол-вода» на ступінь конверсії біоетанолу; [8] – визначення економії етанолу при роботі двигуна по навантажувальній характеристиці; [9] – аналіз результатів експериментальних досліджень впливу добавок синтез-газу на індикаторну роботу двигуна; [10] – визначення діапазону значень температурного напору та граничних значень потужності двигуна при яких досягається економія етанолу; [11] – обробка результатів експериментальних досліджень впливу добавки синтез-газу до бензину на загальну тривалість згоряння суміші.

АНОТАЦІЯ

Проскурін А. Ю. Підвищення ефективності використання етанолу в поршневих двигунах шляхом термохімічної утилізації теплоти відхідних газів. – 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, 2016.

Дисертація присвячена вирішенню задачі підвищення ефективності використання етанолу в поршневих двигунах шляхом вдосконалення процесів та параметрів, що протікають при термохімічній утилізації теплоти відхідних газів.

Проаналізовані та визначені перспективні шляхи ефективного використання етанолу в сучасних поршневих двигунах та встановлено, що найбільш перспективним способом є використання етанолу у вигляді синтез-газу отриманому за рахунок ТХУ теплоти ВГ.

Експериментально підтверджена можливість реалізації та ефективність застосування ТХУ теплоти ВГ для установки на базі малолітражного високообертового ДВЗ, що працює на етанолі.

Удосконалена математична модель поршневого ДВЗ з примусовим запалюванням працюючого на етанолі при використанні ТХУ теплоти ВГ шляхом уточнення зміни енергії, що виділяється при згоранні палива та маси горючої суміші в циліндрі.

Розроблено практичні рекомендації щодо вибору раціональних параметрів роботи поршневого двигуна з ТХУ теплоти ВГ, які дозволяють конвертувати існуючі та проектувати нові ДВЗ. Для установок на базі поршневих двигунів з об'ємом циліндра 250...450 см³, які працюють на етанолі, при застосування ТХУ теплоти ВГ знижується витрата палива на 1,2...5,4%. Визначений раціональний діапазон різниці температур на вході в утилізаційний пристрій конверсії етанолу, який складає 20...160 К. Частка теплоти відхідних газів, яку необхідно утилізувати змінюється в межах 38...44%.

Визначено підвищення ефективності застосування ТХУ теплоти ВГ при зниженні температури реакції конверсії. Досліджено вплив зниження температури конверсії на 25, 50, 75 та 100 К при використанні освоєних промисловістю каталізаторів.

Ключові слова: етанол, утилізація, відхідні гази, паливна економічність, синтез-газ.

АННОТАЦИЯ

Проскурин А. Ю. Повышение эффективности использования этанола в поршневых двигателях путем термохимической утилизации теплоты отходящих газов. - 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, 2016.

Диссертация посвящена решению задачи повышения эффективности использования этанола в поршневых двигателях путем совершенствования процессов и параметров, протекающих при термохимической утилизации теплоты отходящих газов.

Проанализированы и определены перспективные пути эффективного использования этанола в современных поршневых двигателях и установлено, что наиболее перспективным способом является использование этанола в виде синтез-газа, полученном за счет ТХУ теплоты ОГ.

Экспериментально подтверждена возможность реализации и эффективность применения ТХУ теплоты ВГ для установки на базе малолитражного высокооборотного ДВС, работающего на этаноле.

Усовершенствована математическая модель поршневого ДВС с принудительным зажиганием при использовании ТХУ теплоты ОГ путем уточнения изменения энергии, выделяющейся при сгорании топлива и массы горючей смеси в цилиндре, что позволило достичь максимальной относительной среднеквадратической погрешности определения параметров работы двигателя 6...12%.

Разработаны практические рекомендации по выбору рациональных параметров работы поршневого двигателя с ТХУ теплоты ВГ, которые позволяют конвертировать существующие и проектировать новые ДВС. Для установок на базе поршневых двигателей с объемом цилиндра 250...450 см³, работающих на этаноле, при применении ТХУ теплоты ОГ снижается расход топлива на 1,2...5,4% при конверсии этанола по реакции разложения.

Определено, что рациональная разница температур на входе в утилизационное устройство, при которой достигается снижение расхода топлива, лежит в диапазоне 20...160 К. Наибольший диапазон работы двигателя достигается при значении разницы температур 20 К и составляет 25...88% от номинальной нагрузки, а наименьший при 160 К – 75...88%. Доля теплоты отходящих

газов, которую необходимо утилизировать для эффективной работы установки, изменяется в пределах 38...44%.

Определено влияние снижения температуры реакции конверсии этанола на 25, 50, 75 и 100 К при использовании освоенных промышленностью катализаторов (Ni,Co,Cu/Zr; Pd/Al₂O₃; Ni/Al₂O₃; Ni/Y₂O₃).

Установлено, что снижение температуры реакции конверсии значительно расширяет границы значений разницы температур на входе в утилизационное устройство, при которых достигается снижение удельного расхода этанола.

При снижении температуры конверсии на 25 К верхний предел разницы температур на входе в утилизационное устройство увеличивается в 1,18 раз, на 50 К – в 1,31 раз, на 75 К – в 1,5 раза, на 100 К – в 1,63 раз. Определен диапазон работы двигателя с ТХУ по нагрузке. Минимальное значение мощности, при которой достигается снижение удельного расхода этанола, для температурного напора на входе в утилизационное устройство 40...160 К, при уменьшении температуры конверсии на 25...100 К снижается в 1,2...1,9 раз. Установлено, что количество энергии отходящих газов, которую рационально утилизировать для получения синтез-газа при уменьшении температуры конверсии снижается на 0,8...3,6%.

Ключевые слова: этанол, утилизация, отходящие газы, топливная экономичность, синтез-газ.

ABSTRACT

Proskurin A. Y. Increasing efficiency of ethanol usage in reciprocating engines by thermochemical heat utilization of exhaust gases. - Manuscript.

The thesis for the scientific degree of the candidate of technical sciences on specialty 05.05.03 – Engines and power plants. – Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, 2016.

The thesis is devoted to solving the problem of increasing ethanol usage efficiency in reciprocating engines by improving the processes and parameters occurring in the thermochemical heat utilization of exhaust gases.

Analyzed and identified the promising ways of ethanol usage efficiency in modern reciprocating engines and founded that the most promising method of ethanol usage as a synthesis gas obtained by thermochemical heat utilization of exhaust gases.

Experimentally confirmed the possibility of implementation and effectiveness of the thermochemical heat utilization of exhaust gases for installation on the basis of the subcompact high-speed internal combustion engine operating on ethanol.

The mathematical model of the forced ignition internal combustion engine operating on ethanol with using thermochemical heat utilization of exhaust gases by clarifying changes released during the combustion of fuel and mass of the fuel mixture in the cylinder are advanced.

Practical recommendations on the choice of reciprocating engine with thermochemical heat utilization of exhaust gases rational work parameters, which allowed converting existing and designing new engine are developed. For installations based on reciprocating engines with a cylinder volume of 250...450 cm³ operating on ethanol, when using thermochemical heat utilization of exhaust gases reduced fuel consumption by 1,2...5,4 % for ethanol conversion by the decomposition reaction. Rational temperature difference at the inlet of a heat recovery device in the reaction of decomposition of ethanol to produce synthesis gas, which is 20...160 K. Ratio of heat of exhaust gases, which must be recycled varies between 38...44% are developed.

Defined by improving the efficiency of using thermochemical heat utilization of exhaust gases when the temperature shift reaction are reduced. The effect of reducing the conversion temperature of 25, 50, 75 and 100 K by using industry catalyst are developed.

Keywords: ethanol, utilization, exhaust gases, fuel economy, synthesis gas.