

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

ШАЛАПКО ДЕНИС ОЛЕГОВИЧ



УДК 621.431

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ
ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ЗАСТОСУВАННЯМ МАЛИХ
ДОМІШОК ВОДНЮ ДО ОСНОВНОГО ПАЛИВА**

Спеціальність 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Миколаїв – 2019

Дисертація є рукописом.

Робота виконана у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки (МОН) 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
Білогуб Олександр Віталійович,
Національний аерокосмічний університет ім.
М. Є. Жуковського «ХАІ», м. Харків, проф. кафедри
конструкції авіаційних двигунів, технічний
директор Публічного акціонерного товариства
«АВТРАМАТ»;

- 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 «26» червня 2019 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради ДЗ8.060.01 у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова МОН України за адресою: Україна, 54025, м. Миколаїв, просп. Героїв України 9, ауд. 360.

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

Автореферат розіслано «25» травня 2019 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

Д 38.060.01,

д-р техн. наук, професор



А. П. Шевцов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність дослідження. Однією з найбільш важливих проблем морського транспорту є зменшення вартості вантажоперевезень. У вартості тон/милі перевезень частка витрат на паливо становить до 80%. Одночасно зростають вимоги Міжнародної Морської Організації (ІМО) до екологічних показників двигунів особливо на перехідних і часткових режимах навантаження.

Тому поліпшення паливної економічності і екологічних характеристик ДВЗ є однією з найважливіших проблем які стоять перед дослідниками і проектантами двигунів.

На найближчі десятиліття для малих і середніх транспортних установок перспективними типами двигунів вважаються дизельні двигуни внутрішнього згоряння і двигуни з примусовим запалюванням. У зв'язку з цим основною проблемою в розвитку транспортної енергетики є забезпечення ефективної роботи двигунів з використанням водневих добавок.

Проблемою застосування водню як основного і додаткового палива в ДВЗ займалися вітчизняні та зарубіжні вчені: Варшавський, Міщенко, Вагнер та ін. Вони показали, що добавки водню позитивно впливають на екологічні та економічні показники ДВЗ.

Одним з найбільш перспективних способів - є використання добавок водню до основного палива, що отримується з різних видів сировини і різними способами.

Організація процесу подачі водню до основного палива в якості добавки має важливий вплив на техніко-економічні показники ДВЗ. Так існуючі способи добавки газоподібного водню в дизельні двигуни сприяють поліпшенню еколого-економічних показників двигуна.

Одним з перспективних способів використання рідких та газоподібних добавок є спосіб з використанням системи подачі добавок запропонований професором Патрахальцевим М.М.

В результаті вивчення вітчизняних та зарубіжних публікацій не вдалося виявити досить достовірних та надійних теоретичних й експериментальних даних, які б свідчили про можливість та ефективність додавання водню запропонованим способом. Тому використання малих домішок водню до основного палива вимагає подальшого теоретичного та експериментального дослідження для визначення раціональних параметрів, які б забезпечили раціональне співвідношення витрат палива, водню, потужності та ефективних показників роботи двигуна.

Таким чином, робота в напрямку підвищення ефективності суднових ДВЗ шляхом використання малих домішок водню є актуальною, своєчасною та становить науковий та 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 НУК імені адмірала Макарова: №2111 "Розробка технології отримання та безпечного акумулювання водню з сірководню Чорного моря" (ДР № 0117U007283); № 2025 «Покращення екологічних показників суднових двигунів шляхом подачі домішок в

паливопровід високого тиску» (ДР № 0116U4394), в яких автор брав участь на посаді молодшого наукового співробітника.

Метою наукового дослідження є підвищення паливної економічності суднових дизельних енергетичних установок шляхом використання малих домішок водню до основного дизельного палива.

Основні завдання наукового дослідження:

– проаналізувати вітчизняні та іноземні літературні джерела, які стосуються розчинення водню в дизельному паливі, розпилення паливного струменя в циліндрах ДВЗ та використання водневих домішок до основного дизельного палива, що дозволить з'ясувати проблеми, пов'язані з технологією додавання водню, його впливу на характеристики робочого процесу та екологічні показники двигунів.

– експериментально підтвердити можливість використання малих домішок водню шляхом його подачі в паливопровід високого тиску та встановити ефективні показники дизельного двигуна;

– вдосконалити математичну модель розчинення водню дизельним паливом, що дозволить розраховувати кількість водневої добавки з достатньою точністю;

– експериментально виявити та підтвердити вплив малих домішок водню на процес розпилювання палива;

– вдосконалити математичну модель робочого циклу ДВЗ, що дозволить врахувати наявність водневої добавки з достатньою точністю;

– виконати перевірку адекватності математичної моделі робочого циклу ДВЗ та її апробацію для визначення похибки моделювання;

– оцінити можливість впровадження системи додавання водню до основного палива на лінії високого тиску для суднових двигунів.

Об'єкт дослідження – робочі процеси в судовому турбопоршневому дизельному двигуні та його паливній апаратурі при застосуванні водневих добавок до основного палива.

Предмет дослідження – характеристики і параметри робочих процесів в циліндрах та паливній апаратурі судового ДВЗ при застосуванні водневих добавок до основного палива.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі використані відомі методи фізичного та математичного моделювання на основі фундаментальних рівнянь газової динамки і термодинаміки. Розроблені математичні моделі побудовані із застосуванням системного підходу на основі перевірених методик, з використанням початкових і граничних умов, які забезпечують надійність і достовірність результатів. Теоретичні дослідження процесів, які мають місце в циліндрі судового ДВЗ при використанні палива з застосуванням водневих добавок, здійснювалися з використанням об'єктивних критеріїв порівняльної ефективності впливу діючих в робочому циліндрі двигуна. Експериментальні дослідження проводилися з використанням найбільш перевіреного та інформативного методу індиціювання робочого процесу з використанням сучасної цифрової вимірювальної апаратури та комп'ютерної системи збору та обробки інформації.

Теоретичні дослідження особливостей організації робочого циклу й основних параметрів ДВЗ, що працюють з використанням малих домішок водню, а також вивчення відмінностей процесу згоряння здійснювалися методом математичного моделювання.

Експериментальні дослідження проводилися на дизельному двигуні 1Ч8,6/7,2 і двигуні, що працює на генератор, найбільш перевіреним та інформативним методом - індиціюванням робочого процесу - з використанням сучасної цифрової вимірювальної апаратури і комп'ютерної системи збору та обробки інформації.

Наукова новизна одержаних результатів.

Вперше:

– встановлено, що подачу водню в паливопровід високого тиску ДВЗ можна здійснювати додатковим пристроєм, за рахунок використання хвильових процесів у паливній апаратурі дизельного двигуна, розчинності водню в дизельному паливі, що покращує розпилювання дизельного палива та підвищує паливну економічність ДВЗ;

– встановлено, що зменшення довжини паливного струменя на 5...10% та збільшення кута розкриття цього струменя на 7...12% досягається за рахунок використання малих домішок водню до основного палива у кількості до 0,15%, що зменшує середній діаметр крапель розпиленого палива на 6...11%, покращує його розпил та зменшує витрати основного дизельного палива;

– встановлено, що максимальна кількість домішок водню складає 0,05...0,12% від маси основного дизельного палива, що досягається за рахунок використання хвильових процесів в паливній апаратурі високого тиску, налаштуванні змішуючого пристрою, коригування кута випередження впорскування в межах - 2...-7°, відносно заводських налаштувань та параметрів додавання водню, що збільшує ефективну потужність двигуна на 2,6...5,5% та зменшує ефективну витрату палива на 4,5...5,7%;

– встановлено, що підвищення точності математичної моделі робочого циклу ДВЗ досягається за рахунок коригування коефіцієнтів в залежності середнього діаметра крапель розпиленого палива E_k , який визначається з урахуванням типу форсунки та умов розпилювання, та константи випаровування великих крапель палива A_z , що дозволяє визначати параметри та характеристики робочого процесу двигуна при використанні малих домішок водню до основного палива та підвищити точність моделювання.

Удосконалено:

– математичну модель процесів розчинення водню в дизельному паливі, які відбуваються в змішуючому пристрої та паливопроводі високого тиску ДВЗ, шляхом врахування конструктивних параметрів паливної системи та характеристики впорскування, що дозволяє виконувати якісну та кількісну оцінку розчинності водню при його подачі до паливної магістралі високого тиску;

– математичну модель робочого циклу дизельного двигуна, яка враховує використання малих домішок водню до основного палива в паливопроводі високого тиску, що дозволяє досягти максимальної середньоквадратичної

похибки визначення тиску в циліндрі та визначення індикаторних показників ДВЗ на рівні 5...12%.

Отримало подальший розвиток:

– методика розрахунків та конструювання пристроїв подачі водню в дизельні двигуни на лінії високого тиску, що дозволяє їх застосовувати для дизельних двигунів різного типу, потужності та підвищити їх ефективність.

Достовірність отриманих у роботі результатів та висновків забезпечена застосуванням сучасних розрахунково-експериментальних засобів та методів. Достовірність експериментальних даних забезпечена використанням сучасних вимірювальних комплексів та високою точністю вимірювальних приладів (границя основної допустимої похибки перетворювачів тиску, температури та витрат не перевищувала 1%).

Практичне значення отриманих результатів:

– розроблено практичні методики розрахунку конструктивних параметрів пристрою для подачі малих домішок водню до основного дизельного палива, які дозволяють проектувати систему подачі палива для ряду нових судових двигунів та модернізації існуючих;

– розроблено програмне забезпечення для практичного розрахунку робочого циклу ДВЗ, що працює на дизельному паливі з добавками водню.

Апробація результатів дослідження. Крім того, результати досліджень можуть бути поширені на двигуни різних типів (наприклад, стаціонарні, транспортні та спеціального призначення), що безумовно підвищує практичну цінність роботи.

Результати дослідження впроваджено у ПрАТ «Херсонская верфь SMG», на підприємстві "Енерготехнологія", ВАТ «Мегаімпекс», а також навчальному процесі кафедри «Двигуни внутрішнього згоряння» Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (м. Миколаїв) та кафедри Суднового машинобудування та енергетики Херсонської філії НУК (м. Херсон).

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі задач, які пов'язані з ефективним використанням альтернативних добавок до основного палива у ДВЗ, а саме малих домішок водню.

Розроблена здобувачем математична модель згоряння дозволяє враховувати вплив порції домішки водню на швидкість та характер кривої тепловиділення. Запропоновані рівняння основних параметрів математичної моделі Н.Ф. Разлейцева враховують порцію водневої домішки. Вони дозволяють значно підвищити точність математичної моделі робочого циклу ДВЗ.

На базі дизельного двигуна 1Ч8,6/7,2 створено експериментальні установки, на яких проведені дослідження, пов'язані з визначенням основних параметрів робочого циклу та характеристик двигуна при використанні малих домішок водню, а також перевірка адекватності запропонованої математичної моделі.

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі задач, які пов'язані з ефективним використанням водню в дизельних ДВЗ. На експериментальних установках особисто здобувачем проведені дослідження, що пов'язані з визначенням можливості реалізації та ефективності застосування малих домішок водню для установки на базі чотиритактного дизельного ДВЗ, а також здійснена перевірка адекватності запропонованої математичної моделі. Здобувач особисто

проводив експериментальні дослідження роботи двигуна з використання малих домішок водню до основного палива та обробляв їх результати. Особисто здобувачем визначені задачі моделювання й основні параметри математичної моделі. Вдосконалена здобувачем математична модель поршневого ДВЗ з МДВ 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 положення даної дисертації були представлені на науково-практичних семінарах кафедри ДВЗ Національного університету кораблебудування у 2011-2018 рр. та наступних наукових конференціях: V Міжнародній науково-технічній конференції "Суднова енергетика: стан та проблеми", Миколаїв, НУК, 2011 р., III Міжнародній науково-технічній конференції "Інновації в суднобудуванні та океанотехніці", Миколаїв, НУК, 2012 р., міжнародній науково-технічній конференції "Advanced technologies in textile industry", Хмельницький, ХНУ, 2012 р., Міжнародній науково-технічній конференції, присвяченій 75-річчю утворення Миколаївської області "Сучасний стан та проблеми двигунобудування", Миколаїв, НУК, 2012 р., V Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення», – Первомайськ: ППІ НУК, 2013 р., VIII Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми екології та енергозбереження", Миколаїв, НУК, 2013 р., IV Міжнародній науково-технічній конференції "Інновації в суднобудуванні та океанотехніці", Миколаїв, НУК, 2013 р., Міжнародній науково-технічній конференції "Суднова енергетика: стан та проблеми", Миколаїв, НУК, 2013 р., VI Міжнародній науково-технічній конференції "Інновації в суднобудуванні та океанотехніці", Миколаїв, НУК, 2015 р., Міжнародній науково-технічній конференції "Суднова енергетика: стан та проблеми", Миколаїв, НУК, 2015 р., VI Всеукраїнській науково-технічній конференції "Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення", Миколаїв, НУК, 2015 р., VII Міжнародній науково-технічній конференції "Інновації в суднобудуванні та океанотехніці", Миколаїв, НУК, 2016 р., XI Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми екології та енергозбереження", Миколаїв, НУК, 2016 р., 1-й Міжнародна науково-технічна конференція (заочна) «Транспорт: Механічна інженерія, експлуатація, матеріалознавство», Херсон: ХДМА, 2017 р., VIII Міжнародна науково-технічна конференція "Інновації в суднобудуванні та океанотехніці", Миколаїв, – НУК, 2017 р., VIII Міжнародна науково-технічна конференція "Суднова енергетика. Стан та проблеми", Миколаїв, НУК, 2017 р. VII Міжнародній науково-технічній конференції "Сучасні проблеми двигунобудування", Миколаїв, НУК, 2018 р. де отримали позитивну оцінку наукової спільноти.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 6 статей, з них 2 - одноосібні. Ці роботи у достатній мірі відображають зміст дисертації та її основні результати.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу та п'яти розділів, які викладені на 175 сторінках, списку літературних джерел зі найменувань, додатків. Робота ілюстрована 82 рисунками й 9 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 сучасні способи використання домішок до основного палива застосування додавання водню в дизельних ДВЗ для отримання додаткової механічної та електричної потужності.

Використання малих домішок водню як каталізатора згоряння дизельного палива, у тому числі й важких сортів, дозволяє знизити витрати палива та знизити навантаження на довколишнє середовище за рахунок зменшення викидів шкідливих речовин.

Запропоноване технічне рішення може бути застосоване у складі суднових дизельних енергетичних установок, які працюють на важких сортах палива. При цьому виробництво водню може бути здійснено на борту судна шляхом електролізу. Використання малих домішок водню є особливо доцільним при роботі на часткових та перехідних режимах, заходах судна в порти, вузькості, проливи та в інших районах з підвищеними вимогами щодо екологічних показників енергетичних установок.

Розгорнутий аналіз вітчизняних та зарубіжних публікацій дозволив установити, що процеси, пов'язані з розпиленням та згорянням палива насиченого водневою домішкою 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 використання малих домішок водню на показники роботи ДВЗ.

Задачі та методика математичного моделювання, які прийняті в роботі, дозволили вдосконалити модель поршневого двигуна, що працює з використанням малих домішок водню до основного палива, 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:

- 1) Експериментально підтвердити можливість використання малих домішок водню шляхом введення його в паливопровід високого тиску та встановити ефективні показники дизельного двигуна;
- 2) Експериментально підтвердити вплив використання малих домішок водню на процес розпилювання палива;

Для вирішення поставлених цілей була використана експериментальна установка за допомогою якої досліджувалися особливості роботи чотиритактного дизельного ДВЗ 1Ч 8,6/7,2, що працює з використанням малих домішок водню до основного палива. Установка складається з 2 стендів:

- 1) Експериментальний стенд на базі двигуна 1Ч 8,6/7,2, в якому досліджувався вплив малих домішок водню на експлуатаційні показники двигуна;
- 2) Експериментальний стенд МДВ-1 на базі паливної апаратури двигуна Д-65 (4Ч11/13) в якому досліджувались параметри роботи паливної апаратури та розпилу палива з використанням малих домішок водню.

Для реалізації поставлених цілей виконані такі роботи:

1. Для проведення експериментальних досліджень та отримання навантажувальної характеристики, витрати палива та водню було створено експериментальний стенд на базі дизельного двигуна 1Ч8,6/7,2 (рис. 1). Стенд дозволяє проводити експериментальні дослідження основних параметрів роботи ДВЗ залежно від режиму навантаження при роботі з використанням МДВ по навантажувальній характеристиці (рис. 2). Також за результатами експериментальних даних отримано залежності витрати водню від тиску водню та навантаження двигуна (рис. 3).

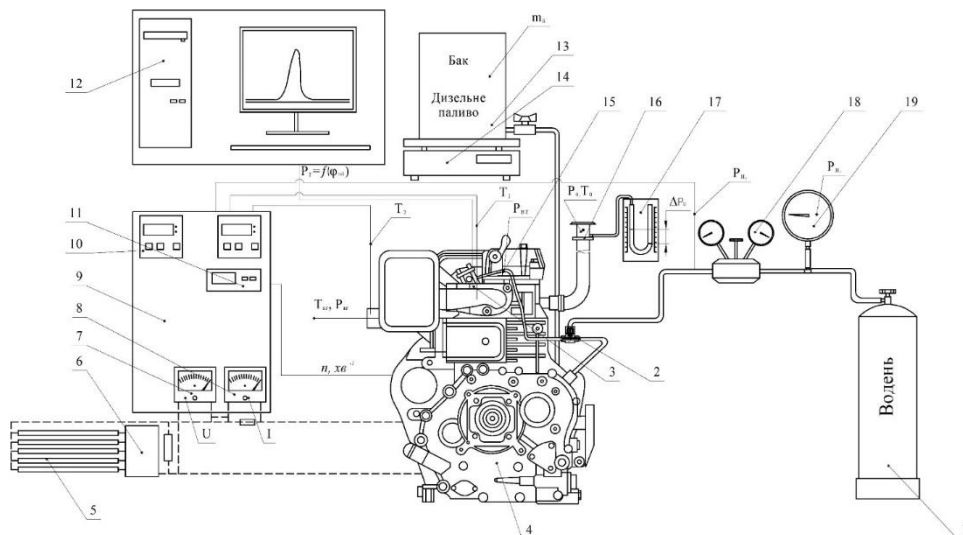


Рис. 1. Схема експериментального стенду на базі двигуна 1Ч8,6/7,2:

- 1 - балони із воднем; 2 - незворотній клапан додавання водню; 3 - датчик тиску; 4 - дизельний двигун 1Ч8/7,6; 5 - блок ТЕНів; 6 - система керування навантаженням; 7 - вольтметр; 8 - амперметр; 9 - панель приладів; 10 - прилад 2ТРМ1; 11 - тахометр; 12 - ПК; 13 - бак з паливом; 14 - ваги; 15 - датчик тиску паливної суміші; 16 - витратомірна шайба; 17 - U-подібний манометр; 18 - редуктор; 19 - манометр

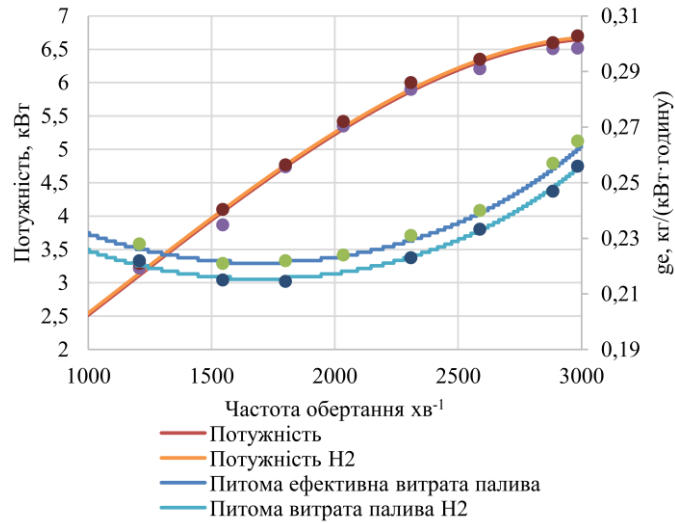


Рис. 2 Порівняльні експлуатаційні характеристики двигуна 1Ч8,6/7,2 при роботі з малими домішками водню та на «чистому» паливі

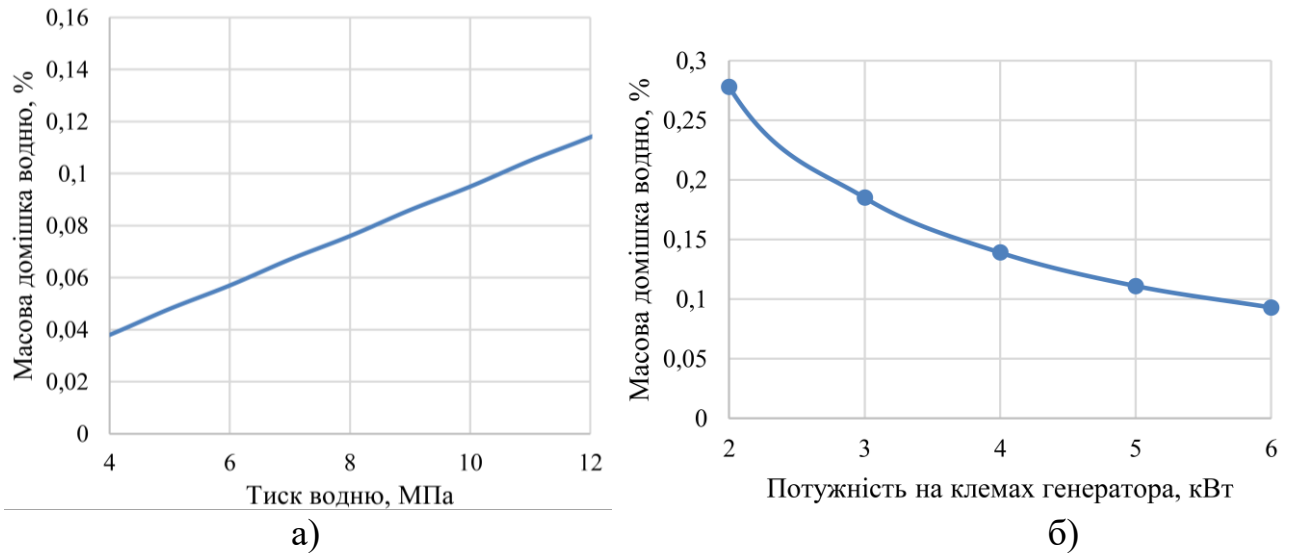


Рис. 3. Залежності масової домішки водню від тиску подачі (рис. 3а) та навантаження генератора (рис. 3б)

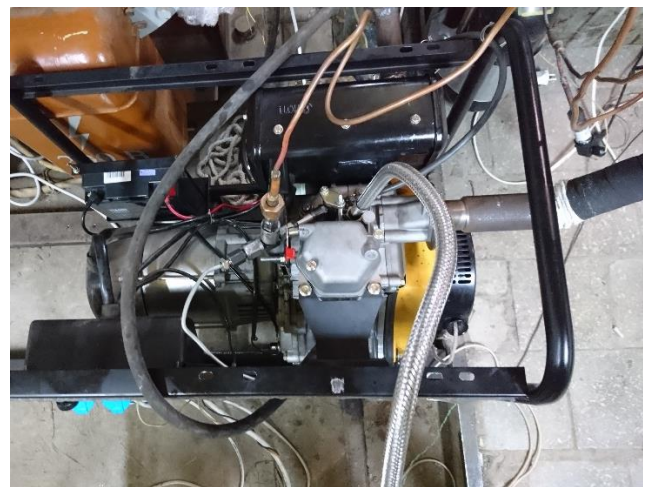


Рис. 4 Загальний вигляд експериментального стенду на базі двигуна 1Ч8,6/7,2 з різним розташуванням клапана подачі водню

За результатами дослідження було виявлено:

- внаслідок наявності водневої домішки в основному паливі відбуваються збільшення потужності двигуна до 1,2...3,7% та зменшення питомої ефективної витрати палива з 0,276 до 0,269 кг/(кВт·годину) (2,6%) при потужності 5 кВт в залежності від кількості водню;

- масова витрата водню змінюється в залежності від декількох факторів серед яких найбільший вплив мають тиск водню, навантаження двигуна, геометричні параметри паливопроводу високого тиску;

- в залежності від навантаження масова домішка водню змінюється від 0,1% до 0,17%, а при зміні тиску подачі водню масова частка домішки складає від 0,04% при 4 МПа до 0,1% при 12 МПа.

2. Для визначення впливу використання малих домішок водню на процес розпилення палива та характеристики паливної апаратури було створено експериментальний стенд МДВ-1 (рис. 5). Експериментальна установка складається з трьох підсистем:

- підсистема (на базі паливної системи двигуна 4Ч11/13) для дослідження параметрів упорскування палива з додаванням газоподібного водню (рис. 6);
- підсистема вимірювань;
- підсистема автоматики і регулювання.

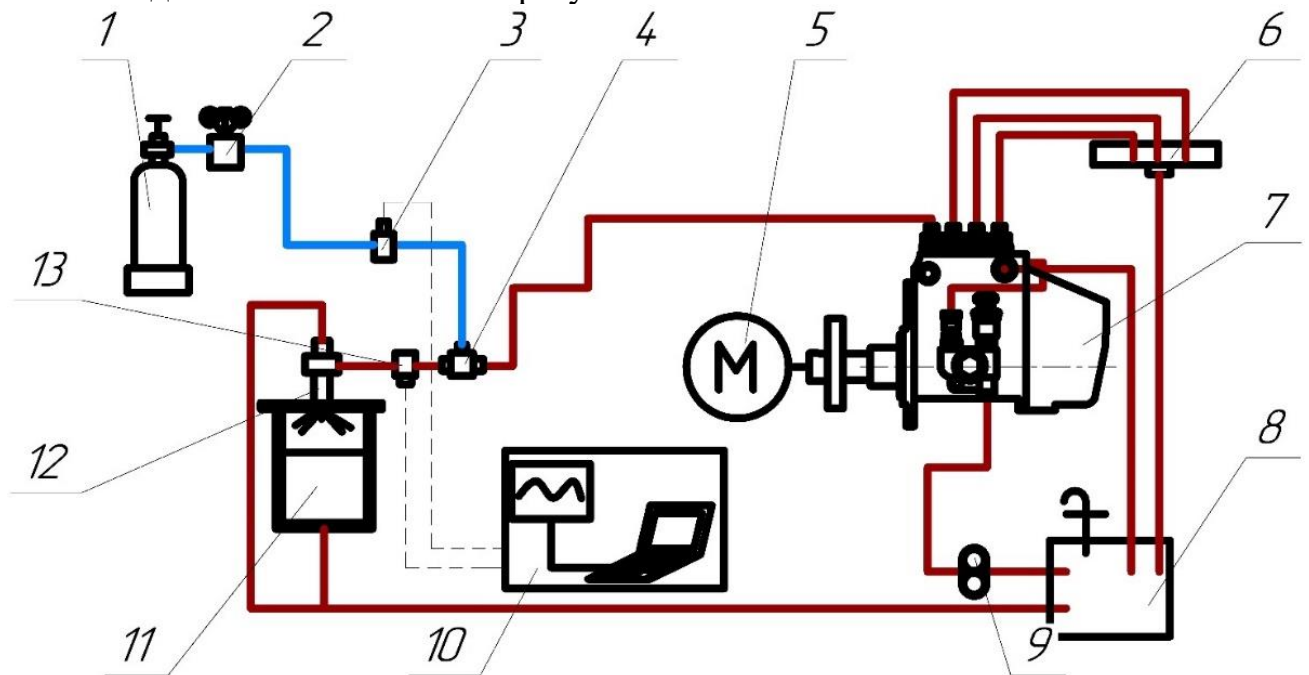


Рис. 5 Схема стенду МДВ-1:

- 1 - балон з воднем; 2 - редуктор водневий промисловий; 3 - датчик тиску; 4 - клапан додавання водню; 5 - електродвигун; 6 - ємність скидання палива; 7 - паливний насос високого тиску; 8 - видаткова цистерна; 9 - насос паливний; 10 - комп'ютерна система вимірювання та обробки даних; 11 - ємність для впорскування; 12 - форсунка; 13 - датчик тиску

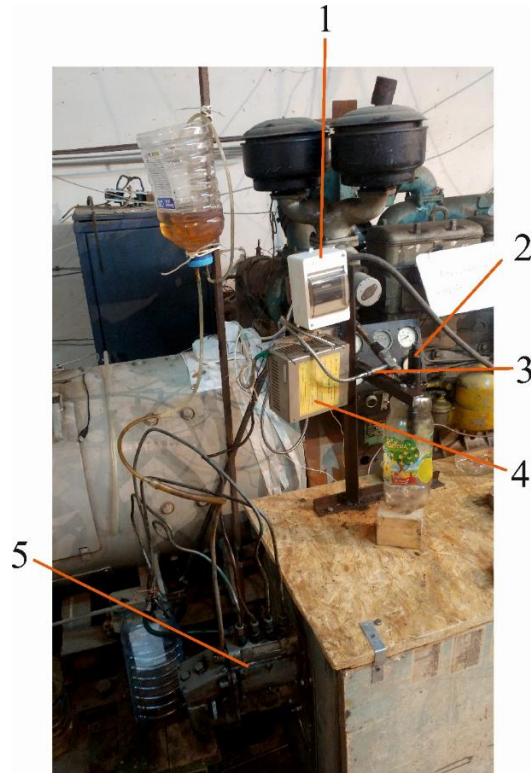


Рис. 6. Експериментальна установка на паливній апаратурі двигуна 4C11/13:

1 - датчик тиску, 2 - форсунка, 3 - блок-фільтр сигналу, 4 - блок живлення датчиків тиску «ОВЕН»

За результатами досліджень виявлено (рис. 7), що при порівнянні діаграм впорскування в зоні посадки голки існують характерні зміни, а саме:

- відсутність хвиль розрідження на діаграмі з додаванням водню;
- динамічні коливання в паливопроводі через подачу водню через клапан.

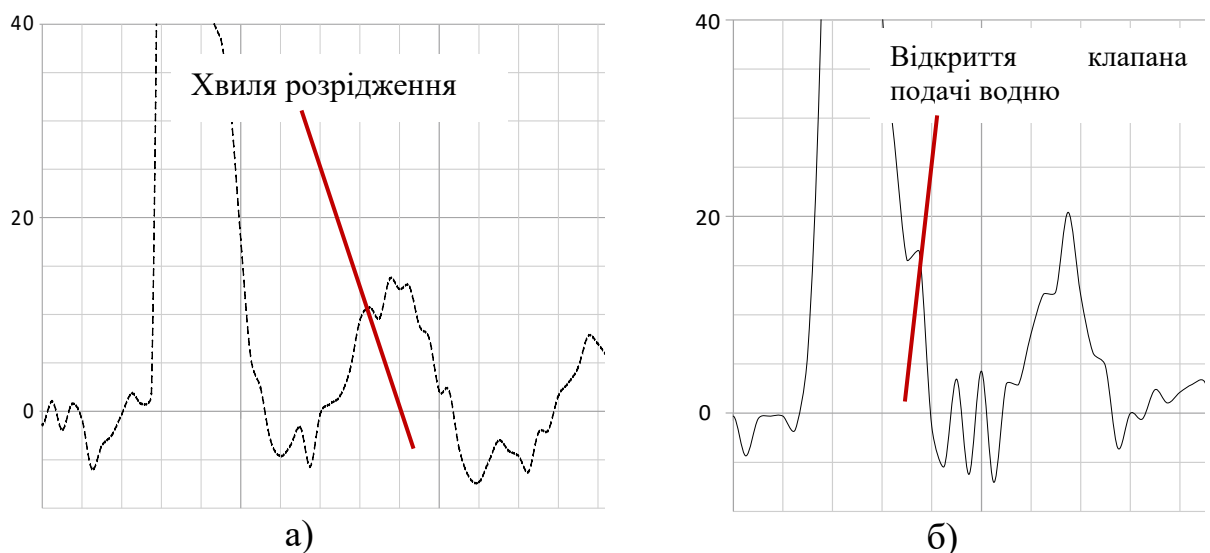


Рис. 7. Діаграми тиску водню в паливопроводі високого тиску:
а) без водню, б) з воднем

Для дослідження процесу розпилювання дизельного палива був розроблений стенд швидкісної відеозйомки струменя розпиленого палива, схема якого зображена на рис. 8.

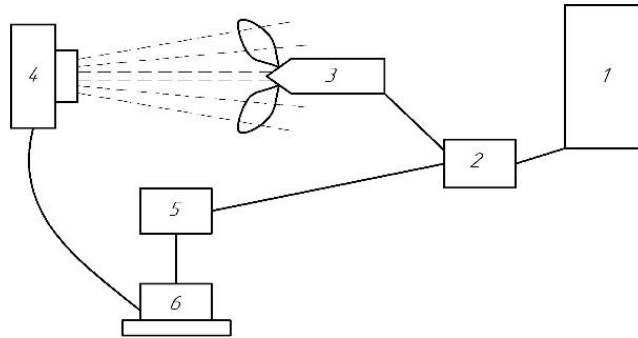


Рис. 8 Схема стенду відеофіксації

Після обробки зображення та зважаючи на зовнішні характеристики розпилювання струменя палива, аналіз отриманих зображень показав, що наявність домішок водню призводить до:

- зафіксовано, що зі збільшенням концентрації газу (повітря) в паливі зменшується дальнобійність струменя L на 7...12%, та збільшується максимальна ширина факела B на 10...15%.

- контур факела набуває більш каплевидної форми;

- не спостерігається загострення при його вершині, можна припустити, що в якійсь мірі руйнується надзбагачена серцевина струменя;

Таким чином експериментальні дослідження підтвердили можливість використання малих домішок водню до основного палива на хвилі розрідження паливної апаратури високого тиску дизельних двигунів.

У **четвертому розділі** обґрунтовані вимоги до математичної моделі дизельного ДВЗ при використанні МДВ. Відповідно до цих вимог було доопрацьовано математичну модель робочого циклу двигуна, з урахуванням доопрацьованої математичної моделі розчинення при використанні малих домішок водню до основного дизельного палива.

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.

$$d_{32} = E_K d_c (\rho \cdot We)^{-0.266} M^{0.0733} \quad (1)$$

Основний вплив використання малих домішок водню на робочий процес дизельного двигуна визначає середній діаметр крапель паливного струменя для оцінки відносної зміни якості розпилювання палива при зміні умов вприскування. Тут E_K - постійний коефіцієнт, що залежить від конструкції форсунки і способу осереднення розмірів крапель. Для закритих форсунок з багатоструменевим розпилювачем $E_K = 1,7$.

$$b_{ит} = \frac{K}{d_{32}^2}, \quad (2)$$

$$b_{и} = Y \cdot b_{ит} = y \cdot (H \cdot n \cdot d_{32})^{0,75} b_{ит}; \quad (3)$$

$$\tau_{\text{и}} = \frac{d_{\text{пр}}^2}{K^*} = \frac{B^2 d_{32}^2}{K^*} = \frac{a_z}{b_{\text{и}}} \quad (4)$$

Вирази (2), (3) використовується для визначення константи випаровування палива b_i . Відповідно залежності Срезневського можна знайти час повного випаровування діаметром $d_{\text{пр}}$ залежно (4). Вплив частоти обертання колінчастого валу і коефіцієнта надлишку повітря на інтенсивність випаровування і вигорання палива враховано в функції Y і емпіричному коефіцієнті a_z :

$$a_z = \frac{A_z}{\alpha^{0,6}}; \quad (5)$$

де $y \approx 10$; H - відношення кутових швидкостей газового заряду і валу двигуна; n - частота обертання колінчастого валу; α - коефіцієнт надлишку повітря; $A_z = 4 \dots 5$.

Для розрахунку кількості газу $Q_{\text{г}}$, розчиненого паливом за період між двома впорскуваннями, цей проміжок часу t розіб'ємо на три етапи. Перший t_1 - коливальні рухи в трубопроводі після закінчення впорскування, за цей час відбудеться k коливань і їх амплітуда зменшиться до нуля. Другий t_2 - етап відсутності коливань в трубопроводі і, нарешті, третій етап - безпосередньо саме впорскування. Отже, кількість газу q , розчиненого одиницею поверхні розділу фаз, також буде складатися з трьох доданків q, q_2, q_3 .

$$q_1 = 2 \sqrt{\frac{D_c \tau}{\pi} \sum_{i=1}^k [C^* - C^0 - (i-1)\Delta C_n]} \quad (6)$$

$$q_2 = 2 \left(C^* - C^0 - \sum_{i=1}^k \Delta C_i \right) \sqrt{\frac{D_c t_2}{\pi}} \quad (7)$$

$$q_3 = 2 \left(C^{**} - C^0 - \sum_{i=1}^k \Delta C_i \right) \sqrt{\frac{D_c t_3 + \Delta t}{\pi}} \quad (8)$$

Відповідно до залежностей (6-7) коефіцієнт часу розчинення Δt враховує залежності часу щодо проходження порції водню між камерою розчинення та форсункою отриманим експериментальним шляхом.

Для врахування впливу МДВ на процес розпилення та випаровування палива запропоновано для уточнення змінного значення коефіцієнта в формулі середнього діаметра крапель розпиленого палива E_K (10) та коефіцієнта в формулі розрахунку швидкості випаровування великих крапель палива A_z (9) використати наступні рівняння, що враховують значення відносної порції водневої добавки (11):

$$A_z' = A_z \cdot Y \quad (9)$$

$$E_K' = E_K \cdot Y \quad (10)$$

$$Y = 8E^7 \Delta H^3 - 162141 \Delta H^2 - 26.194 \Delta H + 1 \quad (11)$$

де $\Delta H = Q_m$ - масова частка домішки водню.

Для оцінки адекватності моделі виконане зіставлення розрахункових та експериментальних значень параметрів роботи двигуна 1Ч 8.6/7.2 з додаванням малих домішок водню до основного палива.

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 чотиритактного дизельного двигуна 6ЧН12/14, що з додаванням малих домішок водню, який входить у склад СЕС судна-універсала.

На базі математичної моделі робочого циклу визначено основні параметри роботи двигуна при роботі по навантажувальній характеристиці на дизельному паливі з додаванням малих домішок водню.

Спираючись на експериментальні дані виявлено, що при використанні МДВ кут випередження впорскування палива відіграє суттєву роль в налаштуванні паливної апаратури дизельного двигуна. Наявність малої домішки водню призводить до пришвидшення реакції горіння палива, що дозволяє використовувати широкі межі кута випередження впорскування палива. Корегування величини кута випередження впорскування палива у зв'язку з інтенсифікацією початкового етапу згоряння за рахунок наявності розчиненого водню в цикловій порції палива дасть змогу без суттєвих змін в конструкції двигуна підвищити ефективність застосування водню.

В результаті аналізу отриманих даних математичного моделювання варто відмітити:

- при використанні малих домішок водню (МДВ) до основного палива варто оптимізувати кут випередження впорскування для отримання найбільшої ефективності використання МДВ (рис. 9).

- за результатами математичного моделювання для двигуна 6ЧН12/14 оптимальним буде кут випередження впорскування 12° п.к.в..

- використання кута випередження впорскування 12° при використанні МДВ призводить до збільшення потужності двигуна з 123 кВт до 129 кВт (4,5%);

- використання кута випередження впорскування 12° при використанні МДВ призводить до зменшення питомої ефективної витрати палива двигуном з 218 кВт до 206 кВт (5,5%).

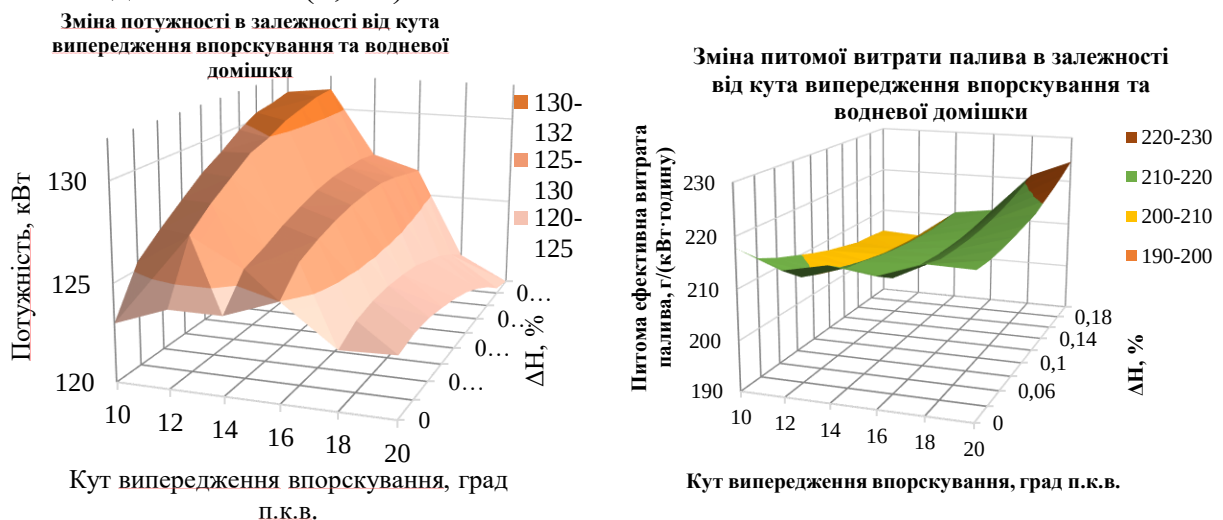


Рис. 9. Ефективні показники двигуна 6ЧН12/14 при зміні кількості домішки водню

Також в розділі розглянуто впровадження результатів дисертаційного дослідження. На підприємствах SMG «Херсонская верфь» та ПАТ «Чорноморсуднопроект» було проведено дослідження ефективності використання МДВ, в енергетичних установках з ДВЗ, а також передані практичні рекомендації щодо вибору параметрів роботи установки, схеми та складу устаткування системи подачі, зберігання та генерації водню. 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 поршневих двигунів шляхом використання малих домішок водню до основного палива. Отримані наступні результати:

1. Аналіз вітчизняної та зарубіжної наукової літератури дозволив встановити можливість використання малих домішок водню у магістраль високого тиску у якості добавки до основного палива дизельних двигунів, що дозволило визначити перелік проблем, які виникають при застосуванні даного способу додавання, а також встановити раціональні шляхи подальшого підвищення ефективності використання водню в ДВЗ.

2. Експериментально встановлено, що подачу водню в паливопровід високого тиску можна здійснювати додатковим пристроєм, принцип роботи якого базується на використанні хвильових процесів у паливній апаратурі дизельного двигуна та розчинності водню в дизельному паливі.

3. Експериментально підтверджено, що максимальна кількість водню, що може бути додана до основного дизельного палива таким способом складає 0,15% по масі; у випадку перевищенні вказаних значень спостерігаються пропуски спалахів та нестабільна робота двигуна.

4. Виконане експериментальне дослідження впливу додавання малих домішок водню до основного палива на параметри паливоподачі дизельного двигуна, показало що при додаванні 0,1% водню (по масі) спостерігається зменшення максимального тиску впорскування на 15...25%, що потребує для забезпечення стабільної роботи паливної апаратури необхідність регулювання параметрів впорскування та збільшення максимального тиску впорскування форсункою на 10...15%.

5. Експериментально встановлено, що при використанні малих домішок водню до основного палива спостерігається необхідність збільшення кута розкриття паливного струменя на 7...12%, зменшення довжини факела на 5...10% в залежності від кількості водню, що зменшує середній діаметр крапель на 6...11% та покращує якість розпилу.

6. Експериментально встановлено, що раціональний діапазон кількості домішок водню складає 0,05...0,12% по масі, що забезпечує зменшення питомої

витрати основного палива на 3,0...4,2% та збільшення потужності на 2,6...5,5% відповідно кількості доданого водню.

7. За даними вітчизняних та іноземних дослідників додавання водню до основного дизельного палива в даних кількостях призводить ще й до зменшення сажоутворення на 25...40%, виділення оксидів азоту NO_x на 20...30% відповідно до кількості доданого водню.

8. Уточнено математичну модель процесу розчинення водню в дизельному паливі, за рахунок використання хвильових процесів у паливній апаратурі високого тиску, що дозволяє досягти задовільної точності розрахунку процесу розчинення водню у дизельному паливі.

9. Уточнено математичну модель робочого циклу дизельного двигуна за рахунок коригування коефіцієнтів в формулі середнього діаметра крапель розпиленого палива E_k та константи випаровування великих крапель палива A_z ; дані коефіцієнти зменшуються пропорційно кількості розчиненого у дизельному паливі водню на 2,5...12%, що дозволило отримати достовірні розрахункові параметри роботи двигуна.

10. Результати дослідження впроваджено у ПрАТ «Херсонская верфь SMG», на підприємстві "Енерготехнологія", ВАТ «Мегаімпекс», а також навчальному процесі кафедри «Двигуни внутрішнього згоряння» Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (м. Миколаїв) та кафедри Суднового машинобудування та енергетики Херсонської філії НУК (м. Херсон).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні результати дисертації опубліковано в наукових **спеціалізованих виданнях**:

1. Тимошевський Б.Г., Ткач М.Р., Шалапко Д.О. Поліпшення робочих характеристик дизельних двигунів за допомогою додавання водню // Водный транспорт. 2016. №2 (25). С. 24-28.

2. Ткач М.Р., Тимошевський Б.Г., Доценко С.М., Галынкин Ю.Н., Шалапко Д.О. Утилизация теплоты вторичных энергоресурсов судовых малооборотных двигателей, работающих на альтернативном топливе // Двигатели внутреннего сгорания. 2017. №2. С. 8-13.

Особистий внесок: визначення основних показників робочого процесу в ДВЗ з використанням альтернативних палив (водню) та визначення ефективності двигунів.

3. Тимошевський Б.Г., Ткач М.Р., Шалапко Д.О. Основні положення математичної моделі додавання водню на лінії високого тиску паливної апаратури // Вісник Херсонського національного технічного університету. 2017. Т. 1., № 3 (62). С. 233-237.

Особистий внесок: визначення залежностей, які визначають розчинність водню в основному дизельному паливі за допомогою змішувального пристрою, залежностей формування факелу розпиленого факелу, а також процесів в паливопроводі високого тиску.

4. Шалапко Д.О. An experimental study of the wave effect in fuel equipment using hydrogen additives to diesel fuel // Technology audit and production reserves. 2018. Vol 6/1, (44). С 36 – 40.

Особистий внесок: результати експериментального визначення параметрів розчинення водню у дизельному паливі за допомогою змішувального пристрою з урахуванням хвильових процесів у паливній апаратурі високого тиску.

5. Shalapko D.O., Proskurin A.Y., Mitrophanov O.M. Methods to improve the performance of diesel engines by adding hydrogen into high pressure line // Shipbuilding & marine infrastructure. 2018. Vol.9., № 1. С. 82 – 86.

Особистий внесок: визначення показників ефективності дизельного двигуна при додаванні малих домішок водню до основного палива на лінії високого тиску.

6. Шалапко Д.О. Непрямі методи дослідження ефекту використання малих домішок водню до основного палива // Авіакосмічна техніка та технологія. 2018. №6 (150). С. 44 – 51.

Особистий внесок: проведення досліджень параметрів розпилювання палива та робочого процесу в ДВЗ при додаванні малих домішок водню до основного дизельного палива з використанням методів акустичної та оптичної діагностики.

Конференції

1. Щодо використання водню у якості домішок до основного рідкого палива дизельних двигунів / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевський, Д.О. Шалапко // Суднова енергетика: стан та проблеми: Матеріали V міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів, молодих науковців та фахівців. – Миколаїв: НУК, 2011.

2. Покращення екологічної обстановки міста шляхом використання водню в автомобільних двигунах / Д.О. Шалапко // Чисте місто, чиста ріка, чиста планета. Матеріали третього міжнародного екологічного форуму. – Херсон, 2011.

3. Використання водню у якості домішок до основного рідкого палива дизельних двигунів / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевський, Д.О. Шалапко // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці. Матеріали III міжнародної науково-технічної конференції – Миколаїв: НУК, 2012.

4. Використання малих домішок водню до основного рідкого палива дизельних двигунів / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевський, Д.О. Шалапко // Advanced technologies in textile industry. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції – Хмельницький: ХНУ, 2012.

5. Вплив на робочі характеристики ДВЗ домішок водню до основного рідкого палива / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевський, Д.О. Шалапко // Суднова енергетика: стан та проблеми. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції – Миколаїв: НУК, 2013.

6. Принципиальные схемы повышения эффективности ДВС при помощи добавок в основное топливо / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевський, Д.О. Шалапко // Сучасний стан та проблеми двигунобудування. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції – Миколаїв: НУК, 2014.

7. Методика дослідження роботи суднового ДВЗ при використанні малих домішок водню до основного рідкого палива / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевський, Д.О. Шалапко // Суднова енергетика: стан та проблеми. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції – Миколаїв: НУК, 2015.

8. Дослідження хвильових коливань палива в магістралі високого тиску при додаванні водню на хвилі падіння тиску / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевський, Д.О. Шалапко // Сучасний стан та проблеми двигунобудування. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції – Миколаїв: НУК, 2016.

9. Экспериментальное исследование малых добавок водорода на безмоторном стенде / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевський, Д.О. Шалапко // VIII Міжнародна науково-технічна конференція "Суднова енергетика. Стан та проблеми", Миколаїв, НУК, 2017 р.

Журнали, в яких опубліковані статті [1-6], індексовані у міжнародних наукометричних базах даних Index Copernicus, Google Scholar та ін.

АНОТАЦІЯ

Шалапко Д.О. Підвищення ефективності суднових двигунів внутрішнього згоряння застосуванням малих домішок водню до основного палива. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки». – Національний університет кораблебудування, Миколаїв, 2019.

Дисертація присвячена дослідженню робочого процесу в судновому турбопоршневому дизельному двигуні та його паливній апаратурі при використанні малих домішок водню до основного палива. Використання домішок водню до основного палива призводить до покращення екологічних та економічних показників ДВЗ. Експериментальні дослідження проведені у «Центрі перспективних енергетичних технологій НУК» підтвердили підвищення експлуатаційних показників дизельного двигуна, зокрема приріст потужності склав на 1,7...3,4%, зменшення питомої витрати палива 2,2...3,7% в залежності від порції доданого водню. Розроблено експериментальний стенд для дослідження впливу додавання малих домішок водню на процес розпилення палива. Так використання малих домішок водню до основного палива призводить до укорочування факела розпиленого палива, та збільшення його кута розкриття.

Удосконалена математична модель розчинення водню під час додавання у паливопровід високого тиску, що враховує коливання рідкого палива між впорскуваннями та довжину паливопроводу. Удосконалено математичну модель робочого циклу дизельного двигуна, що враховує вплив використання малих домішок водню до основного палива на процес розпилення.

Встановлено, що внаслідок покращення якості розпилення кут випередження впорскування потребує корегування. Рациональний кут випередження впорскування палива, який лежить в межах $-2...-7^{\circ}$ від заводських налаштувань, дозволяє підвищити ефективну потужність двигуна на 4,1...5,5 %.

Визначено раціональний діапазон додавання водневої домішки, що складає 0,05...0,15% по масі. Визначено ефективність застосування малих домішок водню на судах сучасного флоту.

Ключові слова: суднові дизельні двигуни, моделювання, параметри робочого процесу, водень, розпилення палива.

SUMMARY

Shalapko D.O. Increase the effectiveness of marine internal combustion engines by using small amounts of hydrogen to the main fuel. – Manuscript.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences (Doctor of Philosophy) in specialty 05.05.03 "Engines and power plants". - National University of Shipbuilding, Nikolaev, 2019.

The dissertation is devoted to the study of the working process in a marine turbopump diesel engine and its fuel equipment with the use of small admixtures of hydrogen to the main fuel. The use of impurities of hydrogen to the main fuel leads to an improvement in the environmental and economic performance of the ICE. Known ways to use hydrogen supplements have several disadvantages, including high consumption of hydrogen - which leads to increased costs, complexity with adjustment, increasing the risk of explosion through direct contact with hydrogen from air. The use of direct hydrogen injection requires complicated engine design and additional space in the engine cylinder.

One of the most promising ways to use hydrogen supplements is the method proposed by Prof. Patrahaltsev M.M. This method is characterized by the addition of hydrogen through an irreversible valve in the fuel line of high pressure between the high-pressure pipe and the nozzle on the wave of pressure drop. However, sources have not been found in the scientific literature regarding the use of hydrogen in the proposed method.

Experimental studies conducted at the Center for Advanced Energy Technologies of NUOS confirmed the increase in the performance of the diesel engine power increased by 1.7 ... 3.4%, the reduction of the specific fuel consumption of 2.2 ... 3.7%, depending on the portion of added hydrogen. It has been experimentally proved that the amount of hydrogen impurity depends on the pressure of hydrogen supply, the rotational speed and loading of the engine.

An improved mathematical model for absorbing hydrogen during the addition of a high-pressure fuel line, which considers the variation of liquid fuel between the injections and the length of the fuel line.

An experimental test bench was developed for the study of the influence of the addition of small impurities of hydrogen on the process of fuel spraying. So the use of small admixtures of hydrogen to the main fuel leads to a shortening of the torch of sprayed fuel, and an increase in its opening angle. Accordingly, it is possible to judge the improvement of the purity of the droplets and the destruction of the enriched core of the torch.

The mathematical model of the working cycle of a diesel engine, which considers the influence of the use of small admixtures of hydrogen to the main fuel on the process of spraying, has been improved.

Practical recommendations on the choice of rational parameters of diesel engine operation with the use of small impurities of hydrogen to the main fuel are developed, which allow to set up modern and design new ICEs. It has been established that due to the improvement of the quality of the cutting, the pre-injection angle needs to be corrected. The rational angle of inertia of fuel injection, which lies in the range $-2 \dots -7^\circ$ from the factory settings, allows you to increase the effective engine power by 4.1 ... 5.5%.

The rational range of addition of hydrogen impurity, which is 0.05-0.15% by weight, is determined. The efficiency of using small admixtures of hydrogen on the ships of modern fleet is determined.

Key words: marine diesel engines, modeling, parameters of working process, hydrogen, fuel spraying.

ШАЛАПКО Денис Олегович

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ
ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ЗАСТОСУВАННЯМ МАЛИХ
ДОМІШОК ВОДНЮ ДО ОСНОВНОГО ПАЛИВА**

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

Підписано до друку 20.05.2019. 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., Центральний, 94/2.
Свідоцтво А01 № 492190