

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Одеська національна морська академія  
(ОНМА)

СЛОБОДЯНЮК ДМИТРО ІВАНОВИЧ

УДК 621.431.74

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ  
ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ СУДНОВОГО МАЛООБЕРТОВОГО ДИЗЕЛЯ

05.05.03 – двигуни і енергетичні установки

Автореферат дисертації  
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Одеса – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в ОНМА Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник

кандидат технічних наук, доцент  
**Колегаєв Михайло Олександрович**,  
декан судномеханічного  
факультету ОНМА,  
завідувач кафедри безпеки життєдіяльності  
на морському флоті.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор  
**Івановський Валерій Георгійович**,  
Одеський національний морський  
університет МОН України,  
професор кафедри суднових  
дизельних установок і технічної  
експлуатації флоту (м.Одеса)

доктор технічних наук, професор  
**Білогуб Олександр Віталійович**  
Національний аерокосмічний університет  
ім. М. Є. Жуковського, професор кафедри  
конструкції авіадвигунів (м.Харків).

Захист відбудеться « 17 » вересня 2015р. о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.106.01 в Одеській національній морській академії за адресою: 65029, м Одеса, вул. Дідріхсона, 8, корп.2.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Одеської національної морської академії за адресою: 65029, м Одеса, вул. Дідріхсона, 8, корп.2

Автореферат розісланий « 25 » червня 2015 р.

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

В. В. Нікольський

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Перетворення енергії згоряння палива в механічну роботу в тепловому двигуні істотно залежить від технічного стану деталей циліндропоршневої групи (ЦПГ), зокрема від стану поршневих кілець (ПК).

Існуючі способи поточного контролю працездатності поршневих кілець реалізовані при гідродинамічних умовах змащення при русі з великими швидкостями уздовж внутрішньої поверхні втулки, покритої мастильною плівкою. Під час руху поршня вздовж продувних вікон втулок циліндрове масло здувається в процесі продувки, товщина масляної плівки зменшується до мінімальних, загрозливих значень. При цьому в тонкому шарі мастила виникають анізотропні властивості, що призводять до зміни пружних характеристик плівки, які до теперішнього часу не вивчені. Погіршення умов змащення призводить до виникнення граничного тертя, адгезійного схоплювання і створенню загрози поломки поршневих кілець. На сьогодні науці не відомий механізм боротьби з таким видом поломок, що не дозволяє, не тільки керувати, а й ідентифікувати такі загрози, тому вирішення цього завдання є **актуальним**.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертації пов'язана з: Державною програмою розвитку промисловості на 2003-2011 роки (частина IV), затвердженої Кабінетом Міністрів України від 28.07.2003 р, № 1174, з програмою економічних реформ на 2010-2014 рр. «Заможне суспільство, конкурентноспроможна економіка, ефективна держава» (напрямок розвитку транспортної інфраструктури); «Транспортної стратегії України на період до 2020 р.» (Розп. КМУ від 20.10.2010 №2174-р.), та планом науково-дослідних робіт ОНМА за темою «Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології» ДР № 0114U000346 (2014 – 2017), в якій автор дисертації виконав окремі розділи.

**Метою дослідження** є підвищення працездатності ущільнювальних поршневих кілець циліндропоршневої групи суднового дизеля.

**Гіпотеза** полягає в тому, що технічний стан поршневих кілець визначається анізотропними властивостями тонкої масляної плівки.

**Головне завдання** дисертаційного дослідження полягає в розробці методу ідентифікації та способу діагностики технічного стану поршневих кілець малообертового дизеля під час руху вздовж продувних вікон втулки.

Для вирішення головного завдання знадобилося дослідження анізотропних властивостей у тонких масляних плівках, для чого була поставлена **задача** встановлення наступних зв'язків у системі між:

- частотою акустичних коливань і зміною розклинювального тиску в плівці під час руху кільця уздовж продувних вікон;
- зміною розклинювального тиску залежно від товщини тонких плівок циліндрових масел нафтового походження на поверхні втулки і поршневого кільця;
- товщиною плівки і технічним станом поршневого кільця.

**Об'єкт дослідження** - робочий процес суднового двигуна.

**Предмет дослідження** - процес руху поршневих кілець уздовж поверхні втулки циліндра.

**Методи дослідження.** Для вирішення головного і допоміжних завдань використані методи:

- дедукції – під час інформаційного пошуку;
- експертного оцінювання - при виборі теми дослідження та ідентифікації технічного стану поршневих кілець;
- системного аналізу – розробляючи технологічну карту досліджень;
- найменших квадратів - при виборі емпіричних залежностей;
- статичної обробки даних - при проведенні експериментів;
- фізичного моделювання для процесів у зоні взаємодії пари «кілець-втулка»;
- еліпсометрії - для вимірювання малих товщин масляних плівок;
- Фур'є перетворень - при дослідженні частотних характеристик акустичного сигналу;
- ранжирування - при вирішенні головного завдання.

**Наукова новизна дослідження** полягає в тому, що технічний стан поршневих кілець ідентифікується методом ранжирування за рівнями надійності, які діагностуються за частотою акустичного сигналу від поршневого кільця під час його руху вздовж вікон втулки, у наступній послідовності:

- надійний рівень (працездатний технічний стан кілець) - інтервал акустичних частот  $2 \div 200$  Гц;
- частково надійний рівень (відсутність плівки на окремих перемичках вікон втулок) - інтервал акустичних частот  $200 \div 300$  Гц;
- передаварійний рівень (режим граничного тертя з частковим адгезійним схоплюванням ПК і перемичок втулки циліндра) - інтервал акустичних частот  $300 \div 500$  Гц;
- аварійний рівень ПК (стан сухого тертя поршневих кілець, що призводить до їх поломки) - акустична частота більш 500 Гц.

**Вперше встановлено, що:**

– надійний рівень технічного стану ПК зберігається у процесі саморегулювання розклинюючого тиску в тонкій плівці, що змінюється за експоненціальним законом залежно від товщини і виключає контакт між сполученими поверхнями при її значенні більше  $h=140$  нм;

– частково надійний рівень технічного стану ПК характеризується процесом саморегулювання розклинювального тиску в плівці мастила, але в сполученні з'являються ділянки, на яких змащення відсутнє, поверхні зближуються на величину менше 140 нм, що призводить до збільшення частоти акустичного сигналу;

– передаварійний рівень технічного стану ПК відповідає режиму змащення, при якому збільшується площа сполучення, на якій відсутня змазка, що викликає режим граничного тертя з частковим адгезійним схоплюванням, зближенню поверхонь і подальшому збільшенню частоти акустичного сигналу;

– аварійний рівень технічного стану ПК відбувається коли відсутності змащення на великій площі сполучення (зближенню поверхонь до  $h = 0$  нм), на якій реалізується режим сухого тертя, що призводить до поломки ПК. При цьому частота збільшується до значень більших від 500 Гц;

– розклинювальний тиск у плівках циліндрового масла на чавуні й сталі залежить від товщини плівки за експоненціальним законом, чим забезпечується процес саморегулювання тиску поршневого кільця на втулку, і таким чином виключається контакт між ними.

– зародження плівок з анізотропними властивостями та їх товщина залежать від матеріалу, і відбувається на поверхні чавуну при товщині  $h = 165$  нм, а на сталях при  $h = 260 \div 280$  нм.

– зменшення товщини плівки з анізотропними властивостями відбувається тільки до мінімальної величини, яка для чавунів лежить в інтервалі  $h = 150 \div 155$  нм, при максимальному розклинювальному тиску  $P_s = 140$  кПа;

– величина частоти акустичного сигналу від поршневого кільця нелінійно залежить від розклинювального тиску в плівці з анізотропними властивостями.

#### **Практичне значення отриманих результатів полягає в:**

– розробці способу та створенні пристрою діагностики технічного стану ПК за величиною частоти акустичного сигналу при проходженні продувних вікон;

– результати дисертаційної роботи впроваджені і використовуються в судноплавній компанії «STAMCO» на двигуні МАН B&W 7S46MC-C потужністю 9170 кВт, на т/х «Seine Highwax», (акт впровадження від 18 червня 2011 р.). і на т/х «Thames Highwax», (акт впровадження від 2 червня 2012 р.).

– ОНМА в НДР «Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології» ДР № 0114U000346 (акт № 21 від 06.05. 2014);

– ОНМА - у навчальному процесі з дисципліни - технічна експлуатація судових енергетичних установок, (акт № 22 від 17.03.2015 р.).

Річний економічний ефект від впровадження результатів досліджень становить 3520 доларів США.

**Особистий внесок здобувача полягає:** у розробці фізичної та математичної моделі, виконанні теоретичного розрахунку частоти акустичного сигналу, створенні лабораторних установок та проведенні експериментів з вивчення розклинювального тиску в масляних плівках (еліпсометрія) і залежності частоти акустичного сигналу від технічного стану поршневого кільця, обробки результатів експериментів. Сформульовано наукову новизну та наукове положення, а також патент на систему діагностування акустичного сигналу.

Розроблено методіку та пристрій для визначення технічного стану кілець при проходженні продувних вікон. Основні дослідження з дисертації виконані автором особисто, а в отриманих результатах у співавторстві його частка склала не менше ніж 60 %.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення роботи, окремі розділи і наукові результати доповідалися, обговорювалися і отримали позитивний відгук на 13 міжнародних, Всеукраїнських та вузівських науково-технічних конференціях у шести університетах та академіях України: міжнародній науково-технічній конференції «Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування і рефрежирації». Миколаїв: НУК-2008; III Міжнародній науково-технічній конференції на тему «Суднові енергетичні установки і системи: експлуатація та ремонт». 28-30 жовтня 2009. Одеса: ОНМА; V міжнародній

науково-технічній конференції на тему «Ефективність, надійність і безпека енергетичних установок». Україна, Севастополь-Балтимор 07-11 червня 2010; міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» 25-26 жовтня 2011. - Миколаїв: НУК; III Всеукраїнській науково-технічній конференції науково-педагогічних та інженерно-технічних працівників «Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення.» - 21-22 травня 2009. Первомайськ: ППІ НУК; IV Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення.» - 18-19 травня 2011. Первомайськ: ППІ НУК; Всеукраїнській науково - практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування» - Херсон: ХДМА, 2011; науково - технічній конференції на тему «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт». 26.03-27.03.2014 р Одеса: ОНМА та ін.

**Публікації.** Основні результати дисертаційного дослідження викладені в 24 публікаціях, з них 11 (4 без співавторів) опубліковано у фахових збірниках наукових праць, рекомендованих МОН України для публікацій дисертаційних досліджень і одному патенті, з яких дві статті в іноземних виданнях (Польща, Росія).

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних літературних джерел і додатка. Обсяг роботи -156 с., з яких основний текст-132 стор., у тому числі 45 рисунків, 5 таблиць, 11 сторінок списку літературних джерел (132 найменування).

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** чітко аргументована актуальність теми дисертації, сформульовані мета і завдання дослідження, відображені наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, наведено дані апробації результатів дисертаційної роботи і публікації.

**У першому розділі** виконано інформаційний пошук досліджень щодо підвищення надійності судових дизелів за такими напрямками: вплив процесу зношування деталей циліндропоршневої групи на надійність роботи двигуна; причини порушення роботи поршневих кілець та їх наслідки; проблеми змащення циліндрів крейцкопфних двигунів; особливості змащення сполучення «втулка-кілець». Велику увагу цим питанням приділено в роботах таких вчених як, Сторожев В.П., Ханмамедов С.А, Семенов В.С, Енгліш С., Возницький І.В., Голіков В.А., Половинка Е.М., Пилюгін А.С., Тарапата В.В., Молодцов Н.С., Міусов М.В., Горб С.І., Івановський В.Г., Суворов П.С., Колегаєв М.А., та ін.

За результатами інформаційного пошуку встановлено, що якість перетворення енергії згоряння палива в механічну роботу визначається працездатністю елементів ЦПГ дизеля, яка залежить від технічного стану поршневих кілець, зокрема: матеріалу і конструкції кілець; зношування і втрати кільцями пружності; впливу зношування втулок циліндрів на поломку кілець; вплив вібрації на поломку кілець; вплив порушення масляної плівки на працездатність ПК.

При малих швидкостях руху в районі НМТ може виникати граничний режим тертя, величина і характер якого визначається пружними властивостями масляних плівок, які розділяють деталі. У тонкому змащувальному шарі з анізотропними

властивостями створюється розклинювальний тиск, що перешкоджає виникненню адгезійного контакту між поршневим кільцем і перемичками вікон втулки, яке до теперішнього часу не вивчено. Рідкокристалічні властивості граничних шарів вивчалися Поповським Ю.М. і Алтоїзом Б.А., проте більшість їх робіт було присвячено ароматичним вуглеводням. Дослідження анізотропних властивостей циліндрової змазки, що виникають за рахунок структурування молекул змазки в пристінних шарах металів, не проводилося. Таким чином, при різноманітності досліджень спрямованих на підвищення надійності суднових дизелів практично відсутні роботи з вивчення технічного стану поршневих кілець під час руху вздовж вікон втулок, а також відсутні дослідження анізотропних властивостей тонких масляних плівок на чавунних поверхнях кільця і втулки та їх вплив на працездатність поршневих кілець.

На основі проведеного огляду обґрунтовано актуальність науково-прикладної задачі розробки методу ідентифікації та способу діагностики технічного стану поршневих кілець малообертових дизелів, під час руху вздовж продувних вікон втулки, з метою захисту від раптових відмов за рахунок поломки поршневих кілець.

Основні результати цього розділу наведені в [1, 3, 10, 11].

**У другому розділі** визначено вибір теми дослідження методом експертних оцінок можливих варіантів підвищення працездатності ущільнювальних поршневих кілець циліндропоршневої групи суднового дизеля за такими чинниками, як: актуальність, наукова новизна, ефективність, відповідність основним напрямкам наукової спеціальності і можливість використання в умовах морського судна. За результатами експертних оцінок найбільш актуальним і ефективним була визначена необхідність розробки способу діагностики технічного стану поршневих кілець малообертового дизеля залежно від анізотропних властивостей тонкої масляної плівки. Сформульована мета, висунута гіпотеза і поставлена головна задача наукового дослідження, яка полягає в розробці методу ідентифікації і способі діагностики технічного стану поршневих кілець малообертового дизеля під час руху вздовж продувних вікон втулки.

Так як працездатність поршневих кілець визначається анізотропними властивостями тонких плівок мастила, що визначають природу взаємодії пари кільце - втулка в режимі граничної змазки, то для вирішення головного завдання знадобилося рішення ряду допоміжних завдань, а саме, встановлення наступних зв'язків: між частотою акустичних коливань і зміною розклинювального тиску в плівці; зміною розклинювального тиску залежно від товщини тонких плівок циліндрових масел нафтового походження на поверхні втулки і поршневого кільця; між товщиною плівки і технічним станом поршневого кільця.

Загальна методика наукового дослідження побудована на системному підході з використанням технологічної карти, яка містить всі елементи системного аналізу.

У першій допоміжній задачі передбачалося дослідити процес взаємодії кільця з втулкою, при малих швидкостях руху вздовж продувних вікон. Для вирішення цього завдання доцільно використовувати метод фізичного і математичного моделювання, який дозволяє встановити залежність частоти акустичного сигналу від розклинювального тиску в плівці.

Друга допоміжна задача пов'язана з експериментальним дослідженням залежності розклинювального тиску в тонких плівках циліндрових масел нафтового походження від товщини плівки на поверхні чавуну і сталей. Для вирішення цього завдання доцільно використовувати метод статичної обробки експериментальних даних, метод еліпсометрії. Для цього була створена лабораторна установка еліпсометричних досліджень.

Третя допоміжна задача пов'язана з експериментальним дослідженням залежності між товщиною плівки і технічним станом поршневого кільця. Для вирішення цього завдання доцільно використовувати метод статичної обробки експериментальних даних, створена лабораторна установка, що має Фур'є - перетворення акустичного сигналу.

Рішення головного завдання, що полягає в розробці методу і способу діагностики технічного стану поршневих кілець на основі встановлення зв'язку між частотою акустичного сигналу та їх технічним станом, виконано шляхом синтезу наукових результатів рішення допоміжних завдань.

Під час експериментальних досліджень використовувалося наступне обладнання. Вимірювач шуму і вібрації ВШВ-003 (діапазон частотний віброприскорення:  $10 \div 10\,000$  Гц, віброшвидкість:  $10 \div 2800$  Гц). Використана вдосконалена конструкція типового датчика віброприскорень, побудованого на п'єзокераміці - ЦТС19. Нерівномірність амплітудно-частотних характеристик вимірювача ВШВ-003 при вимірюванні середнього квадратичного значення віброприскорення і віброшвидкості не більше  $\pm 10\%$ .

Обробка отриманих результатів виконувалася за допомогою методів математичної статистики. Тиск у плівці визначався за виразом

$P = \rho g(H_0 - H_1)$ . Величини  $H_1$  і  $H_0$  визначалися за допомогою мікрометричного пристрою відповідно, з точністю  $H = \pm 0,1$  мм, що призводило до помилки розклинювального тиску  $P = \pm 1$  Па. Експериментальна похибка вимірювань і подальшого розрахунку значень кутів  $\Psi$  і  $\Delta$  знаходилася в межах  $\Delta\Psi = \pm 0,06^\circ$  і  $\Delta\Delta = \pm 0,47^\circ$ , що призводило до похибки визначення товщини шару  $\Delta h = 0,5 \div 1,0$  нм.

Наведена інформація дозволяє стверджувати, на думку автора, про відповідність використаних теоретичних і експериментальних методів, пристроїв і приладів сучасному рівню наукових досліджень та достовірності результатів, отриманих в роботі.

Основні результати цього розділу наведені в [1-5, 14].

**У третьому розділі** наведено рішення першої допоміжної задачі - дослідження процесів руху кілець з малими швидкостями, що відбуваються у вузлі тертя при розділі сполучених поверхонь тонким шаром мастила, зокрема встановити зв'язок між частотою акустичних коливань і зміною розклинювального тиску в плівці під час руху кільця уздовж продувних вікон.

Фізична модель, яка описує процес тертя для вузла, що працює в режимі граничної змазки представлена на рис. 1. Сила тертя представлена як сума сил трьох груп явищ: опір руху елемента вузла тертя в мастильних матеріалах з ізотропними властивостями, анізотропними і опір зсуву елемента вузла тертя на адгезійних контактах.



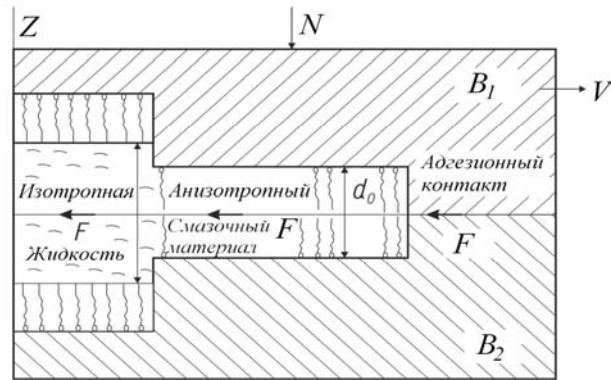


Рис. 1. Фізична модель зони тертя.

На підставі фізичної моделі розглянута схема типового вузла тертя (рис. 2). Поршень з кільцем рухається зі швидкістю  $V$  вздовж осі  $X$ . Кільце притискається до втулки циліндра під дією тиску  $P$  і може рухатися в напрямку перпендикулярному осі  $X$ . Відповідно до фізичної моделі, в сполученні «втулка-кільце» виділено три ділянки, що представляють різний тип взаємодії. I –ізотропний, II – анізотропний, III –адгезійний контакт.

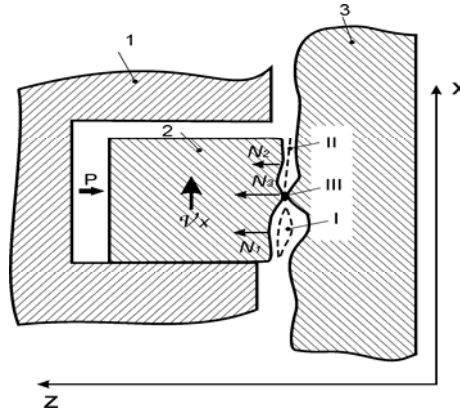


Рис. 2. Схема типового вузла тертя.

Система рівнянь для всіх ділянок взаємодії має наступний вигляд:

$$\begin{cases} \alpha P = A_{\Gamma} \Pi_s \\ \beta P = A_{\beta} E_{\beta} \\ \gamma P = A_{\gamma} E_{\gamma} \end{cases} \quad (1)$$

де  $\alpha, \beta, \gamma$  - вагові коефіцієнти, що відображають частину нормального навантаження, яка сприймається шарами масла, що знаходяться в ізотропному, анізотропному стані і металевими виступами шорсткої поверхні. Площа взаємодії:  $A_c = A_{\Gamma} + A_{\gamma} + A_{\beta}$

де  $A_c$  - контурна площа контакту,  $A_{\Gamma}$  - площа контакту зайнята шаром масла, що знаходиться в анізотропному стані,  $A_{\gamma}$  - площа контакту зайнята шаром масла з об'ємними властивостями,  $A_{\beta}$  - площа зайнята фрикційним контактом.

Відносні деформації виступів в шарі з анізотропними властивостями, фрикційному контакті й об'ємній фазі мастила рівні, відповідно:

$$\varepsilon_r = \frac{\alpha P}{A_r \Pi_s}; \quad \varepsilon_\beta = \frac{\beta P}{A_\beta E_\beta}; \quad \varepsilon_\gamma = \frac{\gamma P}{A_\gamma E_\gamma} \quad (2)$$

де  $E_\beta$ ,  $E_\gamma$  – відповідні модулі Юнга,  $\Pi_s$  – розклинювальний тиск в тонкому шарі мастила.

Враховуючи, що

$$\begin{aligned} A_r &= A_c b \varepsilon^\nu; \\ A_\beta &= A_r \varepsilon^2 \operatorname{ctg}^2 \theta = A_c b \varepsilon^{\nu+2} \operatorname{ctg}^2 \theta \end{aligned} \quad (3)$$

Для частини нормального навантаження, що сприймається шаром масла, що знаходиться в анізотропному стані:

$$\varepsilon_r A_c b \varepsilon^\nu \Pi_s = P - \varepsilon_\beta A_c b \varepsilon^{\nu+2} \operatorname{ctg}^2 \theta E_\beta - \varepsilon_\gamma A_c (1 - b \varepsilon^\nu - b \varepsilon^{\nu+2} \operatorname{ctg}^2 \theta) E_\gamma \quad (4)$$

де,  $b$  і  $\nu$  - експериментальні коефіцієнти, що відображають шорсткість поверхні. Для полірованих поверхонь  $\nu = 3$ ,  $b = 5 \div 10$ . Якщо взяти до уваги, що,  $\varepsilon_r = \varepsilon_\beta = \varepsilon_\gamma = \varepsilon$  а  $\nu = 3$ , з урахуванням того що  $E_\gamma$  на два порядки менше ніж для параметрів сталі і шару, отримаємо:

$$\frac{P}{A_c} - b \operatorname{ctg}^2 \theta E_\beta \varepsilon^6 - b \Pi_s \varepsilon^4 - E_\gamma \varepsilon = 0 \quad (5)$$

З рівняння випливає, що для знаходження частоти сигналу не вистачає значення розклинювального тиску  $\Pi_s$ , який знаходили експериментально.

Вирішуючи останнє рівняння, отримаємо залежність відносної деформації  $\varepsilon(P)$ .

Значення частоти сигналу знаходимо, підставляючи значення  $\varepsilon(P)$  в (5):

$$\nu_i = 10^4 b \varepsilon^{\nu-1} \nu_i \quad (6)$$

Розрахункова залежність частоти акустичного сигналу від величини розклинювального тиску в плівці мастила, що знаходиться в анізотропному стані представлена на рис. 3б, з якого випливає що за нормальної роботи поршневого кільця акустична частота знаходиться в межах  $2 \div 200$  Гц.

Таким чином, теоретичний розрахунок частоти акустичного сигналу при взаємодії поршневого кільця і втулки, розділених шаром мастила з анізотропними властивостями, заснований на запропонованій математичній моделі взаємодії, дозволив встановити інтервал акустичних частот, які відповідають працездатному стану поршневого кільця, що дорівнює  $2 \div 200$  Гц.

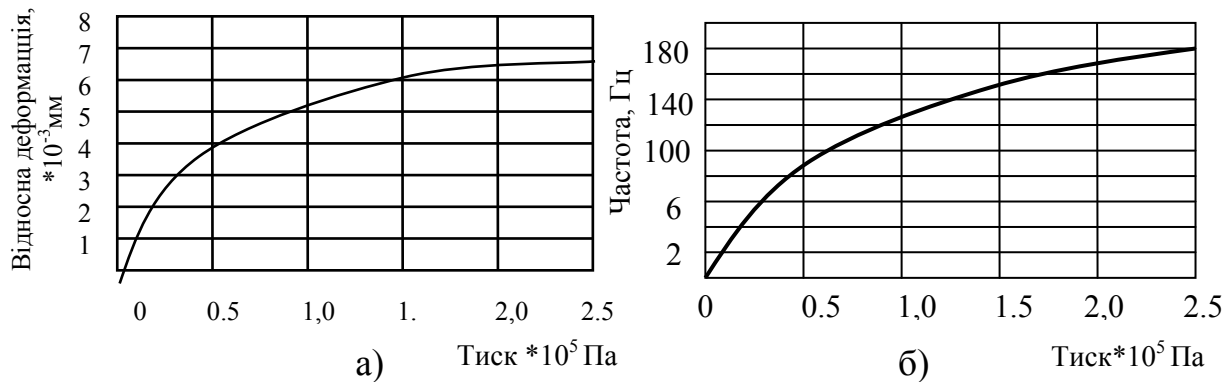


Рис. 3. Залежність відносної деформації (а) і частоти акустичного сигналу від розклинювального тиску в плівці (б). (Тут  $b = 5$ ,  $V_i = 0,7$  м/с).

Основні результати цього розділу наведені в [4, 16, 17].

**Четвертий розділ** присвячений вирішенню другого і третього допоміжних завдань з експериментального дослідження розклинювального тиску в тонких плівках циліндрового масла залежно від їх товщини на чавунних і сталевих поверхнях і встановлення залежності між товщиною плівки і технічним станом поршневого кільця.

Частота акустичного сигналу значною мірою залежить від дефектів поверхні та її шорсткості. Дослідження дефектів на робочих поверхнях деталей ЦПГ виконано безпосередньо на суднах під час розбирання, на двигунах SULZER 7 RTA 62 U (т/х «HUAL AFRICA») і MAN B&W 7S60MC-C (т/х «MORNING CHAMPION»). Встановлено (рис. 4), що в деяких випадках, довжина полонаних фрагментів кілець дорівнює відстані між продувними вікнами, або кратна йому, що вказує на поломку кілець в момент проходження продувних вікон втулок, при погіршенні умов змащення.

Заміри шорсткості поверхні втулки і кільця, що пройшли стадію опрацювання, показали, що вони знаходяться в інтервалі  $Ra_{0,42 \div 0,63}$ .



Рис. 4. Поршень двигуна MAN B&W 7S60MC-C з полонаними 3 і 4 кільцями.

Експериментально розклинювальний тиск циліндрових масел на металевих поверхнях досліджувався на лабораторній установці методом еліпсометрії (рис. 5), заснованому на явищі інтерференції поляризованого світла при проходженні тонких плівок. Оскільки товщина плівки дуже мала, то єдиним методом її вимірювання є метод лінійно поляризованого світла, відповідно до якого поворот площини поляризації є функція товщини плівки. Результати інтерференції променів вивчались за допомогою еліпсометричного мікроскопа Мел. (Рис. 5). Для знаходження параметрів еліпса поляризації  $\Delta$  і  $\Psi$  вимірювалися азимут гасіння поляризатора  $P_0$  і аналізатора  $A_0$ .

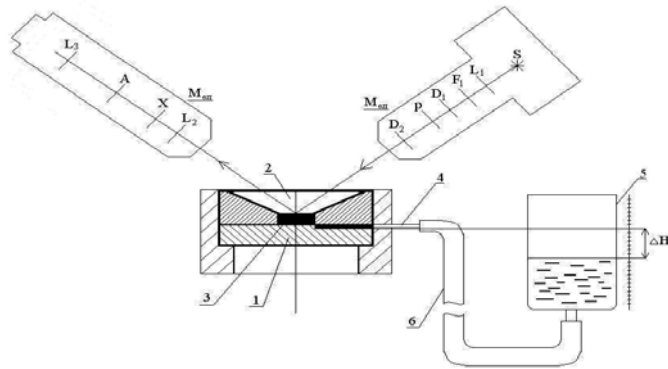


Рис. 5. Схема еліпсометричної установки для визначення розклинювального тиску в тонких плівках масла залежно від її товщини.

На полірований зразок-1 встановлюється сталевий конус-2, з отвором діаметром 1мм, в якому формується плівка масла-3, штуцер-4, який з'єднується шлангом-6 з посудиною-5.

Так, як розклинювальний тиск із зменшенням товщини плівки збільшується, то компенсація цього збільшення проводилася опусканням посудини з маслом. При знаходженні плівки в рівноважному стані, зменшення потенційної енергії рідини дорівнює збільшенню розклинювального тиску в плівці. Зміна розклинювального тиску в плівці визначалося за виразом:  $P = \rho g (H_0 - H_1)$ , де,  $\rho$  - щільність масла.

Розрахунок товщини шару виконаний за допомогою основного рівняння еліпсометрії – рівняння Друде (7), що встановлює зв'язок між експериментальними параметрами  $\Psi$ ,  $\Delta$  і оптичними характеристиками відображаючого зразка, обумовленими узагальненими коефіцієнтами Френеля  $R_p$  і  $R_s$ .

$$\operatorname{tg} \Psi \cdot e^{i\Delta} = \frac{R_p}{R_s} \quad (7)$$

Розроблено математичний апарат обробки експериментальних даних для випадку неполярних молекул на металах. Залежність розклинювального тиску від товщини плівок масла на сталевих поверхнях і чавунному кільці представлені на рис. 6а, б.

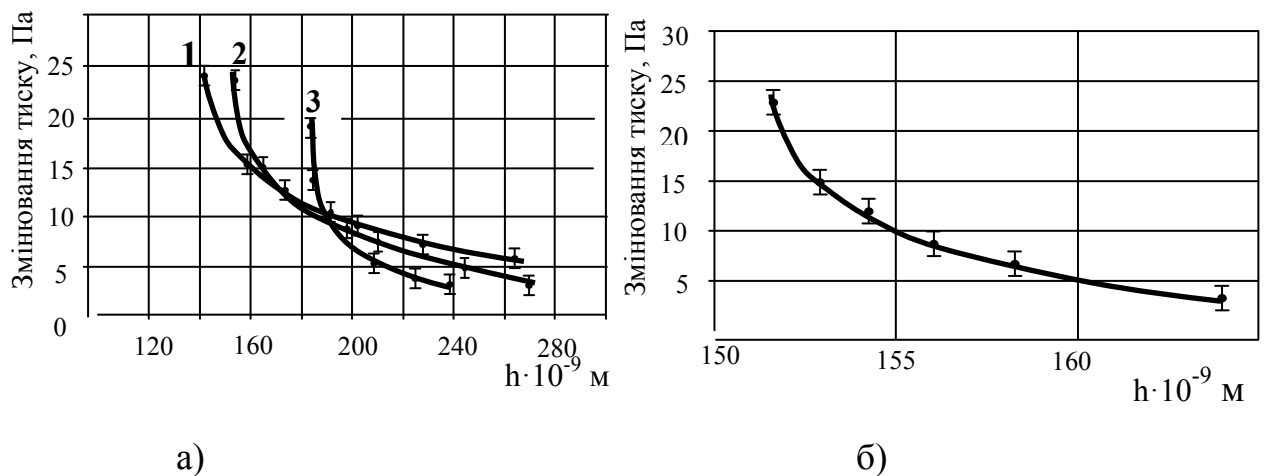


Рис. 6. Зміна розклинювального тиску залежно від товщини плівки в циліндровому маслі ENERGOL CLO 50 M на сталі ШХ15А (1), сталь 35ХМА (2), сталь 45 (3) (а) і на поверхні чавунного кільця (б).

Встановлено:

- розклинювальний тиск на чавунних і сталевих поверхнях відповідає осередку позитивних тисків  $P_s > 0$ , тобто в тонкому змащувальному шарі, за рахунок структурування молекул, виникає сила, спрямована у протилежний бік тиску кільця на втулку;
- зміна розклинювального тиску на сталевій і чавунній поверхнях в плівках масла мають вигляд близький до експоненціального;
- максимальний розклинювальний тиск на чавуні  $P_s = 140$  кПа, що виникає за мінімальної товщина плівок на чавуні в інтервалі  $150 \div 155$  нм.

На фотографіях (рис. 7) у поляризованому світлі, показані різні фази формування тонкої плівки масла на сталевій поверхні, від її виникнення (а), до мінімальної товщини (в).

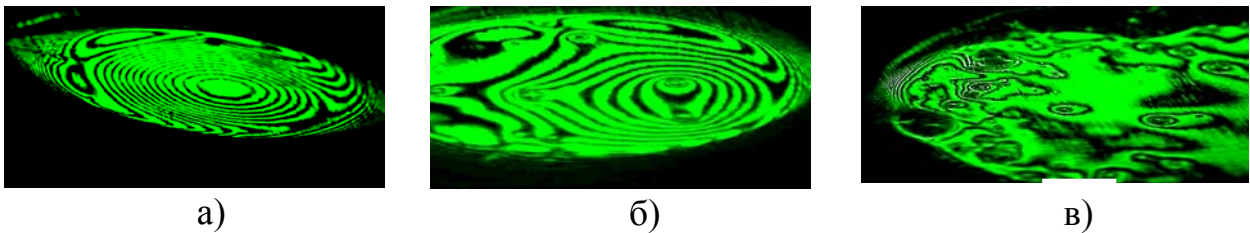


Рис. 7. Мікрофотографії масляної плівки циліндрового масла ENERGOLO GLO 50M з анізотропними властивостями різної товщини в поляризованому світлі на сталевій поверхні.

Таким чином, дослідженням підтверджено анізотропні властивості тонких мастильних шарів, та їх істотний вплив на пружно-демпфуючі характеристики циліндрової змазки.

Рішення третьої допоміжної задачі - встановлення залежності між товщиною плівки і технічним станом поршневого кільця проводилися на лабораторній установці, схема якої представлена на рис.8.

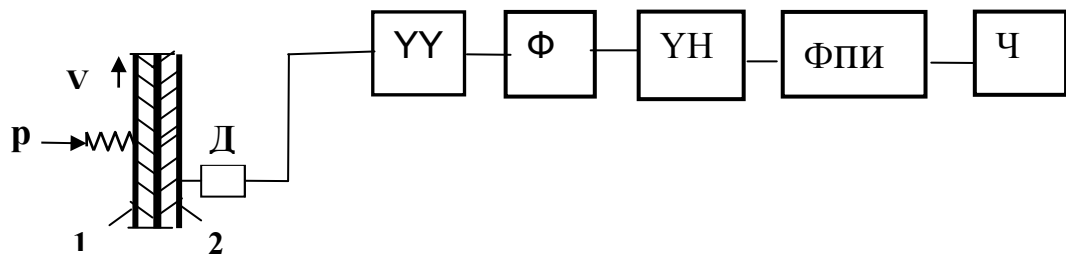


Рис. 8. Блок-схема системи діагностики технічного стану поршневих кілець. 1 - кільце, 2 - втулки, Д - акустичний датчик; УУ – вузько смуговий підсилювач; Ф - фільтр; УН - підсилювач напруги; ФПІ -формував прямокутних імпульсів; Ч - частотомір, Р – тиск, що передається через пружину.

Поверхні мали шорсткість  $Ra_{0,42, \div 0,63}$ , що відповідає стану поверхонь втулок і кілець після опрацювання.

У результаті дослідів встановлено:

1. Нормальне функціонування системи «кільце-втулка» лежить в інтервалі частот 2-200 Гц, при наявності мастила, що підтверджує правильність теоретичного розрахунку, виконаного на основі запропонованої фізичної моделі.

2. Поява частоти 200÷300 Гц (рис. 9) відбувається за відсутності змащення на окремих ділянках.

3. Сигнал частоти 300÷500 Гц (рис. 10) відповідає важкому режиму граничного тертя з адгезійним схоплюванням поверхонь.

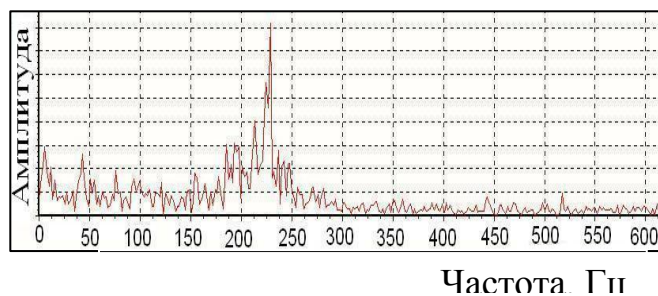


Рис. 9. Амплітудно-частотна характеристика сигналу при порушенні мастила на окремих ділянках.

4. Необоротна деструкція поршневих кілець відбувається за частоти сигналу більше 500 Гц (рис. 11). При цьому виробляється сигнал на аварійну зупинку двигуна.

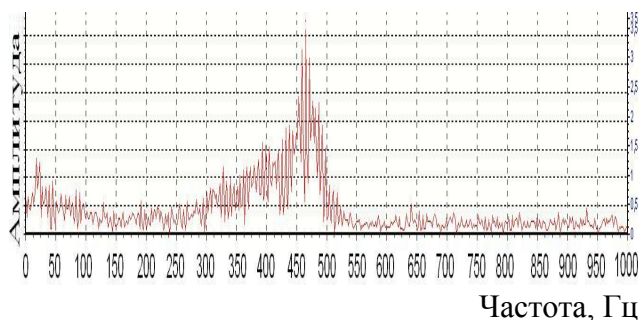


Рис. 10. Частотна характеристика сигналу, що відповідає початку процесу схоплювання на невеликих ділянках, на яких відсутнє змащення.

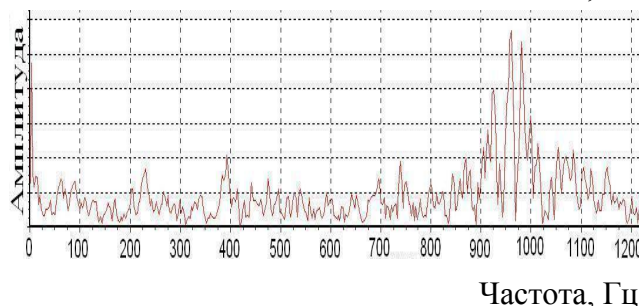


Рис. 11. Частотна характеристика сигналу, що відповідає процесу схоплювання на великій площі.

Таким чином:

1. Встановлено закономірності зміни пружних властивостей у тонких плівках мастила, що знаходяться в рідкокристалічному стані:

- зміна розклинювального тиску на сталевій і чавунній поверхнях у плівках масла мають вигляд близький до експоненціального;
- найбільше значення розклинювальний тиск на чавуні дорівнює  $P_s=140$  кПа, що виникає за мінімальної товщини плівок на чавуні в інтервалі  $h=150\div 155$  нм.

2. Технічний стан поршневих кілець може бути ідентифіковано за частотою акустичного сигналу від поршневого кільця під час руху вздовж вікон втулки. Встановлено залежність частоти акустичного сигналу від режимів змащення кільця, відповідно: наявності змазки (2÷200 Гц), частковій відсутності змазки без схоплювання (200÷350 Гц), за наявності процесу схоплювання (350 ÷ 500 Гц), процесу схоплювання на великій площі при сухому терті (більше 500 Гц).

Основні результати цього розділу наведені в [1, 2, 3, 6, 7, 9, 10, 12, 13, 15, 20, 21].

**П'ятий розділ** присвячений вирішенню головного завдання дослідження на основі синтезу наукових результатів рішення допоміжних завдань та узагальнення досвіду експлуатації судових МОД, розроблено метод ідентифікації та спосіб діагностики технічного стану поршневих кілець малооборотового дизеля під час руху вздовж продувних вікон втулки.

Встановлено, що технічний стан поршневих кілець залежить від режимів змащення, наявності плівки і її товщиною, визначається методом ранжирування за рівнями надійності, які діагностуються за частотою акустичного сигналу від поршневого кільця при його русі вздовж вікон втулки, в наступній послідовності:

- надійний рівень (справний технічний стан кілець) - інтервал акустичних частот  $2 \div 200$  Гц;
- частково надійний рівень (відсутність плівки на окремих перемичках вікон втулок) - інтервал акустичних частот  $200 \div 300$  Гц;
- передаварійний рівень (режим граничного тертя з частковим адгезійним захопленням поршневих кілець і перемичок втулки циліндра) - інтервал акустичних частот  $300 \div 500$  Гц;
- аварійний рівень (стан сухого тертя поршневих кілець, що приводить до їх поломки) - акустична частота більше 500 Гц.

Розроблено пристрій ідентифікації технічного стану кільця, який пройшов випробування на двигуні МАН В&W 7S 46МС-С потужністю 9170 кВт, на т/х «Seine Highwax» і на т/х «Thames Highwax». Датчик акустичного сигналу кріпився над продувними вікнами втулок.

Під час вимірювань у реальних умовах роботи двигуна датчик сприймає не тільки сигнал, що несе корисну інформацію, а й сторонні сигнали. Для виділення корисної інформації зі складного віброакустичного сигналу застосували фільтрацію сигналу за допомогою фільтра. У результаті проведення експериментів на судні підтверджена діагностична модель технічного стану поршневих кілець, розроблена на підставі випробувань на моделях тертя регулюванням кількості та наявності змазки яка показана на рис. 12. У моделі встановлені надійний, попереджувальний і аварійний рівень акустичного сигналу.

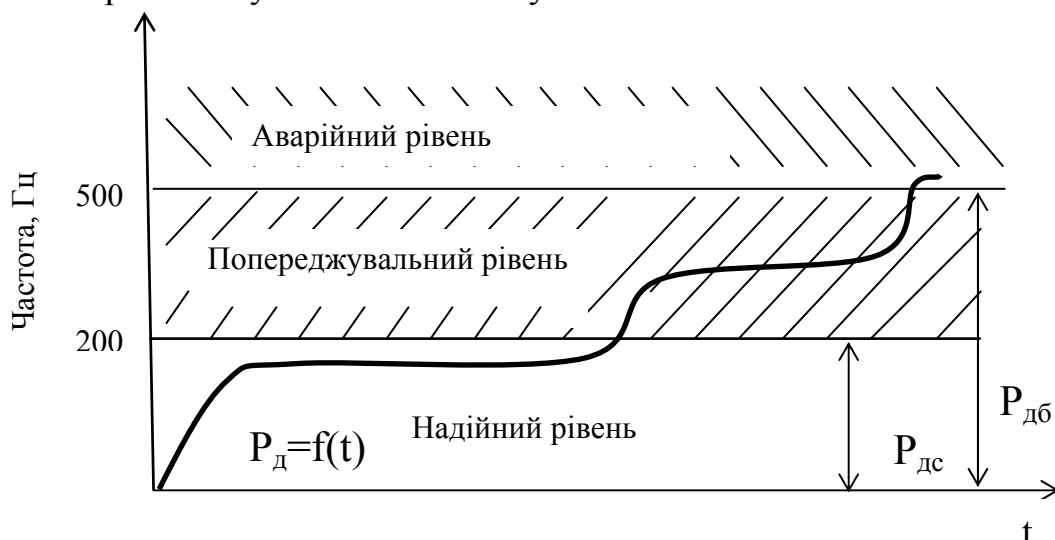


Рис. 12. Діагностична модель технічного стану поршневих кілець МОД.

Інтервал частот акустичного сигналу 200÷500 Гц відповідає попереджувальному рівню, відповідного важкого режиму граничного тертя з адгезійним схоплюванням кілець і перемичок втулки циліндра. Інтервал частот більше 500 Гц відповідає граничному рівню з появою сухого тертя. При цьому відбувається необоротна деструкція поршневого кільця і виробляється сигнал на аварійну зупинку двигуна.

Досвід діагностування сигналу в суднових умовах показав, що через наявність шумів і процесу згасання амплітуди акустичних коливань при розповсюдженні по втулці і в змащувальному шарі, необхідне підвищення чутливості компонентів вібросигналу до технічного стану поршневого кільця. У деяких випадках, на стадії зародження дефектів, або при порушенні умов змазування, перешкоди можуть перевищувати рівень корисного сигналу, що містить інформацію про зміну технічного стану поршневих кілець. Удосконалення розробленої автором і випробуваної системи діагностування технічного стану поршневих кілець проводилося шляхом підвищення інформативності акустичного сигналу, з одночасним зменшенням впливу рівня шумів. Для цього автором розроблена система діагностування технічного стану поршневих кілець, яка захищена патентом на корисну модель.

Основні результати цього розділу наведені в [5, 6, 7, 8, 9, 18, 19, 22, 23, 25].

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлено нове рішення актуальної наукової задачі підвищення надійності циліндропоршневої групи суднових дизелів, шляхом попередження порушення працездатності поршневих кілець ідентифікацією їх технічного стану під час руху вздовж продувних вікон втулки циліндра.

Малообертові дизеля входять до складу майже всіх суднових СЕУ. Перетворення енергії згоряння палива в механічну роботу в тепловому двигуні залежить від технічного стану деталей циліндропоршневої групи, зокрема від працездатності поршневих кілець. Одним із шляхів підвищення працездатності ущільнювальних поршневих кілець є використання залежності їх технічного стану від анізотропних властивостей тонкої масляної плівки, що виникає при малих швидкостях руху кільця і погіршенні змащування між поверхнями сполучених деталей. Це явище відкрито і вивчено для ароматичних вуглеводнів. Однак, питання про його можливе використання для підвищення надійності двигунів, через виникнення умов загрози поломки поршневих кілець, раніше не досліджувалось, тому є актуальним.

Головний науковий результат дисертаційної роботи полягає в тому, що технічний стан поршневих кілець ідентифікується методом ранжирування за рівнями надійності, які діагностуються за частотою акустичного сигналу від поршневого кільця при під час руху вздовж вікон втулки, у наступній послідовності:

- надійний рівень (справний технічний стан кільця) - інтервал акустичних частот 2 ÷ 200 Гц;
- частково надійний рівень (відсутність плівки на окремих перемичках вікон втулок) - інтервал акустичних частот 200 ÷ 300 Гц;



- передаварійний рівень (режим граничного тертя з частковим адгезійним схоплюванням поршневих кілець і перемичок втулки циліндра) - інтервал акустичних частот  $300 \div 500$  Гц;
- аварійний рівень (стан сухого тертя поршневих кілець, що призводить до їх поломки) - акустична частота більш 500 Гц.

Вперше встановлено, що:

- надійний рівень технічного стану поршневого кільця зберігається в процесі саморегулювання розклинювального тиску в тонкій плівці, що змінюється за експоненціальним законом залежно від її товщини і виключає контакт між сполученими поверхнями при її значенні більше 140 нм;

- частково надійний рівень технічного стану поршневого кільця характеризується процесом саморегулювання розклинювального тиску, за наявності в сполученні ділянок, на яких змазка відсутня, в результаті чого поверхні зближуються на величину менше 140 нм;

- передаварійному рівню технічного стану поршневого кільця відповідає режим змащення, при якому збільшується площа сполучення, на якій відсутня змазка, що призводить до граничного тертя з частковим адгезійним схоплюванням поршневих кілець і перемичок втулки циліндра, зближенню поверхонь на величину менше 140 нм;

- аварійний рівень технічного стану поршневого кільця настає через відсутність змащення на великій площі сполучення, зближенню поверхонь до  $h = 0$  нм, при цьому реалізується режим сухого тертя, що призводить до поломки поршневих кілець;

– розклинювальний тиск у плівках циліндрового масла на чавуні і сталі залежить від товщини плівки за експоненціальним законом;

– зародження плівок з анізотропними властивостями і їх товщина залежать від матеріалу, і виникає на поверхні чавуну при товщині

$h = 165$  нм, а на сталях при  $h = 260 \div 280$  нм;

– зменшення товщини плівки з анізотропними властивостями відбувається тільки до мінімальної величини, яка для чавунів лежить в інтервалі  $h = 150 \div 155$  нм, при максимальному розклинювальному тиску

$P_s = 140$  кПа;

– величина частоти акустичного сигналу від поршневого кільця нелінійно залежить від розклинювального тиску в плівці з анізотропними властивостями.

Наведені в дисертації теоретично обґрунтовані і експериментально підтверджені наукові результати мають істотну практичну значимість. Впроваджено пристрій для діагностики технічного стану поршневих кілець в судноплавній компанії «STAMCO» на двигунах МАН В&W 7S 46МС-С потужністю 9170 кВт, що дозволило підвищити надійність циліндропоршневої групи судового дизеля за рахунок контролю працездатності ущільнювальних поршневих кілець.

Отримані результати можуть бути використані при розробці алгоритму і схеми управління мастилом циліндрів, з урахуванням даних про технічний стан поршневих кілець під час проходження продувних вікон втулок циліндрів, а також при експлуатації інших модифікацій дизелів, встановлених на судах

морегосподарського комплексу України і ВМС. Вони можуть бути використані в таких галузях науки і техніки, як теплові двигуни, технології суднобудування та ін.

## ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Слободянюк Д. И. Совершенствование методов идентификации технического состояния поршневых колец судовых МОД / С.А. Ханмамедов, Д.И. Слободянюк // Судовые энергетические установки: научн. техн. сб.– №27 – Одесса: ОНМА, –2011. –С. 108-114. (здобувачеві належить: дослідження процесів зношування втулок циліндрів і поршневих кілець на суднах, а також причин поломки поршневих кілець при проходженні продувних вікон втулок).

2. Слободянюк Д. И. Изотермы расклинивающего давления в структурированной пленке цилиндрического масла судового дизеля. / С.А.Ханмамедов., Д.И. Слободянюк, А.А., Горюк, К.С. Шакур // Научно–виробничий журнал Проблеми техніки –№1.– Одеса: 2011. –С. 90-102. (здобувачеві належить: експериментальне дослідження розклинюючого тиску в масляних плівках, обробка результатів експерименту).

3. Слободянюк Д.И. Экспериментальные изотермы расклинивающего давления в пленках цилиндрического масла и их применение для повышения надежности судового дизеля. / Д.И. Слободянюк, С.А. Ханмамедов // Научно–виробничий журнал Проблеми техніки –№2.–Одеса: 2011. –С. 136-147. (здобувачеві належить: експериментальне дослідження розклинюючого тиску дизельного масла на сталевих поверхнях, обробка результатів експерименту).

4. Слободянюк Д.И. Расчет частоты импульсов акустического сигнала от сопряжения «кольцо-втулка» ЦПГ МОД с учетом расклинивающего давления в тонких пленках смазки / Д.И. Слободянюк, С.А. Ханмамедов, К.С. Шакур // Судовые энергетические установки: научн. техн. сб. – №28. –Одесса: ОНМА, 2012. – С.39-48. (здобувачеві належить: встановлення залежності частоти акустичного сигналу від розклинюючого тиску в плівці мастила, що знаходиться в анізотропному стані).

5. Слободянюк Д.И. Совершенствование методики идентификации состояния поршневых колец МОД при прохождении продувочных окон втулок. / Д.И. Слободянюк // Научно–виробничий журнал Проблеми техніки –№3.–Одеса: 2012. – С. 124-135.

6. Слободянюк Д. И. Расклинивающее давление в тонких пленках цилиндрического масла на чугунных поршневых кольцах судовых дизелей./ Д. И. Слободянюк, М.А.Колегаев, И.М. Слободянюк // Научно–виробничий журнал Проблеми техніки –№2.–Одеса: 2013. –С. 43-51. (здобувачеві належить: експериментальне дослідження розклинюючого тиску дизельного масла на чавунному поршневому кільці, обробка результатів експерименту, написання статті).

7. Slobodianiuk D.I. Experimental study of the disjoining pressure in the cylinder oil films on marine diesel engine piston rings. / D.I. Slobodianiuk, I.M. Slobodianiuk, M.A. Kolegaev // Journal of Polish CIMAC, Gdansk. 2013. Vol.8, No.1. St. 81-89. (здобувачеві належить: експериментальне дослідження розклиниваючого тиску на сталевих і чавунних поверхнях, обробка результатів експерименту, висновки).

8. Слободянюк Д.И. Диагностическая модель работоспособности поршневого кольца судового двигателя при реализации анизотропных свойств смазывающих материалов. / Д.И. Слободянюк //Судовые энергетические установки: научн. техн. сб.– №32. –Одесса: ОНМА, 2014.–С. 83-92.

9. Слободянюк Д.И. Совершенствование системы виброакустического диагностирования технического состояния поршневых колец судовых дизелей / Д.И. Слободянюк //Судовые энергетические установки: научн. техн. сб. – №31. –Одесса: ОНМА, 2014.–С.173-177.

10. Слободянюк Д.И. Экспериментальные изотермы расклинивающего давления в пленках цилиндрического масла судового дизеля./ Д.И. Слободянюк, М.А. Колегаев, А.А. Горюк. // Журнал университета водных коммуникаций. – СПб: ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова, 2014. – С-Петербург. –С. 42-49 (Вып. 1). (здобувачеві належить: експериментальне дослідження розклинюючого тиску на сталевих і чавунних поверхнях, обробка результатів експерименту, висновки).

11. Слободянюк Д.И. Система диагностирования технического состояния поршневых колец. Патент № 75246, 2012г.

12. Слободянюк Д.И. Особенности процессов трения поршневых колец дизелей. / С.А. Ханмамедов, Д.И. Слободянюк // Матеріали III-ої всеукраїнської науково-технічної конференції науково-педагогічних та інженерно-технічних працівників» Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення» – 21-22 травня 2009. Первомайськ: ПП НУК, –С. 52-53. (здобувачеві належить: аналіз причини втрати працездатності і руйнування поршневих кілець при експлуатації судових дизелів).

13. Слободянюк Д.И. Мониторинг процессов трения поршневых колец дизелей. / С.А. Ханмамедов, Д.И. Слободянюк // Матеріали III-ої Міжнародної науково-технічної конференції на тему «Суднові енергетичні установки і системи: експлуатація та ремонт». 28-30 жовтня 2009. Одеса: ОНМА, 2009. – С. 46. (здобувачеві належить: дослідження впливу порушення процесу змазування на напругу в чавунному кільці і його поломки).

14. Слободянюк Д.И. Совершенствование методов идентификации технического состояния поршневых колец судовых МОД. / С.А. Ханмамедов, Д.И. Слободянюк //Матеріали науково-технічної конференції на тему «Енергетика судна: експлуатація та ремонт». 30. 11.2010 – 1.12.2010. Одеса: ОНМА, 2010. –С. 15-16. (здобувачеві належить: дослідження дефектів зеркала втулки циліндра і поломки кілець на судах).

15. Слободянюк Д.И. Процессы изнашивания поршневых колец судовых дизелей в момент прохода продувочных окон. / Д.И. Слободянюк, С.А. Ханмамедов // Материалы V международной научно-технической конференции на тему «Эффективность, надежность и безопасность энергетических установок». Украина, Севастополь–Балтимор. 07–11 июня 2010. – С. 23 - 25. (здобувачеві належить: дослідження поломки кілець на судах).

16. Слободянюк Д.И. Система экспертной оценки технического состояния поршневых колец судовых дизелей / Д.И. Слободянюк, С.А. Ханмамедов // Материалы XI-ой Всеукраинской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Стан, досягнення і перспективи інформаційних систем і технологій», Одеська державна академія холоду, 25-26 квітня 2011. Одеса: ОДАХ, 2011. – С. 191 -

192. (здобувачеві належить: експертна оцінка технічного стану поршневого кільця за акустичними сигналами від вібраційного датчика, встановленого на циліндровій втулці судового двигуна).

17. Слободянюк Д. И. Изотермы расклинивающего давления в структурированной пленке цилиндрического масла судового дизеля. / С.А. Ханмамедов, Д.И. Слободянюк, А.А. Горюк, К.С. Шакурн // Матеріали науково-технічної конференції на тему «Енергетика судна: експлуатація та ремонт». 5.04.2011 – 7.04.2011. Одеса: ОНМА, 2011. –С. 61 - 64. (здобувачеві належить: експериментальне вимірювання товщини та расклинивающего тиску в масляних плівках, обробка результатів експерименту).

18. Слободянюк Д.И. Измерение расклинивающего давления в структурированной пленке цилиндрического масла судового дизеля. /С.А. Ханмамедов, Д.И. Слободянюк, А.А. Горюк, К.С. Шакурн // Матеріали IV-ої Всеукраїнської науково-технічної конференції «Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення.» – 18-19 травня 2011. Первомайськ: ППІ НУК, –С. 36-38. (здобувачеві належить: експериментальне вимірювання товщини та расклинивающего тиску в масляних плівках, обробка результатів експерименту, висновки).

19. Слободянюк Д.И. Совершенствование системы защиты поршневых колец судовых малооборотных двигателей. /С.А. Ханмамедов, Д.И. Слободянюк // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. «Актуальні с проблеми інженерної механіки» 25-26 жовтня 2011. – Миколаїв: НУК, 2011. –С. 66 - 68. (здобувачеві належить: розшифровка акустичного сигналу від вібраційного датчика встановленого на циліндровій втулці в процесі тертя поршневого кільця).

20. Слободянюк Д.И. Совершенствование методов идентификации технического состояния поршневых колец судовых МОД. / С.А. Ханмамедов, Д.И. Слободянюк // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування».– Херсон: ХДМА, 2011. –С.47-48. (здобувачеві належить: визначення еталонних значень акустичного сигналу що відповідають різним рівням працездатності поршневих кілець, при зміні умов змащення на лабораторній установці).

21. Слободянюк Д.И. Совершенствование методов идентификации акустического сигнала от поршневого кольца при прохождении продувочных окон цилиндров МОД. / С.А. Ханмамедов, Д.И. Слободянюк // Матеріали Всеукраїнської науково-технічної «Математичне моделювання та інформаційні технології» 23–25 листопада 2011. – Одеса: ОДАХ, 2011. –С. 135 - 136. (здобувачеві належить: встановлені частотні інтервали акустичного сигналу що відповідають надійному, предаварійному і аварійному рівню роботи).

22. Слободянюк Д.И. Идентификация сигнала о состоянии поршневых колец МОД при прохождении продувочных окон. / С.А. Ханмамедов, Д.И. Слободянюк // Матеріали науково-технічної конференції на тему «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт». 21.03.2012–23.03.2012. Одеса: ОНМА, 2012. – С. 158 - 160. (здобувачеві належить: розроблено пристрій для ідентифікації акустичного сигналу на судовому двигуні, випробування на судні).

23. Слободянюк Д.И. Расклинивающее давление в тонких пленках цилиндрического масла на чугунных поверхностях деталей судовых дизелей / Д.И. Слободянюк, М.А.

Колегаев // Матеріали науково-технічної конференції на тему «Суднові енергетичні установи: експлуатація та ремонт». 20.03.2013 – 22.03.2013. Одеса: ОНМА, 2013. – С. 15 - 18. (здобувачеві належить: експериментальне дослідження розклинюючого тиску на чавунних поршневих кільцях, обробка результатів експерименту ).

24. Слободянюк Д.И. Диагностика технического состояния поршневых колец судовых малооборотных дизелей. / Д.И. Слободянюк, М.А. Колегаев // Матеріали науково-технічної конференції на тему «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт». 26.03.2014–27.03.2014. Одеса: ОНМА, 2014. – С. 25 - 27. (здобувачеві належить: вдосконалення системи діагностування технічного стану поршневих кілець шляхом підвищення інформативності, та зменшення рівня шумів, формула винаходу патенту на корисну модель).

## АНОТАЦІЯ

Слободянюк Д. І. Вдосконалення методів ідентифікації технічного стану поршневих кілець судового малооборотного дизеля. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.05.03 - двигуни і енергетичні установки. Одеська національна морська академія, Одеса, 2015.

У дисертації вирішено актуальне наукове завдання підвищення надійності циліндропоршневої групи дизелів шляхом попередження руйнування поршневих кілець в районі продувальних вікон втулок циліндрів.

Наукова новизна дослідження полягає в ідентифікації технічного стану поршневих кілець методом експертних оцінок по рівнях надійності, які визначаються по частотним характеристикам акустичного сигналу від поршневого кільця, при проходженні продувальних вікон втулок циліндрів.

Виконані теоретичні дослідження процесу руху кільця при малих швидкостях. Проведені експериментальні дослідження по вивченню розклинюючого тиску в тонких плівках циліндрової змазки і знаходженню частотних інтервалів, що відповідають різним рівням надійності поршневих кілець. Розроблена діагностична модель технічного стану поршневих кілець

Приведений опис пристрою для моніторингу стану поршневих кілець, який впроваджений на судні.

**Ключові слова:** судовий двигун, змазка, кільце, тиск, ідентифікація, акустичний сигнал, частота, поляризоване світло.

## АНОТАЦІЯ

Слободянюк Д. И. Совершенствование методов идентификации технического состояния поршневых колец судового малооборотного дизеля. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – двигатели и энергетические установки. Одесская национальная морская академия, Одесса, 2015.

В диссертации решена актуальная научная задача повышения надежности цилиндропоршневой группы дизелей путем предупреждения поломки поршневых колец в районе продувочных окон втулок цилиндров.

Научная новизна исследования заключается в том, что техническое состояние поршневых колец может быть идентифицировано методом ранжирования по уровням надежности, которые определяются по частоте акустического сигнала от поршневого кольца при его движении вдоль окон втулок цилиндров.

Выполнены теоретические исследования процесса движения кольца при малых скоростях в зависимости от смазки. Разработана физическая модель, описывающая процесс взаимодействия для узла, работающего в режиме граничной смазки в котором сила трения может быть представлена как сумма сил трех групп явлений: сопротивление движению элемента узла трения в смазочном материале с изотропными свойствами, анизотропными свойствами и сопротивление сдвигу элемента узла трения на адгезионных контактах.

С помощью оптических методов (эллипсометрии) проведены экспериментальные исследования по изучению анизотропных свойств в тонких пленках цилиндрического масла. Установлено, что расклинивающее давление в пленках цилиндрического масла на чугунах и сталях зависит от толщины пленки по экспоненциальному закону. Зарождение пленок с анизотропными свойствами и их толщина зависят от материала, и происходит на поверхности чугуна при толщине  $h=165$  нм, а на сталях при  $h=260\div 280$  нм. Уменьшение толщины пленки с анизотропными свойствами происходит только до минимальной величины, которая для чугунов лежит в интервале  $h=150\div 155$  нм, при максимальном расклинивающем давлении  $P_s = 140$  кПа.

Установлено, что величина частоты акустического сигнала от поршневого кольца нелинейно зависит от расклинивающего давления в пленке с анизотропными свойствами.

Разработано устройства диагностики технического состояния поршневых колец по величине частоты акустического сигнала при прохождении продувочных окон.

**Ключевые слова:** судовой двигатель, смазка, анизотропия, кольцо, давление, идентификация, акустический сигнал, частота, поляризованный свет.

## ANNOTATION

Slobodianiuk D. I The Improvement of piston ring technical condition identification method on marine low speed diesel engines. - Manuscript.

Ph.D. thesis in Engineering Science specialty 05.05.03 - Engines and Power Plants. Odessa National Maritime Academy, Odessa , 2015.

The thesis deals with a vital scientific task solution as to improve reliability of cylinder-piston group on diesel engines by preventing the breakage of the piston rings in scavenging ports of cylinder sleeves.

The scientific novelty of the research is that the technical condition of the piston rings can be identified by ranking method of the reliability levels that are determined by the frequency of acoustic signal during piston ring movement.

We have made theoretical research of the ring movement at low speeds depending on lubricant type. The experimental study of the disjoining pressure in thin cylinder oil films and frequency of intervals corresponding to different levels of piston rings reliability for steel and cast-iron have been done.

The diagnostic model of piston rings technical condition has been worked out. The description of the installed monitoring device for ship's piston rings condition is given.

**Key words:** marine engine, lubrication, anisotropy, ring, pressure, identification, acoustic signal, the frequency, polarized light.