

ВІДГУК

офіційного опонента

кандидата технічних наук, доцента Білоусова Євгена Вікторовича
на дисертаційну роботу «Підвищення надійності трубопроводів високого тиску
паливної системи суднового малообертового дизеля»,
що представлена Стеценком Максимом Сергійовичем
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю
05.05.03 - двигуни та енергетичні установки

1. Загальна характеристика дисертації і автореферату

Відгук складений на основі вивчення наступних матеріалів: представленого рукопису дисертації, автореферату та опублікованих за темою дисертації наукових робіт автора.

У результаті розгляду зазначених матеріалів сформульована наступна оцінка дисертаційної роботи.

Дисертація виконана у Національному університеті «Одеської морська академія» (НУ «ОМА») Міністерства освіти і науки України. Основний текст викладено російською мовою.

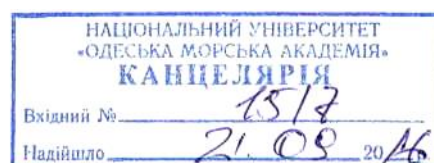
Дисертація складається зі вступу, 5 глав, висновків, списку літератури зі 145 найменувань та 9 додатків. Повний обсяг роботи становить 214 стор., з яких 181 стор. текст дисертації, рисунки на 56 стор., таблиці на 15 стор. і додатки на 33 стор.

Автореферат написаний державною мовою, містить необхідну вихідну інформацію, основний текст і короткі анотації українською і російською мовами та розширену англійською мовою.

Зміст автореферату відповідає змісту дисертації і дає достатнє уявлення про її структуру та розроблених в ній положень. Його обсяг і дата розсилки відповідають пропонованим до нього вимогам.

2. Актуальність роботи

На сьогоднішній день більше ніж 50% суден торгового флоту оснащені малообертовими поршневыми двигунами внутрішнього згорання, що працюють на високов'язких (важких) сортах палива. Надійність роботи цих двигунів на часткових навантаженнях різко знижується з причини руйнування трубопроводів високого тиску паливної системи (ПС). Важливість боротьби з руйнуванням трубопроводів та



вимог ІМО (правило II-2/4 Конвенції СОЛАС). В даний час відомий ряд конструктивних рішень, спрямованих на захист від поширення палива в простір машинного відділення, проте саме явище розриву вони не запобігають.

З огляду на маловивченість проблеми розривів трубопроводів високого тиску та постійну загрозу безпеки як суден, так і їх екіпажів, дослідження, спрямоване на її розв'язання, є актуальним.

3. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами

Робота спрямована на реалізацію Транспортної стратегії України до 2020 року (розпорядження Кабінету Міністрів України №2174-р від 20 жовтня 2010 року) і виконувалась в рамках НДР в НУ «ОМА» «Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології», ДР № 0114U000346 (2014-2017 рр.). Автор виконав дослідження експлуатаційної надійності паливної апаратури високого тиску дизелів, результати якого увійшли у звіт про НДР у вигляді окремого розділу.

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

Достовірність і обґрунтованість наукових положень, висновків і результатів обумовлена адекватністю математичних моделей, що базуються на фундаментальних положеннях, перевірених інженерною практикою на відповідність реальним процесам, що підтверджується стандартними процедурами перевірки результатів досліджень на всіх етапах і задовільною збіжністю теоретичних і емпіричних результатів.

При проведенні роботи використовувалися наступні **методи** дослідження: інформаційного пошуку, експертного оцінювання, системного аналізу, математичного і фізичного моделювання, кінцевих елементів, натурних експериментів, навантажувального резервування, зменшення кількості відмов, теорії розв'язання винахідницьких завдань та ін.

5. Новизна наукового положення і результатів дисертаційного дослідження

В ході виконання дисертаційної роботи здобувачем проведено значний обсяг теоретичних і експериментальних досліджень, завдяки чому були отримані нові наукові результати та сформульоване *наукове положення*, згідно з яким руйну-

вання 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..

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що вперше встановлено:

1. 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;

2. 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;

3. 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 насоса високого тиску і прохідного перетину під'єднаних трубопроводів;

4. 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.

6.Оцінка змісту дисертації

У **вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми, визначені об'єкт і предмет дослідження, поставлені мета, головне та допоміжні завдання дисертаційної роботи, охарактеризовано використані методи дослідження, наведені наукова новизна і практична цінність результатів роботи, а також відомості про публічну апробацію з вказанням особистого внеску здобувача.

У **першій главі** виконано інформаційний пошук щодо сучасного стану рівня надійності технічних засобів у суднопластві. Показано, що протягом багатьох років по причині відмов машин і механізмів відбувається близько половини всіх аварій у морі. Більша частина цих аварій пов'язана з несправностями елементів головного двигуна.

Оцінюючи інтенсивність відмов елементів малообертового двигуна, автор виділяє п'ять найменш надійних з них: турбокомпресор, циліндро-поршневу групу, шийки і підшипники валу, паливну апаратура та антаблемент. Особливу увагу привертає низька надійність паливної апаратури, оскільки інтенсивність відмов цього елементу тільки зростає з роками. Однією з причин цьому є невирішена протягом багатьох десятиліть проблема розриву паливних труб високого тиску. Це явище представляє собою значну небезпеку для суднопластва і вказує на існування нерозв'язаних наукових завдань.

Загальний обсяг огляду літературних джерел в дисертації не перевищує 20% від обсягу основної частини

У **другій главі** здійснено вибір теми, постановку мети та завдань дослідження. Тема дослідження вибрана методом експертного оцінювання за п'ятьма факторами: актуальність, відповідність паспорту спеціальності, наукова новизна, можливість реалізації та економічна ефективність.

Розроблена технологічна схема дослідження, яка містить формулювання ро-

бочої гіпотези, головного та допоміжних наукових завдань, основні наукові результати, наукову значимість і практичну цінність результатів роботи та синтезоване наукове положення.

Обрано та охарактеризовано методи розв'язання допоміжних і головного завдань, наведено методику експериментальних досліджень. Обґрунтовано вибір методів дослідження, вказуючи на переваги, що дає їх використання, та наводяться очікувані наукові результати розв'язання допоміжних завдань.

Третя глава присвячена розв'язанню першого допоміжного завдання: дослідження пружних властивостей важкого палива. Розв'язуючи перше завдання, було встановлено, що пружність важкого палива характеризується п'ятьма незалежними пружними сталими і описується рівняннями узагальненого закону Гука.

Шляхом моделювання за методом молекулярної динаміки та вимірювальних експериментів були отримані чисельні значення матриці пружності важкого палива при заданій температурі.

Матриця пружності важкого палива є науковим результатом розв'язання першого допоміжного завдання. Її значення справедливі для важкого палива, що заповнює тіло циліндричної форми у діапазоні температур експлуатації паливних систем дизелів (130...145°C).

Четверта глава містить результати розв'язання третього і другого допоміжних завдань, які полягали у теоретичному та експериментальному дослідженні вільних, вимушених і параметричних коливань паливопроводу високого тиску мало-обертowego дизеля.

Дослідження хвильового поля в трубопроводі автор проводив шляхом розробки математичної моделі з подальшим чисельним моделюванням, використовуючи метод кінцевих елементів. У результаті були встановлені умови виникнення частотного резонансу коливань в трубопроводі, що заповнений важким паливом.

Науковим результатом знайденого розв'язку другого допоміжного завдання є отримані власні частоти для перших трьох коливальних мод незаповненого та заповненого важким паливом трубопроводу, та встановлений факт того, що амплітуда зміщень незаповненого трубопроводу на порядок менша, ніж заповненого важким паливом.

Дослідження параметричних коливань було здійснене як шляхом математичного моделювання, так і натурних експериментів на робочому дизелі Sulzer14RT-flex 96C. Математичне пояснення механізму появи параметричного резонансу було отримане за допомогою методу Матьє-Хілла, що дозволило визначити ті конс-

труктивні параметри і фізичні властивості трубопроводу, від яких залежить поява цього негативного явища.

Науковим результатом розв'язку третього допоміжного завдання є встановлення появи параметричного резонансу на першій коливальній моді з частотою 25 Гц при зменшенні частоти упорскування палива в той момент, коли дію збурюючої сили починають виконувати власні коливання у паливі, а не імпульси тиску від паливного насоса високого тиску.

У **п'ятій главі** знаходиться розв'язок головного завдання дисертаційного дослідження – синтез механізму протидії резонансним явищам в трубопроводі високого тиску дизеля.

Автор розробив техніко-експлуатаційні вимоги до процедури проектування та технічної діагностики паливної системи високого тиску малооборотового дизеля, ключовим пунктом яких є вимога до проектної організації щодо перевірки паливопроводів на частотний і параметричний резонанси та введення за необхідності навантажувального резервування, розділення магістралі на декілька ділянок меншої довжини, використання новітніх матеріалів та інші.

З метою підвищення надійності паливних систем високого тиску МОД без виводу їх з експлуатації були розроблені процедура безпечного управління малооборотовим дизелем на часткових режимах роботи, автоматизований пристрій запобігання розривів паливопроводів високого тиску малооборотових дизелів та активний демпфер критичної вібрації.

Виконана кількісна оцінка ефективності впровадження синтезованих технічних засобів та організаційних заходів підвищення надійності трубопроводів високого тиску за результатами якої встановлено, що інтенсивність відмов елементів малооборотового двигуна зменшиться на 8,3 %.

7. Наукова значимість і практична цінність дисертації

Наукову значимість дисертаційної роботи представляє собою аналітичний опис явища розриву трубопроводу унаслідок частотного і параметричного резонансів і механізму протидії їм.

Розроблені технічні засоби і організаційні заходи запобігання появі або придушення резонансу в трубопроводах високого тиску паливної системи малооборотового дизеля представляють собою практичну цінність роботи.

8. Повнота викладу основних результатів дисертаційного дослідження

Дисертаційне дослідження містить теоретичне узагальнення і новий розв'язок актуального науково-практичного завдання підвищення надійності трубопроводів паливної системи високого тиску малообертового дизеля.

Основні положення та наукові результати роботи відображені у 11 публікаціях, зокрема 3 наукових статтях, які опубліковані у виданнях, що входять до переліку МОН України для публікацій результатів дисертаційних досліджень, 2 наукових статтях у зарубіжних виданнях, 7 матеріалах конференцій. Отримано 1 свідоцтво про видачу патенту на корисну модель.

Оформлення дисертації в цілому відповідає вимогам МОН України і ДСТУ 3008-95 «Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення».

Зміст автореферату ідентичний змісту дисертації і повністю відповідає основним положенням дисертації.

9. Зауваження по дисертації здобувача

В процесі розгляду дисертації відзначені наступні її недоліки.

1. Висвітлюючи факти низької надійності елементів паливної апаратури дизеля у першій главі дисертації та загальну методику дослідження у другій главі, здобувач подекуди бракує лаконічності, що призводить до перенавантаження тексту другорядними подробицями.

2. Занадто категоричним є ствердження автора відносно недослідженості явища розриву паливних трубок високого тиску в процесі паливоподачі (стор. 43), що зазначено як визначальний фактор наукової новизни.

3. В акумуляторних системах впрыскування, якими обладнується розглянутий у роботі двигун типу Sulzer RT-flex, механізм утворення хвильових процесів буде суттєво відрізнятися від систем об'ємної дії, але цим відмінностям у дисертації не приділено достатньої уваги.

4. Здобувач успішно виконав експериментальне визначення двох із п'яти коефіцієнтів пружності важкого палива ультразвуковим методом, а решту отримав шляхом моделювання. Незрозуміло, що завадило використати ультразвуковий метод для визначення всіх коефіцієнтів.

5. Визначаючи похибку математичного моделювання пружних властивостей важкого палива у третій главі, здобувач використовує експериментальні дані інших дослідників для важкої нафти, що не є коректним, оскільки нафта та продук-

ти її переробки можуть мати істотні відмінності у хімічному складі та фізичних властивостях.

6. У четвертій главі наведено аналітичний розв'язок системи рівнянь математичної моделі хвильового поля у трубопроводі для компонентів векторів зміщень та напруг, які представлені системами рівнянь (4.28) і (4.29), відповідно. Використані при цьому звичайні та модифіковані функції Бесселя не сприяють якісному сприйняттю фізичного сенсу рівнянь. У цьому випадку було б доцільно замінити згадані функції їх асимптотичними виразами.

7. З тексту дисертації не зрозуміло, яким чином на хвильове поле у трубопроводі акумуляторної системи вприскування впливає об'ємна витрата палива, що має місце після підйому клапану блоку керування вприскуванням палива та голки форсунки.

8. У дисертації запропоновано виконувати визначення стійкості параметричних коливань трубопроводу високого тиску паливної системи, використовуючи діаграму стійкості Айнса-Стретта та обчислені за методом Матьє-Хілла параметри стійкості для кожного режиму роботи дизеля. Доцільніше було б побудувати діаграму дозволених областей експлуатації трубопроводу, використовуючи той же метод.

9. Для підвищення надійності трубопроводів високого тиску автором, зокрема, розроблені автоматизований пристрій запобігання розриву паливопроводів та активний демпфер критичної вібрації, однак при цьому не враховані показники надійності цих пристроїв у порівнянні з аналогічними показниками трубопроводів.

10. У тексті дисертації є деякі відхилення від вимогам ДСТУ 3008-95 (використання несистемних одиниць: об/хв, замість 1/хв. (хв⁻¹); перенесення позначення фізичної величини з відривом від її чисельного значення; та ін.)

10. Загальна оцінка дисертації

Аналіз матеріалів дисертації, автореферату, а також публікацій по темі роботи дозволяє зробити наступні висновки.

Дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.05.03 –двигуни та енергетичні установки, як за формулою спеціальності, так і за напрямком дослідження.

Дисертація Стеценка М. С. є завершеною кваліфікаційною науковою працею, яка містить в собі отримані автором нові науково-обґрунтовані результати в галузі двигунів і енергетичних установок, які в сукупності вирішують конкретну важ-

