

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора Тимошевського Бориса Георгійовича
на дисертаційну роботу Стеценка Максима Сергійовича
"Підвищення надійності трубопроводів високого тиску паливної системи
суднового малообертового дизеля", яка представлена на здобуття наукового
ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю
05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

1. Загальна характеристика роботи

1.1. Надані матеріали. До розгляду матеріалів дисертаційної роботи було представлено:

- дисертаційна робота, яка була виконана в Національному університеті "Одеська морська академія" Міністерства освіти і науки України, загальним обсягом 214 стор., з яких 181 стор. - текст дисертації, включаючи список літературних джерел зі 145 найменувань, та додатки на 33 стор.;

- автореферат кандидатської дисертації загальним обсягом 22 сторінки;

- копії опублікованих праць за темою дисертації (перерахованих в авторефераті).

У результаті розгляду матеріалів дисертаційної роботи була сформульована її оцінка, зміст якої наведено нижче.

1.2. Оформлення дисертації відповідає вимогам ДСТУ 3008-95 "Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення". Назва дисертації відповідає обраній спеціальності та суті розв'язуваної задачі. У дисертації використовуються тільки особисто розроблені автором ідеї, технічні рішення та інші матеріали. На використані у рукопису матеріали і результати досліджень інших авторів зроблені посилання.

Зміст автореферату ідентичний змісту дисертації і дає повне уявлення про роботу. Вимоги до оформлення автореферату і його розсіпки витримані.

Тема дисертації, її об'єкт і предмет дослідження відповідають паспорту спеціальності 05.05.03 - двигуни та енергетичні установки як за формулою І спеціальності, так і за напрямком досліджень.

По формулі спеціальності (вибірково): «науково-технічні проблеми дослідження, проектування, конструювання, ... експлуатації та ремонту двигунів (зокрема ... дизельних ...), узгодження і оптимізацію процесів взаємодії компонентів у двигунах»

За напрямком досліджень (вибірково):

- фізичне та математичне моделювання, системний аналіз і синтез термодинамічних, гідродинамічних, газодинамічних, електродинамічних, електрохімічних та інших процесів в двигунах, енергоустановках та їх елементах;

- розробка, розрахункових та експериментальних методів визначення міцності, надійності та ресурсу двигунів та енергоустановок; їх ресурсне проектування;

- системи і агрегати двигунів та енергетичних установок. Методи їх проектування та дослідження.



1.3. Зміст дисертації

У **вступі** обґрунтована актуальність задачі, яка розв'язується у дисертаційній роботі, а також її зв'язок з державними науковими планами та програмами розвитку транспорту. Окреслено мету й завдання досліджень, їх наукова новизна та практичне значення. Наведені акти впровадження отриманих результатів, місце і результати апробації роботи, кількість публікацій за темою дисертації.

У **першій главі** здійснена оцінка аварійності суден торговельного флоту. Показано, що поряд з іншими, найбільша кількість аварійних випадків пов'язана з машинами та механізмами та більша їх частина припадає на головні двигуни. Також проаналізовані відмови дизельних двигунів, пов'язані з такими елементами, як циліндро-поршнева група, турбонаддувний агрегат, підшипники, паливна апаратура та інші. Показано, що до сьогодення найменш надійним елементом є форсунки, але спостерігається тенденція до зниження надійності паливних насосів високого тиску та паливних нагнітаючих трубопроводів. Встановлені чинники, які визначають несправності елементів паливної апаратури та окремо паливопроводів високого тиску.

У результаті був зроблений обґрунтований висновок про те, що серед інших машин та механізмів, головні дизельні двигуни є найменш надійними. Серед чинників, які викликають аварію двигунів, одним з важливих є відмова паливної апаратури за рахунок руйнування паливопроводів високого тиску. Зроблено припущення, що недостатня надійність цих паливопроводів пов'язана з хвильовими процесами, які мають місце у таких елементах.

Друга глава дисертаційної роботи присвячена вибору теми, визначенню мети та завдань дослідження, і обґрунтуванню методик проведення досліджень. У цьому розділі автор проаналізував протиріччя, які мають місце при встановленні надійності паливних систем високого тиску малообертових дизелів. Розроблена та наведена інформаційна структура основних несправностей паливної апаратури високого тиску малообертових дизелів. Показано, що одним з найменш надійних елементів є паливопроводи високого тиску, та визначені чинники, які викликають аварійні ситуації. Наведені також приклади руйнації паливопроводів, які виникли в експлуатаційних умовах на двигуні Sulzer RT-flex 96C. Звернено увагу на те, що до сьогодення розрахунки паливної апаратури базуються на уявленні, що важке паливо є ньютонівською рідиною. Це призводить до суттєвих похибок у визначенні міцності елементів паливної системи.

Базуючись на цих викладках, автор обґрунтовано вибрав тему, визначив об'єкт та предмет дослідження. Крім того автором були сформульовані та обґрунтовані мета та технологія дослідження. Наведена технологічна карта сприяє подальшому створенню структури та представленню результатів роботи.

Додатково у цьому розділі автор визначив та ґрунтовно проаналізував особливості реологічної поведінки високов'язких нафтопродуктів, що дозволило обґрунтовано визначити методики теоретичних та експериментальних досліджень хвильових процесів у паливопроводах високого тиску, а також вибрати вимірювальну апаратуру, яка дозволяє коректно провести ці дослідження.

Третя глава присвячена дослідженню пружних властивостей важкого палива. Автор визначив етапи досліджень та встановив, що оптимізація для про-

грамного забезпечення є обов'язковою при обчислюванні молекулярної динаміки.

Автор розглядає будову триклинної кристалічної решітки насичених парафінів, модель упаковки асфальтенів у об'ємі важкого палива, наводить матрицю пружності важкого палива, яка базується на сучасних поглядах на орієнтацію молекул такого палива у трубопроводах.

У результаті модельних досліджень були встановлені значення для модуля Юнга, модуля зсуву та коефіцієнта Пуассона у двох площинах кристалічних структур нормальних парафінів. При цьому було встановлено, що коефіцієнт Пуассона у деяких опитах мав негативне значення.

Автором отримані також коефіцієнти пружності важкого палива сорту RMK850 В результаті були отримані залежності для коефіцієнта пружності та визначена матриця пружності важкого палива. Крім того, була визначена матриця пружності важкого палива.

У **четвертій главі** роботи наведені результати теоретичного та експериментального дослідження вільних, вимушених і параметричних коливань паливопроводу високого тиску малообертового дизельного двигуна.

Автором розроблена оригінальна математична модель хвильового поля у важкому паливі, яке знаходиться у паливопроводі, що відповідає умовам, що мають місце у паливній апаратурі малообертових суднових дизельних двигунів. Розроблена математична модель дозволяє визначити форму та частоту, як поздовжніх, так й поперечних коливань паливопроводу горизонтальної та вертикальної поляризації. Сформульовані початкові та граничні умови, необхідні для реалізації цієї моделі на ЕОМ. Така модель є унікальною та має наукову та практичну цінність для дослідження та проектування паливної апаратури не тільки дизельних, але й двигунів інших типів.

Також виконані дослідження акустичного резонатора, яким у паливній системі дизеля є паливний насос. Крім теоретичних досліджень, автор наводить результати, які отримані на двигунах Sulzer серії RT-flex. Ці дані мають окрему наукову та практичну цінність оскільки отримані в натурних умовах у складі суднового пропульсивного комплексу.

Автор виконав математичне моделювання коливань у трубопроводі високого тиску малообертового дизельного двигуна. Проведені дослідження дозволили встановити власні частоти перших нижчих коливань, що дозволяє оцінити загрозу появи частотного резонансу та руйнуванню паливопроводу.

Проведене дослідження стійкості параметричного коливального руху паливопровода дозволило встановити, що параметричний резонанс має місце на часткових режимах роботи двигуна.

Окремо треба зазначити перевірку адекватності математичних моделей, яка показала задовільне узгодження результатів фізичного та математичного моделювання. Максимальна похибка моделювання не перевищувала 16%, що для моделювання зазначених процесів є достатньо добрим результатом и підтверджує адекватність математичного моделювання та надійність отриманих результатів. Однак автор підкреслює, що адекватність моделі хвильового поля не була встановлена внаслідок відсутності надійних експериментальних даних. Треба зазначити, що цей факт не є суттєвим в плані визначення міцності та на-

дійності пливопроводів високого тиску та не впливає на наукову та практичну цінність отриманих результатів.

У п'ятій главі автор виконує синтез механізму протидії резонансним явищам в трубопроводі високого тиску паливної системи малообертових дизелів. Доведено, що параметричний резонанс є найбільш небезпечним, та на стадії ескізного проектування обов'язково необхідно виконати перевірку всіх типових пливопроводів високого тиску на частотний та параметричний резонанси. Показано, що поряд з відомими засобами уникнення резонансу, наприклад, зміни маси пливопроводу, ефективним є розроблений та запатентований автором автоматизований пристрій для попередження розриву пливопроводу високого тиску шляхом демпфування критичної вібрації. Додатково рекомендовано уникати або скорочувати час роботи малообертового двигуна на часткових режимах, на яких можливе виникнення резонансу. Так, для дизеля Sulzer RT-flex 96с рекомендовано підтримувати частоту обертання колінчастого валу не нижче за $65...70 \text{ хв}^{-1}$, що відповідає інтервалу між впорскуванням менш, ніж $850...900 \text{ мс}$.

В цьому ж розділі сформульоване наукове положення, яке встановлює, що забезпечення надійності паливо проводу високого тиску може бути здійснено шляхом контролю за реологічними властивостями важкого палива та зміни маси коливальної системи.

Показано, що впровадження розроблених автором організаційно-технічних заходів та засобів забезпечення надійності пливопроводів високого тиску дозволить зменшити інтенсивність відмов елементів малообертового дизеля на $8,3 \%$.

У висновках по роботі в достатній мірі відображені результати основних досліджень дисертаційної роботи.

Список використаних джерел. Охоплює в достатньому обсязі різнобічні джерела інформації по тематиці роботи, в тому числі вітчизняні та зарубіжні.

2. Актуальність обраної теми.

Світовий досвід експлуатації комерційного флоту показує, що одним з чинників безаварійності судна є надійність пропульсивного комплексу, основним елементом якого є дизельний двигун. Паливна система такого двигуна є найбільш вразливою. Несправності в роботі цієї системи можуть викликати порушення режиму роботи двигуна та його зупинку, що особливо небезпечно у складних погодних умовах та може привести до загибелі судна.

Дисертаційна робота, що рецензується, спрямована на вирішення важливої народно-господарчої проблеми забезпечення безпеки судноплавства, тому її актуальність є безсумнівною. Актуальність роботи забезпечується також тим, що вона спрямована на реалізацію транспортної Стратегії України до 2020 року (Розпорядження Кабінету Міністрів України №2174-р від 20 жовтня 2010 року) та науково-дослідної роботи в Національному університеті "Одеська морська Академія" "Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології", № 0114Ш00346 ГР (2014-2017 рр.).

3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації.

Достовірність та обґрунтованість наукового положення, висновків та результатів підтверджується адекватністю математичних моделей, що базуються на фундаментальних залежностях хімотології, гідромеханіки, рівняннях збереження енергії, відповідністю реальним процесам, які відбуваються у паливній апаратурі мало обертових дизельних двигунів. Крім того, використання стандартних пакетів прикладних програм для обчислення процесів, які мають місце у паливній апаратурі, відомих процедур операцій з рівняннями, та задовільне узгодження експериментальних даних з даними моделювання також дозволяє вважати отримані автором результати обґрунтованими та достовірними.

Методи та методики

При дослідженнях здобувачем використовувалися сучасні методи: дедукції, системного аналізу та синтезу складних систем, статистики, факторного аналізу, дослідження операцій, теорії ймовірності, математичного моделювання та розрахунково-теоретичні методи, засновані на відомих підходах, які визнані здатними та ефективними для такого дослідження.

4. Наукова новизна результатів дисертаційної роботи

Робота має наукову новизну, яка полягає у тому, що руйнування трубопроводів паливної системи високого тиску МОД виникає унаслідок появи частотного та/або параметричного резонансів в системі «трубопровід – важке паливо», а підвищення надійності трубопроводів забезпечується механізмами протидії цим негативним явищам за рахунок зміни частоти власних коливань трубопроводу шляхом конструктивної зміни його маси, зменшення величини зсувів у важкому паливі шляхом підвищення його температури вище 130 °С і/або відведенні енергії з поверхні трубопроводу шляхом в'язкого тертя та теплообміну.

Вперше встановлено наступне:

– важке паливо як робоче тіло являє собою рідке дисперсійне середовище, що містить тверду фазу, пружні властивості якого характеризуються п'ятьма константами пружності, чисельні значення яких нелінійно зменшуються з підвищенням температури палива, унаслідок чого при досягненні температури 130 °С і вище зсувні деформації стають некритичними;

– руйнування трубопроводів високого тиску паливної системи МОД викликане повторюваними явищами частотного резонансу радіальних коливань унаслідок утворення поперечних хвиль у важкому паливі та/або параметричного резонансу просторових згинальних коливань при зниженні частоти обертання дизеля нижче 70-65 хв⁻¹;

– амплітуда і частота коливань елементів системи «трубопровід – важке паливо» залежать:

- власні коливання трубопроводу – від констант пружності c_{12} і c_{44} , лінійних розмірів, погонної маси та інтенсивності штучного відбору енергії в оточуюче середовище;

- вимушені коливання трубопроводу прямо пропорційні коливанням у важкому паливі та інтенсивності штучного відбору енергії в оточуюче середовище;

- власні коливання об'єму важкого палива – від констант пружності c_{11} , c_{13} , c_{33} , c_{44} і c_{66} , лінійних розмірів прохідного перетину трубопроводу;

- вимушені коливання об'єму важкого палива – від режиму роботи дизеля, лінійних розмірів камери стиснення паливного насосу високого тиску і прохідного перетину під'єднаних трубопроводів;

- протидія негативним резонансним явищам забезпечується комплексним впливом на властивості робочого тіла, інерційні властивості трубопроводу та/або інтенсифікацією відводу надлишкової енергії.

Отримали подальший розвиток:

- експериментально-аналітичні методи визначення констант пружності важкого палива;

- методи контролю трансверсально-ізотропних властивостей важкого палива перед його подачею до паливного насосу високого тиску;

- методи визначення характеристик хвильового поля у паливопроводах суднових дизелів із використанням моделей, сформованих на основі узагальненого закону Гука.

Практична цінність отриманих наукових результатів полягає у тому, що запропоновані автором практичні рекомендації щодо запобігання вібрації паливопроводів високого тиску мало обертових дизелів знайшли впровадження у судноплавних компаніях шляхом доповнення правил технічної експлуатації головних суднових малообертових двигунів, а також в тому, що розроблений та запатентований активний демпфуючий пристрій може бути застосований на зазначених двигунах для уникнення резонансу.

Результати дисертаційної роботи можуть бути корисні при проектуванні суднових дизельних енергетичних установок та модернізації тих, які вже знаходяться в експлуатації, що дозволить отримати певний економічний та соціальний ефект.

Впровадження результатів дослідження у навчальний процес та виконання науково-дослідних робіт у Національному університеті "Одеська морська академія" також підкреслює практичне значення цієї роботи.

Слід зауважити, що результати роботи можуть бути розповсюджені на широкий клас стаціонарних малообертових дизельних двигунів різного призначення.

Однак дисертаційна робота є вільною від зауважень, до яких слід віднести наступні.

1. У першій главі забагато уваги приділено конструктивним особливостям та аналізу причин відмов елементів, які напряму не пов'язані з паливною апаратурою двигуна, що призвело до суттєвого збільшення обсягу цієї глави.

2. Незважаючи на важливість наведеної інформації у главі 2, її обсяг суттєво перевантажений, а висновки носять загальний характер.

3. Також у главі 2 здобувач використовує системний підхід, розробляючи технологію дослідження, але під час написання подальших глав відхиляється від принципів системності, приділяючи основну увагу трубопроводу високого тиску, і меншим чином – пов'язаним з ним функціонально паливному насосу високого тиску та форсунці.

4. У ході викладення загальної методики дослідження здійснено занадто розширений аналіз фізико-хімічних властивостей важких нафтопродуктів та їх складових.

5. Список літературних джерел містить декілька застарілих видань.

6. У третій главі формулою (3.28) здобувач представляє молекулярний склад важкого палива, що справляє враження занадто спрощеного для важкого нафтопродукту.

7. У третій главі дисертації на рис. 3.14 і 3.15, що описують залежність коефіцієнтів пружності важкого палива від температури, здобувач не наділяє уваги поясненню причини, чому ця залежність зворотно пропорційна.

8. Автор не наводить фізичної сутності та аналізу даних про те, що коефіцієнт Пуассона у деяких опитах мав негативне значення. Вірогідно ці результати є помилковими або потребують об'єктивних доказів.

9. Незрозуміло, яким чином під час експлуатації суднових малооборотних дизелів стримується амплітуда коливань трубопроводу високого тиску, значення якої для другої коливальної моди, згідно рис. 4.5, може сягати 22 мм.

10. З аналізу коливань паливних труб високого тиску судового дизеля, осцилограми яких представлені на рис. 4.9-4.18, важко судити про кількісне значення амплітуди зміщень.

11. У п'ятій главі дисертації здобувач наводить розрахунок конструктивних параметрів трубопроводів, які позбавлені явища небезпечного резонансу, але не надає відомостей про їх експериментальне підтвердження.

12. Для наведеного у п'ятій главі дисертації активного демпфера критичної вібрації відсутні математичні розрахунки.

13. У висновках по главам дисертації не зазначено рівень їх апробації у публікаціях здобувача.

14. Висновки по розділах мають риси опису та містять обмежену кількість кількісних показників. У тексті дисертації зустрічається багато тривіальних висновків та інших пасажів загального характеру, які можна було би видалити без збитку для наукового та практичного значення роботи. Це також стосується й загальних висновків по роботі в цілому.

15. В роботі немає інформації про технологію впровадження результатів, хоча у додатках наводяться відповідні акти.

Слід зауважити, що зазначені зауваження не носять принципового характеру та ні в якій мірі не знижують актуальності роботи, наукової та практичної цінності отриманих результатів та рекомендацій.

Загальні висновки по роботі

В результаті вивчення поданих Стеценком М. С. дисертаційної роботи, автореферату та наукових праць сформульовано наступний висновок.

Дисертація Стеценко М. С. "Підвищення надійності трубопроводів високого тиску паливної системи судового малооборотного дизеля", яка представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки, є самостійною, завершеною науково-дослідною роботою, в якій отримані нові, теоретично обґрунтовані та експериментально підтверджені результати, які в сукупності розв'язують конкретну науково-прикладну задачу, спрямовану на підвищення ефективності та на-

високого тиску паливної системи суднового малообертового дизеля", яка представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки, є самостійною, завершеною науково-дослідною роботою, в якій отримані нові, теоретично обґрунтовані та експериментально підтверджені результати, які в сукупності розв'язують конкретну науково-прикладну задачу, спрямовану на підвищення ефективності та надійності дизельних двигунів суднових енергетичних установок.

Автореферат відповідає змісту дисертаційної роботи та відображає її основні результати, а також є ідентичним дисертації.

Робота відповідає паспорту спеціальності 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки, відповідає документам ДАК МОНУ "Порядок присудження наукових ступенів и присвоєння вчених звання", "Основним вимогам до дисертацій та авторефератів дисертацій", які пред'являються до кандидатських дисертацій та напрямками досліджень, позначених в цьому паспорті.

Дисертаційна робота містить всі необхідні кваліфікаційні ознаки, що пред'являються до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, а її автор, **СТЕЦЕНКО Максим Сергійович**, безумовно, заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук.

Офіційний опонент,
завідуючий кафедрою
двигунів внутрішнього згоряння
Національного університету кораблебудування
ім. адм. Макарова, д-р техн. наук, професор

Б. Г. Тимошевський

Підпис завідувача кафедри "Двигуни внутрішнього згоряння" Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, д-ра техн. наук, професора Тимошевського Б.Г. засвідчую:

Проректор з наукової роботи
Національного університету кораблебудування
ім. адм. Макарова, д-р техн. наук, професор

В. С. Блінцов

