

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
імені адмірала Макарова**

Доценко Сергій Михайлович

УДК 621.436

**ПІДВИЩЕННЯ ПАЛИВНОЇ ЕКОНОМІЧНОСТІ
СУДНОВИХ ГАЗОДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРІВ ШЛЯХОМ
ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ВПОРСКУВАННЯ
ЗАПАЛЬНОГО ПАЛИВА**

Спеціальність 05.08.05 - Суднові енергетичні установки

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

Миколаїв – 2006

Дисертацією є рукопис
Робота виконана в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Тимошевський Борис Георгійович,
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, завідувач кафедри двигунів внутрішнього згоряння, м. Миколаїв.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Івановський Валерій Георгійович,
Одеський національний морський університет, завідувач кафедри суднових енергетичних установок і технічної експлуатації, м. Одеса.

кандидат технічних наук, професор **Горбов Віктор Михайлович,**
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, завідувач кафедри суднових та стаціонарних енергетичних установок, м. Миколаїв.

Провідна установа Одеська національна морська академія,
Міністерства освіти і науки України, м. Одеса.

Захист відбудеться "30" травня 2006 р. о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 38.060.02 при Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова, за адресою: 54025, м. Миколаїв, проспект Героїв Сталінграда, 9.

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

Автореферат розісланий "___" квітня 2006 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради, доктор технічних наук, професор



Тимошевський Б.Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток сучасного світового суднобудування супроводжується заходами, спрямованими на зниження собівартості морських перевезень, раціональне використання природних ресурсів та захист навколишнього середовища. До основних факторів, що визначає конкурентоспроможність суднової енергетичної установки (СЕУ), поряд із її собівартістю, відносяться паливна економічність та екологічні показники, які в значній мірі залежать від виду палива, що використовується. На сьогодні більше ніж 90 % морських та річкових суден обладнані дизельними енергетичними установками, що працюють на різних видах рідкого палива нафтового походження. Одним із перспективних напрямків підвищення паливно-енергетичної ефективності та економічності СЕУ, які знаходяться в експлуатації, є застосування газодизельного циклу. При використанні газодизельних двигунів їх енергетична ефективність, економічність та екологічні показники у значній мірі залежать від системи подачі та величини запальної дози дизельного палива. У зв'язку з цим наукові дослідження, спрямовані на зменшення запальної дози дизельного палива газодизельних двигунів і використання нових типів паливної апаратури є актуальними, становлять науковий та практичний інтерес.

Результати дослідження дозволяють вирішувати питання зниження паливної складової вартості 1 тонно-милі вантажних перевезень при експлуатації судна, раціонально використовувати супутній нафтовий газ на морських платформах та покращити екологічні показники двигуна.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дослідження виконувались у рамках програми комплексного розвитку АТВТ "Первомайськдизельмаш" на 2001 - 2005 рр.; тематичного плану НДДКР Міністерства освіти і науки України за напрямком "Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетичній промисловості та в агропромисловому комплексі" за темою "Розробка загальної концепції вдосконалення процесів в енергетичному обладнанні на основі альтернативних робочих тіл і енергоносіїв", реєстраційний номер 01198U004220; науково-технічної роботи Інституту газу НАН України (контракт № ІнтерАН - 01/31.08) з модернізації морських стаціонарних платформ (МСП-3 ... МСП-9), що експлуатуються з газодизелями ГЖЧН 25/34 та ГЖЧН 36/45; пріоритетних напрямків удосконалення нормативної документації Російсько Морського Регістру Судноплавства: "Правил классификации и постройки морских судов", "Правил классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок (ПБУ) и морских стационарных платформ (МСП)", "Руководство по техническому наблюдению за соблюдением технических нормативов выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух при изготовлении и эксплуатации СБУ".

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення паливної економічності газодизель-генераторів шляхом подачі зменшеної запальної дози дизельного палива, інтенсифікації впорскування

палива за рахунок використання модулятора імпульсу тиску (МІТ), пошуку раціональних конструктивних рішень, що дозволяють реалізувати газодизельний цикл зі зменшеною запальною дозою в судових ДВЗ.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні основні задачі:

- на основі проведеного аналізу систем регулювання подачі запальної дози палива судового газодизеля вибрати на стадії проектування раціональні конструктивні рішення паливної апаратури, здатні забезпечити реалізацію газодизельного циклу зі зменшеною запальною дозою дизельного палива;

- удосконалити конструкцію паливної системи, оснащеної модуляторами імпульсу тиску, з метою підвищення надійності і стабільності роботи та забезпечення реалізації газодизельного циклу зі зменшеною запальною дозою дизельного палива в судових ДВЗ, за рахунок вибору раціональних параметрів розпилювача форсунки;

- розробити математичну модель паливної системи високого тиску з модуляторами імпульсів тиску судового газодизеля;

- спроектувати та виготовити дослідний зразок МІТ;

- визначити вплив модулятора імпульсів тиску на ефективність роботи модернізованої паливної апаратури при проведенні безмоторних випробувань;

- провести експлуатаційні випробування судового газодизель-генератора з метою перевірки надійності роботи двигуна оснащеного штатної паливної апаратури МІТ у комплектації з різноманітними розпилювачами форсунки;

- визначити вплив модулятора імпульсів тиску на ефективність роботи газо дизель-генератора;

- узагальнити результати розрахункових та експериментальних досліджень і розробити практичні рекомендації щодо використання МІТ у складі модернізованої паливної системи для поліпшення паливної економічності та екологічних показників судових, тепловозних та стаціонарних газодизельних двигунів.

Об'єкт дослідження - паливні системи високого тиску судових газо-дизель-генераторів та явища, пов'язані з використанням у паливній системі високого тиску газодизельних двигунів модулятора імпульсу тиску.

Предмет дослідження - процеси впорскування дизельного палива при використанні модуляторів імпульсів тиску та зменшенні запальної дози.

Методи дослідження. Для розрахунку процесу паливоподачі використовувався гідродинамічний метод. Дослідження експериментального зразка МІТ проводилось на безмоторних та моторних стендах АТВТ "Первомайськдизельмаш". Використання методу стендових випробувань було застосовано при визначенні навантажувальних характеристик газодизель-генератора, робочих параметрів паливної апаратури та властивостей потоків палива. Вимоги до засобів

діагностування та їх класи точності визначено на основі теорії похибок та методів математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів, наукові положення.

Основне наукове положення полягає в тому, що підвищення паливної економічності та екологічних показників газодизельних двигунів може бути досягнуто за рахунок використання МІТ шляхом інтенсифікації впорскування запальної дози палива. Обґрунтованість наукового положення підтверджена такими отриманими науковими результатами:

- вперше запропоновано використати для зниження розміру запальної дози дизельного палива на розрахунковому режимі роботи суднового газодизель-генератора модулятор імпульсів тиску;

- вперше розроблено математичні моделі, які адекватно відображають процеси в паливній системі суднового газодизеля з модуляторами імпульсів тиску та дозволяють з достатньою мірою точності досліджувати процеси паливоподачі на стадії проектування;

- визначені основні чинники, що впливають на процес формування паливоподачі суднового газодизельного ДВЗ;

- встановлена принципова можливість ефективного зменшення розміру запальної дози дизельного палива при використанні МІТ.

Достовірність наукових результатів дослідження визначається використанням фундаментальних рівнянь та залежностей, прийнятих для дослідження паливних систем високого тиску ДВЗ. Основні допущення та обмеження, висунуті при постановці задач дослідження, перевірені аналітично та експериментально. Достовірність досліджень з достатньою мірою точності підтверджена експериментальними даними.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблено та виготовлено дослідний зразок модулятора імпульсів тиску для газодизель-генератора (ГДГА-800), випробуваного на двигуні, та доведено його ефективність.

2. Розроблено та проведено модернізацію безмоторного стенду для випробування модуляторів імпульсів тиску в складі паливної системи високого тиску газодизелів ГЖЧН 25/34 та ГЖЧН 26/34.

3. Розроблено схему паливної системи високого тиску газодизель-генератора з модуляторами імпульсів тиску.

4. Експериментально доведено, що модулятор імпульсів тиску може бути встановлений на газодизельному двигуні без істотних технічних змін.

5. Розроблені практичні рекомендації щодо використання МІТ у складі модернізованої паливної системи високого тиску для поліпшення паливної економічності та екологічних показників суднових газодизель-генераторів.

Впровадження результатів дослідження. Результати досліджень впроваджені на АТВТ "Первомайськдизельмаш" при модернізації суднового газодизеля 6 ГЖЧН 26/34, що дозволило знизити запальну дозу дизельного палива з 18 до 6 кг/год. Матеріали роботи використовуються Інститутом газу НАН України для зменшення запальної дози дизельного палива газодизелів ГЖЧН 25/34 та ГЖЧН 36/45 морських стаціонарних

платформ (МСП-3...МСП-9). Результати дисертаційної роботи використовуються відділенням Російського Морського Регістру Судноплавства в м. Миколаїв для підготовки пропозицій щодо вдосконалення нормативної документації: розділа 9 "Двухтопливные двигатели внутреннего сгорания" "Правил классификации и постройки морских судов"; частини VII "Механические установки и механизмы" "Правил классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок (ПБУ) и морских стационарных платформ (МСП)", а також у навчальному процесі Національного університету кораблебудування (НУК) та Первомайського політехнічного інституту НУК при підготовці студентів зі спеціальності 7.090210 "Двигуни внутрішнього згоряння".

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі задач, пов'язаних із ефективним використанням газоподібних палив у суднових ДВЗ та спрямованих на зменшення запальної дози дизельного палива; розробленні математичної моделі процесу впорскування запальної дози дизельного палива в циліндр газодизеля; розробленні програми експериментальних досліджень модернізованої паливної апаратури з МІТ; проведенні випробування дослідного зразка модулятора імпульсів тиску для газодизель-генератора; проведенні вибору типу та параметрів розпилювачів форсунки; проведенні модернізації безмоторного стенду для випробування паливної апаратури високого тиску; проведенні експериментальних досліджень на моторному стенді для виявлення впливу величини запальної дози палива на економічні та екологічні параметри газодизельного двигуна.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідалися та обговорювалися на Конгресах двигунобудівників України (Рибаче-Крим - Україна, 2000р., 2002р.); 2-й Міжнародній науково-технічній конференції "Проблемы энергосбережения и экологии в судостроении" (м. Миколаїв, 1998р.); 3-й Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми енергозбереження та екології в суднобудуванні" (м. Миколаїв, 2002р.); Міжнародній конференції "Кораблебудування: освіта, наука, виробництво" (м. Миколаїв, 2002р.); Міжнародній науково - технічній конференції "Сучасні проблеми суднової енергетики" (м. Миколаїв, 2003р.); Всеукраїнській науково-технічній конференції "Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення" (м. Первомайськ, 2005р.); Міжнародній науково - технічній конференції "Суднова енергетика: стан та проблеми" (м. Миколаїв, 2005р.); Науково - технічних семінарах кафедри двигунів внутрішнього згоряння Національного університету кораблебудування та кафедри "ДВЗ та ТМ" Первомайського політехнічного інституту НУК (м. Миколаїв - м. Первомайськ, 2000-2005 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 12 друкованих робіт, які в повній мірі відображають зміст та основні положення дисертації. У збірниках наукових праць, рекомендованих ВАК України, опубліковано 7 робіт (у тому числі 3 друковані роботи є одноосібними), а інші в матеріалах та у тезах науково - технічних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел зі 131 найменування та додатків. Обсяг основного тексту становить 169 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та задачі дослідження, обрані об'єкт і предмет дослідження, відбиті наукова новизна та практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі розглянуто стан та основні шляхи вирішення проблеми використання паливного газу в суднових енергетичних установках та концепції організації робочого процесу в поршневих двигунах. Перспективність використання газодизельних двигунів для СЕУ пояснюється більш високим К.К.Д. в порівнянні з газовими двигунами, збільшеним моторесурсом порівняно з дизельними та можливістю швидшої конвертації дизельних двигунів на газодизельні. Суттєвим є екологічний ефект, який забезпечують власні характеристики газоподібного палива, а саме: відсутність оксидів сірки, незначна кількість NO_x і понижене виділення CO при згорянні. Основним завданням, яке ставиться при конвертації дизельних двигунів на газорідний процес, є збереження конструкції базового дизельного двигуна та зниження об'єму запальної дози рідкого палива.

Аналіз шляхів модернізації конструкції паливної апаратури показав, що для вирішення поставлених задач використовують різноманітні конструктивні рішення, більшість яких відрізняються складністю, низькою технологічністю, високою собівартістю. На підставі проведеного аналізу виділені основні шляхи вирішення проблеми та сформульована мета дослідження:

- визначення найефективніших шляхів зменшення розмірів запальної дози дизельного палива;
- підвищення паливної економічності газодизель-генераторів шляхом інтенсифікації впорскування зменшеної запальної дози дизельного палива за рахунок використання модулятора імпульсу тиску.

Другий розділ присвячений обґрунтуванню загальної методики та основним методам дослідження паливної системи високого тиску. При вирішенні основних задач дисертаційного дослідження застосовані методи фізичного та математичного моделювання, а саме дослідження процесів, що відбуваються в паливній системі двигуна, здійснювалося з використанням чисельно - аналітичного методу гідродинамічного розрахунку паливної системи газодизеля. Застосовані математичні моделі побудовані з використанням системного підходу на основі класичних термодинамічних залежностей.

У третьому розділі було проведено аналіз причин нестабільної роботи паливної апаратури газодизеля при зменшенні запальної дози палива. Аналіз показав, що основною причиною є малий активний хід

плунжера ПНВТ. Другою причиною нестабільної роботи паливної апаратури є те, що при таких малих подачах, штатний нагнітальний клапан не забезпечує постійного рівня залишкового тиску від циклу до циклу та у циліндрах двигуна. Третя причина - це завищені значення, основних параметрів розпилювача - площі соплових отворів та максимального ходу голки форсунки.

Проведений аналіз дозволив запропонувати наступні шляхи удосконалення роботи паливної апаратури. По - перше, для збільшення активного ходу плунжера ПНВТ пропонується розгерметизувати штатний нагнітальний клапан, виконанням по осі наскрізного отвору діаметром 1,0 мм. Запропонована конструктивна зміна нагнітального клапана одночасно вирішує дві проблеми — збільшується активний хід плунжера насоса та ліквідуються коливання залишкового тиску в системі високого тиску. Для усунення третьої причини штатний розпилювач замінюється новим, в якому за рахунок зменшення діаметру або числа соплових отворів площа перерізу соплових отворів розпилювача форсунки зменшується в 3-4 рази. Після зменшення площі гідравлічний опір запираючого конусу голки фактично перестане впливати на загальну втрату тиску в розпилювачі і величину опору можна буде збільшити, тобто зменшити максимальний підйом голки форсунки у 2-3 рази. З іншого боку зменшення максимального підйому голки підвищує чіткість її роботи і зменшує "насосний ефект". Для практичної реалізації цієї зміни під час виготовлення дослідних розпилювачів їх геометричні розміри були змінені таким чином, що хід голки зменшився до величини 0,2...0,25 мм, тобто у 2 рази. Запропонованими конструктивними змінами було досягнуто задовільної роботи паливної системи при об'ємах запальної дози палива на рівні 5...7%, при цьому активний хід плунжера буде досягати 8... 10% від його номінальної подачі.

При подальшому зменшенні об'єму запальної дози до рівня 3...5 % активний хід плунжера зменшиться до такої незначної величини, що призведе до нестабільної роботи паливної апаратури. Збільшення ж активного ходу плунжера за рахунок подальшого зменшення площі соплових отворів розпилювача неможливо, тому що при подачах 15...20% від номінальної (режим холостого ходу) підвищується максимальний тиск палива, який перевищує 100 МПа, що неминуче визве порушення в роботі паливної системи.

Для забезпечення надійної роботи газодизеля на розрахунковому режимі (режим впорскування запальної дози палива при номінальній частоті

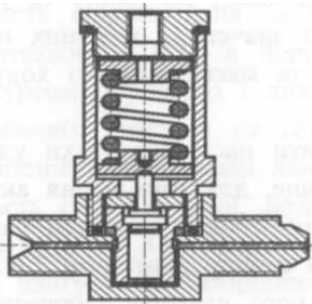


Рис. 1. Модулятор імпульсів тиску

обертання колінчастого вала) пропонується використати в лінії високого тиску паливної системи додатковий елемент - модулятор імпульсу тиску (рис. 1).

Конструкція модулятора імпульсу тиску співпадає з конструкцією резонансного елемента - демпфера (РЕД),

яка була розроблена О.Л. Григор'євим для інтенсифікації паливоподачі на режимі номінальної потужності автомобільного дизеля, а також використана Врублевським О.В. для інтенсифікації процесу паливоподачі тепловозного дизеля на режимі холостого ходу. Перша відмінність між цими конструкціями полягає у величині запальної дози палива $Q_{\text{зап.}}$, що відводиться під поршень модулятора. Якщо ця величина для РЕД автомобільного дизеля складала більше 60 %, а для тепловозного дизеля - біля 10 %, то для МІТ газодизеля — 3...5 %. Друга відмінність полягає в режимі роботи паливної системи двигуна. Розрахунковий режим роботи для РЕД - номінальна частота обертання колінчастого вала, для тепловозного дизеля - режим холостого ходу (50...60 % від номінальної частоти), для МІТ газодизеля-режим впорскування запальної дози дизельного палива при номінальній частоті обертання колінчастого вала. Третя відмінність роботи паливної системи газодизеля з МІТ - це відсутність залишкового тиску $P_{\text{заль}}$ величина якого на режимі холостого ходу тепловозного дизеля складала; 3...6 МПа.

У зв'язку з використанням у паливній системі МІТ математична модель паливної системи на ділянці активного ходу плунжера паливного насоса високого тиску має свої особливості (рис. 2). Процес формування у насосі імпульсу подачі F_H до початку підйому голки форсунки описується системою з трьох рівнянь.

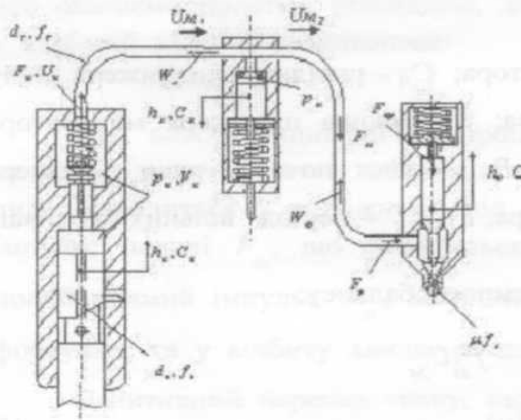


Рис. 2. Гідравлічна схема паливної системи газодизель-генератора з МІТ.

Рівняння об'ємного балансу

$$\alpha V_H \frac{dP_H}{dt} = q_H - f_T \cdot U_H \quad (1)$$

описує процес стиску палива у порожнинах насоса. Ліва частина рівняння являє собою зміну об'єму палива при зміні тиску (де α - коефіцієнт стискування палива; P_H , V_H - тиск та об'єм порожнини під плунжером насоса), а права - різницю між об'ємною швидкістю палива, що витікає зі штуцера паливного насоса, q_H та об'ємною швидкістю палива $f_T \cdot U_H$, що витікає в трубопровід. Рівняння

$$\rho a U_H(t) = F_H(t) - W_M \cdot (t - T_1) \quad (2)$$

пов'язує швидкості з тиском в імпульсах прямої F_H та відбитої W_M хвилі від модулятора у бік насоса (де ρ, a - густина палива та швидкість звуку в паливі). Оскільки в трубопроводі між форсункою та насосом розмістився модулятор імпульсу тиску, довжина трубопроводу L_T ділиться на дві частини: L_1 від насоса до модулятора та L_2 від модулятора до форсунки. Відповідно час проходження звукової хвилі по стовпу палива в трубопроводі L_1 буде $T_1 = L_1 / a$, а в трубопроводі L_2 буде $T_2 = L_2 / a$. Якщо в рівнянні (2) розглядалась різниця тиску в імпульсах, то в рівнянні $P_H(t) = F_H(t) + W_M(t - T_1)$ (3) розглядається сума імпульсів.

Враховуючи те, що в конструкцію нагнітального клапана паливного насоса високого тиску внесено зміну (було виконано додатковий отвір), величина залишкового тиску $P_{\text{зал}}$ в рівнянні (3) відсутня.

Для модуляторів імпульсу тиску отримано дві групи рівнянь. Перша група – це рівняння руху плунжера модулятора:

$$\begin{cases} m_M \cdot \frac{dC_M}{dt} = f_M \cdot P_M - f_{M.O} \cdot P_{M.O} - \frac{1}{2} \cdot Z_{\text{пм}} \cdot T_{\text{пр.м}} \cdot C_M \\ \frac{dh_M}{dt} = C_M, \end{cases} \quad (4)$$

де m_M – маса плунжера модулятора; C_M – швидкість плунжера модулятора; h_M – хід плунжера модулятора; f_M – площа плунжера модулятора; P_M – тиск у порожнині модулятора; $P_{M.O}$ – тиск початку руху плунжера; $Z_{\text{пм}}$ – жорсткість пружини модулятора; $T_{\text{пр.м}}$ – період вільних коливань пружини.

Друга група – це рівняння об'ємного балансу:

$$\begin{cases} \alpha V_M \frac{dP_M}{dt} = f_{T_1} \cdot U_{M_1} - f_{T_2} \cdot U_{M_2} - f_M C_M \\ U_{M_1}(t) = \frac{1}{a\rho} \cdot (2 \cdot F_n \cdot (t - T_1) - P_M(t)) \\ U_{M_2}(t) = \frac{1}{a\rho} \cdot (P_M(t) - 2 \cdot W_{\phi}(t - T_2)) \end{cases} \quad (5)$$

де V_M – об'єм порожнини під плунжером модулятора; f_{T_1}, f_{T_2} – площа поперечного перерізу трубопроводу між насосом високого тиску та модулятором, між модулятором та форсункою; U_{M_1}, U_{M_2} – лінійні швидкості руху палива в трубопроводі на вході в модулятор та на виході.

Рівняння об'ємного балансу (5) описує процес стиску палива в порожнині модулятора. Ліва частина рівняння являє собою зміну об'єму палива при зміні тиску, а права частина – різницю між об'ємною швидкістю палива, що проходить по відрізку трубопроводу між насосом та модулятором $f_{T_1} U_{M_1}$, об'ємною швидкістю палива $f_{T_2} U_{M_2}$, що витікає по відрізку трубопроводу між модулятором і форсункою, та частиною палива $f_M C_M$, що відводиться під плунжер модулятора.

Для замкненості системи рівнянь отримано рівняння відбитої хвилі W_M від модулятора у бік насоса та прямої хвилі F_M від модулятора у бік форсунки:

$$\begin{cases} W_M(t) = P_M(t) - F_H(t - T_1) \\ F_M(t) = P_M(t) - W_\phi(t - T_2) \end{cases} \quad (6)$$

На даному етапі підйом голки форсунки ще не відбувся, тому процес опишемо простим рівнянням, де тиск у прямій хвилі дорівнює тиску у відбитій хвилі з запізненням:

$$W_\phi(t) = F_M(t - T_2) \quad (7)$$

При використанні МІТ у процесі паливоподачі з'являється нова фаза попереднього розгону палива в трубопроводі, під час якої частина палива відводиться у порожнину під плунжер модулятора. Внаслідок цього імпульс подачі F_H , що формується в насосі, трансформується в МІТ у новий прямий імпульс F_M , величина якого недостатня для підйому голки форсунки, та у відбиту хвилю розширення W_M .

Позитивний перепад тиску, що виникає між перерізом трубопроводу біля насоса та біля модулятора під час нової фази, призводить до збільшення швидкості палива в цій частині трубопроводу. Акумульована таким чином кінетична енергія після припинення відводу палива під плунжер модулятора призводить до різкого підвищення тиску в імпульсі F_M , а потім до такого ж різкого зменшення амплітуди цього імпульсу. Максимальний тиск $F_{M.max}$ в імпульсі F_M та тривалість проміжку часу T між моментами різкої зміни амплітуди, які визначають інтенсивність та тривалість активної фази впорскування, розраховуються за формулами:

$$F_{M.max} = a \cdot \rho \cdot f_n \cdot c_n / f_T \quad (8)$$

$$T = 2 \cdot L / a, \quad (9)$$

де a, ρ – швидкість звуку в паливі та густина палива; f_n, c_n – площа плунжера насоса та його швидкість на ділянці активного ходу; f_T, L – площа поперечного перерізу та довжина трубопроводу між насосом та форсункою.

Формули (8) та (9) є основа, на якій базується методика раціонального вибору параметрів модулятора. При її застосуванні вирішується задача досягнення максимальної інтенсивності впорскування при заданій мінімальній запальній дозі палива. Розв'язання цієї задачі досягається на розрахунковому режимі роботи паливної системи газодизеля з модуляторами за рахунок наступних факторів:

по-перше, значне збільшення крутизни фронтів та амплітуди імпульсу подачі підвищує швидкість переміщення голки форсунки, внаслідок чого вона піднімається вище і встигає вийти на верхній упор, що гарантує відсутність пропусків подач навіть при істотних відхиленнях конструктивних параметрів паливної системи від розрахункових значень;

по-друге, відведення частини палива під плунжер модулятора призведе до збільшення активного ходу плунжера насоса в 1,5...2,5 рази. Величина активного ходу на розрахунковому режимі складе 15...20 % від номінальної величини при об'ємі запальної дози палива 3...5 %, що стабілізує показники паливоподачі від циклу до циклу і по циліндрах. Цей же фактор збільшує середній тиск у прямій хвилі і тим самим зменшує вплив ділянок дроселювання палива через неповністю перекриті дозуючі вікна;

по-третє, особливості формування імпульсу подачі на розрахунковому режимі призводять до того, що впорснутий об'єм палива залишається практично незмінним при відхиленнях більшості конструктивно-регульовальних параметрів, навіть при незначних відхиленнях рейки паливного насосу.

Для вибору раціональних значень параметрів модулятора була виконана серія гідродинамічних розрахунків для паливної системи високого тиску газодизеля 6 ГЖЧН 26/34 результати яких наведені на рис. 3 - 6. На основі проведених розрахунків об'єм палива, що відводиться під плунжер модулятора, повинен складати $Q_{від.} = 100...150 \text{ мм}^3$, а тиск початку переміщення плунжера $P_{мо} = 5...12 \text{ МПа}$. При ході плунжера модулятора $h_{м.мах} = 1,5 \text{ мм}$ (рис. 3) його максимальна швидкість переміщення складає 3,5 м/с, фактично досягає допустимого рівня з міркувань забезпечення міцності та надійності. Тому раціональне значення ходу плунжера модулятора вибираємо 1,5 мм.

Раціональне значення тиску $P_{мо}$ початку переміщення плунжера модулятора складає 10 МПа, так як при $P_{мо} > 12,5 \text{ МПа}$ спостерігається передчасний підйом голки форсунки, що погіршує характеристики впорскування (рис. 4). Збільшення максимального ходу голки форсунки не погіршують показники впорскування запальної дози дизельного палива в паливній системі з модулятором імпульсу тиску. Але при $h_{г.м} > 0,25 \text{ мм}$ швидкість підйому голки перевищує 3 м/с, що недопустимо збільшує динамічну складову деформації пружини форсунки та може привести до її поломки (рис. 5). Тому максимальний хід голки форсунки вибраний 0,2 мм.

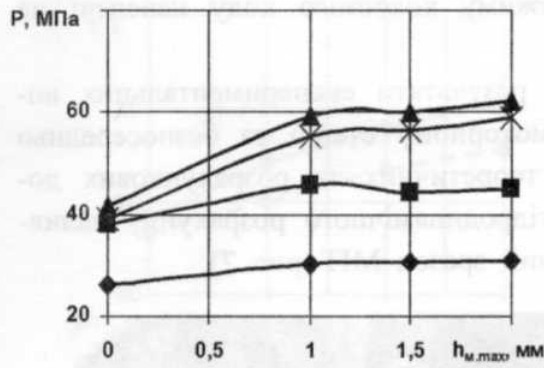


Рис. 3. Залежність P_{max} палива від ходу плунжера МІТ

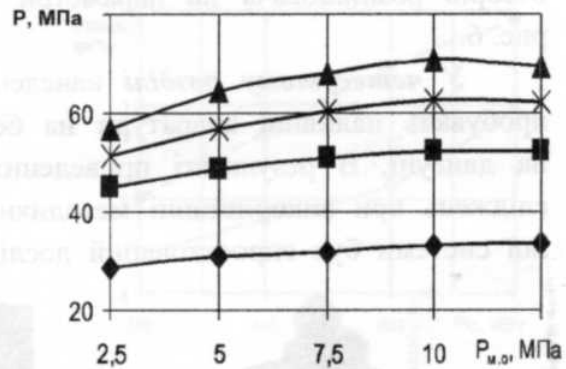


Рис. 4. Залежність P_{max} палива від тиску початку переміщення плунжера МІТ

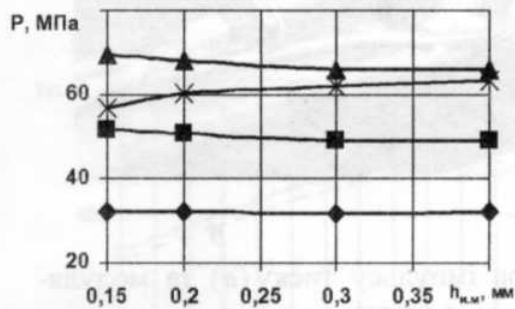


Рис. 5. Залежність P_{max} палива від максимального підйому голки форсунки

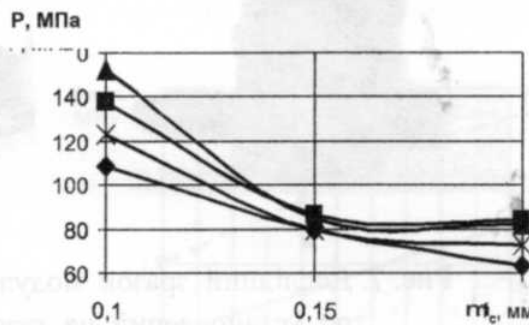


Рис. 6. Залежність P_{max} палива від ефективної площі соплових отворів розпилювача

на рис. 3–6: $\blacklozenge$ P_{II} – максимальний тиск палива в порожнині насоса;
 $\blacksquare$ P_M – максимальний тиск палива в порожнині модулятора;
 $\blacktriangle$ P_Φ – максимальний тиск палива в кармані розпилювача;
 $\times$ $P_{вп}$ – максимальний тиск впорскування.

Для оцінки максимального тиску палива P , на холостому режимі, допустимо використовувати спрощену математичну модель паливної системи, яка описується єдиним диференціальним рівнянням (10):

$$\alpha \cdot V_c \cdot dP/dt = f_n \cdot C_n - \mu f_\Phi \cdot \sqrt{(2/\rho) \cdot P} \quad (10)$$

де α, ρ – коефіцієнт стискання та густина палива; μf_Φ – ефективна площа соплових отворів форсунки; V_c – сумарний об'єм палива в лінії високого тиску; $f_n \cdot C_n$ – площа та середня швидкість плунжера насоса на ділянці його активного ходу. Вплив величини ефективної площі соплових отворів розпилювача на параметри режиму холостого ходу наведені на рис. 6.

У четвертому розділі наведено результати експериментальних випробувань паливної апаратури на безмоторному стенді та безпосередньо на двигуні. В результаті проведених теоретичних та розрахункових досліджень при використанні методики гідродинамічного розрахунку паливної системи був спроектований дослідний зразок МІТ (рис. 7).



Рис. 7. Дослідний зразок модулятора імпульсу тиску (а) та модулятор, установлений на газодизелі 6 ГЖЧН 26/34 (б).

Експериментальна перевірка показала, що при використанні МІТ та розпилювачів $8 \times 0,4 \times 155^\circ$ запальна доза становить $9,5 \dots 10$ кг/год. В ході випробувань при запальній дозі на рівні $9,5 \dots 10$ кг/год, двигун працював на всіх режимах надійно. Максимальний тиск згоряння по циліндрах зменшився на $1,5 \dots 2$ МПа, а середня температура газів на виході з циліндрів зросла на $20 \dots 35$ К.

З метою подальшого зниження запальної дози палива були проведені моторні випробування паливної апаратури газодизеля 6 ГЖЧН 26/34 з розгерметизованими нагнітальними клапанами, розпилювачами $3 \times 0,3 \times 155$ та МІТ, які були встановлені безпосередньо перед форсункою. Запальна доза дизельного палива була виставлена на рівні $5,5 \dots 6$ кг/год. Як і в попередніх випробуваннях максимальний тиск згоряння по циліндрах зменшився на $1 \dots 2$ МПа, а середня температура газів на виході з циліндрів зросла на $10 \dots 25$ К (рис.8, 9).

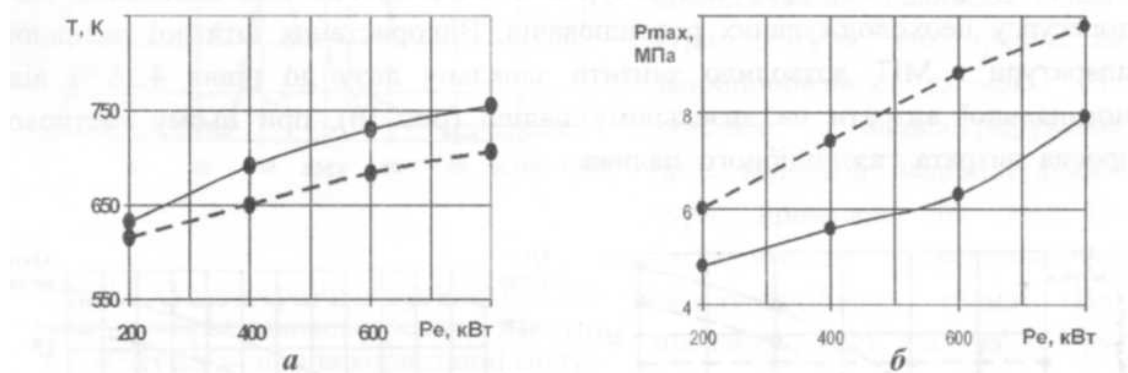


Рис. 8. Залежність температури (а) та максимального тиску (б) від потужності газодизельного двигуна: --- робота без МІТ; — робота з МІТ

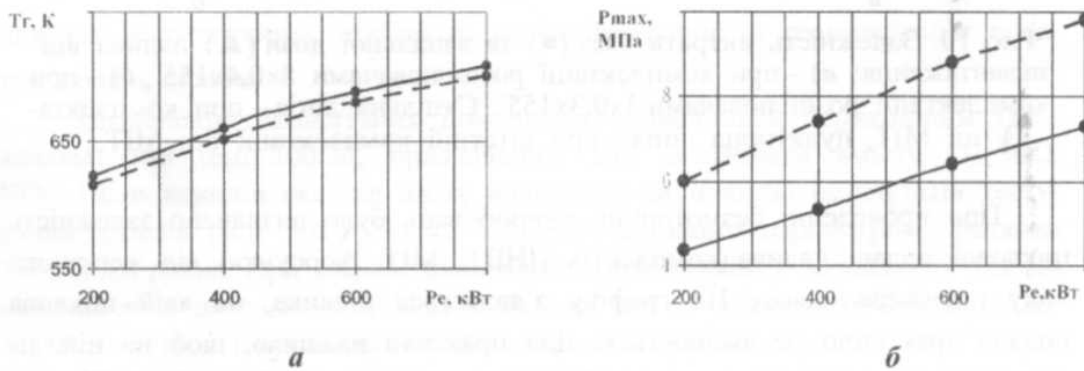


Рис. 9. Залежність температури газів (а) та максимального тиску (б) від навантаження газодизельного двигуна: --- робота без МІТ; — робота з МІТ

У результаті експериментальних випробувань паливної системи на газодизелі 6 ГЖЧН 26/34 було підтверджено, що використання МІТ при збереженні штатної комплектації паливної апаратури забезпечує зниження запальної дози палива на 40...45 % (від 18 кг/год до 9,5... 10 кг/год), а при оснащенні розпилювачами $3 \times 0,3 \times 155$ та модуляторами імпульсу тиску була досягнута запальна доза палива 5,5...6 кг/год. В результаті випробувань була досягнута найменша запальна доза палива 4,4...4,5 кг/год (2,5 % від номінальної витрати на дизельному паливі), але даний висновок потребує більш тривалих ресурсних випробувань для виявлення моторесурсу неохолоджуваних розпилювачів. Використання штатної паливної апаратури з МІТ дозволило знизити запальну дозу до рівня 4...6 % від номінальної витрати на дизельному паливі (рис. 10), при цьому частково зросла витрата газоподібного палива.

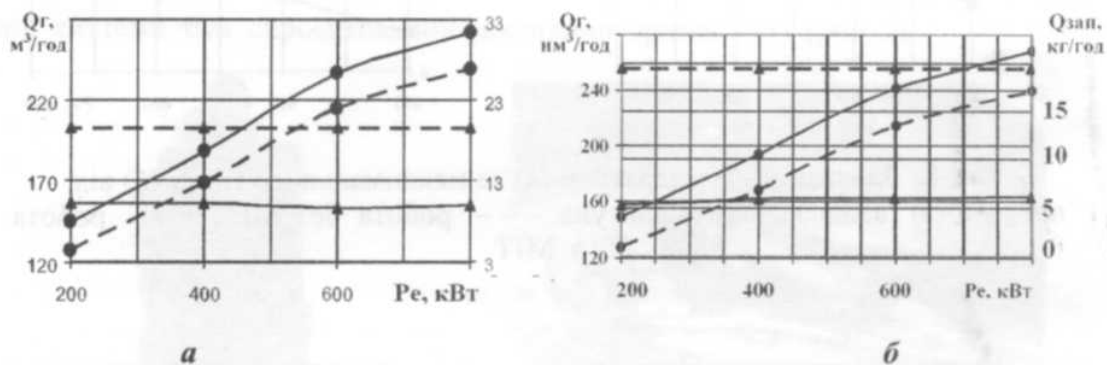


Рис. 10. Залежність витрати газу (●) та запальної дози (▲) палива від навантаження: а) — при комплектації розпилювачами $8 \times 0,4 \times 155$; б) — при комплектації розпилювачами $3 \times 0,3 \times 155$. Суцільна лінія — при комплектації МІТ, пунктирна лінія — при штатній комплектації без МІТ.

При проведенні безмоторних випробувань було визначено залежність циклової подачі палива (комплектів ПНВТ, МІТ, форсунка) від активного ходу плунжера насосу. На графіку з'являється ділянка, на якій циклова подача практично не змінюється. Для практики важливо, щоб на цій ділянці розміщувався розрахунковий режим, що дозволить виконувати ефективне регулювання паливної апаратури за рахунок корегування початкових положень рейок паливних насосів. При роботі паливної

апаратури на даній ділянці параметри паливоподачі всіх ПНВТ подібні, тобто забезпечується стабільність циклової подачі від циклу до циклу. Для перевірки адекватності математичних моделей проводились експериментальні дослідження як штатної паливної апаратури газодизеля 6 ГЖЧН 26/34, так і дослідної з модуляторами імпульсів тиску.

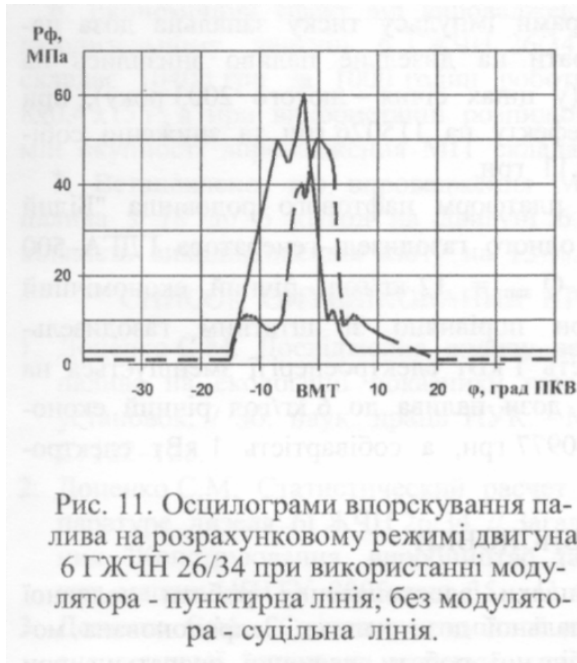


Рис. 11. Осцилограми впорскування палива на розрахунковому режимі двигуна 6 ГЖЧН 26/34 при використанні модулятора - пунктирна лінія; без модулятора - суцільна лінія.

Експериментальне дослідження проводилося методом візуалізації процесу паливоподачі шляхом осцилографування досліджуваної паливної апаратури двигуна, що працює за запропонованою схемою. Результати осцилографування двох варіантів паливної апаратури приведені на рис. 11. Експерименти проводилися на експлуатаційному стенді. Визначення тиску палива в трубопроводах високого тиску, переміщення голки розпилювача, тиск в циліндрі двигуна виконувалися з використанням

тензостанції УТС1-ВТ-12 та осцилографа Н-115. Під час експериментів реєструвалися: тиск палива P_f біля форсунки (за модулятором), підйом h_z голки форсунки та геометричний початок подачі палива.

Визначення екологічних показників проводились портативним газоаналізатором testo 300 M, призначеним для визначення вмісту O_2 , CO , NO_x . Поле викидів оксидів азоту визначено на підставі результатів тестування дизелів ряду ЧН 25/34 та ЧН 26/34 за даним параметром протягом 1988-2000 років. При аналізі екологічних показників у залежності від запальної дози дизельного палива виявлено, що зі зниженням запальної дози зменшується і кількість викидів оксидів азоту й вуглецю.

П'ятий розділ присвячений дослідженню економічної ефективності роботи суднового газодизель-генератора при використанні МКТ. Впровадження результатів дослідження на АТВТ "Первомайськдизельмаш" дозволило знизити запальну дозу палива з 18 до 10 кг/год та зменшити витрати на дизельне паливо на 10400 грн за 1000 годин роботи двигуна (у цінах січня - лютого 2003 року), при цьому річний економічний ефект збільшився на 77770 грн., а собівартість 1 кВт електроенергії склала 0,12 грн. При комплектації паливної апаратури газодизеля розпилювачами форсунки $3 \times 0,3 \times 155^\circ$ та модуляторами імпульсу тиску запальна доза палива знизилась до 6 кг/год, витрати на дизельне паливо знизились на 15600 грн за 1000 годин роботи (у цінах січня-лютого 2003 року), при збільшенні річного економічного ефекту на 115026 грн та зниженні собівартості 1 кВт електроенергії до 0,11 грн.

Для морських стаціонарних платформ нафтового родовища "Білий тигр" (В'єтнам) при використанні одного газодизель-генератора ГДГА-500 оснащених МІТ, який працює з $Q_{\text{зап}} = 12$ кг/год, річний економічний ефект збільшується на 64732 грн порівняно зі штатним газодизель-генератором. При цьому собівартість 1 кВт електроенергії зменшується на 0,03 грн. При зниженні запальної дози палива до 6 кг/год річний економічний ефект збільшується на 140977 грн, а собівартість 1 кВт електроенергії зменшується на 0,05 грн.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено конструктивні шляхи вдосконалення роботи паливної апаратури з метою зменшення запальної дози палива. Запропонована модернізація дозволить досягти стабільної роботи паливної апаратури при зниженні об'єму палива до рівня 5...7%.

2. Розроблено математичну модель паливної системи, яка застосована для дослідження роботи газодизель-генератора на режимі холостого ходу.

3. Досліджено процеси інтенсифікації паливopодачі на номінальному режимі роботи газодизель-генератора, які базуються на використанні - модулятора імпульсу тиску в штатній паливній системі газодизеля. Максимальна інтенсивність впорскування при заданій мінімальній запальній дозі палива досягається, за рахунок узгодженого вибору параметрів ПНВТ та МІТ. Запропоноване рішення дозволить при мінімальних затратах і змінах в паливній апаратурі конвертувати дизельні двигуни, що знаходяться в експлуатації, на газодизельні, забезпечуючи при цьому запальну дозу дизельного палива на рівні 3...5 %.

4. Розроблено методіку розрахунку параметрів модулятора, в якій результати узагальнені у формі простих аналітичних залежностей, що враховують особливості роботи паливної системи газодизеля з МІТ. Результати розрахунку адекватні експерименту.

5. Проведені експериментальні дослідження на безмоторному стенді виявили, що залежність циклової подачі від активного ходу плунжера насосу для паливної системи з МІТ має нелінійний характер з горизонтальною ділянкою, яка відповідає 3..5 % номінальної циклової подачі. Експериментально підтверджено, що на даній ділянці забезпечується стабільна циклова подача від циклу до циклу на всіх ПНВТ.

6. Економічний ефект від впровадження модуляторів імпульсу тиску на газодизельному двигуні 6 ГЖЧН 26/34 АТВТ "Первомайськдизельмаш" складає 10400 грн за 1000 годин роботи при використанні розпилювачів $8 \times 0,4 \times 155^0$, а при використанні розпилювачів $3 \times 0,3 \times 155^0$ - 15600 грн. Термін окупності впровадження МІТ складає 290 годин.

7. Встановлено, що впровадження МІТ та зменшення запальної дози палива з 18 до 6 кг/год па двигуні 6 ГЖЧН 26/34 дозволило зменшити кількість викидів оксидів азоту на 13 %.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Доценко С.М. Дослідження впливу величини запальної дози дизельного палива на екологічні показники газодизельних суднових енергетичних установок. // 36. наук, праць НУК. - Миколаїв: НУК, 2004. - № 2 (395). - С. 122-125.

2. Доценко СМ. Статистический расчет расхода топлива в топливной аппаратуре дизеля 6ГЖЧН 26/34. // Загальнодерж. міжвід. наук.-техн. збірник "Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин / КНТУ, 2005, вип. 35. - С. 428-432.

3. Доценко С.М. Оцінка економічної ефективності роботи газодизельної енергетичної установки морських стаціонарних платформ. // 36. наук, праць НУК. - Миколаїв: НУК, 2005. - № 5 (404). - С. 89-94.

4. Использование модулятора импульсов давления для интенсификации впрыскивания запальной порции дизельного топлива в цилиндры газодизеля. А.Л. Григорьев, А.Н. Врублевский, С.Н. Литвин, С.М. Доценко // Вестник ХГПУ-1999. - Вып. 85, - С. 3-12. *Здобувачем виконано розрахунково-експериментальне доведення дослідного зразка модулятора імпульсів тиску.*

5. Новый способ модернизации топливной аппаратуры при конвертировании дизель - генератора с жидкого топлива на газ./ С.Н. Литвин, С.М. Доценко, А.Л. Григорьев, А.Н. Врублевский // Авиационно-космическая техника и технология. - Харьков: "ХАИ", 2000. - Вып. 19. - С. 64-69. *Здобувачем розроблена методика оптимального вибору параметрів модулятора.*

6. Теоретическое и экспериментальное исследование топливной аппаратуры газового дизель-генератора. / С.М. Доценко, А.Л. Григорьев, С.Н. Литвин, А.Н. Врублевский // 36. Наук, праць УДМТУ. - Миколаїв: УДМТУ, 2002. - № 7 (385). - С. 85-95. *Здобувачем виконані експериментальні дослідження.*

7. Перспективы дальнейшего снижения расхода дизельного топлива газодизельными двигателями. / С.Н. Литвин, С.М. Доценко, А.Л. Григорьев, А.Н. Врублевский // Авиационно-космическая техника и технология. - Харьков, 2002. — Вып. 30. - С. 11—14. *Здобувачем виконані експериментальні дослідження роботи паливної системи газодизеля з МІТ.*

АНОТАЦІЯ

Доценко СМ. Підвищення паливної економічності суднових газодизель-генераторів шляхом інтенсифікації впорскування запального палива. - Рукопис.

Дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.08.05 Суднові енергетичні установки.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2006.

Дисертація присвячена підвищенню паливної економічності суднових газодизель-генераторів за рахунок використання газоподібного та зниження запальної дози дизельного палива. Зменшення розміру запальної дози досягається шляхом інтенсифікації процесу впорскування палива. Для вирішення поставленої задачі в штатну паливну систему газодизеля вводиться додатковий елемент - модулятор імпульсів тиску. Також вносяться конструктивні зміни, які зменшують ефективний прохідний переріз соплових отворів форсунки. Наведено результати експлуатації газодизель-генераторів, у результаті яких встановлена принципова можливість ефективного зменшення розміру запальної дози дизельного палива при використанні МІТ до величини 3..5 %. При цьому витрата дизельного палива для газодизеля 6 ГЖЧН 26/34 знижується з 18 до 6 кг/год (з 10 до 3 %). Запропоновані зміни окупилися протягом 290 годин роботи та дозволяють без значних капітальних витрат конвертувати суднові дизельні двигуни в газодизельні, що значно підвищить паливну економічність, моторесурс та покращить екологічні показники двигуна.

Ключові слова: газодизельні двигуни, запальна доза, конвертація, модулятор імпульсів тиску.

АННОТАЦИЯ

Доценко СМ. Повышение топливной экономичности судовых газодизель-генераторов путем интенсификации впрыска запального топлива. -Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.05 Судовые энергетические установки.

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, 2006.

В диссертации рассмотрены вопросы повышения топливной экономичности судовых газодизель-генераторов за счет использования газообразного и уменьшения запальной дозы дизельного топлива.

В процессе эксплуатации СЭУ экономичность двигателя в большой мере зависит от цены используемого топлива. Учитывая экономические и экологические преимущества использования газообразного топлива, перспективным усматривается его применение и в СЭУ, В первую очередь для судов-метановозов, перевозящих сжиженные газы, которые в процессе транспортирования интенсивно испаряются, и подлежат утилизации. Эффективно является также использование топливного газа для речных судов и судов внутреннего плавания, которые имеют возможность бункероваться в портах через береговые газонаполнительные станции. При работе двигателя по газодизельному циклу затраты на топливо в значительной степени зависят от величины запальной дозы.

Одним из способов уменьшения запальной дозы дизельного топлива до уровня 3...5% является включение в топливную систему газодизеля - модулятора импульса давления (МИД), который устанавливается между топливным насосом высокого давления (ТНВД) и форсункой. При исполь-

зовании модулятора импульса давления в процессе топливоподачи возникает новая фаза предварительного разгона топлива в трубопроводе, во время которой часть топлива отводится в полость под плунжер модулятора. Аккумулированная таким образом кинетическая энергия приводит к резкому повышению давления в импульсе подачи, а в дальнейшем - такому же резкому понижению амплитуды этого же импульса. При использовании МИД решается задача обеспечения максимальной интенсивности впрыска при минимальной дозе топлива за счет следующих факторов:

- увеличения крутизны фронтов и амплитуды импульса подачи, которые повышают скорость перемещения иглы форсунки, вследствие чего она успевает выйти на верхний упор;
- отвода части топлива под плунжер модулятора, вызывающего увеличение активного хода плунжера ТНВД в 1,5...2,5 раза.

При проведении безмоторных испытаний определена зависимость цикловой подачи от активного хода плунжера ТНВД для топливной системы с МИД. Получена зависимость нелинейного характера, на которой имеется горизонтальный участок, что отвечает 3...5 % номинальной цикловой подачи топлива. Теоретически определено и экспериментально подтверждено, что на данном участке обеспечивается стабильная цикловая подача от цикла к циклу на всех ТНВД.

Проведены моторные и эксплуатационные испытания, которые подтверждают возможность снижения запальной дозы дизельного топлива до уровня 3...5 % от номинальной подачи при использовании модуляторов импульса давления. При этом величина запальной порции дизельного топлива уменьшилась с 18 до 6 кг/час (при комплектации топливной аппаратуры МИД и форсунками с распылителями $3 \times 0,3 \times 155^\circ$). Экспериментально определены экологические показатели судового газодизеля 6 ГЖЧН 26/34, которые при уменьшении запальной дозы дизельного топлива существенно улучшаются.

Предложена методика проектирования топливной системы газодизеля с МИД. Определены основные критерии проектирования и основные ограничения, которые гарантируют стабильную и надежную работу топливной системы на протяжении продолжительного времени. На основании полученных результатов делается вывод о целесообразности использования модулятора для данного типа газодизеля.

Предложенные мероприятия позволят при незначительных капиталовложениях конвертировать судовые дизельные двигатели в газодизельные, что значительно повысит топливную экономичность, моторесурс и экологические показатели двигателя.

Ключевые слова: газодизельные двигатели, запальная доза, модулятор импульса давления, конвертация.

ANNOTATION

S.M. Dotsenko. The beneficial effect of fuel consumption redundancy of gas-diesel generators by means of intensification of fuel charge injection. - Manuscript.

The thesis for maintaining the academic degree of candidate of technical sciences on speciality 05.08.05. Ship's energetic installation National University of Shipbuilding named after admiral Makarov, Mykolaiv, 2006.

The beneficial effect of fuel consumption redundancy of ship's gas-diesel generators by means of using gaseous fuel and reduction of fuel oil charge has been elaborated in the thesis. The reduction of fuel oil charge by means of intensification of fuel charge injection has been presented.

The additional element, impulse pressure modulator has been introduced into the permanent gas-fuel system for achieving this goal.

And also constructive changes which allow to reduce the effective entrance cross-section of nozzle has been offered. The results of gas-diesel maintenance has been showed which led to possibility of effective reduction of fuel oil charge when using IPM to 3...5%. The consumption of fuel oil for gas-diesel 6 GLFCS 26/34 is reduced from 18 kg to 6 kg (from 10 % to 3 %). These changes cover the expenses during 290 hours work, and allowed to convert the ship's diesel engines into gas-diesel without great investment costs that will considerably economize the fuel consumption, working resource and provide better environmental features of the engine.

Key words: gas-diesel engines, fuel charge, conversion, impulse pressure modulator.

Підписано до друку 25.04.06. Папір офсетний. Формат 60x84/16. Гарнітура "Тайме". Друк офсетний. Ум. друк. арк. 0,8. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. № 136.

Друкарня видавництва Національного університету
кораблебудування, 54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5