

Міністерство освіти і науки України  
(МОН України)

Національний університет «Одеська морська академія»  
(НУ «ОМА»)

СТЕЦЕНКО МАКСИМ СЕРГІЙОВИЧ



УДК 621.431.74-185.3+621.43.032.8:534.283

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТРУБОПРОВОДІВ ВИСОКОГО ТИСКУ  
ПАЛИВНОЇ СИСТЕМИ СУДНОВОГО МАЛООБЕРТОВОГО ДИЗЕЛЯ

05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті «Одеська морська академія» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, доцент  
**Логішев Ігор Віссаріонович,**  
Національний університет «Одеська морська академія»,  
доцент кафедри технічної експлуатації флоту.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Тимошевський Борис Георгійович,**  
Національний університет кораблебудування  
ім. адмірала Макарова,  
завідувач кафедри двигунів внутрішнього згоряння;

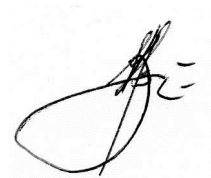
кандидат технічних наук, доцент  
**Білоусов Євген Вікторович,**  
Херсонська державна морська академія,  
декан факультету суднової енергетики.

Захист відбудеться 6 жовтня 2016 р. о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.106.01 у Національному університеті «Одеська морська академія» за адресою: вул. Дідріхсона, 8, корпус 1, зал засідань вченої ради, м. Одеса, 65029.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету «Одеська морська академія» за адресою: вул. Дідріхсона, 8, корпус 2, м. Одеса, 65029 та за електронною адресою: [http://onma.edu.ua/index.php?quater\\_ua](http://onma.edu.ua/index.php?quater_ua).

Автореферат розісланий 6 вересня 2016 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
д.т.н., професор



В. В. Нікольський

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** 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 його наслідками підтверджується практичними діями у вигляді конвенційних вимог Міжнародної морської організації (правило П-2/4 конвенції з охорони людського життя на морі – СОЛАС). На даний час відомий ряд конструктивних рішень, спрямованих на захист від розповсюдження палива в простір машинного відділення, але безпосередньо розрив трубопроводу вони не запобігають.

З огляду на маловивченість проблеми розриву трубопроводів високого тиску та постійну загрозу безпеки суден дослідження, спрямоване на її розв'язання, є актуальним.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами.** Робота спрямована на реалізацію Транспортної стратегії України до 2020 року (розпорядження Кабінету Міністрів України №2174-р від 20 жовтня 2010 року) і виконувалась у рамках НДР в НУ «ОМА» «Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології», ДР № 0114U000346 (2014-2017 рр.). У звіті про НДР автору належить окремий розділ: «Підвищення експлуатаційної надійності паливної апаратури (ПА) високого тиску суднового малообертового дизеля (МОД)».

**Мета та завдання дослідження.** Метою дисертаційного дослідження є збереження та/або підвищення надійності трубопроводів високого тиску шляхом зменшення експлуатаційного навантаження під час роботи паливної системи суднового МОД.

**Робочою гіпотезою** є теза про існування механізму протидії явищу розриву трубопроводів високого тиску.

**Головне завдання** дисертаційної роботи полягає у встановленні причини розриву трубопроводів високого тиску паливної системи МОД та створенні механізму протидії цьому негативному явищу. Для його розв'язання необхідно було виконати три допоміжні завдання: дослідження

- пружних властивостей важкого палива (ВП);
- хвильових процесів в трубопроводі високого тиску МОД;
- параметричних згинальних коливань трубопроводу.

**Об'єкт дослідження** – процес подачі важких сортів палива у циліндри МОД.

**Предмет дослідження** – параметри надійності трубопроводів високого тиску.

**Методи дослідження**, які використані у роботі:

- дедукції – в ході інформаційного пошуку;
- експертного оцінювання – в ході вибору теми дисертації;
- системного аналізу – під час розробки технології дослідження;
- непрямого вимірювання, Мартина-Тобіаса-Клейна і силового поля DREIDING – в ході чисельного визначення параметрів пружності важкого палива;

- фізичного і математичного моделювання та кінцевих елементів – при визначенні характеристик хвильового поля трубопроводу;
- Мат'є-Хілла – при дослідженні стійкості згинальних коливань трубопроводу;
- натурних експериментів – в ході дослідження коливань трубопроводів високого тиску паливної системи МОД в умовах експлуатації;
- навантажувального резервування, зменшення кількості відмов і теорії розв'язання винахідницьких завдань та синтезу – при розробці засобів підвищення надійності паливної системи високого тиску МОД.

**Наукова новизна** одержаних результатів 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<sup>-1</sup>;
- 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 (ПНВТ) 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 ПНВТ;
- методи визначення характеристик хвильового поля у паливопроводах суднових дизелів із використанням моделей, сформованих на основі узагальненого закону Гука.

**Практична цінність** одержаних результатів полягає у розробленій технології створення механізмів протидії негативному явищу розриву трубопроводів високого тиску, що забезпечує збереження працездатності паливної системи МОД та підвищення надійності її трубопроводів шляхом впровадження наступних організаційно-технічних засобів та заходів:

- техніко-експлуатаційних вимог до проектування паливних систем високого тиску МОД відносно надійності трубопроводів;
- процедури безпечного управління дизелем на часткових режимах роботи;
- автоматизованого пристрою запобігання розриву паливопроводів високого тиску;
- активного демпфера критичної вібрації паливопроводів високого тиску дизеля;
- технічних засобів виміру пружних сталих важкого палива і дослідження хвильового поля паливної системи високого тиску МОД;

Результати дисертаційної роботи впроваджені та використовуються в наступних організаціях:

- судноплавній компанії СМА CGM (акт від 27.08.2014), яка запровадила додаткові рекомендації з технічної експлуатації суднових головних двигунів;
- НУ «ОМА» – у навчальному процесі при виконанні практичних робіт з дисциплін оптимізація режимів роботи суднових енергетичних установок і технічна експлуатація суднових енергетичних установок (акт від 24.02.2016);
- НУ «ОМА» – в НДР «Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології» (акт від 17.02.2016).

**Особистий внесок здобувача.** Всі наукові результати, представлені в дисертаційному дослідженні та опубліковані в роботах [1-3, 5, 6, 8, 9, 11], отримані автором самостійно. У наукових роботах, виконаних у співавторстві, здобувачеві належить наступне: [4] – теоретичне обґрунтування існування просторового хвильового поля у паливопроводі високого тиску малообертового дизеля; [7] – проведення експериментального дослідження паливного насоса високого тиску як акустичного резонатора шляхом фізичного моделювання та аналіз результатів; [10] – проведення експериментального дослідження коливань паливопроводу високого тиску дизеля шляхом фізичного моделювання та аналіз результатів; [12] – розробка методики експериментального дослідження пружних властивостей важкого палива та отримання чисельних результатів; [13] – розробка науково обґрунтованої стратегії технічної експлуатації паливної системи високого тиску дизеля.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та отримали позитивні відгуки на шести науково-технічних конференціях: Міжнародній науково-технічній конференції «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт», м. Одеса, ОНМА, 24-25 березня 2015 р.; V Міжнародній науково-технічній конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми», м. Миколаїв, НУК, 10-11

листопада 2011 р.; IV Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні проблеми двигунобудування. Стан, ідеї, рішення», м. Первомайськ, ППІ НУК, 18-19 травня 2011 р.; Науково-технічній конференції «Енергетика судна: експлуатація та ремонт», м. Одеса, ОНМА, 30 листопада – 1 грудня 2010 р., 5-7 квітня 2011 р. та 26-28 березня 2014 р.

**Публікації.** Основні положення та наукові результати роботи відображені у 11 публікаціях, зокрема 5 наукових статтях, 3 з яких опубліковані у виданнях, що входять до переліку МОН України для публікацій результатів дисертаційних досліджень, і 2 опубліковані у закордонних виданнях, 7 матеріалах конференцій. Отримано 1 свідоцтво про видачу патенту на корисну модель.

**Структура роботи.** Робота складається зі вступу, п'яти глав, висновків, списку використаної літератури із 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.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** визначено актуальність теми дисертаційного дослідження, сформульовані мета і завдання дослідження, відображені наукова новизна, практичне значення отриманих результатів та інформація про їх апробацію.

Зміст **першої глави** присвячено інформаційному пошуку щодо сучасного стану рівня надійності технічних засобів морських суден. Оцінка аварійності суден торговельного флоту показала, що протягом трьох десятиріч (за даними страхових компаній) по причині відмов машин і механізмів відбувається близько половини всіх аварій у морі. Було виявлено, що за останні десять років кількість відмов елементів головного двигуна в два рази перевищує кількість відмов як допоміжних двигунів, так і рульових машин, та механізмів.

Вивчення статистики відмов елементів головного двигуна показала, що найбільшу інтенсивність відмов мають турбокомпресор, циліндро-поршнева група, шийки валу і підшипники валу, паливна апаратура та антаблемент і анкерні болти. Серед них особливу увагу привертають несправності ПА, оскільки їх кількість з часом тільки зростає, незважаючи на розвиток науково-технічного потенціалу світового двигунобудування.

Зниження надійності паливної системи малообертового дизеля (ПС МОД) констатують також вчені-дослідники. Зокрема, В. Г. Івановський, Ю. Я. Фомін та інші відзначають, що «до теперішнього часу паливна апаратура високого тиску судових дизелів залишається найбільш уразливим в експлуатаційному відношенні вузлом дизеля: більшість вимушених зупинок суден у морі відбувається через несправності в ПА. Для головних малообертових дизелів за 10000 годин експлуатації число вимушених зупинок становить 22–26%».

Огляд літератури, присвяченій впливу сучасних тенденцій в двигунобудуванні на принципи функціонування ПА, що представлений роботами І. В. Возницького, Є. В. Білоусова, В. Г. Івановського, Ю. А. Пахомова, Е. М. Половинки, С. А. Ханмамедова та інших, дозволив установити, що більше половини всіх несправностей ПА пов'язана з роботою сучасних дизелів на важких сортах палива. Складний склад і дисперсна структура важких палив призводить до таких

дефектів, як заїдання плунжера паливного насосу високого тиску, руйнування посадкових поверхонь його клапанів, ерозійне руйнування, поперечні розриви паливопроводів, прихоплювання і зависання голки розпилювача форсунок, закоксовування та зношування їх соплових отворів, а також погіршення якості розпилювання палива.

У **другій главі** здійснено вибір теми, постановку мети та задач дослідження і викладено загальну методику дослідження. Серед розглянутих у першій главі несправностей ПА особливу увагу привернули поперечні розриви трубопроводів високого тиску, оскільки це явище створює наступне технічне протиріччя: вдосконалення технології виготовлення трубопроводів високого тиску не усуває ймовірність появи поперечних тріщин. Виявлене протиріччя вказує на потенційно важливу науково-практичну проблему, що потребує розв'язання.

Вибір напрямку дослідження було здійснено із використанням методу експертного оцінювання за п'ятьма факторами: актуальність, наукова новизна, економічна ефективність, відповідність спеціальності і можливість реалізації. За результатами вибору найбільшу кількість балів отримала паливна апаратура дизеля. Остаточний вибір теми дослідження був зроблений з урахуванням виявленого протиріччя та факторів експертного оцінювання.

Актуальність теми обумовлена руйнуванням трубопроводів та його наслідками для безпеки суден та їх екіпажів. На даний час відомий ряд конструктивних рішень, спрямованих на захист від розповсюдження палива в простір машинного відділення: правило з конвенції СОЛАС, згідно якого усі паливопроводи високого тиску дизелів розміщуються усередині закритої системи трубопроводів, та пристрої у вигляді гідравлічних і механічних демпферів. Однак безпосередньо руйнування трубопроводів вони не запобігають.

Тема роботи відповідає напрямкам Транспортної стратегії України до 2020 року, тематиці науково-дослідної роботи НУ «ОМА» та паспорту спеціальності 05.05.03. Економічна ефективність і можливість реалізації обумовлені використанням у ході дослідження математичного і фізичного моделювання, що значно спрощує дослідницьку роботу.

Виконавши поглиблений аналіз фотознімків несправних трубопроводів, було звернено увагу на те, що у більшості випадків руйнування паливопроводу високого тиску виникає у поперечній площині (рис. 1). Оскільки на сьогоднішній час у літературних джерелах відсутній науково обґрунтований опис механізму утворення поперечних тріщин паливопроводів високого тиску МОД, це визначає очікувану наукову новизну дослідження.

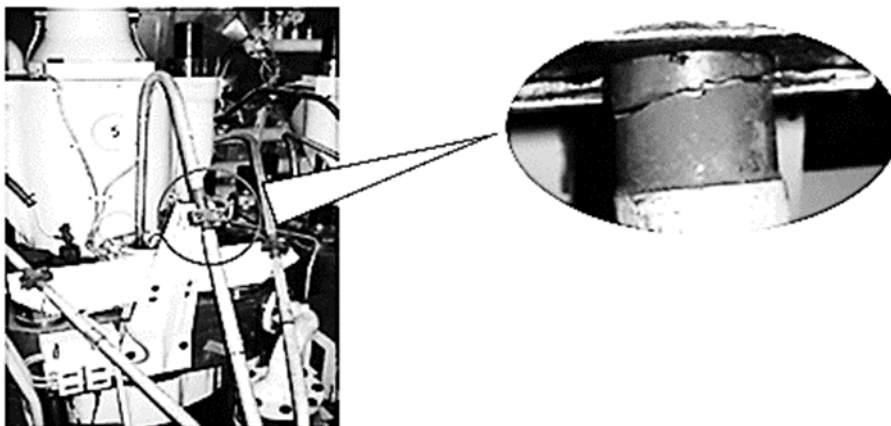


Рис. 1. Поперечна тріщина труби високого тиску МОД Sulzer RT-flex 96C

Відповідно до теми дослідження його мета полягає у збереженні та/або підвищенні надійності трубопроводів високого тиску шляхом зменшення експлуатаційного навантаження під час роботи паливної системи суднового малооборотового дизеля.

Враховуючи маловивчені хвильові явища у паливній системі МОД, інформація про наявність і негативні прояви яких неодноразово доповідались у роботах провідних вчених, було припущено, що поперечні тріщини утворюються у результаті резонансу механічних коливань. Використавши метод аналогії, було запропоновано представляти паливний насос високого тиску, як акустичний резонатор, а паливопровід – як хвилевід.

Оскільки сучасна теорія коливань і протидії резонансним явищам значно розвинена, робоча гіпотеза дослідження була представлена тезою про існування механізму протидії явищу розриву трубопроводів високого тиску.

Головне завдання дисертаційної роботи полягає у створенні механізму протидії негативному явищу розриву трубопроводів високого тиску паливної системи МОД.

З метою встановлення умов виникнення руйнівних деформацій трубопроводу високого тиску були поставлені допоміжні завдання, що полягали у дослідженнях пружних властивостей важкого палива, хвильових процесів у трубопроводі високого тиску МОД та параметричних згинальних коливань трубопроводу.

Розв'язанню першого допоміжного завдання передував огляд наукових джерел, що присвячені фізикохімії нафти та високов'язких нафтопродуктів (роботи Р. З. Сафієвої, І. Н. Євдокімова, М. К. Рогачьова, З. І. Сюняєва, Ф. Г. Унгера та ін.). У результаті було встановлено, що високов'язкі нафтопродукти представляють собою дисперсні системи, тверда фаза яких може утворюватися кристалами граничних та неграничних вуглеводнів, а також асоціатами смолисто-асфальтенових речовин (САР). До того ж у дисертаційній роботі В. В. Добровольського доведено, що ВП має властивості рідкокристалічного середовища. Все це вказує на те, що у важкому паливі вірогідно наявні зсувні деформації, які призводять до поширення не тільки поздовжніх, як у рідині, а й поперечних хвиль, як у пружному рідкокристалічному середовищі.

Наведений вище хід міркувань дозволив встановити, що для моделювання коливального руху у важкому паливі, структура якого є періодичною уздовж однієї осі, найбільше підходить модель трансверсально-ізотопного середовища. Узагальнений закон Гука, що характеризує це середовище, потребує визначення п'яти незалежних пружних сталих.

Відсутність довідкових даних про пружні властивості важких нафтопродуктів, за винятком декількох дослідницьких робіт, передбачала розв'язання складного завдання визначення пружних сталих важкого палива. Цьому передував вибір методів і методик визначення пружних сталих трансверсально-ізотропних речовин.

На даний час найбільше поширення набув ультразвуковий метод, згідно якого пружні сталі речовини можуть бути визначенні шляхом виміру часу проходження ультразвукових хвиль у зразку матеріалу. Обчислення пружних сталих важкого палива потребує як мінімум 5 вимірювань при заданій температурі. Шляхом збудження повздовжніх та поперечних хвиль вздовж основних вісей  $x$ ,  $y$  і  $z$  можна отримати значення для  $c_{11}$ ,  $c_{33}$ ,  $c_{44}$  та  $c_{66}$ , при цьому  $c_{22} = c_{11}$ ,  $c_{21} = c_{12}$ ,



$$c_{23} = c_{32} = c_{13}, \quad c_{55} = c_{44} \quad \text{і} \quad c_{66} = (c_{11} - c_{12})/2.$$

Визначивши швидкість проходження хвиль  $v$  і знаючи значення густини палива  $\rho_F$ , можна обчислити значення пружних констант за наступною формулою:

$$c_{ij} = \rho_F v_{ij}^2, \quad (1)$$

де перший індекс при  $v$  означає напрям розповсюдження хвилі, а другий вказує на напрям поляризації. Для визначення  $c_{13}$  необхідно вимірювати час розповсюдження квазі-поперечної хвилі під кутом  $45^\circ$  та застосовувати складний аналітичний вираз її розрахунку.

Оскільки у техніці для визначення пружних деформацій та напруг прийнято використовувати модуль пружності (Юнга)  $E$ , модуль зсуву  $G$  та коефіцієнт Пуассона  $\nu$ , нижче наведені вирази для визначення пружних констант, використовуючи ці величини:

$$c_{11} = \frac{E_{11}(E_{33} - E_{11}\nu_{13}^2)}{(1 + \nu_{12})(E_{33} - E_{33}\nu_{12} - 2E_{11}\nu_{13}^2)}, \quad c_{12} = \frac{E_{11}(E_{33}\nu_{12} + E_{11}\nu_{13}^2)}{(1 + \nu_{12})(E_{33} - E_{33}\nu_{12} - 2E_{11}\nu_{13}^2)}, \quad (2), (3)$$

$$c_{13} = \frac{E_{11}E_{33}\nu_{13}}{E_{33} - E_{33}\nu_{12} - 2E_{11}\nu_{13}^2}, \quad c_{33} = \frac{E_{33}^2(1 - \nu_{12})}{E_{33} - E_{33}\nu_{12} - 2E_{11}\nu_{13}^2}, \quad c_{44} = G_{13}, \quad c_{66} = \frac{E_{11}}{2(1 + \nu_{12})}. \quad (4), (5), (6)$$

Для вимірювання часу проходження ультразвукової хвилі у поздовжній та радіальній площинах були розроблені і сконструйовані вимірювальні комірки (рис. 2). Використовувався генератор прямокутних імпульсів, що подавав сигнал на п'єзоелектричний випромінювач. У якості пристрою реєстрації застосовувався п'єзодатчик, підключений до цифрового осцилографа. Погрішність методу не перевищувала 1,8%.

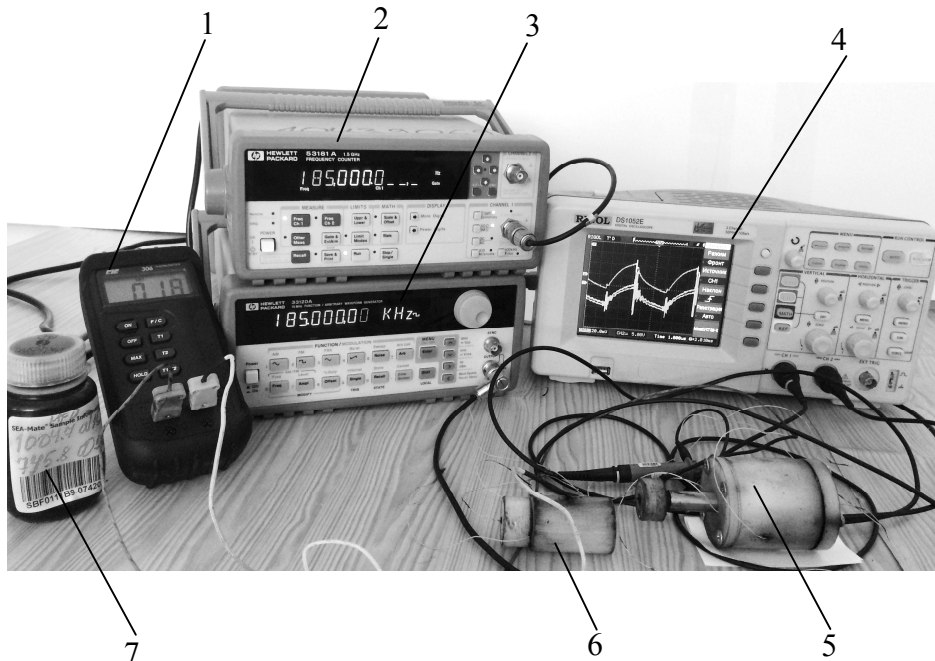


Рис. 2. Вимірювальний стенд:

- 1 – цифровий вимірювач температури; 2 – частотомір;
- 3 – генератор імпульсів; 4 – цифровий осцилограф; 5 – акустичний резонатор; 6 – вимірювальна комірка; 7 – зразок важкого палива

Складність використання ультразвукового методу для вимірювання п'яти пружних сталей важкого палива, яке знаходиться у рідкому стані, вимагала застосування також альтернативних методик. Такою є методика математичного моделювання пружного руху речовини на ЕОМ методом молекулярної динаміки. Оскільки для обчислення коефіцієнтів пружності необхідно модифікувати рівняння руху молекулярної системи таким чином, щоб ефективно враховувати наявність і величину зовнішнього тиску та температури, було прийнято рішення використовувати відомий метод Мартина-Тобіаса-Клейна (МТК) у поєднанні з методом силового поля DREIDING.

Використання цих двох методів лягли в основу об'єднаної методики комбінованого дослідження пружних сталей ВП, згідно якої дані, отримані за допомогою математичного моделювання, згодом уточнювалися шляхом проведення експериментів. Важливою особливістю є те, що методом молекулярної динаміки досліджувалися пружні властивості окремих компонентів важкого палива, що дає змогу обчислити пружні константи певного сорту важкого палива в цілому відповідно до певної концентрації цих компонентів.

Друге допоміжне завдання зводилося до математичного моделювання хвильового поля у системі «трубопровід – важке паливо» з урахуванням встановлених пружних властивостей важкого палива. З метою забезпечення точності характеристик хвильових процесів було прийняте рішення виконувати моделювання на ЕОМ, використовуючи метод кінцевих елементів. Очікуваним науковим результатом моделювання мало стати встановлення умов виникнення частотного резонансу у паливопроводі. Лабораторне дослідження пружних властивостей, процесів збудження хвиль в трубопроводах високого тиску паливної системи МОД та ПНВТ як акустичного резонатора здійснювалось за допомогою експериментального стенду (див. рис. 2).

Третє допоміжне завдання полягало у експериментально-аналітичному дослідженні стійкості руху просторових параметричних згинальних коливань паливопроводу. Знаходження розв'язку цього завдання доцільно виконувати із використанням метода Мат'є-Хілла, оскільки цей метод дозволяє виявляти особливості появи параметричного резонансу коливальної системи.

Розв'язання головного завдання – синтезу механізмів протидії резонансним явищам у трубопроводі високого тиску МОД – потребувало застосування методів навантажувального резервування, зменшення кількості відмов, теорії розв'язання винахідницьких завдань, а також інших організаційно-технічних заходів.

У **третій главі** дисертації наведено результати розв'язання першого допоміжного завдання, яке полягало у дослідженні пружних властивостей важкого палива.

Модельне експериментальне дослідження пружних властивостей важких сортів суднового палива виконувалося із використанням комерційного програмного забезпечення під назвою MAPS (Material and Processes Simulations), що дозволяє створювати об'ємні моделі молекулярних утворень і досліджувати їх енергетичні та пружні властивості.

У зв'язку з тим, що молекулярний склад нафти – це завжди баланс між вмістом нормальних парафінів (60–70%), нафтенів, ароматичних вуглеводнів та смолисто-асфальтенових речовин, експериментальне дослідження пружних властивостей було зосереджено на н-парафінах з великим числом атомів вуглецю (рис. 3а), що відповідає високотемпературній фракції ВП, та гіпотетичних асоціатів САР і ароматичних сполук (рис. 3б).

У результаті були отримані чисельні значення коефіцієнтів, що повністю характеризують пружні властивості кожного досліджуваного компонента відповідно до його просторової симетрії (табл. 1 і 2).

Використовуючи дані, що наведені у табл. 1 і 2, були обчислені коефіцієнти пружності відповідних вуглеводнів за наведеними вище формулами (2), (3), (4), (5) і (6). На наступному етапі отримані дані зазнали обробки із використанням методів екстраполяції та усереднення, що дало змогу визначити наближені значення коефіцієнтів пружності важкого палива.

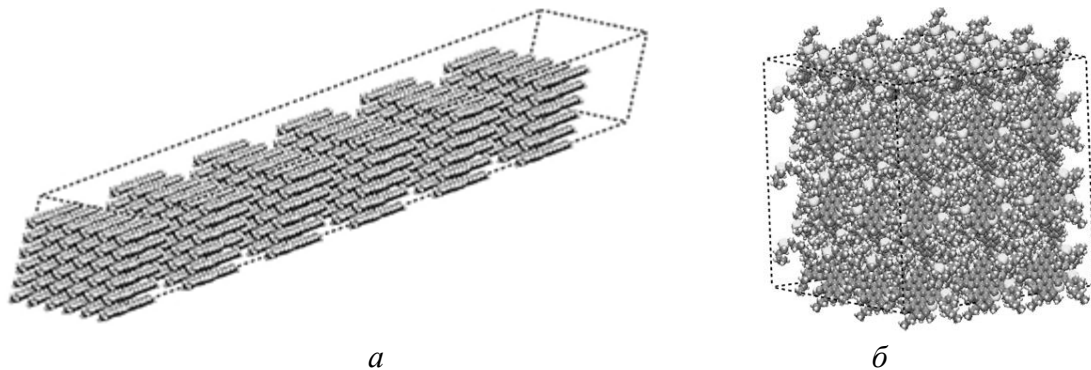


Рис. 3. Тривимірні імітаційні моделі:  
а) кристалічна ґратка н-парафіна  $C_{24}H_{50}$ ;  
б) асоціат САР

Таблиця 1

**Результати експериментального визначення модуля Юнга, модуля зсуву та коефіцієнта Пуассона деяких нормальних парафінів**

| Вуглеводень    | Сингонія  | Температура, °C | $E_{xx}(E_{yy})$ , ГПа | $\nu_x(\nu_y)$   | $E_{zz}$ , ГПа | $\nu_z$           | $G_{xz(zx)}$ , ГПа |
|----------------|-----------|-----------------|------------------------|------------------|----------------|-------------------|--------------------|
| $C_{19}H_{40}$ | Ромбічна  | 25; 60; 100     | 0,5; 0,2; 0,1          | -0,5; -0,5; -0,5 | 2,8; 1,4; 1    | -0,03; -0,7; -0,7 | 0,3; 0,15; 0,1     |
| $C_{23}H_{48}$ | Ромбічна  | 25; 60; 100     | —                      | —                | 2,3            | -0,05             | —                  |
| $C_{24}H_{50}$ | Триклинна | 25; 60; 100     | 0,6; 0,3; 0,5          | -0,5; -0,5; -0,5 | 4,1; 2,1; 2,4  | 0,1; 0,1; 0,4     | 0,3; 0,5; 0,2      |
| $C_{36}H_{74}$ | Ромбічна  | 25; 60; 100     | —; —; 0,4              | -0,05; —; -0,02  | 7; —; 2,2      | —; —; -0,5        | —; —; 0,13         |

Використання методу вимірювання часу проходження ультразвукових хвиль дозволили визначити два коефіцієнта пружності за наведеною вище методикою. Як видно з рис. 4-5, динаміка зміни коефіцієнтів пружності має нелінійний характер, що по новому доказує наявність фазових переходів у важкому паливі. Так, графік сталої  $c_{44}$ , що характеризує зсувні деформації (рис. 4), має нелінійні ділянки при температурі, 40-45 °C, 50-55 °C, 60-65 °C та 70-80 °C.

Фазові переходи у важкому паливі можна також ідентифікувати за графіком залежності пружної сталої  $c_{33}$  від температури (рис. 5). Вона [стала] характеризує пружність уздовж осі

анізотропії  $z$ . Фазові переходи добре виражені при температурах 25 °С, 40-45 °С та 65-75 °С, як видно з графіку на рис. 5.

Таблиця 2

**Результати експериментального визначення модуля Юнга та коефіцієнта Пуассона деяких смолисто-асфальтенових речовин**

| Склад асоціату                                     | Співвідношення | Сингонія           | Температура, °С | $E$ , ГПа      | $\nu$            |
|----------------------------------------------------|----------------|--------------------|-----------------|----------------|------------------|
| $C_{84}H_{98}N_2S_2O_3 + C_{26}H_{40}NS_2$         | 1/5            | Ізотропна речовина | 25; 60; 100     | 0,6; 0,55; 0,3 | -0,1; -0,6; -0,3 |
| $C_{84}H_{98}N_2S_2O_3 + C_7H_{14} + C_{12}H_{12}$ | 1/20/10        | Ізотропна речовина | 25; 60; 100     | 1,1; 0,8; 0,4  | 0,1; -0,5; -0,5; |

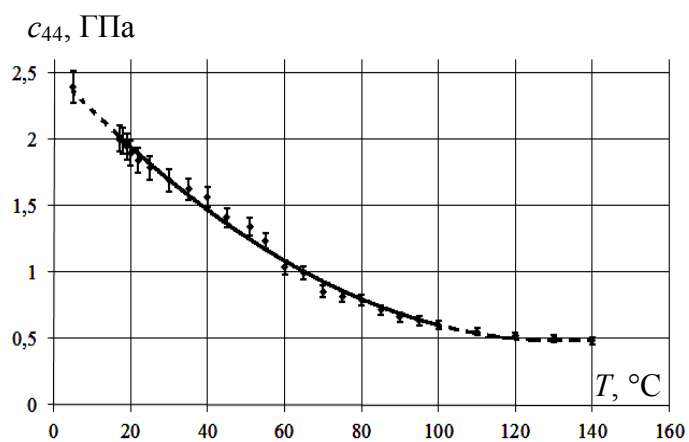


Рис. 4. Залежність значення пружної сталої  $c_{44}$  ВП від температури

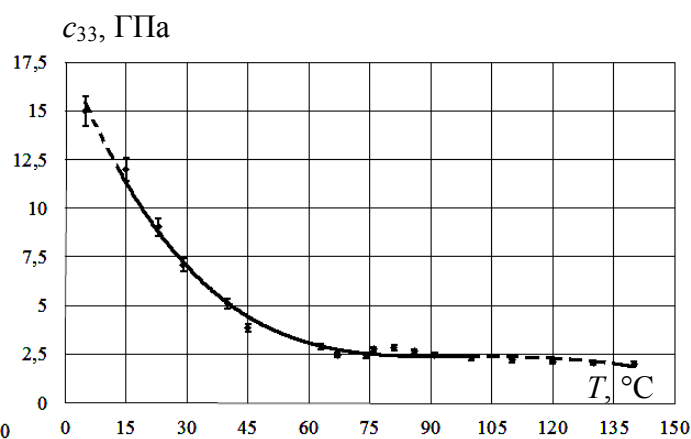


Рис. 5. Залежність значення пружної сталої  $c_{33}$  ВП від температури

У дисертаційній роботі показано, що молекулярний склад важкого палива з достатньою точністю представляється за допомогою декількох структуроутворюючих компонентів. Для важкого палива було складено загальний вираз згідно процентного вмісту вуглеводнів і гетероатомних сполук, розглянутих у дисертації, який має наступний вигляд:

$$HFO = 30\%C_{19}H_{40} + 20\%C_{24}H_{50} + 5\%C_{36}H_{74} + 15\%(C_{84}H_{98}N_2S_2O_3 + C_{26}H_{40}NS_2) + 30\%(C_{84}H_{98}N_2S_2O_3 + C_7H_{14} + C_{12}H_{12}). \quad (8)$$

Таким чином, з урахуванням формули (8) та результатів дослідження коефіцієнтів пружності були отримані значення п'яти незалежних пружних сталей ВП (табл. 3).

Таблиця 3

**Результати експериментального визначення пружних сталей важкого палива при температурі 130±15 °С**

| Пружна стала | $c_{11}$ | $c_{12}$ | $c_{13}$ | $c_{33}$ | $c_{44}$ | $c_{66}$ |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Значення     | 1        | -0,47    | -0,35    | 2,05     | 0,5      | 0,74     |

Чисельні значення пружних сталей важкого палива, що наведені у табл. 3, є науковим результатом розв'язання першого допоміжного завдання. Значення справедливі для важкого палива, що заповнює тіло циліндричної форми, у діапазоні температур експлуатації паливних систем дизелів (130-145 °С). Негативні значення елементів  $c_{12}$  і  $c_{13}$  вказують на особливість пружної поведінки ВП, що раніше не доповідалося як у вітчизняній, так і зарубіжній літературі. Однак схожі властивості були виявлені у полімерних сполуках за умов повного або часткового просторового обмеження, що доказує правомірність значень  $c_{12}$  і  $c_{13}$  для ВП, яке обмежене стінками труби.

У **четвертій главі** з метою визначення характеристик хвильового поля та умов появи резонансних явищ в трубопроводі було знайдено розв'язок другого і третього допоміжного завдань шляхом проведення теоретичного та експериментального досліджень вільних, вимушених і параметричних коливань паливопроводу високого тиску малообертового дизеля.

Оскільки розв'язання другого допоміжного завдання потребувало побудови математичної моделі хвильового поля у паливопроводі високого тиску дизеля, наведемо основні викладки. Для цього розглянемо елемент трубопроводу, що заповнений важким паливом (рис. 6). Нехай внутрішній радіус труби буде  $a$ , а зовнішній –  $b$ . Довжину труби приймемо рівною  $L$ .

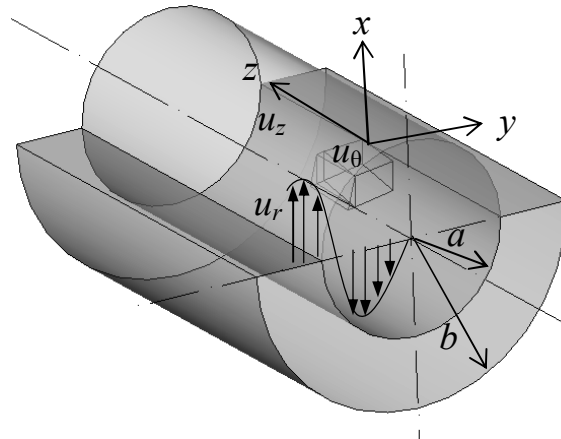


Рис. 6. Графічна модель паливопроводу високого тиску

Для визначення хвильового поля у трубопроводі математична модель у загальному вигляді запишеться, як

$$\rho \ddot{u}_i = c_{ij} \varepsilon_{kl}, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (10)$$

де  $u_i$  – складові вектору зміщення,  $\varepsilon_{kl}$  – елементи симетричного тензора деформації, а  $c_{ij}$  є елементами тензора четвертого рангу пружних сталей.

Систему рівнянь (10) необхідно доповнити граничними умовами, які запишуться як

$$u_z = 0, \sigma_{zr} = 0, \sigma_{z\theta} = 0 \text{ при } z = 0, L$$

і

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}^f &= \sigma_{rr}^p, \quad \tau_{r\theta}^f = \tau_{r\theta}^p, \quad \tau_{zr}^f = \tau_{zr}^p, \quad u_r^f = u_r^p, \quad u_\theta^f = u_\theta^p, \quad u_z^f = u_z^p \text{ при } r = a; \\ \sigma_{rr} &= \sigma_{rz} = \sigma_{r\theta} = 0 \text{ при } r = b, \end{aligned}$$

де  $\sigma_{zr}$ ,  $\sigma_{z\theta}$ ,  $\sigma_{rr}$ ,  $\sigma_{r\theta}$  і  $\tau_{r\theta}$  – складові вектору напруги; верхній індекс  $f$  позначає кількість, що

відноситься до важкого палива, а  $p$  – до металу стінки труби.

У дисертаційній роботі наводяться розв'язки рівнянь (10) для компонентів зміщення та напруг при розповсюдженні як вісесиметричних, так і асиметричних пружних коливань у важкому паливі, що заповнює металевий циліндричний трубопровід. Показано, що хвильове поле у паливопроводі складається з падаючих і відбитих хвиль типу  $P$ ,  $SV$  і  $SH$  у паливі та заломлених хвиль відповідного типу у металі труби ( $P$  – повздовжня хвиля,  $SV$  – поперечна вертикально поляризована,  $SH$  – поперечна горизонтально поляризована).

З метою визначення величини кількісної взаємодії згаданих вище хвиль було виконане чисельне математичне моделювання хвильових процесів у трубопроводі високого тиску дизеля. Завдяки застосуванню інформаційного засобу наукового пізнання COMSOL Multiphysics (Femlab) для розв'язання системи нелінійних диференціальних рівнянь в частинних похідних (10) методом кінцевих елементів в одно- і трьохвимірній системі координат були отримані власні частоти для перших трьох коливальних мод незаповненого та заповненого важким паливом (відповідно до табл. 3)) трубопровода (табл. 4). Також був встановлений факт того, що амплітуда зміщень незаповненого трубопровода на порядок менша (рис. 7), ніж заповненого важким паливом (рис. 8), при незмінному розподілі вузлів та пучностей.

Науковим результатом знайденого розв'язку другого допоміжного завдання є встановлені умови виникнення небезпечного частотного резонансу радіальних коливань металу труби та важкого палива, що її заповнює. Значення із табл. 3 вказують, на яких частотах з'явиться частотний резонанс радіальних коливань трубопровода при появі вимушених поперечних хвиль у важкому паливі на цих же частотах.

Для знаходження розв'язку третього допоміжного завдання необхідно було дослідити параметричні згинальні коливання трубопровода на стійкість методом Матьє-Хілла. З цією метою перейдемо до побудови математичної моделі, графічна інтерпретація якої представлена на рис. 9.

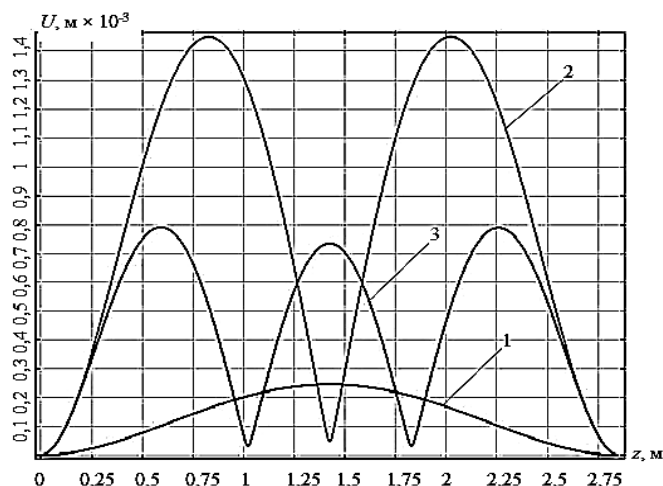


Рис. 7. Розподіл результуючого вектору зміщень по довжині незаповненого трубопровода для перших трьох мод власних коливань: 1 – перша мода; 2 – друга мода; 3 – третя мода

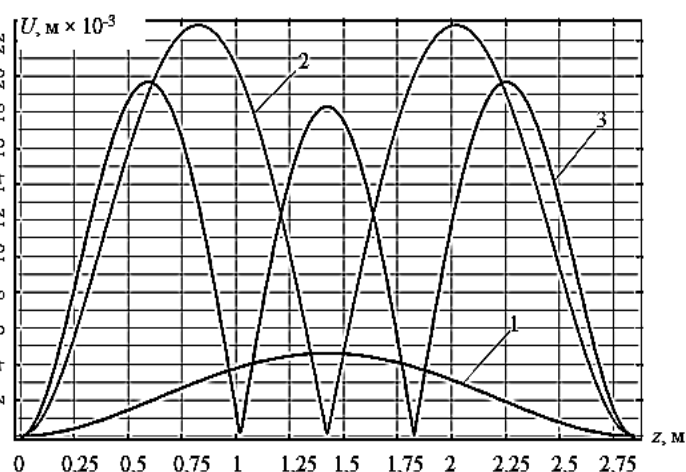


Рис. 8. Розподіл результуючого вектору зміщень по довжині заповненого важким паливом трубопровода для перших трьох мод власних коливань: 1 – перша мода; 2 – друга мода; 3 – третя мода

**Результати експериментального визначення частот перших трьох мод власних коливань трубопроводу з жорстко закріпленими кінцями**

| Стан трубопроводу         | Частота $n$ -ї моди, Гц |       |       |
|---------------------------|-------------------------|-------|-------|
|                           | 1                       | 2     | 3     |
| Незаповнений              | 18,46                   | 50,86 | 99,57 |
| Заповнений важким паливом | 17,52                   | 48,25 | 94,45 |

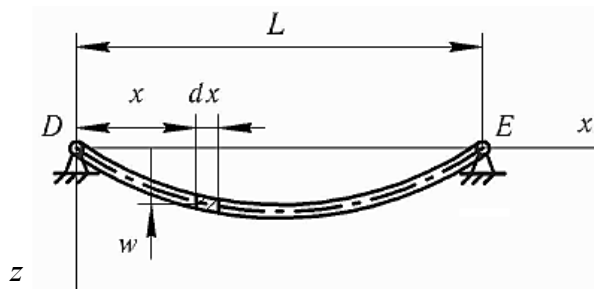


Рис. 9. Графічна модель параметричних згинальних коливань паливопроводу

У даному випадку рівняння руху паливопроводу запишеться у вигляді

$$EJ \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + m(x) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - F_i (P_0 + P_a \cos \omega t) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0, \quad (11)$$

де  $P_f = P_0 + P_a \cos \omega t$  являє собою осцилюючий тиск палива, що містить статичну  $P_0$  і динамічну  $P_a$  компоненти амплітуди;  $F_i = \pi r_i^2$  — площа внутрішнього перерізу радіуса  $r$ ;  $m(x)$  — погонна маса,  $E$  — модуль Юнга і  $J$  — осьовий момент інерції площі поперечного перерізу трубопроводу.

Представимо розв'язок рівняння (11) у формі Мат'є-Хілла:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + (\lambda - 2h^2 \cos 2x) T = 0. \quad (12)$$

Параметри  $\lambda$  і  $h^2$  у рівнянні (12) визначають стійкість руху коливальної системи і обчислюються для кожного значення  $k$  ( $k = 1, 2, 3 \dots n$ ) за формулами:

$$\lambda = \frac{4}{\omega^2} p_k^2 (1 - q_k^2) \text{ і } 2h^2 = \frac{b_k^2}{1 - q_k^2},$$

де

$$p_k = \frac{\pi^2 (2k+1)^2}{a 4L^2}, \quad b_k^2 = \frac{4L^2 \cdot P_a \cdot F_i}{\pi^2 (2k+1)^2 \cdot EJ} = \frac{P_a \cdot F_i}{P_{crit}}, \quad q_k^2 = \frac{P_0 \cdot F_i}{P_{crit}} \text{ і } a^2 = \frac{m(x)}{EJ}.$$

Зручним способом визначення стійкості коливального руху за відомим значеннями параметрів  $\lambda$  і  $h^2$  є використання діаграми стійкості Айнса-Стретта.

Для чисельного визначення параметрів  $\lambda$  і  $h^2$  в залежності від режиму роботи дизеля

необхідно було виконати дослідження ПНВТ як акустичного резонатора. Цей етап роботи було виконано шляхом фізичного моделювання за допомогою лабораторної дослідної установки (див. рис. 2) та використанням даних по натурним експериментам з літературних джерел. У результаті було встановлено частоти вимушених та вільних хвиль у ВП під час роботи ПНВТ.

Обчислені із використанням даних попереднього етапу чисельні значення  $\lambda$  і  $h^2$  для номінального і часткового режимів роботи дизеля були нанесені на діаграму стійкості Айнса-Стретта. У результаті було встановлено, що на частковому режимі роботи дизеля в трубопроводі високого тиску має виникати параметричний резонанс.

Підтвердження цьому було знайдене в ході експериментального дослідження параметричних згинальних коливань трубопроводу високого тиску МОД на судні Ebba Maersk водотоннажністю 170794 т. Пропульсивний комплекс судна оснащено малообертовим двотактним головним двигуном Sulzer 14RT-flex 96C максимальною потужністю 80080 кВт при частоті обертів  $102 \text{ хв}^{-1}$ . Даний двигун обладнаний паливною системою акумуляторного типу з електрогідравлічним керуванням подачі палива до форсунок дизеля.

Після проведеної серії натурних експериментів було встановлено, що коливальний процес на часткових режимах роботи дизеля має значно більшу тривалість та інтенсивність (рис. 10), ніж на номінальному (рис. 11).

Науковим результатом розв'язку третього допоміжного завдання є встановлення появи параметричного резонансу на першій коливальній моді з частотою 25 Гц (див. рис. 10) при зменшенні частоти упорскування палива в той момент, коли дію збурюючої сили починають виконувати власні коливання у паливі, а не імпульси тиску від ПНВТ. Математичне пояснення механізму появи параметричного резонансу було одержане за допомогою методу Матьє-Хілла, що дозволило визначити ті конструктивні параметри і фізичні властивості трубопроводу, від яких залежить поява цього негативного явища.

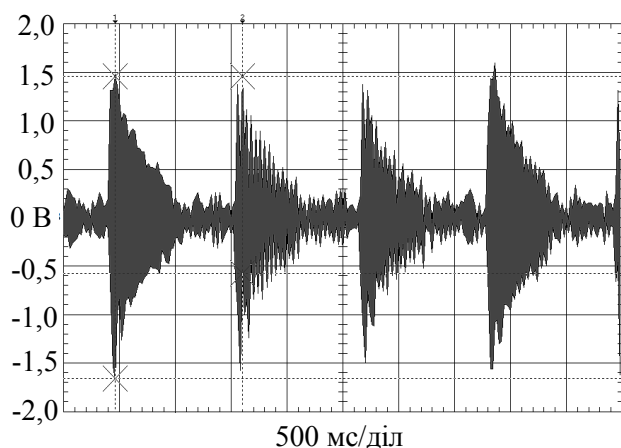


Рис. 10. Осцилограми коливань паливної труби при роботі МОД на частоті  $55 \text{ хв}^{-1}$

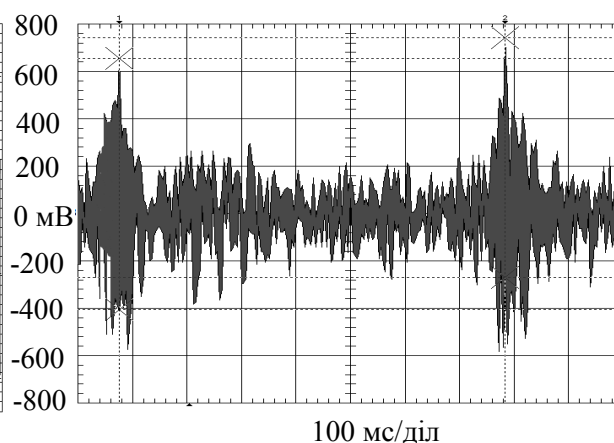


Рис. 11. Осцилограми коливань паливної труби при роботі МОД на частоті  $82 \text{ хв}^{-1}$

Четверта глава завершується перевіркою адекватності використаних у дисертаційному дослідженні моделей. Так, середня відносна похибка моделювання молекулярної динаміки склала 11,4%. Модель параметричних коливань знаходиться у доброму узгодженні з експериментом для



другої моди, але для першої і третьої узгодження гірше. Середня відносна похибка склала 15,8%. Математичне моделювання хвильового поля в паливопроводі проводилось з відносною похибкою 0,25-0,5%.

У **п'ятій главі** розв'язується головне завдання дисертаційного дослідження – синтез механізмів протидії резонансним явищам у трубопроводі. Отримані у процесі дослідження наукові результати дозволили встановити всі можливі напрямки впливу на процес виникнення як частотного, так і параметричного резонансів.

Оскільки частотний резонанс радіальних коливань залежить від зсувних деформацій у важкому паливі, необхідно впливати на пружні властивості ВП шляхом зміни його температури у більшу сторону (під час експлуатації). Також ефективним є відведення енергії з поверхні трубопроводу шляхом використання демпфування та прямого теплообміну.

Для боротьби з параметричним резонансом ефективними напрямками є конструктивна зміна параметрів, що визначають власну частоту згинальних коливань трубопроводу. До них відносяться маса, модуль Юнга, довжина та осьовий момент інерції. Оскільки частота збудження залежить від режиму роботи дизеля і викликає параметричний резонанс при зниженні частоти обертання дизеля нижче  $70-65 \text{ хв}^{-1}$ , необхідно обмежувати (наскільки можливо) його роботу на часткових режимах.

На основі визначених вище напрямків протидії резонансу були розроблені способи і заходи підвищення надійності трубопроводів високого тиску паливної системи суднового малообертового дизеля.

Розроблено техніко-експлуатаційні вимоги до процедури проектування паливної системи високого тиску малообертового дизеля, ключовим пунктом яких є вимога до проектної організації щодо перевірки трубопроводів на частотний і параметричний резонанси та введення за необхідності навантажувального резервування чи розділення магістралі на декілька ділянок меншої довжини. Обґрунтована доцільність використання для виготовлення трубопроводів високого тиску матеріалів, що мають значення модуля Юнга більше 1 ТПа, до яких належать композитні матеріали з вуглецевих нанотрубок та графену.

З метою підвищення надійності паливних систем високого тиску МОД, не виводячи їх з експлуатації, було розроблено наступне: процедура безпечного управління малообертовим дизелем на часткових режимах роботи, автоматизований пристрій запобігання розривів паливопроводів високого тиску малообертових дизелів та активний демпфер критичної вібрації. Пристрій запобігання розривів паливопроводів використовує принцип зміни власної частоти коливань  $\omega$  трубопроводу при збільшенні його маси  $m$  (рис. 12 а), а активний демпфер критичної вібрації змінює резонансну частоту для трубопроводу  $\omega_r$  (рис. 12 б) шляхом збільшення коефіцієнту згасання  $\beta$ , що в обох випадках забезпечує зменшення амплітуди коливань  $A$ .

Представлені вище організаційно-технічні заходи забезпечують удосконалення програми забезпечення надійності паливної системи високого тиску МОД на всіх етапах її життєвого циклу: від стадії проектування до експлуатації. Показано, що відповідно до статистики відмов ПА, впровадження результатів дисертаційного дослідження забезпечить зменшення інтенсивності відмов  $\lambda(t)$  на 8,3%. Абсолютний коефіцієнт виграшу надійності по  $\lambda(t)$  при цьому буде

дорівнювати  $G(t) = 1,1$ , а відносний коефіцієнт виграшу надійності по  $\lambda(t)$  буде  $\tilde{G}(t) = 0,093$ . Також згідно інформації The Swedish Club про збитки судновласників за період 1998-2004 рр. коефіцієнт економічності можна оцінити у  $K_e = 0,09$ .

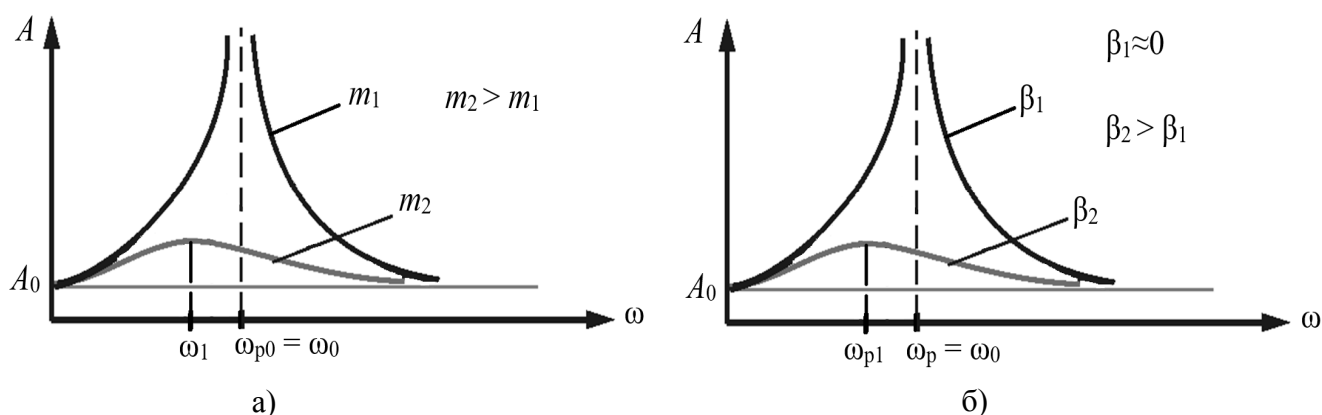


Рис. 12. Амплітудно-частотні характеристики коливань трубопроводів при застосуванні технічних засобів боротьби з резонансом:

- а) трубопровід, обладнаний автоматизованим пристроєм запобігання розривів;
- б) трубопровід, обладнаний активним демпфером критичної вібрації

Отримані результати дали можливість сформулювати *наукове положення*, згідно з яким підвищення надійності трубопроводів паливної системи високого тиску МОД забезпечується механізмами протидії частотному і параметричному резонансам в системі «трубопровід – важке паливо» за рахунок зміни частоти власних коливань трубопроводу шляхом конструктивної зміни його маси, зменшення величини зсувів у важкому паливі шляхом підвищення його температури вище 130 °C і/або відведення енергії з поверхні трубопроводу шляхом в'язкого тертя та теплообміну.

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

Розроблені технічні засоби і організаційні заходи із запобігання появі або придушення резонансу в трубопроводах високого тиску ПС МОД представляють собою *практичну цінність* роботи.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційне дослідження містить теоретичне узагальнення і новий розв'язок актуального науково-практичного завдання встановлення причини розриву трубопроводів високого тиску паливної системи МОД та створення механізму протидії цьому негативному явищу.

Встановлено, що важкі сорти суднового палива представляють собою рідке дисперсійне середовище, що містить тверду фазу, пружні властивості якого характеризуються п'ятьма незалежними пружними сталими.

Чисельне визначення пружних властивостей важкого суднового палива було здійснене

завдяки успішному застосуванню методики визначення пружних констант складної речовини. Суть методики полягає у комбінуванні модельних і лабораторних експериментальних досліджень нафтових дисперсних речовин із використанням інформаційних і технічних засобів наукового пізнання.

Отримані чисельні значення параметрів пружності деяких нормальних парафінів і моделей смолисто-асфальтенових речовин шляхом моделювання за методом молекулярної динаміки, дають підставу вважати, що їх пружні властивості ближче за своєю природою до властивостей твердих тіл, а не аморфних утворень.

Визначена пружна поведінка насичених і циклічних вуглеводнів та гетероатомних з'єднань була як очікувана, так і несподівана. Особливу увагу привертають отримані негативні значення коефіцієнта Пуассона, що дає підставу зараховувати ці речовини до ауксетиків.

Використання ультразвукового методу в ході дослідження пружних властивостей важкого палива дало змогу встановити, що характерні для важкого нафтопродукту фазові переходи відбуваються в інтервалах значень температури 40-45 °C, 50-55 °C, 60-65 °C та 70-80 °C. Чисельні значення пружних сталей нелінійно зменшуються при збільшенні температури важкого палива, але при досягненні експлуатаційного значення температури у  $130 \pm 15$  °C спостерігається постійність значень всіх п'яти пружних сталей.

На підставі результатів математичного моделювання коливальних процесів встановлено, що у важкому паливі поширюються не тільки поздовжні (як у звичайній рідині), так і поперечні хвилі горизонтальної та вертикальної поляризації. Взаємодія поперечних хвиль з радіальними коливаннями паливної труби за певних умов супроводжується появою частотного резонансу.

Результати дослідження параметричних згинальних коливань паливопроводу високого тиску показали, що конструкції сучасних паливних систем не враховують можливості появи параметричного резонансу, який є результатом зниження частоти обертання дизеля нижче  $70-65 \text{ хв}^{-1}$ , що при многократному повторюванні призводить до втомних руйнувань стінки паливопроводу.

При проектуванні паливної системи малообертового дизельного двигуна кожному виробнику пропонується виконати аналіз надійності ПС способом, представленим в дисертації. Для того щоб уникнути негативного впливу коливань у паливі, необхідно вибирати геометричні параметри (довжину і співвідношення внутрішнього і зовнішнього діаметрів) паливних труб високого тиску, виходячи з розрахунків на стійкість. Перспективним напрямом є збільшення модуля пружності за рахунок застосування останніх досягнень у виробництві композитних матеріалів на основі вуглецевих нанотрубок і графена.

Надійність паливопроводів високого тиску ПС дизеля доцільно підвищувати без виведення його з експлуатації шляхом введення додаткової маси, застосуванням демпфування і виконуючи вимоги процедури безпечного управління дизелем на часткових режимах роботи.

Наукові результати дисертаційної роботи були впроваджені як у науково-дослідну, так і навчальну роботу НУ «ОМА». Розроблені організаційні заходи підвищення надійності ПС МОД використовуються у судноплавній компанії СМА СГМ в якості додаткових правил з технічної експлуатації флоту. Розроблені технічні засоби підвищення надійності є патентоспроможними, що підтверджується отриманим патентом на корисну модель автоматизованого пристрою

запобігання розривів паливопроводів МОД. Оцінка ефективності запропонованих у дисертації заходів і способів підвищення надійності трубопроводів високого тиску ПС МОД показала, що вони дозволяють знизити кількість несправностей паливопроводів в чотири рази, а кількість відмов ПА на 8,3% у довгостроковому періоді.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Стеценко, М. С. Исследование волнового поля топливпровода высокого давления малооборотных дизелей [Текст] / М. С. Стеценко // Проблемы техніки: Науково-виробничий журнал. – Одеса: ОНМУ, 2012. – № 2. – С. 22 – 28.
2. Stetsenko, M. Determination of elastic constants of anisotropic heavy petroleum product using molecular dynamics simulation [Text] / M. Stetsenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2014. – Vol. 5. – №6 (71). – P. 37 – 44. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.26313.
3. Stetsenko, M. Vibrational aspect in low speed diesel engines high pressure fuel system reliability [Text] / M. Stetsenko // Journal of POLISH CIMAC. – 2014. – Vol. 9. – №2. – P. 185 – 195.
4. Стеценко, М. С. Анализ колебательного движения топлива в магистрали высокого давления дизеля [Текст] / М. С. Стеценко, И. В. Логишев // Проблемы техніки: Науково-виробничий журнал. – Одеса: ОНМУ, 2014. – № 4. – С. 65 – 77.
5. Stetsenko, M. Determining the elastic constants of hydrocarbons of heavy oil products using molecular dynamics simulation approach [Text] / M. Stetsenko // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2015. – Vol. 126. – P. 124 – 130. DOI:10.1016/j.petrol.2014.12.021
6. Автоматизований пристрій запобігання розриву паливопроводів високого тиску малооборотних дизелів [Текст]: Пат. 79316 Україна: МПК F02M 63/00. / Стеценко М. С.; заявл. 27.06.2012; опубл. 25.04.2013. Бюл. №8
7. Стеценко, М. С. Колебательные процессы в топливных трубопроводах высокого давления дизелей [Текст] / М. С. Стеценко, С. А. Ханмамедов // Матеріали наук.-техн. конф. «Енергетика судна. Експлуатація та ремонт», 30 листопада – 1 грудня 2010 р. – Одеса: ОНМА. – С. 33.
8. Стеценко, М. С. Колебания трубопроводов системы высокого давления дизелей [Текст] / М. С. Стеценко // Матеріали IV всеукраїнської наук.-техн. конф. «Сучасні проблеми двигунобудування. Стан, ідеї, рішення», 18 – 19 травня 2011 р. – Первомайськ: ППІ НУК ім. адм. Макарова. – С. 74.
9. Стеценко, М. С. Колебания трубопроводов высокого давления дизелей [Текст] / М. С. Стеценко // Матеріали наук.-техн. конф. «Енергетика судна. Експлуатація та ремонт», 5 – 7 квітня 2011 р. – Одеса: ОНМА. – С. 47 – 48
10. Стеценко, М. С. Колебания трубопроводов системы высокого давления дизеля [Текст] / М. С. Стеценко, С. А. Ханмамедов // Матеріали V міжнародної наук.-техн. конф. «Суднова енергетика: стан та проблеми», 10 – 11 листопада 2011 р. – Миколаїв: НУК ім. адм. Макарова. – С. 142.
11. Стеценко, М. С. Развитие информационных и технических средств научного исследования фундаментальных свойств нефтепродуктов [Текст] / М. С. Стеценко // Матеріали

наук.-техн. конф. «Енергетика судна. Експлуатація та ремонт», 26-28 березня 2014 р. – Одеса: ОНМА. – С. 21 – 23.

12. Стеценко, М. С. Повышение надежности топливной системы высокого давления малооборотных дизелей [Текст] / М. С. Стеценко, И. В. Логишев // Матеріали наук.-техн. конф. «Енергетика судна. Експлуатація та ремонт», 26 – 28 березня 2014 р. – Одеса: ОНМА. – С. 23 – 26.

13. Стеценко, М. С. Особенности технической эксплуатации топливной системы высокого давления малооборотных дизелей / М. С. Стеценко, И. В. Логишев // Матеріали міжнародної наук.-техн. конф. «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт» у двох частинах. Ч. 2, 24 – 25 березня 2015 р. – Одеса: ОНМА. – С. 20 – 25.

## АНОТАЦІЯ

Стеценко М. С. Підвищення надійності трубопроводів високого тиску паливної системи суднового малооборотного дизеля. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки. Національний університет «Одеська морська академія». Одеса, 2016.

Дисертаційне дослідження присвячене вирішенню актуальної прикладної задачі підвищення надійності трубопроводів високого тиску паливної системи суднового малооборотного дизеля. Актуальність дослідження обумовлена високою аварійністю у судноплавстві, основною причиною якої є несправності головних малооборотних дизелів. Особливу увагу привертають розриви паливних труб високого тиску, які відбувається у поперечній площині, що не мало пояснення до цих пір.

Головним завданням дослідження було розробка засобів та заходів забезпечення надійності паливопроводів високого тиску з метою попередження їх розривів. Завдання було розв'язане за допомогою низки наукових результатів, що були отримані у ході дослідження пружних властивостей важкого палива, просторового хвильового поля в паливопроводі та його параметричних згинальних коливань, а також, що найголовніше, умов виникнення частотного та параметричного резонансів у паливопроводі. Дослідження проводилось із застосуванням методів фізичного і математичного моделювання, лабораторних експериментальних досліджень та натурних експериментів на працюючому дизелі.

За результатами дослідження були розроблені техніко-конструкційні вимоги до процедури проектування паливних систем, а також засоби та заходи забезпечення надійності паливної системи дизеля без виведення його з експлуатації.

**Ключові слова:** малооборотний дизель, паливопровід, хвильове поле, частотний резонанс, параметричний резонанс.

## THE ANNOTATION

Stetsenko M. S. Improving the reliability high pressure pipelines of low speed diesel engine fuel system. – The dissertation is the manuscript.

Dissertation on competition of scientific degree of candidate of engineering sciences. Specialty 05.05.03 – Engines and Power plants. National University “Odesa Maritime Academy”. Odesa, 2016.

The dissertation is devoted to solving an original and actual applied problem of improving the reliability of high pressure pipelines of marine low speed diesel engine fuel system.

The relevance of the study is determined largely by the accident rate in the shipping industry, which remains high mainly due to the main low speed diesel engines damage. Among the five less reliable low speed engine components a particular attention is drawn by the fuel equipment. This is due to the breakage of high pressure fuel pipelines, which, as rule, occurs in the transverse plane and accompanied by an extreme vibration.

The main task of the research was to develop new means and measures to ensure the reliability of the high pressure fuel pipes with an aim of their breakage prevention. The task was solved with the help of a number of scientific results obtained in the following research studies: determination of the elastic properties of a heavy fuel oil, spatial wave field in the fuel pipeline investigation, parametric bending vibrations of the same, and, with most importantly, determination the conditions of the both frequency and parametric resonance occurrence in the fuel pipeline. The research was conducted using the methods of physical and mathematical modelling, precise measurements in the laboratory and field experiments on a running diesel engine.

According to modern concepts, oil and high viscous oil products are colloidal dispersion systems, solid phase in which consists of saturated and unsaturated hydrocarbon crystals and associates of resinous-asphaltenic substances. Therefore, mechanical interactions of heavy fuel components should be elastic in nature.

In order to determine the elastic properties of a heavy fuel oil, a combined technique was developed, according to which new scientific knowledge about a complex matter can be obtained by examining its individual components. Thus, by analyzing the molecular composition of a complex compound and defining the main structural elements of it, properties of each of them can be estimated separately, in a first place, and then a general result can be derived for a substance as a whole. As a result, five values of independent elastic constants from the elasticity matrix of a heavy grade of fuel oil were obtained at the temperature of 130 °C. Two the most important values of the elasticity matrix were farther clarified using ultrasonic method of elastic constants measurement. These experiments were conducted in the laboratory with use of specially constructed measuring cells.

The numerical values of the elasticity matrix were farther utilized to perform computer modelling experiments with use of specially developed mathematical model. The model describes propagation and interaction of longitudinal and transverse waves in a high pressure fuel pipelines filled with transversely isotropic medium, such as heavy fuel oil. Another set of experiments was conducted in the laboratory, using specially developed and constructed physical model.

It has been revealed that elastic behavior of a heavy fuel oil creates a condition when dangerous

frequency resonance of the transverse waves in the pipe wall and the analogous one in a containing it fuel oil, will lead to a fatigue failure of a high pressure pipe.

Due to principle of diesel engine fuel equipment operation, besides frequency resonance, the parametric one can occur as well. In connection with this there were both modeling and field experiments conducted, in order to establish precisely conditions of parametric resonance occurrence.

Field research took place on board the modern container vessel Ebba Maersk equipped with 80080 kWt power Sulzer 14RT-flex96C main low speed diesel engine. Using vibration sensors connected to portable digital oscilloscope, bending parametric vibration waveforms were obtained at partial and rated loads of the main engine. It was established that, at partial load, the high pressure fuel pipes are more vulnerable, as they oscillate with two times greater intensity. An assumption of the parametric resonance occurrence at partial load has been confirmed in followed modeling experiments with use of the Mathieu method. It was found that stability of high pressure fuel pipeline oscillatory motion is less, at partial load, due to the frequency characteristics of natural oscillations in a fuel.

On the basis of both theoretical and empirical results obtained through the research there was the high pressure fuel pipelines reliability program developed. The program includes number of technical means and organizational activities to improve reliability of the mentioned pipelines. Practical recommendations presented in the program are to be used to design initially reliable high pressure fuel system.

There were both technical and organizational means introduced to improve reliability of the high pressure fuel pipes of a low speed diesel engine without its decommissioning. Those solutions utilize dependence of pipeline natural frequency on its mass to prevent parametric resonance from occurring. Another organizational solution to the problem is the procedure for the safe operation of a diesel engine. The algorithm introduced minimizes possibility of unstable vibrations appearance while diesel engine is operated at partial loads.

Evaluation of measures proposed in the dissertation has shown that they can reduce the number of high pressure fuel pipelines failures by four times, and the number of failures of fuel equipment by 8.3% in the long run.

**Keywords:** low speed diesel engine, high pressure fuel pipeline, wave field, frequency resonance, parametric resonance.

## АННОТАЦИЯ

Стеценко М. С. Повышение надежности трубопроводов высокого давления топливной системы малооборотного дизеля. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03. – двигатели и энергетические установки. Национальный университет «Одесская морская академия». Одесса, 2016.

Диссертационное исследование посвящено решению актуальной прикладной задачи повышения надежности трубопроводов высокого давления топливной системы судового малооборотного дизеля. Актуальность исследования обусловлена высокой аварийностью в

судоходстве, основной причиной которой является неисправности главных малооборотных дизелей. Особое внимание привлекают разрывы топливных труб высокого давления, которые происходят в поперечной плоскости, что не имело объяснения до сих пор.

Главной задачей исследования было разработка средств и мер обеспечения надежности топливопроводов высокого давления с целью предупреждения их разрывов. Задача была решена с помощью ряда научных результатов, полученных в ходе исследования упругих свойств тяжелого топлива, пространственного волнового поля в топливопроводе и его параметрических изгибных колебаний, а также, что самое главное, условий возникновения частотного и параметрического резонансов в топливопроводе. Исследование проводилось с применением методов физического и математического моделирования, точных измерений в лаборатории и натурных экспериментов на работающем дизеле.

По результатам исследования были разработаны технико-конструкционные требования к проектированию топливных систем, а также средства и меры обеспечения надежности топливной системы дизеля без вывода его из эксплуатации.

**Ключевые слова:** малооборотный дизель, топливопровод высокого давления, волновое поле, частотный резонанс, параметрический резонанс.



Підп. до друку 05.09.2016. Формат 60х84/16. Папір офсет.  
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 1,4.  
Тираж 100 пр. Зам. № И16-09-11

Національний університет «Одеська морська академія»  
65029, м. Одеса, Дідріхсона, 8.  
Тел./факс (0482) 34-14-12  
publish-r@onma.edu.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК № 1292 від 20.03.2003