ISSN 1815-6770

Міністерство освіти і науки України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

Суднові енергетичні установки

Науково-технічний збірник

Випуск 39

Одеса
2019

ББК 39.46
С 169
УДК 629.123.066

Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вып. 39. - Одеса: НУ «ОМА», 2019. -169 с.

Збірник присвячений проблемам суднової енергетики, проектування, модернізації й експлуатації суднових енергетичних установок, методам підвищення ефективності й надійності використання суднових технічних засобів. Збірник входить у перелік видань, схвалених ВАК України по розділу технічних наук.

Для науковців і фахівців.

Редакційна колегія: к.т.н., проф. НУ «ОМА» М.О. Колегаєв, (редактор); д.т.н., проф. М.В. Міюсов; д.т.н., проф. В.А. Голіков; д.т.н., проф. В.Н. Захарченко; д.т.н., проф. С.І. Горб; к.т.н., доц. С.В. Сагін, НУ «ОМА»; д.т.н., проф. Г.Ф. Романовський, НУК; ОНМУ; д.т.н., проф. П.С. Суворов, секретаріат Дунайської комісії, заступник генерального директора; д.т.н., проф. А.М. Берестовой, АМИ;, к.т.н., проф. А.Н. Пипченко, НУ «ОМА»; к.т.н, доц. Ю.І. Журавльов, НУ «ОМА».

Адреса редакційної колегії: 65029, Одеса, вул. Дідріхсона, 8, національний університет «Одеська морська академія» (НУ «ОМА»), кафедра ТМС.

Контактні телефони редакції (048) 733-49-24, 733-23-52.

e-mail: ivanovich1zh@gmail.com

Комп'ютерна верстка Журавльов Ю.І.

Затверджене вченою радою НУ «ОМА», протокол №4 від 28.11.19.

©Національный університет "Одеська морська академія", 2019

Зміст

Афтанюк В.В., Даниленко Д.В., Афтанюк А.В. Моделювання та аналіз гідродинаміки парогазових потоків у скрубері вентурІ.. *5*
Афтанюк В.В., Гаврілкін О.Є. Моделювання гідродинаміки корпуса судна з урахуванням біологічного забруднення 14
Богач В.М., Шебанов А.М., Слободянюк І.М. Дослідження роботи системи "Puls" без акумулювання тиску масла..... 22
Бутенко О.В., Максимов М.В., Демиденко В.Е., Брунеткін О.І. Метод пошуку розв’язання складної задачі інтерпретації для розв'язання зворотної задачі з визначення складу пального.... 30
Козьміних М.А.,Задорожний В.А. Особливості обробки парів ЗПГ на газовозах з мембранним типом танків 43
Малахов О.В., Колегаєв М.О., Бражнік І.Д., Ліхогляд К.А. Характеристики процесу тепло-масопереносу в застосуванні до вентиляції інертними газами вантажних трюмів танкерів..... 56
Кулік В.І. Підвищення цетанового числа дизельного палива при домішках нанопорошка оксида алюмінія (Al_2O_3) 69
Савельева О.С., Малахова Д.О. Застосування інформаційних технологій у суднових технологічних процесах 78
Kaluga O.O., Kozminuh M.A. Analysis of construction features of gasfueled vessel’s storage tanks 89
Kiris A.V., Garagulya B.A. Calculation of ships attraction force power at their approach..... 96
Kozytskyi S.V., Kiriian S.V. Effectiveness of nanodispersed substances utilization in ship’s mechanisms 101
Lebediev B., Lebedieva E., Dmytrieva S., Krolkova M. Modification of exothermic compositions in order to increase their heat power 107
Polovinka E.M., Tabulinskiy I.N. Modeling of fuel injection processes of rt-flex engines accumulator common rail fuel injection system 115
Polovinka E.M., Yakovenko A.Y. Development and testing of systems for monitoring of marine diesel engines working processes on the basis of combined measuring converters.....129

Zhuralov Yu.I., Melnik A.A., Muradyan P.S. Use efficiency of the flexible connections (fc) of deck mechanisms 143
РЕФЕРАТИ 150
Правила оформлення і подання рукописів для збірника «Суднові енергетичні установки».....167

10.31653/smf39.2019.5-13

Афтанюк В.В., Даниленко Д.В., Афтанюк А.В.
Національний університет «Одеська морська академія»

МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ГІДРОДИНАМІКИ ПАРОГАЗОВИХ ПОТОКІВ У СКРУБЕРІ ВЕНТУРІ

ANNOTATION

The article presents the results of numerical simulation of a Venturi scrubber for purifying contaminated gases from SO_x emitted into the atmosphere by marine engines.

To model aerodynamics, a solid-state model of a Venturi scrubber was developed. Geometrical parameters and standard models are designed to ensure that they are stowed in clean ship systems.

At the first stage, they reached the bottom of the gas stream into the scrubber while feeding the obsolete gas in an amount of 32 m^3/s. On the basis of the obtained model of air flow graphs of velocity and pressure distribution along the axis of the Venturi scrubber were constructed.

To determine the rational volume of steam to be fed to the scrubber to ensure a uniform distribution of it on the apparatus, studies of the distribution at different amounts of steam.The study was conducted for three modes of operation of the scrubber, which differ in the amount of saturated steam supplied to the apparatus (1, 5, 10 m^3/s).

The simulation results allowed us to analyze the distribution of gas velocities and pressures in the scrubber, the efficiency of spraying and mixing of the gas stream and steam. Based on the analysis of hydrodynamics, the rational mode of operation of the scrubber is determined (steam supply – 10 m^3/s).

Further increase in the amount of steam can be considered impractical due to the fact that the gas velocity of the apparatus is greatly increased, which in turn leads to increased resistance of the apparatus and the leakage of dust.

The result of the early analysis is the transition to early models of purification systems based on the Venturi scrubber.

The developed model can be used as a separate unit in large models of cleaning systems, which include several types of scrubbers for various industries.

Keywords: shipboard systems for cleaning emissions of SO_x, solid-state scrubber models, numerical simulation of gas flows.

Постановка проблеми і її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. Інтенсивний розвиток судноплавства на водних шляхах призвело до будівництва якісно нового флоту: з потужними енергетичними установками, високими вантажопідйомністю та швидкістю. Масова експлуатація такого флоту супроводжується зростанням його впливу на навколишнє середовище. Вимоги до конвенції MARPOL (додаток VI), з метою захисту навколишнього середовища від викидів сірки (SO_x), встановлюють загальне обмеження максимальних викидів від суднових двигуні, та рекомендує застосувати систему очищення вихлопних газів для зниження загального викиду оксидів сірки [1].

Аналіз досліджень і публікацій. Проблемам зниження токсичних викидів від суднових енергетичних установок (СЕУ) присвячені численні наукові роботи вітчизняних та закордонних фахівців [2-4].

Аналіз впроваджених суднових систем очищення викидів від SO_x показує, що суднові системи очистки від SO_x складаються з скрубера Вентурі та скрубера-каплевловлювача. Такий склад мають системи фірми «Альфа Лаваль», компанії «МАН дізель» «Wärtsilä» та ін. фірми [5].

Незважаючи на великий об’єм виконаних робіт відсутня вичерпна інформація о ефективності роботи труби-коагулятора Вентурі в умовах перемінного режиму роботи дизельного двигуна, тому дослідження в цьому напрямку є актуальними.

Ідея роботи полягає в забезпеченні підвищення ефективності очищення SO_x за рахунок оптимізованої подачі пересиченої пари в скрубер Вентурі, що забезпечує покращення процесу абсорбції та уловлення сажі [6].

Метою роботи є підвищення ефективності суднової системи очищення SO_x на базі скрубера Вентурі шляхом оптимізації течій газу в ній, за допомогою створеної тривимірної твердо-тільної моделі і комп’ютерного моделювання.

Викладення основного матеріалу дослідження. Першим етапом дослідження є створення твердотільної тривимірної моделі скрубера Вентурі з подачею пересиченої пари в зоні горловини (рис. 1). Геометричні параметри і типорозміри відповідають існуючим конструкціям, що застосовується в суднових системах очищення. Тривимірна геометрична модель була створена в масштабі 1:1.

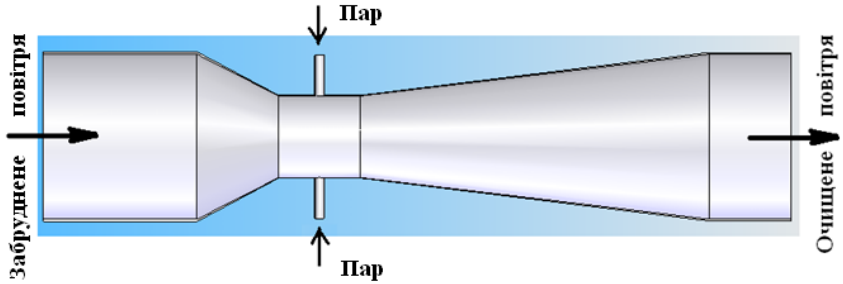


Рис. 1. Твердотільна модель скрубера Вентурі.

Для проведення числових розрахунків тривимірна геометрична модель скрубера Вентурі, була імпортована в середу Flow Simulation [7]. У цьому модулі була підготовлена геометрія області течії потоку (рис. 2) для вирішення внутрішньої задачі.

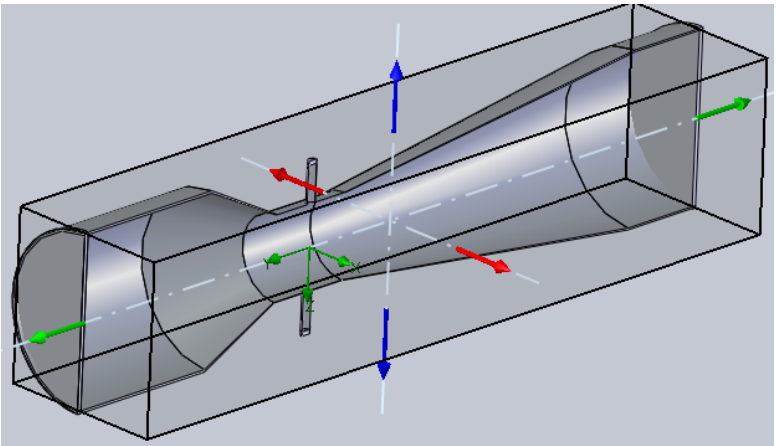


Рис. 2. Область розрахунку.

Для реалізації числового методу рішення розрахункова геометрична область рівномірно розбивалася на окремі осередки (елементи) в модулі Mesh, в результаті чого генерувалась розрахункова сітка (рис. 3). Кількість елементів в сітці становило 510000, що пов'язано з обмеженнями використовуваної для розрахунків ЕОМ. В якості кінцевих елементів використовувався куб. Розмір елемента задавався рівним 11,5 мм.

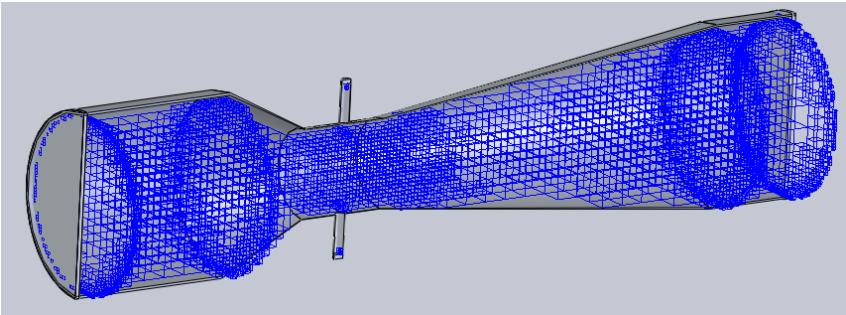


Рис. 3. Розрахункова сітка.

У комп’ютерній моделі в якості граничних умов приймалися: початкова швидкість *v*, (м/с) газу на вході; тиск на виході *P*, Па. При цьому на стінках скрубера умови ковзання газового потоку, розглядаються як непружні.

Проведення модельних розрахунків включало в себе наступні основні етапи:

- завантаження геометричної моделі скрубера;
- побудова сіткової моделі розрахункової області;
- визначення матеріалів фаз;
- завдання початкових і граничних умов;
- настройка вирішувача (вибір і настройка моделі, завантаження і компіляція UDF- функцій);
- настройка параметрів рішення;
- запуск розрахунку і отримання результатів обчислень;
- візуалізація та аналіз результатів чисельного розрахунку.

Чисельні розрахунки проводилися на 2-х ядерному процесорі ПЕОМ з 8 Гб оперативної пам'яті. Час отримання результату рішення становило від 0,5 до 1 години.

На першому етапі досліджень були проведені розрахунки руху газового потоку в скрубері (рис. 4) при подачі забрудненого повітря в об’ємі 32 м^3/с. Кількість пари подається в об’ємі 1 м^3/с, тиск на виході з апарату задавався рівним 1,5 атм.

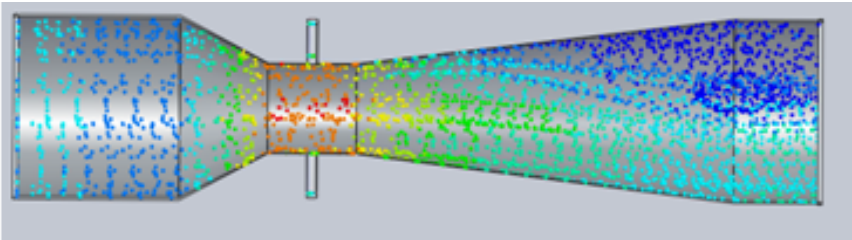


Рис. 4. Модель течій повітря в скрубері Вентурі.

З представленої картини перебігу газу випливає, що в трубі Вентурі забезпечується прискорення газового потоку з 17,4 м/с на вході до 58,8 м/с в конфузорі. Отримані дані добре узгоджуються з результатами відомих досліджень [8, 9], згідно з якими швидкість газу в горловині промислових труб Вентурі з аналогічними типорозмірами і параметрами газового потоку знаходиться в діапазоні 50 - 70 м/с. Отримані результати моделювання руху основного потоку є вхідними даними для моделювання руху і взаємодії частинок дисперсної фази в скрубері Вентурі.

На підставі отриманої моделі течії повітря були побудовані графіки розподілу швидкості (рис. 5) і тиску (рис. 6) по осі скрубера Вентурі. Побудова графіків виконана на осі апарату для чого в модель був спеціально встановлений віртуальний лінійний об’єкт.

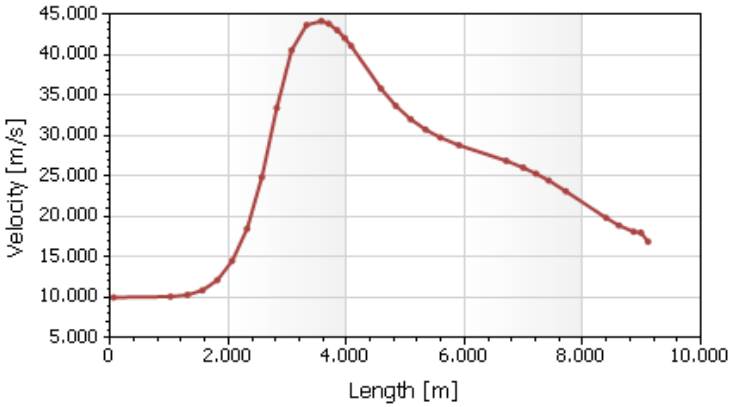


Рис. 5 – Графік зміни швидкості повітря по осі скрубера Вентурі

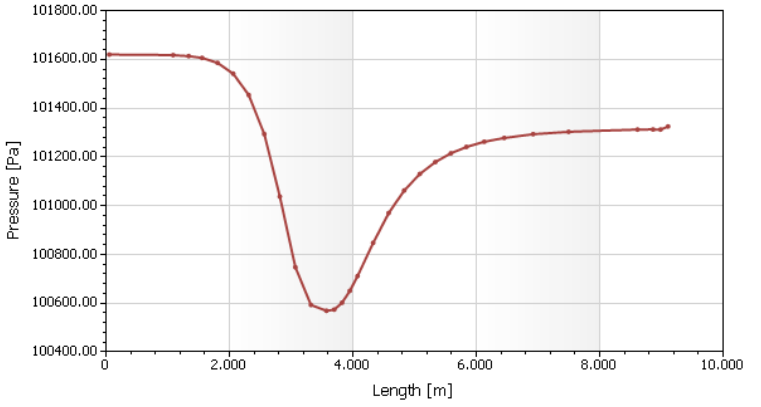


Рис. 6 – Графік зміни тиску повітря по осі скрубера Вентурі

Для визначення картини перебігу течії в об’ємі апарату для аналізу та моделювання раціональних режимів роботи скрубера побудований розріз (рис. 7) розподілу швидкостей.

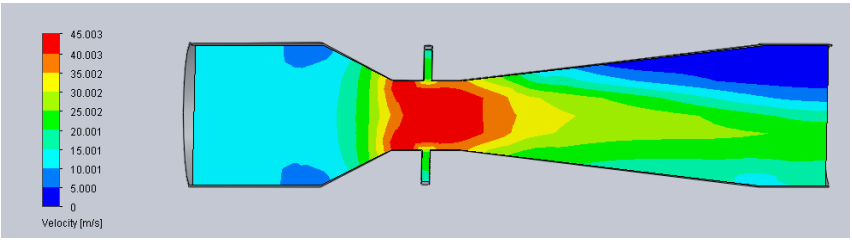


Рис. 7 – Візуалізація зміни швидкості повітря в об’ємі скрубера

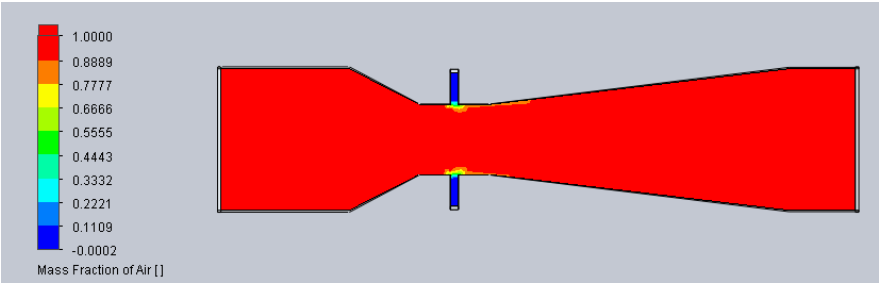
Для визначення раціонального об’єму пари що необхідно подати в скрубер для забезпечення рівномірного розподілу її по апарату були проведені дослідження розподілу при різних кількостях пари. Розглядались три варіанти роботи апарату:

– перший варіант – кількість пари становила 1 м^3/с;

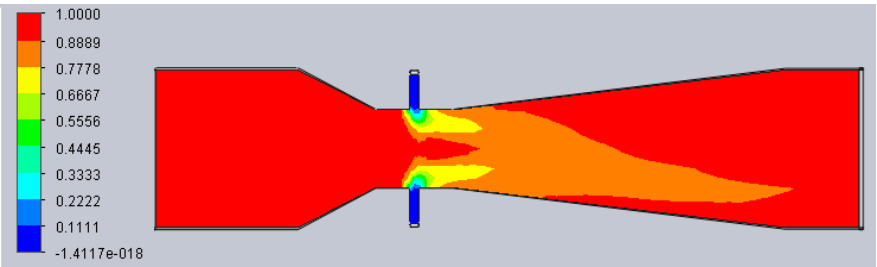
– другий варіант – кількість пари становила 5 м^3/с;

– третій варіант – кількість пари становила 10 м^3/с;

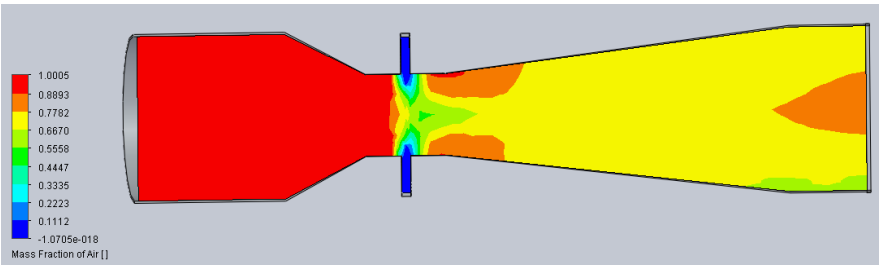
Візуалізація процесу змішування (рис. 7) в залежності від кількості пересиченої пари, що подається в скрубер показує, що найбільш раціональним є третій варіант (кількість пари 10 м^3/с).



а)



б)



в)

Рис. 7 – Візуалізація розподілу розпорошеної пари в об’ємі скрубера Вентурі:

а – для першого варіанту; *б* – для другого варіанту;
в – для третього варіанту

Подальше збільшення кількості пари можна вважати недоцільним у зв’язку з тим, що значно зростає швидкість газу в апараті що в свою

чергу призводить до збільшенню опору апарату та проскакуванню твердих частинок.

Висновки

1. Для дослідження течій газу при розпорошенні пересиченої пари в зоні горловини розроблена твердо-тільна модель скрубера Вентурі.

2. Числове моделювання ліній струму газу показало наявність зони зниження швидкості потоку газу.

3. Візуалізація розподілу фракції пари в забрудненому повітрі для різних об'ємів пересиченої пари дозволило визначити раціональну кількість пари, що необхідно подати щоб забезпечити рівномірний розподіл при в об'ємі дифузора.

4. Результати проведеного дослідження дозволяють перейти до дослідження наступних моделей систем очищення на базі скрубера Вентурі.

Закінчення

Розроблена твердо-тільна модель буде використана, як елемент збірки, при створенні моделі комбінованого скрубера для очищення викидів суднових двигунів від сполук SO_x.

Розроблена модель скрубера Вентурі може бути використана при проведенні науково-дослідних, дисертаційних робіт магістрантів, аспірантів, наукових працівників для порівняльної оцінки ефективності розпорошення фракцій, дослідження розподілу швидкостей і тисків.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Руководство по средствам защиты окружающей среды компании Wärtsilä // Сайт фірми Вартстиля. Режим доступу: http://www.wartsila.com.

2. Simulation of gas velocity distribution in a scrubber for ship exhaust gas cleaning systems. V. Aftaniuk, D. Danilenko, A. Shalyov, V. Spinov / Transport means 2019. Proceedings of 23rd International Scientific Conference. Transport Means 2019. P. 675 – 679. PART II. October 02-04.02019, Palanga, Lithuania

3. Emission Project Guide. MAN B&W Two-stroke Marine Engines / MAN Diesel & Turbo Teglholmsgade 41 2450 Copenhagen SV, Denmark, 2017. -108 p.

4. HERE. Международный журнал компании «Альфа Лаваль». № 30. 2012. С. 10-13.
5. ABS ADVISORY ON EXHAUST GAS SCRUBBER SYSTEMS / American Bureau of Shipping, 2018. – 52 p. Режим доступу: https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/ exhaust- gas-scrubber-systems-advisory.pdf.
6. Модина М.А. Принцип действия установок поглощения газовых выбросов (УПГВ) для очистки продуктов сгорания от соединений серы в судовых условиях // Эксплуатация морского транспорта. – 2010. – №2 (60). –С.67-70.
7. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В., Харитонович А.И., Пономарев Н.Б. – СПб.: БХВ - Петербург, 2005. – 800 с.
8. Зарубежное и отечественное оборудование для очистки газов: Справочное издание/ М.Г. Ладыгичев, Г.Я. Бернер. – М.: Теплотехник, 2004. – 696 с.
9. Палатник И.Б., Лавров Б.Е., Когай Г.Н. Основы рабочего процесса пылеулавливания при использовании труб – коагуляторов Вентури. Алма – Ата.: Наука. – 1977.

10.31653/smf39.2019.14-21

Афтанюк В.В., Гаврілкін О.Є.
Національний університет «Одеська морська академія»

МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІКИ КОРПУСА СУДНА З УРАХУВАННЯМ БІОЛОГІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ

ANNOTATION

The article presents a study of the effect of roughness and waviness (including taking into account bioburden) on the hydrodynamic characteristics of the vessel. To carry out the experiments, a model of the hull of the vessel was developed, which includes the submerged underwater part of the vessel and a special channel in which the flow is modeled.

Biological contamination (bio-fouling of the underwater hull) of sea-ships and river-ships is a problem for all fleets.

To maintain the speed of a ship with biological contamination, the hull requires an increase in diesel power by increasing the fuel supply. To maintain the speed of a ship with biological contamination, the requires an increase in diesel power by increasing the fuel supply. It affects the economy and environmental friendliness of maritime transport.

The model investigated the change in fluid velocity during flow around a "clean surface" with a roughness of 75, 100, 125 microns. Numerical modeling showed a slight effect of changes in coating roughness for a “clean surface”.

Numerical modeling for a surface contaminated with biological contaminants (roughness of 750 micron) revealed a significant effect on the change in fluid velocity along the hull.

The developed model can be used when conducting research for a comparative assessment of the energy efficiency of ships.

Key words: bio-fouling of ships, solid-state models of ships, numerical simulation of fluid flows.

Постановка проблеми і її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. Біологічне забруднення (обростання підводної частини корпусу) морських та річних суден є проблемою всіх флотів. Воно веде до руйнування поверхні корпусів, збільшення опору руху судна, а отже, до падіння швидкості руху. Для підтримки швидкості судна з вкритим біологічним забрудненням корпусом потрібне

збільшення потужності дизеля за допомогою збільшення циклової подачі палива. Це призводить до теплової і механічною перевантаження деталей циліндрово-поршневої групи [1].

За дослідницькими даними, витрата палива і емісія парникових газів для корпусу з обростанням в порівнянні з гладким корпусом зростає на 30-50%. [2].

Боротьба з обростанням підводної частини корпусів суден представляє складну задачу, не вирішену остаточно і в даний час.

Резолюція Мерс 207 (62) [3] підкреслює, що практика управління біообростанням може поліпшити гідродинамічні характеристики судна і бути ефективним засобом підвищення енергоефективності та скорочення викидів в повітряне середовище з суден.

Аналіз досліджень і публікацій. Основним способом захисту від обростання суден є протиобростаючі покриття. Інші методи захисту (ультразвук, хлорування та ін.) мають скоріше експериментальне застосування [4].

Дія протиобростаючих фарб заснована на виділенні в морську воду токсичних (отруйних) речовин. Токсичні речовини, що містяться в проти обростаючих фарбах, розчиняються в морській воді. В результаті цього на пофарбованої поверхні утворюється шар води, що містить отруйні компоненти, які відлякують личинок організмів обростання, що намагаються прикріпитися до корпусу судна, а якщо прикріплення сталося, викликають їх швидку загибель.

Для того щоб проти обростаюча фарба надійно захищала, з неї постійно має виділятися в воду певну кількість отруйних сполук. Воно повинно бути не нижче мінімальної дози, яка забезпечує захист від обростання. Ефективність проти обростаючої фарби пов'язана не тільки зі змістом в її складі токсичних речовин, але і зі швидкістю переходу цих речовин з пофарбованої поверхні в морську воду. Однак занадто висока швидкість виділення (вилуговування) токсинів в воду може привести до швидкої втрати токсичності внаслідок збідніння пофарбованої поверхні отруйними речовинами. Здатність фарб забезпечувати необхідну швидкість розчинення отруйних компонентів і виділення їх в шар води, що прилягає до пофарбованої поверхні, залежить від типу основи, її структури, властивостей отруйних речовин.

Найбільшого поширення набули фарби що «самополіруються». Механізм захисної дії таких покриттів полягає в наступному: відбувається дифузія молекул води в покриття, гідроліз зв'язків полімерного

ланцюга, а потім розчинення і ерозія матеріалу під дією потоку води. Паралельно йде розчинення і дифузія токсинів (біоцидів, отрути).

Для того щоб підтримувався необхідний рівень токсинів на границі покриття – вода, необхідно постійне оновлення поверхні, що і відбувається при русі судна.

Крім того, поверхня протиобростаючого покриття що само полірується при русі судна стає більш гладкою, за рахунок чого знижується опір тертя руху судна. При виборі покриття що самополірується необхідно враховувати швидкість руху судна, частоту і тривалість стоянок. Залежно від швидкості судна і необхідного терміну захисту розраховується товщина покриття. Термін служби сучасних покриттів що само поліруються складає 5 років.

Перші покриття що самополіруються були розроблені англійською фірмою International Paints на початку 70-х років. Надалі проти обростаючі покриття що само поліруються були розроблені іншими провідними фірмами: JOTUN, Sigma, Hempel і ін. В якості токсинів в фарбах що само поліруються першого покоління використовувалися олово органічні з'єднання [5].

Проти обростаючі фарби що самополіруються завоювали величезну популярність у світовому судноплавстві за рахунок зниження витрат на паливо на 10-12%, тому значна частина суден була перефарбована подібними фарбами. Однак тривале застосування фарб що самополіруються на оловоорганічних полімерах виявило їх недоліки. Вони чинили негативний вплив на системи розмноження морських організмів [5].

Найбільш безпечними для екології є силіконові покриття з високою поверхневою енергією. Здатність захисту від обростання пояснюється тим, що морські організми мають до цих покриттів дуже низьку адгезію. При стоянці судна на поверхні покриття можуть закріпитися обростання, але вони змиваються при русі судна. Силіконові покриття створюють виключно гладку поверхню, знижують опір тертя, забезпечують економію палива 8-10% і між доковий період 5 років.

Найбільш ефективними визнані протиобростаючі покриття фірми International Marine Coatings (AkzoNobel) серії Intersleek 700 і серії Intersleek 900 [6].

Метою роботи є моделювання гідродинаміки корпуса судна при використанні покрить протиобрастання та наявності біологічного забруднення.

Викладення основного матеріалу дослідження. На рис. 1, 2, 3, наведені дані фірми про порівняння характеристик шорсткості стандартних самополіруючих покриттів, продукту Intersleek 700 і продукту Intersleek 900 [7]. Продукт Intersleek 900 утворює найбільш «плавну» поверхню. Зниження висоти горбків при цьому призводить до зменшення опору руху (з практики це може становити біля 4% [7]).

Однак необхідно відзначити, що будь-яке зменшення шорсткості веде до зростання вартості судна як при його будівництві, так і в процесі експлуатації. З цієї причини необхідно встановити межу, до якої доцільно згладжування поверхні обшивки корпусу.

Для дослідження впливу шорсткості та хвилястості (у тому числі з урахуванням біообрастання) на гідродинамічні характеристики судна була розроблена модель корпусу судна (рис. 4). Модель включає занурену підводну частину судна що виконана з урахуванням конструктивних вимог [8] та спеціальний канал в якому моделюється течія.

В якості покриття корпусу прийнятий силікон, шорсткість поверхні в дослідах задавалась рівною 75, 100, 125 мкм, швидкість руху судна приймалась рівною 15 вузлів.

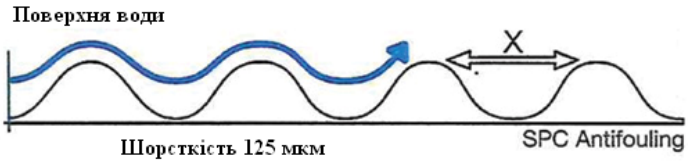


Рис. 1 – Шорсткість і хвилястість стандартного протиобростаючого покриття само полірується [7]

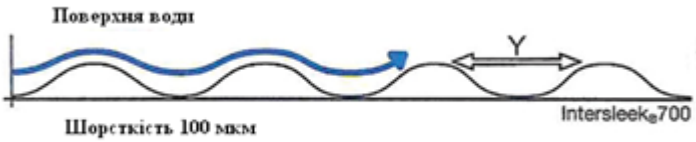


Рис. 2 – Шорсткість і хвилястість покриття Intersleek 700 [7]

Рис. 3 – Шорсткість і хвилястість покриття Intersleek 900 [7]

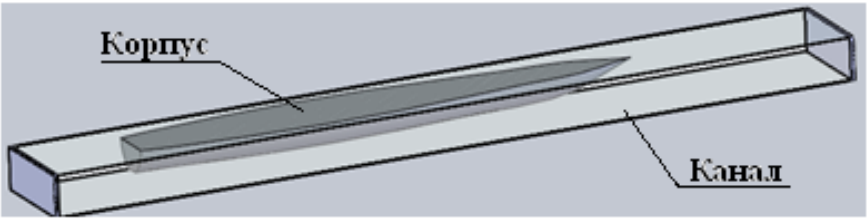


Рис. 4 – Модель зануреної частини корпусу судна

Модель течії при обтіканні корпуса наведена на рис. 5.

Для візуалізації параметрів швидкості у вигляді графіка в моделі був побудований спеціальний віртуальний елемент у вигляді ломаної лінії, що повторює контур судна та проходить по середині каналу. З цього елемента були зняти значення швидкості при різних значеннях шорсткості і побудовані графіки (рис. 6).

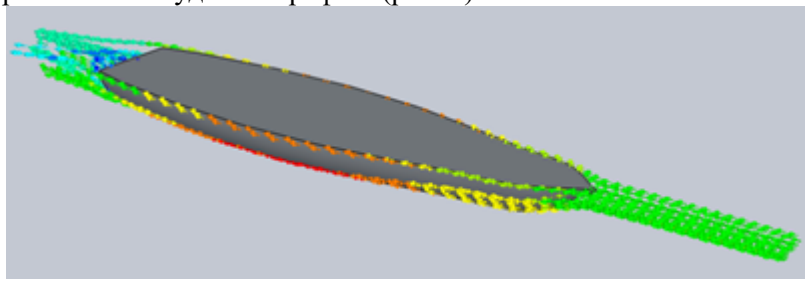


Рис. 5 – Модель течії при обтинанні зануреної частини корпусу судна

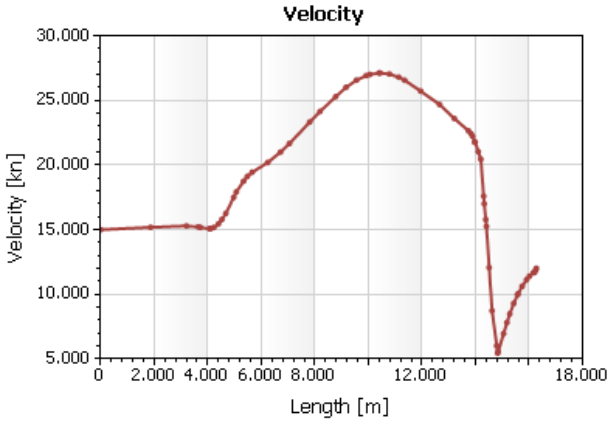
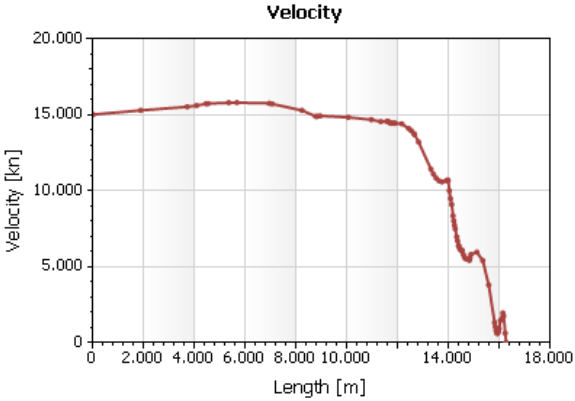


Рис. 6 – Графік зміни швидкості потоку уздовж корпусу судна при шорсткості поверхні 75 мкм

Також графіки швидкості були побудовані для значень шорсткості 100 та 125 мкм. Аналіз графіків показав що зміни швидкості при різній шорсткості поверхні (75, 100, 125 мкм) практично не відбувається. Це пояснюється я тим що стан поверхні корпусу судна відповідає «чистій поверхні».

При накопиченні біологічного обростання поверхні шорсткість корпусу значно зростає (3-10 разів) [8], що впливає на зміну швидкості на (рис. 7).



.

Рис. 7 – Графік зміни швидкості потоку уздовж корпусу судна при шорсткості поверхні 750 мкм

Висновки

1. Для дослідження впливу шорсткості та хвилястості (у тому числі з урахуванням біообрастання) на гідродинамічні характеристики судна була розроблена модель корпусу судна, яка включає занурену підводну частину судна та спеціальний канал в якому моделюється течія.

2. На моделі досліджено зміну швидкості рідини при обтіканні для «чистої поверхні» з шорсткістю 75, 100, 125 мкм. Числове моделювання показало незначний вплив зміни шорсткості покриття для «чистої поверхні».

3. Числове моделювання для поверхні забрудненої біологічними забруднювачами (шорсткість 750 мкм) виявило суттєвий вплив на зміну швидкості рідини вдовж корпусу судна.

Закінчення

Розроблена модель та результати проведеного дослідження розподілу швидкостей дозволяють перейти до моделювання режимів руху судна з різним рівнем біологічного забруднення корпусу судна.

Розроблена модель і віртуальний експериментальний стенд можуть бути використані при проведенні науково-дослідних, дисертаційних робіт магістрантів, аспірантів, наукових працівників для порівняльної оцінки енергетичної ефективності суден.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Защита морских судов от обрастания. Гуревич Е.С., Искра Е.В., Куцевалова Е.П. «Судостроение» 1978.
2. Михайлов В.Н., Ткачук Г.Н. Влияние шероховатости корпуса судна на сопротивление воды. –Л.: Судостроение, 1971. 152 с.
3. MEPC.207(62). http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/ Indexof IMOResolutions/ Marine-Environment-Protection-Committee - (MEPC) / Documents/ MEPC.207(62). pdf
4. Емельянов Н.Ф. Ходкость водоизмещающих морских судов: Уч. пос. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2004. 249 с.
5. Защита морских судов и сооружений от коррозии и обрастания. Выхристюк П.Н., ОжигановЮ.Г. Библтотека передового опыта.
6. International Marine Coatings (Akzo Nobel) новітні розробки в Інтернет виданнях. https://www.international-marine.com

7. Эффективность защиты корпуса судна от обрастания. Е. Атрушкевич, Э. Соминская, Е. Хитов. Морской флот №2 (2017) http://www.morvesti.ru/analitics/detail.php?ID=69195
8. Барабанов Н.В., Турмов Г.П. Конструкция корпуса морских судов: Учебник. – В двух томах. Т. 2. – СПб.: Судостроение, 2002. – 472 с.
9. Mehmet Atlar. Recent developments in marine anti-fouling coatings with an emphasis on energy efficiency. https://commons.wmu.se/cgi/viewcontent.cgi?article=1070&context=marener_conference

10.31653/smf39.2019.22-29

Богач В.М., Шебанов А.М., Слободянюк І.М.
Національний університет "Одеська морська академія"'

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ "PULS" БЕЗ АКУМУЛЮВАННЯ ТИСКУ МАСЛА

The abstract

The publication is devoted the decision of an actual problem increase efficiency operation of ship diesel engines by perfection processes greasing of cylinders. The analysis a condition of a question on an investigated problem is made and lacks systems greasing of diesel engines RTA are defined.

Experimental researches on studying processes greasing of cylinders of ship engines that has allowed to receive representation about an overall performance these systems are spent. Modern methods researches, such as oscillograms and high-speed filming are thus used.

By these researches it is defined, that greasing process is accompanied by "pushing out" a part oil in the cylinder, gases extending in the channel that causes a real loss of cylinder oils and occurrence an additional source deposits.

Characteristics process greasing, and their interrelation with a design of greasing devices are defined. Influence geometrical parametres of channels system greasing on characteristics process the expiration of oil in the cylinder and finally on efficiency its use in the engine is experimentally confirmed.

Keywords: ship diesel engine, greasing system, greasing channel, greasing process, cylinder, piston, a piston ring.

Вступ. Малорозмірні крейцкопфні дизелі мають хороші перспективи завдяки підвищеній здатності працювати на низькосортних важких і в'язких паливах, незначним витратам на обслуговування, і більшим моторесурсам. Відмова від використання двигунів більших розмірностей не випадкова і викликана тим, що необхідні потужності вдається забезпечити форсуванням двигунів невеликої розмірності.

Енергетична криза змусила основні дизелебудівні фірми перейти до створення двигунів з більшим відношенням ходу поршня до діаметра циліндра. Збільшення ходу поршня компенсувало зниження частоти обертання й дозволило зберегти на попередньому рівні цилінд-

рову потужність. У зв'язку з новими показниками відношення ходу поршня до діаметра циліндра двигунів нових типорозмірів, значно збільшилася довжина робочої поверхні циліндрової втулки, що вимагає особливої уваги до питань ефективної роботи систем мащення цих дизелів.

Досвідом експлуатації встановлено, що при використанні високосірчаного палива визначальну роль у довговічності й економічності роботи суднового двигуна відіграє правильний вибір кількості поданого в циліндр лужного масла, яке має забезпечити створення достатньої масляної плівки на тертьових поверхнях при зниженні до мінімуму корозійного зносу та видалення з поверхні тертя продуктів згоряння (золи, нагару, домішок в паливі, часточок зношування деталей) шляхом відновлення масляної плівки.

Однак створення й широке використання ефективних систем мащення обмежується малої їх вивченістю й суперечливістю існуючих даних про експлуатаційну надійність, що в значній мірі утрудняє розв'язок питань удосконалення лубрикаторних систем.

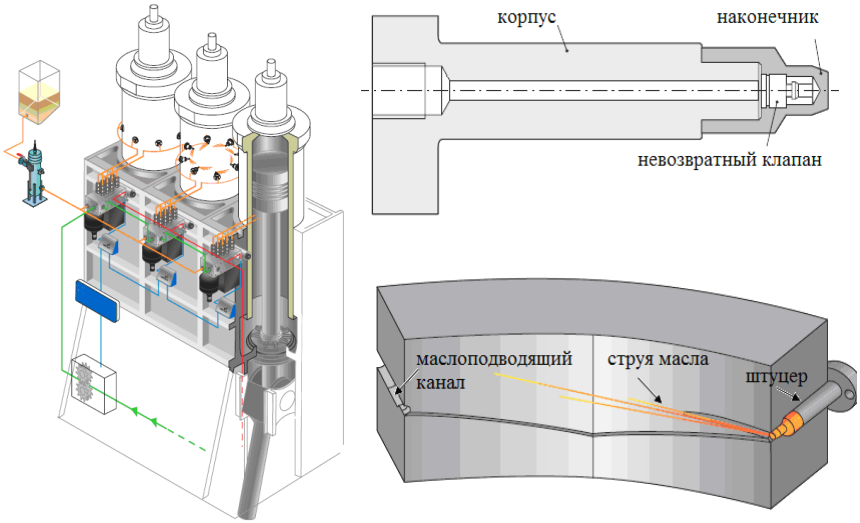
Аналіз публікацій по темі дослідження. Проведені дослідження із цієї проблеми [1,2,3], показують, що є можливість подальшого поліпшення процесу подачі масла в циліндри двигунів за рахунок удосконалення систем мащення. Експлуатаційними випробуваннями [4,5] підтверджено, що досконалість процесів і систем дозованої подачі масла є ефективним напрямком підвищення економічних показників роботи суднових дизелів.

Метою дослідження є визначення закономірностей руху мастильної рідини в системах змазування циліндрів суднових дизелів з електронним керуванням подачею масла.

Результати досліджень. З моменту введення в експлуатацію довгоходових двигунів RTA на них застосовувалася система змазування циліндрів, багато в чому аналогічна існуючій раніше на двигунах RND. Підведення масла до штуцерів здійснювалося за допомогою лубрикаторів, що мають механічний привід.

Однією із таких систем є однорядна система з лубрикаторами "Puls" (що мають гідравлічний привід) без акумулювання тиску масла в системі, та з одним поясом розташування штуцерів нової конструкції, рис.1.

Особливістю нових штуцерів є те, що безповоротний клапан максимально наближений до дзеркала циліндра (як на двигунах RND), а



а) б)

Рис.1. Однорядне розташування штуцерів (а) і їх нова конструкція (б)

на виході із штуцера масло міняє напрямок завдяки декільком отворам-дроселям виконаним під кутом до осі каналу штуцера. Для забезпечення струминної подачі масла зі зміною напрямку його руху вихідна ділянка каналу в стінці втулки виконана горизонтально (а не похилою, як у всіх попередніх випадках) і має більший діаметр, ніж зазвичай.

При цьому система налаштована таким чином, що подача масла в циліндр повинна здійснюватися в три етапи (як показано на рис.2) вище поршня, у район поршневих кілець і нижче поршня.

Здійснюючи переобладнання існуючих двигунів під нову систему з лубрикаторами "Puls" фірма Wartsila-Zylser підключає її до одного з двох наявних поясів змазування. У підсумку таких змін досить часто вихідний канал у стінці циліндрової втулки перетворюється в радіальний канал.

У таких двигунах подача масла в канал втулки здійснюється через бічні отвори, розташовані в безпосередній близькості від глухого торця штуцера зверненого до дзеркала циліндра. Канали штуцерів являють собою кілька співвісних свердлінь різного діаметра, розташованих послідовно.

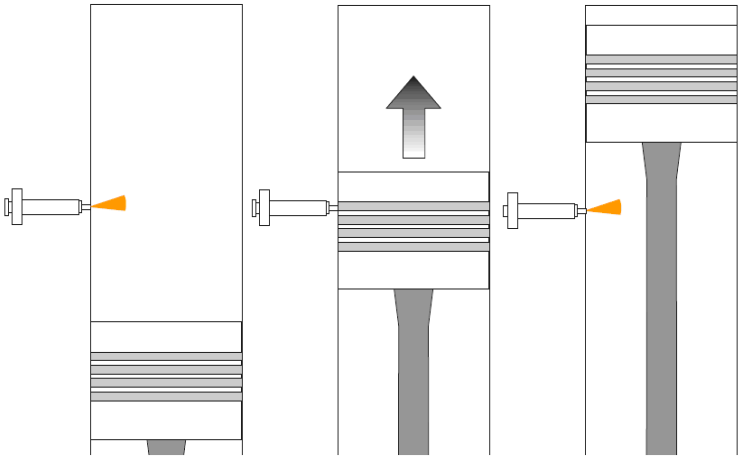


Рис.2. Періоди виходу масла в циліндри двигуна

Дослідження системи змазування таких циліндрів довгоходових двигунів проведені в умовах експлуатації. Випробування, що включають візуальні спостереження за процесом маслоподачі, показали, що канал у стінці втулки, розташований між торцем штуцера й вихідним отвором на дзеркалі, заповнюється маслом лише частково й на короткий час.

Рівень масла в каналі має вигляд клина з основою у торца штуцера й вершиною у вихідного зрізу каналу перед дзеркалом. При збереженні клинової форми, загальний рівень масла в каналі до кінця циклу маслоподачі помітно міняється - зменьшується.

Однак, процес витікання масла на дзеркало має вигляд регулярного його сповзання, яке розривається імпульсами тиску газу. Похила поверхня шару масла під дією імпульсної зміни тиску газу деформується, здобуваючи хвилюватість і деякий зворотно-поступальний рух хвиль.

Разом з тим, хвилі не досягають верхньої межі каналу й не перекривають його. Це не створює істотного перепаду тиску в каналі, не викликає утворення замкнених газових камер і приводить до швидкого гасіння енергії гребенів масла й повільному стіканню його без відриву від поверхні дзеркала циліндрової втулки.

Істотне значення в забезпеченні безвідривного витікання масла з каналу має також і конструкція самого штуцера. Центральний канал його корпуса з’єднаний з каналом у стінці втулки за допомогою бічних свердлінь, що мають невеликий діаметр.

Як показали спостереження, масло яке виходить з каналу, практично не попадає в маслорозподільні канавки, через їхнє високе розташування щодо нижньої границі зрізу отвору, що обумовлює поганий розподіл його по окружності циліндрової втулки.

При цьому витікання масла з каналу здійснюється приблизно протягом 2…3 обертів, декількома зосередженими порціями, що стікають вертикально вниз під зріз вихідного отвору (рис.3).

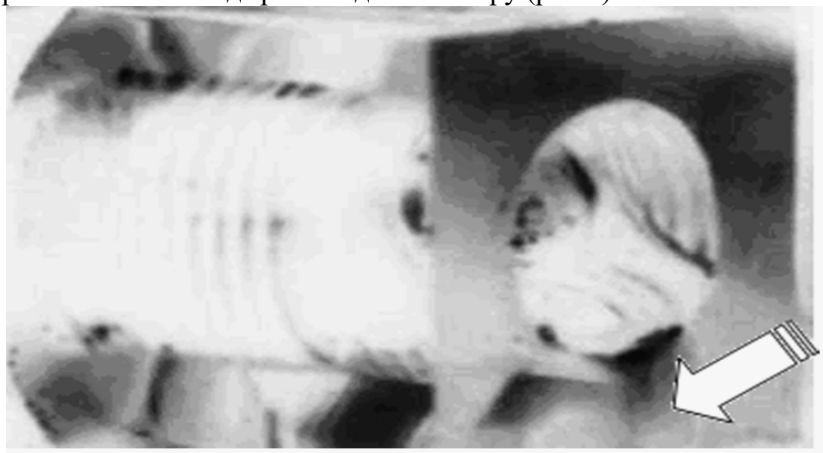


Рис. 3. Характер руху масла на виході з каналу

На наступних обертах до нового робочого ходу плунжера лубрикатора, витікання масла в циліндр не відбувається, а канал у втулці виявляється спустошеним.

Явища “виштовхування” масла, тобто витікання його з відривом від поверхні розташування вихідного зрізу каналу не спостерігається. Це пояснюється малою довжиною (5…8 мм) каналу в стінці втулки, що виключає утворення хвиль, які перекривають перетин каналу з наступним замиканням газових порожнин у ньому, що необхідно для формування “виштовхування”.

Крім того, вихід масла з каналу штуцера через бічні свердління, обумовлює зіткнення частини потоку масла зі стінками каналу у втулці й тим самим приводить до гасіння швидкості його витікання до значень, що забезпечують безвідривний вихід масла в циліндр.

До того ж, ці свердління є свого роду дроселями, які в значній мірі утрудняють проникнення газів у канал штуцера й принципово міняють картину взаємодії газів з маслом.

Через те, що вихідні свердління в штуцері виконані під певним кутом, частина масла з них надходить за межі каналу в порожнину циліндра (рис.4) і залежно від моменту подачі масла, буде зустрічатися з різними поверхнями поршня.

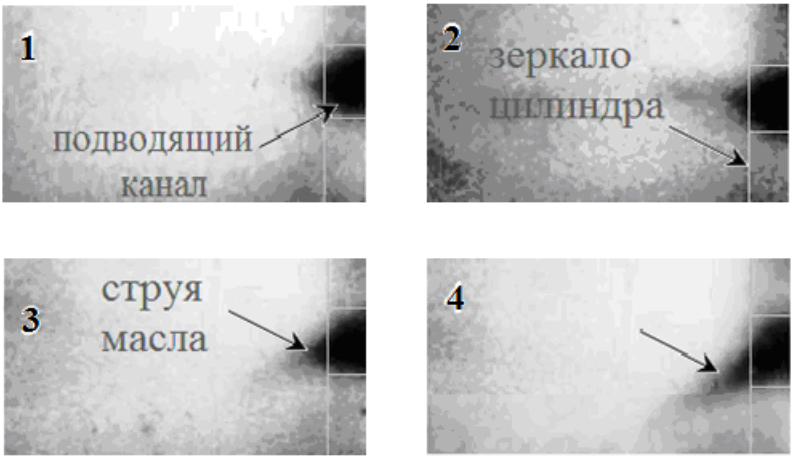


Рис. 4. Кінокадри руху масла через бічні свердління штуцера

Осцилографуванням процесу (рис.5) встановлено, що поповнення каналу штуцера (лінія Хкл) здійснюється на 1…2 обертах, а вихід масла на дзеркало відбувається протягом 2…3 обертів з наступною перервою в подачі на 4…6 обертах.

Таким чином, кількість обертів, протягом яких поповнюється штуцер близько до кількості обертів, на яких відбувається витікання масла на дзеркало.

Однак моменти виходу масла (лінія Мв) і відкриття зворотного клапана суттєво різні. Як видно з осцилограми, між відкриттям клапана й виходом масла на дзеркало є проміжок, який становить 20…30° п.к.в.

Величина цього запізнення являє собою той час, який необхідно для поновлення руху масла по каналу у втулці, спустошеному в проміжках між його поповненням.

Сумарний час, протягом якого клапан відкритий, виявляється в 3…5 раз меншим часу витікання масла на дзеркало, що вказує на неможливість чіткого керування подачею масла шляхом впливу на лубрикатор.

Накладення осцилограм на криву руху поршня показує, що основна частина масла (близько 60%) надходить у проміжку між 60…300° п.к.в., тобто в періоди руху поршневих кілець нижче мастильних отворів.

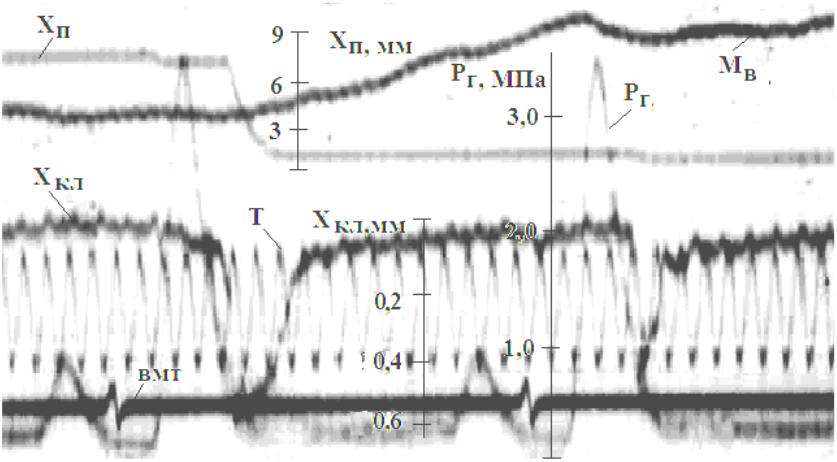


Рис.5. Осцилограма процесу подачі масла в циліндри двигуна

Слід припускати, що при висхідному ході поршня це масло підхоплюється кільцями й розподіляється переважно в районі отворів і верхньої частини втулки. Подача 40% масла, яке залишилося, здійснюється наприкінці стискання й припадає на район нижніх поршневих кілець, що визначає його розподіл по поверхні втулки, яка перебуває нижче пояса мастильних отворів (що складає 70% площі всього дзеркала). Частина цього масла попадає у вікна, що інтенсифікує їх коксування.

ВИСНОВКИ

У результаті виконаних експериментальних досліджень систем змазування циліндрів суднових двигунів фірми Wartsila-Zylser установлено наступне:

Витікання масла в циліндр із каналу за клапаном штуцера здійснюється не під дією плунжера лубрикатора, а в результаті взаємодії газів з маслом у цьому каналі;

Витікання масла з каналу на дзеркало відбувається в основному повз канавки, що не сприяє рівномірному його розподілу по окружності циліндра й обумовлює скидання масла у вікна, підпоршневий простір і віднесення із продувним повітрям;

Подача масла на стиску доводиться частково на нижні кільця й в основному - на тронк поршня;

Має місце нерівномірна подача масла по обертах і непропорційний розподіл його між верхньої й нижньої частинами дзеркала циліндра.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Богач В.М. Исследование процесса маслоподачи двухрядной системой "Puls" без аккумулирования давления масла / В.М. Богач, А.Н. Шебанов// Судовые енергетические установки: науч.-техн.сб. - 2014. - № 34. - Одесса: ОНМА. - С. 113-120.
2. Шебанов А.Н. Исследование процесса маслоподачи двухрядной лубрикаторной системой с аккумулированием давления масла / А.Н. Шебанов, В.М. Богач // Судовые енергетические установки: науч.-техн.сб. – 2013.- Вып. 31 - Одесса: ОНМА. - С.122-132.
3. Bogach V. Performance efficiency lubricator systems of marine diesel engines / V. Bogach, A. Shebanov // European Applied Sciences, November, №11, 2016 - pp. 24-29.
4. Богач В.М. Эксплуатационная проверка эффективности модернизированной системы смазывания цилиндров двигателей RTA/ В.М. Богач, А.Н. Шебанов // Судовые енергетические установки: науч.-техн.сб. – 2016.- Вып. 36 - Одесса: ОНМА. - С.37-45.
5. Богач В.М. Эксплуатационные показатели эффективности лубрикаторных систем судовых дизелей / В.М. Богач, А.Н. Шебанов, И.Д. Колиев, Ю.И. Журавлев // Судовые енергетические установки: науч.-техн.сб.- 2007.- Вып. 19.- Одесса: ОНМА.- С. 10-22.

10.31653/smf39.2019.30-42

Бутенко О.В., Максимов М.В., Демиденко В.Е., Брунеткін О.І.
Одеський національний політехнічний університет, Одеса

МЕТОД ПОШУКУ РОЗВ'ЯЗАННЯ СКЛАДНОЇ ЗАДАЧІ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗВОРОТНОЇ ЗАДАЧІ З ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ ПАЛЬНОГО

The abstract

The topic of the article is to develop a method of finding a solution to a complex interpretation problem to solve the inverse problem of determining the composition of the fuel.

The determination of the qualitative and quantitative composition of gas is distinguished by chemical, physico-chemical and physical methods. Known advantages of physical-chemical and physical methods over chemical, namely, speed of execution, the possibility of automation of analysis, made possible their widespread dissemination. Currently, the most widely used methods are gas chromatography. The main drawbacks of these instruments are the consistent measurement of the gas components, the long analysis time.

The purpose of the research is to develop a method of finding a solution to a complex interpretation problem to solve the inverse problem of determining the composition of the fuel.

The scientific and practical significance of the work lies in the definition of the general type of problem, as inversely incorrectly assigned and distinguished its narrower class - a difficult task of interpretation.

Methods for solving the problem of controlled combustion of gaseous fuels of variable composition and finding a solution to the inverse problem of interpretation based on the use of library data have been developed. Modeling of technological measurements with accepted errors is carried out.

The research methodology is based on the solution method - Newton-Rafson method, square matrix conditionality, and library method for solving the inverse problem.

The modeling of the proposed methods in determining the composition of the fuel allowed for the considered substances (methane, propane, ethyl alcohol) with the measurement errors made it possible to get decisions within the model.

The practical value of the study is that it is shown as the introduced errors increase the range of possible solutions. The influence of

measurement accuracy of technological parameters on the uncertainty of the fuel composition determination is determined.

Keywords. hydrocarbon fuel, combustion, inverse problem of interpretation, library method, number of square matrix conditionality, measurement errors.

Тема статті полягає в розробці метода пошуку розв’язання складної задачі інтерпретації для розв'язання зворотної задачі з визначення складу пального.

Встановлення якісного і кількісного складу газу розрізняють хімічні, фізико-хімічні та фізичні методи. Відомі переваги фізико-хімічних і фізичних методів перед хімічними, а саме, швидкість виконання, можливість автоматизації аналізу, зробили можливим їх більш широке поширення. В даний час найбільш широке застосування знаходять методи газової хроматографії. Основними недоліками цих приладів є послідовний вимір компонентів газу, тривалий час аналізу.

Мета наукового дослідження полягає в розробці методу пошуку розв’язання складної задачі інтерпретації для розв'язання зворотної задачі з визначення складу пального.

Наукова і практична значущості роботи полягає в визначені загального типу задачі, як зворотно некоректно поставленої і виділено її більш вузький клас — складна задача інтерпретації.

Розроблено методи розв'язання задачі контрольованого спалювання газоподібного палива змінного складу та пошуку розв’язання зворотної задачі інтерпретації на базі використання даних бібліотеки. Проведено моделювання технологічних вимірів з прийнятими похибками.

Методології дослідження базується на методі розв’язання — метод Ньютона-Рафсона, числі обумовленості квадратної матриці та метод бібліотеки для розв’язання зворотної задачі.

Моделювання запропонованими методами при визначенні складу палива дозволило для розглянутих речовин (метан, пропан, етиловий спирт) з прийнятими похибками вимірювання дало можливість отримати рішення в рамках моделі.

Практична цінність проведеного дослідження полягає в тому, що показано як похибки, що вносяться збільшують діапазон можливого рішення. Визначено вплив точності вимірювань технологічних параметрів на похибку визначення складу пального.

Ключові слова. вуглеводневе пальне, горіння, зворотна задача інтерпретації, метод бібліотеки, число обумовленості квадратної матриці, похибки вимірювання.

Вступ

В даний час немає єдиного методу оптимального управління процесом спалювання вуглеводневого газу невідомого складу. Це обумовлено різними призначеннями технологічного продукту, який одержується в подальшому: спалювання для енергетичних потреб, застосування в якості нафтохімічної сировини або використання отриманого продукту в металургійній технології.

Аналіз літературних джерел.

Можна використовувати газові аналізатори для ідентифікації компонентів в невідомих газових сумішах. В подальшому ідентифіковані суміші використовують при спалюванні в енергетичних цілях або ідентифіковані компоненти використовують для перетворення в хімічних технологіях вуглеводневих газів. У таких випадках з'являється можливість організації процесів управління, які не мають екстремальних характеристик. Прикладом може бути піч безокисного нагріву [1], або реактори органічного синтезу.

З метою встановлення якісного і кількісного складу газу розрізняють хімічні, фізико-хімічні та фізичні методи. Відомі переваги фізико-хімічних і фізичних методів перед хімічними, а саме, швидкість виконання, можливість автоматизації аналізу, зробили можливим їх більш широке поширення. В даний час найбільш широке застосування знаходять методи газової хроматографії [2]. Основними недоліками цих приладів є послідовний вимір компонентів газу, тривалий час аналізу.

З появою невеликих, надійних лазерних джерел і високочутливих багатоканальних фотоприймачів з'явилися газоаналізатори, засновані на використання спонтанної рамановської спектроскопії (spontaneous Raman spectroscopy) [3], хоча до теперішнього часу такі газоаналізатори знаходяться на стадії дослідно-промислових розробок. Крім того, такі пристрої вимагають висококваліфікованого обслуговування.

Велика частина розрахунків параметрів процесів горіння виконується на основі методів хімічної кінетики через визначення наведеної формули суміші як окремої речовини [4]. При використанні такого

підходу для розгляду процесу горіння суміші газів розраховується ентальпія і визначається брутто-формула. Така задача є зворотною і некоректно поставленою.

Мета та задачі дослідження

Не існує єдиного методу вирішення всього різноманіття зворотних некоректно поставлених задач. Кожен їх вид вимагає індивідуального підходу. Це ускладнює, або навіть виключає, використання існуючих методів визначення в автоматичному регуляторі брутто-формули пального змінного складу. Крім того, склад пального може багаторазово випадково змінюватися протягом будь-якого проміжку часу. Це спричиняє необхідність оперативного багаторазового отримання рішення задачі, що призводить до необхідності розробки нового методу розв'язання оберненої і некоректно поставленої задачі.

В даній статті показано метод пошуку розв’язання складної задачі інтерпретації для розв'язання зворотної задачі з визначення складу пального. Етапи вирішення такої задачі мали таку послідовність:

— визначення методу розв'язання задачі контрольованого спалювання газоподібного палива змінного складу.

— метод пошуку розв’язання зворотної задачі інтерпретації на базі використання даних бібліотеки

— моделювання технологічних вимірів з прийнятими похибками

Визначення методу розв'язання задачі контрольованого спалювання газоподібного палива змінного складу.

Метод розв’язання, застосований в [5-7] найчастіше використовується в інженерних розрахунках — метод Ньютона-Рафсона. В процесі пошуку причин виникнення нестійкості в процесі рішення було проаналізовано систему лінійних рівнянь, що утворюється при лінеаризації вихідної нелінійної системи. Обчислення детермінанту її основної матриці у всіх розглянутих випадках дало кінцеву величину. Це показує, що система не вироджується, тобто має рішення, а модель коректна.

Погана обумовленість систем рівнянь, що було лінеаризовано, які використовуються в ітераційному процесі розв’язання вихідних систем нелінійних рівнянь відображає високу чутливість наближень. Проблема може бути вирішена шляхом підвищення точності початкових наближень. Причому, чим більше значення числа обумовленості

матриці, тим точніше має бути початкове наближення визначених величин, в якості яких виступають парціальні тиски продуктів згоряння і кількість атомів хімічних елементів в умовній формулі пального. Але вихідні дані для розв'язання такої задачі не дозволяють зробити це. Кількість атомів в процесі розв'язання може змінюватися, що є непередбачуваним. Наведені вище розрахунки стосуються видів горючих, що складаються не більше ніж з трьох хімічних елементів $C_{b_C}H_{b_H}O_{b_O}$.

Одним із прийомів для вирішення проблеми поганої обумовленості лінеаризованої системи рівнянь використовується метод продовження розв'язання за параметром. Цей метод можна застосовувати, якщо в розглянутому рівнянні або системі рівнянь можна виділити який-небудь параметр θ, від якого вони залежать. В цьому випадку можна записати

$$f(x,\theta)=0, \tag{1}$$

а розв'язок слід шукати при деякому фіксованому (кінцевому) значенні параметра θ_c. Припустимо, що при будь-якому значенні параметра в діапазоні від деякого початкового значення θ_n до θ_c ($\theta\in[\theta_n,\theta_c]$) система (1) має розв'язок $\overline{x}=\overline{x}(\theta)$. При цьому для $\theta=\theta_n$ розв'язок системи $f(x,\theta)=0$ відомий, або легко розраховується. Введемо на відрізку $[\theta_n, \theta_c]$ набір точок $\theta_n=\theta_0<\theta_1<\theta_2 \ldots <\theta_N = \theta_c$. Будь-яким ітераційним методом розв'язується система послідовно для k = 0,1,2, ..., N. При цьому за початкове наближення $\overline{x}(\theta_k)$ прийматимемо рішення $\overline{x}(\theta_{k-1})$. Різниця θ_k-θ_{k-1} вибирається малою величиною так, щоб розв'язання $\overline{x}(\theta_{k-1})$ було досить хорошим початковим наближенням до $\overline{x}(\theta_k)$, що забезпечує збіжність використовуваного ітераційного методу при будь-якому ступені обумовленості системи рівнянь.

Основною перевагою описаного методу [8] є глобальна збіжність при виборі малого кроку зміни параметра.

У моделі визначення складу пального по виміряним параметрам, а саме по співвідношенню витрат пального і повітря, та температурі продуктів згоряння, був виділений параметр у вигляді змінюваного і виміряного відношення об'ємних витрат окиснювача і пального ($\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$) [5-7]. Але була виявлена проблема, яка полягає в тому що такий параметр не є однозначним. Виявилося, що кількість таких параметрів дорівнює кількості хімічних елементів, що становлять умовну

формулу невідомого пального. Відповідно до цього, їх може бути, наприклад, до шести ([C], [H], [O], [N], [P], [S]). Це не виключає принципову можливість вирішення завдання за допомогою методу продовження рішення за параметром, але істотно ускладнює розв’язання задачі через одночасні варіювання такою кількістю змінних.

Було виявлено існування причини, яка принципово не дозволяє використовувати цей метод. Крім розрахунків величин парціальних тисків продуктів згоряння P_j^i; кількості молей палива M_T^j, що беруть участь в розрахунках і дорівнюються кількості вимірів; кількості атомів b^j хімічних елементів, в моделі присутні величини температур продуктів згоряння T^j. Вона не варіюється, як параметр, але і не обчислюється як вихідна змінна. В рамках моделі визначення складу пального по виміряним параметрам ця величина не передбачувана [5-7]. Вона вимірюються в результаті організованого процесу спалювання палива.

Варіювання параметра і стійкий (який має збіжність) процес розрахунку складають основу ідеї методу визначення температури продуктів згоряння при відомому складі пального, так звана пряма задача.

Задача визначення складу пального за виміряними параметрами, а саме по співвідношенню витрат пального і повітря та по температурі продуктів згоряння — це складна задача інтерпретації, так звана зворотна задача. Однією з її ознак є не одночасний, а незалежний один від одного вимір параметрів з деякого їх числа. Для вирішення такої задачі використовують метод «бібліотеки», як найбільш загальний. В його рамках для «заповнення» багаторазово розв’язується пряма задача при різних поєднаннях вихідних даних. В якості розв’язання зворотної задачі з бібліотеки рішень прямої задачі вибирається такий елемент, який з прийнятою похибкою відповідає зробленим вимірам. Такий процес розв’язання передбачає подолання деяких математичних труднощів. Як і для будь-яких некоректних задач, необхідним елементом є введення додаткової апріорної інформації про шуканий об'єкт і правил розв’язання. Некласичне розв’язання пов'язане зі зміною уявлення про саму модель. У цьому випадку для отримання "розв’язку" модель включає апріорну інформацію про можливий характер передбачуваного рішення, що зменшує інформаційну невизначеність, та алгоритм обробки інформації. Виходячи з цих передумов,

в подальшому потрібно розробити метод розв'язання задачі визначення складу палива по виміряним незалежним величинам. Для цього було запропоновано метод бібліотеки.

Метод пошуку розв’язання зворотної задачі інтерпретації на базі використання даних бібліотеки

Метод визначення складу палива з використанням сформованого робочого тривимірного масиву [6] «бібліотеки» здійснюється наступним чином:

1. Змінюючи і фіксуючи величину відношення об'ємних витрат окиснювача і пального $(\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f)_i$ вимірюється температура продуктів згоряння T_i для кожного випадку. Кількість таких змін і вимірювань визначається кількістю нормованих величин. Так в разі палива виду $C_1H_{(b_H/b_C)}O_{(b_O/b_C)}N_{(b_N/b_C)}$ или $C_1H_{d_H}O_{d_O}N_{d_N}$ необхідно отримати вимірювальні відгуки в якості чотирьох величини $(\bar{d}_H, \bar{d}_O, \bar{d}_N, I_t)$ і, відповідно, виконати чотири послідовні серії вимірювань.

2. Відповідно до цих вимірів на площині $T - \dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$ робочого тривимірного масиву визначаються чотири комірки (виділені штриховими лініями) (рис. 1) і пов'язані з ними вектори (виділено кольором). Дані з інших векторів на даному етапі методу що розглядається не використовуються.

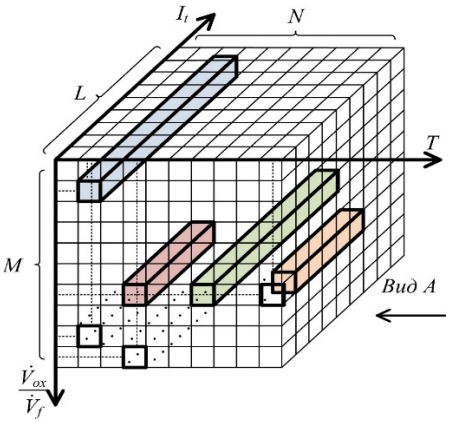


Рис.1 – Схема формування, структурованого робочого тривимірного масиву «бібліотеки» на основі вихідних даних і результатів розв'язання прямої задачі

Елементами векторів є числа Ek. У кожному векторі в Ek записані всі можливі комбінації визначених величин $(\bar{d}_H, \bar{d}_O, \bar{d}_N, I_t)$, які забезпечують температуру Ti при різних значеннях $(\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f)$i і у відповідних комірках.

3. Вибрані вектори (вид А, рис. 1) проектуються на площину $\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$ – It. Можливе положення векторів відображено на рис. 2 і виділено кольором.

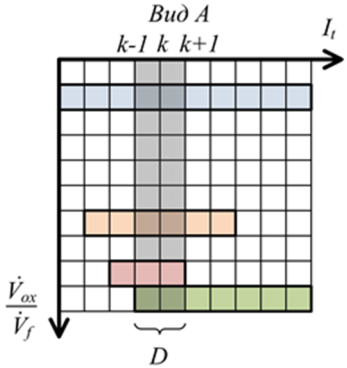


Рис. 2 – Приклад проекції обраних векторів

4. При всіх різноманітних комбінаціях об'ємні витрати складу і ентальпія палива, що визначається, залишаються постійними. Отже, повинні бути однаковими і відповідні їм величини чисел E_k у всіх розглянутих векторах. На цій підставі виділяються відповідні елементи чисел E_k, що відображено областю D на рис. 2. В реальній ситуації ця область може займати більш ніж два інтервали. Всі інші елементи вибраних векторів не розглядаються в подальших перетвореннях. У старших розрядах чисел E_k відображаються значення ентальпії палива. Отже, в кожному інтервалі (k-1↔k і k↔k+1) в елементах векторів розташовуються комплекти вихідних даних (числа E_k) з однаковими значеннями ентальпії. Точніше ентальпії знаходяться в інтервалах $(I_t)_{k-1} \leftrightarrow (I_t)_k$ і $(I_t)_k \leftrightarrow (I_t)_{k+1}$, обумовлених точністю їх визначення.

5. Всі виділені числа (область D, рис. 2) групуються в стек. Значення з старших розрядів (рис. 3.1) переноситься в кінець числа. У старші розряди переносяться значення наступної величини, що визначається (рис. 3).

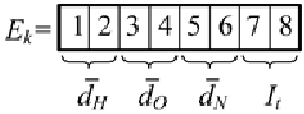


Рис.3 – Схема позиційного представлення у вигляді єдиного числа нормованих значень вихідних даних після його перетворення

В рамках розглянутих векторів числа, що залишилися сортуються, наприклад, в зростаючому порядку. В результаті утворюється масив чисел що залишилися.

6. Дії з пункту 4 повторюються до тих пір, поки не будуть використані всі величини зі списку визначених $(I_t, \bar{d}_H, \bar{d}_O, \bar{d}_N)$. Таким чином на кожному кроці виділяються числа з двома однаковими старшими розрядами, які відповідають в даний момент одної з визначених величин. Так при другому проході це $\bar{d}_H$, при третьому - $\bar{d}_O$ і так далі. При кожному проході кількість чисел E_k, що залишилися зменшується. В кінцевому підсумку залишається одне. У ньому зосереджені вихідні дані, які відповідають усім заміряних T_i при заданих $\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$. Це число і є результатом розв’язання зворотної задачі.

Моделювання технологічних вимірів з прийнятими похибками

Вихідні дані у вигляді технологічних вимірів було імітовано результатами розв'язання прямої задачі для метану, пропану і спирту. Було задано різні значення коефіцієнта надлишку окиснювача α як більш, так і менш одиниці. Для них було розраховано температури T продуктів згоряння і відношення $\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$. Отримані значення приймалися в якості «поточних» вихідних даних. Вихідні дані для розв'язання зворотної задачі ідентифікації отримані з «поточних» шляхом зміни їх значень. Розглядалося рішення при всіх можливих комбінаціях максимального відхилення вихідних даних від «поточних» значень в інтервалі ± 1% від прийнятого значення.

В даному випадку в якості розв’язку виступають діапазони можливих значень визначених величин. Не у всіх випадках є можливість знайти спільний діапазон для всіх варіантів розрахунків. Для підвищення точності розв’язку використовувалося збільшена, в порівнянні з теоретично необхідною, кількість замірів технологічних параметрів.

В якості вирішення вибирався діапазон (рис. 2) з найбільшою кількістю збігів серед усіх вимірів технологічних параметрів. Таким чином в якості розв'язку розглядається найбільш ймовірне значення величини що визначається.

В результаті розв'язання отримані діапазони можливих значень кількості атомів водню в нормованих брутто-формулах і коефіцієнт надлишку окиснювача α при моделюванні стехіометричної реакції горіння:

– для метану

$$CH_{(3,7-4,1)} \text{ (точне значення } CH_4\text{)},$$

– для пропану

$$CH_{(2,5-2,75)} \text{ (точне значення } CH_{2,(6)}\text{)},$$

– для етилового спирту

$$CH_{(2,85-3,1)}O_{(0,45-0,55)} \text{ (точне значення } CH_3O_{0,5}\text{)}$$

Діапазон зміни α отриманий шляхом порівняння кількості молей кисню у відповідній стехіометричної реакції при граничних і точних значеннях кількості атомів водню в відповідних речовинах.

$$\text{для метану } \alpha \in [0,96\ldots1,01];$$

$$\text{для пропану } \alpha \in [0,98\ldots1,01];$$

$$\text{для спирту } \alpha \in [0,96\ldots1,01].$$

Вплив припущень на результати моделювання визначення складу спалюваного газу методом бібліотеки

Запропонований метод розв'язання зворотної задачі визначення складу спалюваного газу методом бібліотеки може бути застосований при ряді припущень:

- паливо, склад якого визначається, має перебувати в газоподібному стані;

- властивості пального і окиснювача в газоподібному стані підпорядковуються рівнянню ідеального газу;

- склад пального в процесі декількох технологічних вимірювань температури продуктів згоряння і його об'ємних витрат не повинен змінюватися.

Перші два припущення для інженерних розрахунків можна вважати не жорсткими і здійсненними при будь-якому складі палива. Розглянутий метод пропонується використовувати при визначенні змінного складу пального. Тому можливість виконання третього припущення необхідно розглянути додатково.

На першому етапі має бути виконано необхідну кількість технологічних вимірів до початку визначення складу пального. Наприклад, три вимірювальні експерименти T і $\dot{V}_{ox}/\dot{V}_f$ при замірах позначимо як {1, 2 і 3}. На їх основі отримано відгуків вимірювальних експериментів визначається перший склад пального. Для подальшого розрахунку досить виконати тільки ще один вимірювальний експеримент {4} і в якості вихідних даних використовувати {2, 3 і 4} відгуки вимірювальних експериментів. Всі подальші розрахунки виконуються в такій же послідовності після поточного вимірювального експерименту. При цьому після кожного розрахунку знайдений склад пального порівнюється з результатами попереднього кроку. Отриманий збіг результатів розрахунку демонструє відсутність зміни складу пального на поточному кроці вимірювального експерименту. В іншому випадку необхідно відмовитися від використання результатів попередніх вимірювань. Виконати три вимірювальні експерименти і розрахувати новий склад пального як на першому етапі. Далі за тим самим алгоритмом. Таким чином може бути виявлено момент часу зміни складу пального.

Висновки

1. Визначено загальний тип задачі, як зворотно некоректно поставленої і виділено її більш вузький клас — складна задача інтерпретації. Для вирішення визначеної задачі обрано метод бібліотеки.

2. Розроблено метод заповнення бібліотеки розв’язками прямої задачі у вигляді робочого тривимірного масиву. Для цього:

- запропоновано метод перетворення коефіцієнта надлишку окиснювача α як вихідного даного для прямої задачі. Отримана величина використовується в якості вимірюваного технологічного параметра при вирішенні зворотної задачі визначення складу палива;

- запропоновано метод перетворення вихідних даних прямої задачі в число-згортку (кількість атомів хімічних елементів в брутто-формулою і ентальпії палива), яке формується на основі позиційного принципу запису десяткових чисел.

3. Розроблено метод пошуку розв'язання складної задачі інтерпретації з даних, які отримані з сформованого робочого тривимірного масиву шляхом застосування обмежень і послідовного виділення областей збігу даних.

4. Показано відсутність похибок, що вносяться до рішення алгоритмом запропонованого методу. При моделюванні точних технологічних вимірів розрахункові похибки обумовлені тільки дискретизацією вихідних даних при розв'язані прямої задачі.

5. Визначено вплив точності вимірювань технологічних параметрів на похибку визначення складу пального. Величина похибки не перевищує допустимої для інженерних розрахунків величини.

Литература

1. Morales S.A. 3D CFD Simulation of Combustion in Furnaces Using Mixture Gases with Variable Composition. Chemical Engineering Transactions Volume 70, 2018. P. 121-126.

2. Buldakov M.A. Raman gas analyzer for determining the composition of natural gas. Journal of Applied Spectroscopy: March 2013, Vol. 80, Issue 1. P. 124–128.

3. Schorsch S. Development of an Analyzer System for Real-time Fuel Gas Characterization in Gas Turbine Power Plants. Chemie Ingenieur Technik: March 2011, Vol. 83, Issue 3. P. 247-253.

4. Ferreira Bárbara D.L. Methane combustion kinetic rate constants determination: an ill-posed inverse problem analysis. Química. Nova: 2013. Vol.36, no.2.

5. Брунеткин А.И. Метод определения состава горючих газов при их сжигании. Науковий вісник Національного гірничого університету : 2015: №5. С. 83–90.

6. Brunetkin, O., Davydov, V., Butenko, O., Lysiuk, G., Bondarenko, A. Determining the composition of burned gas using the method of constraints as a problem of model interpretation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 3 : 2019 (6 (99)), P. 22–30.

7. Brunetkin O., Maksymov M. V., Maksymenko A., Maksymov M. M. Development of the unified model for identification of composition of

products from incineration, gasification, and slow pyrolysis: 2019. Vol. 4: (6 (100)), P. 25-32.

8. Жулин С.С. Метод продолжения по параметру и его приложение к задачам оптимального управления. Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ им. Ломоносова: 2007, Т. 8. С. 205-217.

10.31653/smf39.2019.43-55

Козьміних М.А.,Задорожний В.А.
Національний університет «Одеська морська академія»

ОСОБЛИВОСТІ ОБРОБКИ ПАРІВ ЗПГ НА ГАЗОВОЗАХ З МЕМБРАННИМ ТИПОМ ТАНКІВ

Анотація

У статті розглядається використання зрідженого природного газу в якості палива судових малооборотних двигунах. Екологічний аспект переходу на використання ЗПГ є визначальним при виборі конкретного шляху виконання вимог конвенції МАРПОЛ 73/78. Результатом роботи двигуна внутрішнього згорання на природному газі є низькі викиди вихлопних газів в навколишнє середовище через відсутність в паливі забруднювачів. Метан, головний компонент природного газу, є високоефективним вуглеводневим паливом. Крім екологічних аспектів в даному випадку дуже важливі і економічні. Перехід на газове паливо на суднах забезпечує зниження експлуатаційних витрат за рахунок низької вартості газу, менших витрат на ТО. На сьогоднішній день реалізовані дві технології використання ЗПГ. Подача газу при високому тиску здійснюється при положенні поршня поблизу верхньої мертвої точки (ВМТ) і реалізована в двигунах MAN B & W серії ME-GI. Та технологія подачі газу при низькому тиску заснована на спалюванні збіднених газоповітряних сумішей і реалізована в двигунах Winterthur Gas & Diesel Ltd (WinGD) DF і RT-flexDF.

Ключові слова: Зріджений природній газ, екологічний аспект, мембранні танки, вихлопні гази, суднові системи, природньо випарований газ (ПВГ). Газовий топочний агрегат (ГТА)

Anotation

The article discusses the use of liquefied natural gas as a fuel for judicial low-speed engines. The environmental aspect of the transition to the use of LNG is crucial when choosing a specific way to fulfill the requirements of the MARPOL 73/78 convention. The result of the operation of an internal-combustion engine using natural gas is low emissions of exhaust gases into the environment due to the absence of pollutants in the fuel. Methane, the main component of natural gas, is a highly efficient hydrocarbon fuel. In addition to environmental aspects in this case is very important and economic. Switching to gas fuel on ships ensures a reduction in operating costs due to the low cost of gas and lower maintenance costs. To date, implemented two technologies for the use of LNG. The gas supply

at high pressure is carried out at the position of the piston near the top dead center (TDC) and is implemented in engines MAN B & W of the ME-GI series. And the low-pressure gas supply technology is based on the combustion of lean gas-air mixtures and is implemented in Winterthur Gas & Diesel Ltd (WinGD) DF and RT-flexDF engines.

Keywords: liquefied natural gas, environmental aspect, membrane tanks, exhaust gases, ship systems, naturally vaporized gas (PVN). Gas furnace unit (GTA)

Вступ

Використання зрідженого природного газу (ЗПГ) в якості палива для головних суднових двигунів, а також для виробництва електроенергії з метою забезпечення потреб на суднах під час стоянки в портах дозволяє зтримувати зростання забруднення і виконувати жорсткі екологічні обмеження. Екологічний аспект переходу на використання ЗПГ є визначальним при виборі конкретного шляху виконання вимог конвенції МАРПОЛ 73/78. Економічні переваги зрідженого газу дозволяють в прийнятні терміни окупити витрати на пристосування судна до роботи на ЗПГ, на технологічне обладнання та вартість бункерування. [4]

За останніми даними, до 2019 року кількість суднів газоходів в світі досягне приблизно 200 одиниць, а споживання ЗПГ в якості палива в суднових енергетичних установках досягне 1 мільйона тонн до 2020 року і стрімко зросте до значення 8,5 млн. Тонн 2025 г. [11]

Результатом роботи двигуна внутрішнього згорання на природному газі є низькі викиди вихлопних газів в навколишнє середовище через відсутність в паливі забруднювачів. Метан, головний компонент природного газу, є високоефективним вуглеводневим паливом. Таким чином, в режимі роботи двигуна на газі викиди CO_2 знижуються на 20% в порівнянні з роботою двигуна на залишкових сортах палива. Відповідно знижуються викиди NOx на 85 - 90%, в той час як викиди SO_x практично зникають. Більш того, відсутні видимий дим, шламові осадження, викиди свинцю, викиди бензолу знижуються на 97%. [2]

Крім екологічних аспектів в даному випадку дуже важливі і економічні. Перехід на газове паливо на суднах забезпечує зниження експлуатаційних витрат за рахунок низької вартості газу, менших витрат на ТО і т.д.

Енергетична установка контейнеровозу газоходу

На сьогоднішній день реалізовані дві технології спалювання газового палива в суднових малооборотних двигунах, які зручно класифікувати по тиску подачі газу в циліндр. [1]

Подача газу при високому тиску здійснюється при положенні поршня поблизу верхньої мертвої точки (ВМТ) і реалізована в двигунах MAN B & W серії ME-GI. Технологія подачі газу при низькому тиску заснована на спалюванні збіднених газоповітряних сумішей і реалізована в двигунах Winterthur Gas & Diesel Ltd (WinGD) DF і RT-flexDF.

Важливою особливістю двигунів WinGD є те, що вони працюють на збіднених газових сумішах, повітря в циліндрі орієнтовано в два рази більше, ніж потрібно для повного згорання, тому велика кількість тепла витрачається на нагрівання повітря, а це сприяє суттєвому зниження пікових значень температур згоряння і різкого зменшення утворення NOx. Підвищується ККД двигуна і потужність, в той же час зникає детонація. Коефіцієнт надлишку повітря підтримується в межах 2,0 - 2,2.

Перед двигуном газ фільтрується, тиск в газопроводі регулюється в залежності від навантаження двигуна (8 кгс/см^2 на повному навантаженні). Далі газ направляється до головного впускного клапана, встановленого в кришці циліндра. Керуючі імпульси на клапани подаються від електронного блоку управління, який, в свою чергу, отримує інформацію від датчиків обертів, навантаження, тиску та температури наддувного повітря і датчика контролю згоряння в кожному циліндрі. [1].

З танка запасу ЗПГ багатоступеневим відцентровим насосом регульованою продуктивності ЗПГ подається в теплообмінник, де він повністю випаровується. Після випарника газ надходить в підігрівач, в якому температура підвищується до 30 °С. З підігрівача газ надходить в буферний танк. Стабілізації тиску газу в танку запасу ЗПГ відбувається за допомогою відбору «теплих» парів компресором. З буферного танка, який грає роль акумулятора, газ при температурі 30 ºС і тиску 18 бар подається до ГКБ головного двигуна. До паливній системі допоміжних двигунів газ надходить через редуктор тиску, який знижує тиск до 6 бар. ГКБ регулює тиск газу в газопалевній рампі в залежності від навантаження двигуна. [1]

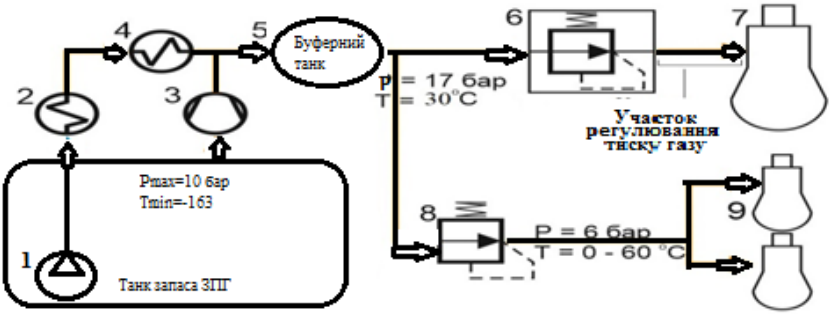


Рис. 1. Загальна принципова схема підготовки і подачі газу в двигуна WinGD DF: 1 - насос; 2 - випарник; 3 - компресор; 4 - підігрівач; 5 - буферний танк; 6 – Газо - клапанний блок (ГКБ); 7 - головний двигун; 8 - редукційний клапан; 9 - допоміжні двигуни

Процес горіння в двигуні з низьким тиском подачі газу характеризується рівномірним розподілом температур в КЗ, в слідстві чого кількість виробленого NOx не перевищує значення 4 г / (кВт * рік), що повністю відповідає вимогам III-го етапу Програми VI конвенції МАРПОЛ 73/78 [1].

У двигунах MAN B & W серії ME-GI газове паливо подається в циліндри під високим тиском. В даному двигуні використовується ідея досягнення необхідного тиску за рахунок стиснення ЗПГ, а потім його газифікації [3] (рис 2). Стиснення ЗПГ до необхідного тиску відбувається в трьох-плунжерні насоси високого тиску (НВТ). До НВТ скраплений природний газ подається живильним насосом. При цьому ПВГ з газового танка подається у випарник компресором високого тиску малої продуктивності. Витрата і тиск в системі регулюються частотою обертання насоса від приводного електродвигуна, що дозволяє досягати необхідного тиску при змінному навантаженні ГД. Незважаючи на те що змінюється витрата, тиск в системі підтримується постійним за допомогою досить складної системи регулювання. [8].

Подача газу в двигуні здійснюється через дві окремі газові форсунки, розташовані в кришці циліндра. Для досягнення критичного перепаду тисків на газовій форсунці і в камері згоряння (КЗ) тиск в газопроводі має становити 150 - 300 кгс/см^2 (в залежності від навантаження). Температура кінця такту стиснення складає 500 - 600 °С, що є недостатнім для надійного запалення метану, з огляду на його високу

температуру самозаймання (600 °С), тому перед подачею газового палива подається мала доза запального палива. [3]

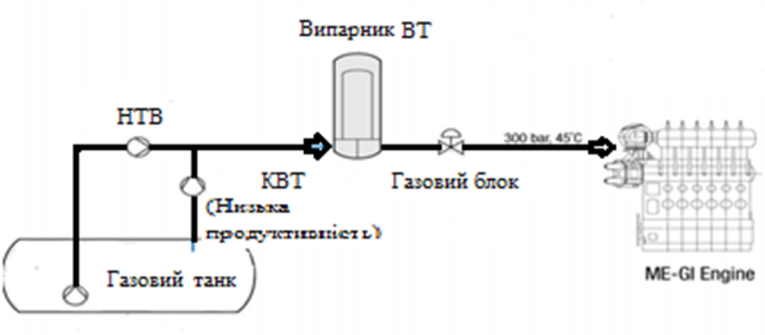


Рис. 2. Загальна принципова схема підготовки і подачі газу в двигуні MAN B & W ME-GI

Прийомистість двигунів з високим тиском подачі газу порівнянна з дизелями, що працюють на рідкому паливі, зважаючи на більш широко допустимий діапазон коефіцієнта надлишку повітря.

Технологія спалювання газового палива в ГД не впливає на вибір танків запасу ЗПГ, проте принципово визначає систему паливопідготовки. Для двигунів з низьким тиском подачі газу досить відцентрового криогенного насоса, і випарника низького тиску, тоді як для двигуна з високим тиском необхідний насос високого тиску (НВТ) плунжерного типу і відповідний випарник. [1]

Перевага системи низького тиску подачі газу в цьому випадку полягає в менших енергетичних витратах на стиск парів ЗПГ, в той час як для двигунів з високим тиском подачі газу необхідний багатоступінчастий насос високого тиску. [1]

У процесі горіння газу в двигуні з високим тиском подачі в КЗ з'являються локальні високотемпературні зони, де відбуваються реакція утворення NOx. Викиди NOx, при цьому відповідають лише II-му етапу Програми VI МАРПОЛ, а для відповідності III-му етапу необхідна подальша очистка вихлопних газів за допомогою вибіркової каталітичної нейтралізації. [1]

Аналіз можливих варіантів вибору танків запасу ЗПГ. Хоча використання ЗПГ в якості палива в суднових енергетичних установках має безліч переваг, є і недоліки. Танки запасу ЗПГ займають в 3-4 рази більше суднового простору, ніж звичайні паливні танки. Таким чином вільний вантажний простір стає одним з головних питань для обговорення. Збільшення тривалості планованого рейсу викликає необхідність збільшення

обсягу танків запасу ЗПГ [11]. Отже, одна з основних цілей при проектуванні суднів - оптимізувати розмір танків запасу в залежності від вільного простору [10].

Для зберігання зріджених газів використовуються різні конструкції танків. При цьому враховуються такі параметри, як:

-максимальний робочий тиск;

-максимальна температура ЗПГ;

-конфігурації танка;

-матеріал, який використовується в конструкції танка [9].

На сьогоднішній день існує декілька можливих варіантів установки танків запасу ЗПГ на транспортних суднах - газоходах [10]. Використання таких танків допустимо відповідно до вимог ІМО. До таких танкам відносяться незалежні танки типу А, В і С, а також мембранні танки [9].

Мембранні танки не є самонесучими, складаються з тонкої мембрани, покладеної на ізоляцію. Ізоляція, в свою чергу, розташовується прямо на корпусі судна, так що тиск в танку безпосередньо передається конструкції корпусу. Корпус є основним несучим елементом таких танків. Мембрана танка проектується таким чином, щоб термічні та інші види розширення або стиснення компенсувалися без її надмірного напруження [9]. Розрахунковий тиск пару Р в таких танках повинен складати не більше 0,07 МПа [7]. Для цього типу танків потрібно вторинний бар'єр.

Незалежні танки - самонесучі, не є складовою частиною корпусу судна і не беруть участь в забезпеченні загальної міцності корпусу. Такі танки кріпляться до корпусу судна тільки через спеціальні супорти, дозволяючи їм стискатися і розширюватися незалежно від корпусу судна. Зберігання ЗПГ відбувається в танках запасу у вигляді криогенних резервуарів без будь-яких засобів зовнішнього охолодження. Отже, значна частина обсягу ЗПГ випаровується під час рейсу [5]. Цей випаруваний газ зазвичай називають природно випаруваним газом (ПВГ). Утворений ПВГ можна використовувати в якості палива, зжижати в УПЗГ або спалювати в спеціальному газовому топочном агрегаті (ГТА). Утилізація ПВГ, який неминуче утвориться при використанні ЗПГ в якості палива на морських суднах є одним з ключових питань при проектуванні суднів - газоходів.

Не дивлячись на те, що при установці танків типу С значно більше використовується корисного місця на судах, даний варіант залишається найбільш привабливим з точки зору економії фінансових коштів, які необхідно затратити на утилізацію ПВГ з більш компактних мембранних танків.

Для прикладу, в циліндричному танку типу С обсягом 200 м^3 з робочим тиском від 0,6 бар до 4 бар і з еластичною поліуретановою піною в

якості ізоляції товщиною 200мм - максимально дозволений тиск в танку буде досягнуто приблизно через 25 днів [10].

Таким чином для суднів з невеликим дедвейтом - оптимальним варіантом є установка танків типу С, які є на ринку в наявності різних об'ємів з максимально допустимим робочим тиском до 10 бар. [10]. Вони найбільш привабливі в використанні на судах з невеликою витратою газового палива, або на таких, які часто заходять в порти, де можливе бункерування судна. Танки Типу З уже використовуються на багатьох поромах і офшорних суднах [10].

Однак для великих суднів доцільно використовувати мембранні танки в зв'язку з тим, що установка таких танків більш вигідна з точки зору оптимального використання вільного простору.

Прикладом таких суднів можуть виступити споруджуємі на Китайських суднобудівних заводах 9 контейнеровозів, компанії CMA CGM місткістю 22 000 контейнерів. Повідомляється що ці судна будуть ходити між Європою і Далеким сходом з бункеруванням в країнах Європи. Планується, що місткість вантажних танків досягне 18 600 м^3. Місткість таких танків запасу можна співвіднести з вантажомісткістю невеликого газовоза. Таким чином очевидно, що доцільне використання тільки танків мембранного типу.

Недавні замовлення на великі морські судна, що використовують в якості палива ЗПГ показують істотне збільшення попиту і потреби в більш просунутих і ефективних технологічних рішеннях для обробки ПВГ, що утворюється при неминучій передачі тепла через ізоляцію криогенного резервуара. [12]

Методи обробки ПВГ

ЗПГ зберігається в танках запасу при тиску близькому до атмосферного і температурі -163 - -159 °С. [2]. Найбільш прийнятним варіантом на великих контейнеровозах з двох-паливною установкою є використання мембранних танків. Так, наприклад, на згаданих контейнеровозах на 22 000 контейнерів компанія GTT проектує мембранні паливні танки ЗПГ, типу Марк III, які дозволять максимально ефективно використовувати вантажний простір на даних судах. Такі танки розраховані на робочий надлишковий тиск 7 кПа. При 25 кПа зпрацьовує запобіжний клапан [2].

Компанія CMA CGM заявляє, що на згаданих споруджуваних контейнеровозах будуть встановлюватися 12-циліндрові, двотактні двигуни внутрішнього згоряння WinGD 12X92DF з діаметром поршня 92

см і системою подачі газу під низьким тиском. Максимальна потужність сягатиме 63,840 КВт при 80 об / хв. Обсяг танків запасу ЗПГ буде дорівнює 18 600 м^3. Планується, що контейнеровоз буде працювати на лінії Європа - Далекий Схід з одноразовим бункеруванням в Європі. Очевидно, що на ходових режимах роботи судна утворюваний ПВГ буде повністю зпалюватися в циліндрах головного двигуна. Однак, припустимо, що танки запасу ЗПГ повністю заповнені і судно стоїть на якорі або в дрейфі. В такому випадку споживана потужність судна буде значно нижче і весь ПВГ буде неможливо утилізувати в дизель-генераторах або котлах.Для оцінки кількості надлишкового ПВГ можна розрахувати дизбаланс між необхідною теплотою згоряння і теплотою ПВГ.

Необхідна кількість теплоти пропорційно потужності і питомої витрати газового палива при певному навантаженні двигуна

$$Q_{необ} = N_e \cdot g_e \cdot 24$$

Потужність варіюється в залежності від режиму роботи судна. Потужність, споживаюча контейнеровозом на стоянці залежить від кількості споживачів, необхідних для забезпечення судна. Припустимо, що на майбутній рейс судна не було заплановано перевезення рефрижераторних контейнерів. Тоді споживаюча потужність такого контейнеровоза дорівнює приблизно 500 кВт.

$$Q_{необ} = \frac{500кВт \cdot 7091 \frac{кДж}{кВт / ч} \cdot 24}{1000} = 85092 \frac{МДж}{доб}$$

Кількість теплоти ПВГ характеризує як добовий обсяг випаруваного вантажу, так і його теплотворність. Кількість теплоти ПВГ можна розрахувати за формулою:

$$Q_{пвг} = e \cdot V \cdot l \cdot p \cdot H$$

де e - добовий коефіцієнт випаровування ЗПГ; V - об'єм вантажних танків; l - коефіцієнт заповнення танків; ρ - щільність ЗПГ; H - масова нижча теплота згоряння газу. Виробники вантажних систем заявляють, що добовий коефіцієнт випаровування вантажу для мембранних танків вантажних систем Mark III дорівнює 0,0015.Також припустимо, що пари вантажу будуть містити виключно метан. Тоді масова нижча теплота згоряння складе 50,041 МДж / кг [1], таким чином:

$$Q_{пвг} = 0,0015 доб^{-1} \cdot 18600 м^3 \cdot 0,98 \cdot 459,4 \frac{кг}{м^3} \cdot 50,041 \frac{МДж}{кг} = 628560,73$$

Дизбаланс випаруваного і необхідної кількості теплоти буде дорівнює їх різниці

$$\Delta Q = Q_{пвг} - Q_{необ}$$

$$\Delta Q = 628560 - 85092 = 543468 \frac{МДж}{доб}$$

Очевидно, що спалювати в ГТА і нехтувати такою кількістю газу не доцільно. Використовувати його в якості палива не представляється можливим. Отже, необхідно повторно зріджувати ПВГ в різних установках повторного зрідження.

На сьогоднішній день для обробки ПВГ використовується кілька типів установок повторного зрідження газів. Найбільш поширеними є установки, що працює за циклом Брайтона, що випускаються декількома виробниками в різній компоновці. Однак застосування установок, що працюють за циклом Брайтона недоцільно при малому добовому обсязі ПВГ.

Суднові системи скраплення природного газу, що працюють по циклу Брайтона мають двоконтурну систему із загальним теплообмінником. Як робоче тіло в них використовується N2 (азот).

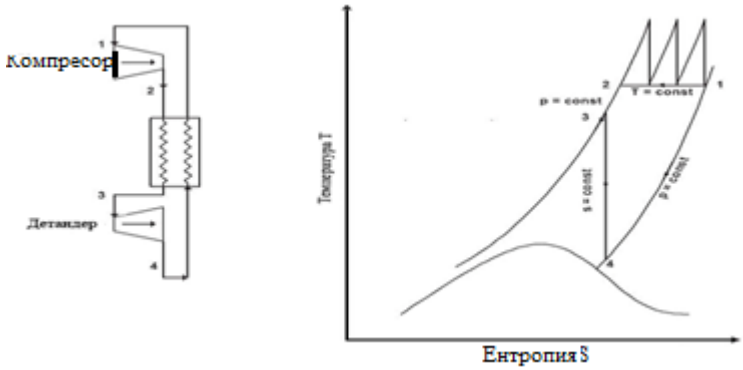


Рис. 3. Зворотний цикл Брайтона

Газ зтискається ізотермічно в трьохступеневом компресорі з проміжним охолодженням (рис. 3). Потім газ проходить через теплообмінник при постійному тиску, в якому відбувається обмін енергією з відходним потоком низького тиску. Від точки 3 до точки 4 відбувається ізоентропійне розширення в детандері. Від точки 4 до точки 1

холодний газ нагрівається до початкової температури, відводячи енергію при постійному тиску від вхідного потоку високого тиску. [6]

Альтернативою таким установкам можуть виступати Mini LNG установки, які працюють за принципом змішаного охолодження. Такі установки були розроблені і протестовані в лабораторіях науково - дослідного інституту Sintef в Тронхеймі. На даний момент вони встановлюються на невеликих суднах - газовозах, таких як газовоз компанії I.M. Skaugen SE з об'ємом ПВГ 20 тонн / день.В установках такого типу ПВГ стискається в компресорі до 18 бар, охолоджується забортною водою і пропіленом до температури -35 °С в контурі попереднього охолодження в спеціальних теплообмінниках. Потім газ зріджується і переохолоджується в контурі змішаного охолодження. Після чого переохолоджена рідина дроселюється до необхідного тиску [14].

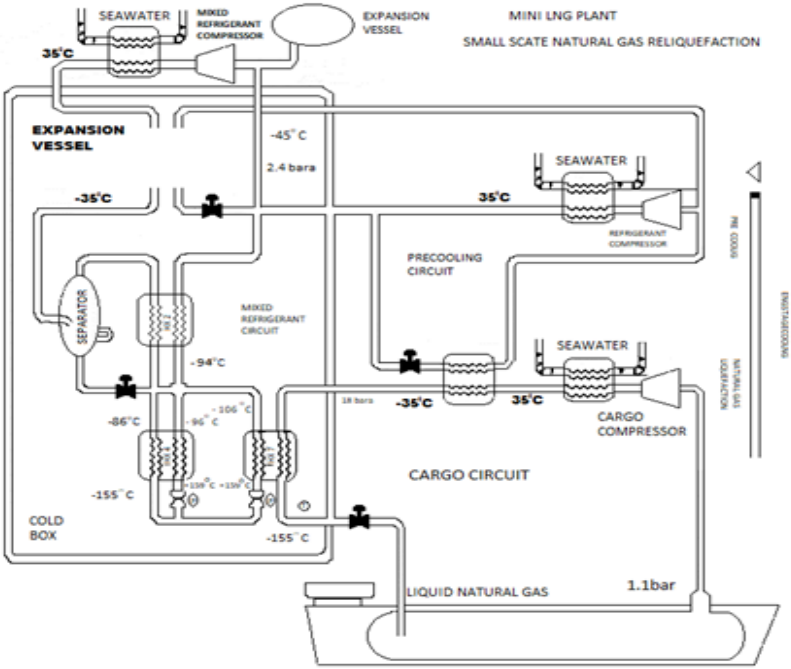


Рис.5 Установка інституту Sintef

Установки такого типу випускаються багатьма компаніями продуктивністю від 5 до 50 тон ЗПГ в день. Середнє споживання енергії в

таких установках дорівнює 0,47 КВт/кг ЗПГ. Ще однією альтернативою установкам повторного зрідження може виступити установка StirLNG, що працює по зворотному циклу Стірлінга, заснованого на стисненні і розширенні гелію в закритому циклі.

Для наочного пояснення, процес може бути розділений на 4 основні положення поршня, зображених на рис. 6.У положення 1, гелій знаходиться в просторі D при температурі навколишнього середовища. У положенні 2 цей газ стискається поршнем B з подальшим підвищенням температури до 80 °C. Коли плунжер З рухається вниз з положення 2 в положення 3, газ витісняється з простору D в простір E, проходячи через охолоджувач H з подальшою віддачею тепла охолоджуючої води і зниженням температури газу до 15 °C. Далі гелій проходить через регенератор G в простір E.В регенераторі газ охолоджується майже до температури зрідження. Під час останньої і головної дії газ розширюється при русі плунжера і поршня в положення 4.

У процесі розширення створюється необхідна холодопродуктивність, зкраплений метан в теплообміннику J. Для початку нового циклу, плунжер рухається в положення 1, повертаючи гелій в простір D.

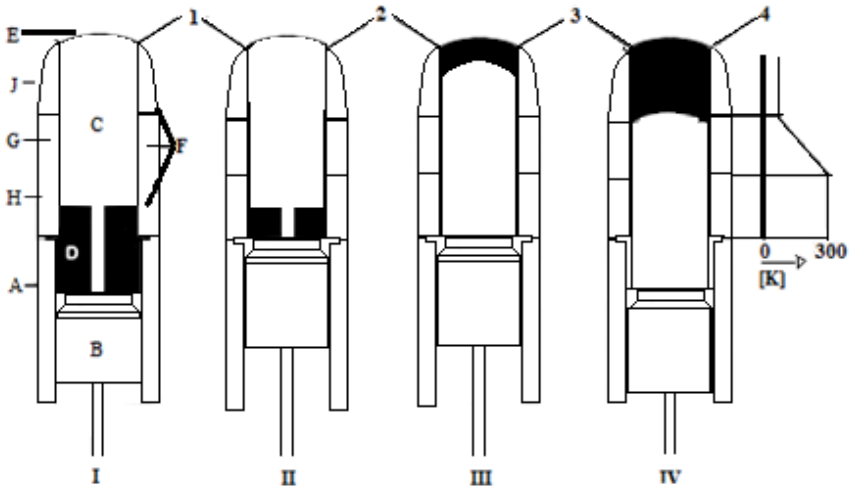


Рис.6 Установка StirLNG

Вперше на морських суднах установка StirLNG буде використана на бункеровочному судні обсягом вантажних танків 2200 m3 в проекті

компанії Tote. На цьому судні буде встановлено 6 StirLNG, продуктивністю 900 кг / день і споживаної потужністю 38 КВт кожна.

Висновки

1. З урахуванням сучасних екологічних вимог і постійним зростанням цін на залишкові сорти палива, Пропульсивний комплекс з двотактним газо-дизелем є черговим еволюційним рішенням.

2. Існуючі на сьогоднішній день технології використання природного газу в суднових малооборотних двигунах принципово різні. З точки зору динамічних і потужних показників очевидними перевагами володіє технологія подачі газу під високим тиском. Однак, екологічні характеристики, капіталовкладення та експлуатаційні витрати значно краще у двигунів з низьким тиском подачі газу.

3. Для не великих суден - оптимальним варіантом є установка танків типу С, які не вимагають додаткових установок для обробки ПВГ. В той час, як для великих судів найбільш привабливим варіантом буде установка танків запасу мембранного типу, що дозволяють максимально ефективно використовувати вантажний простір судна.

4. Необхідний пошук найбільш ефективних і економічних варіантів обробки надлишкового ПВГ, що утворюється при стоянці судна, який неможливо використовувати в якості палива в суднових котлах і двигунах внутрішнього згоряння.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Чепаліс І.В. Проблеми стійкої роботи газодизеля при використанні природно випарувався вантажу метановозів як палива / Вісник ГУМРФ. - 2015.
2. Чепаліс І.В. Козьміних Н.А. Вплив економічних та екологічних факторів на вибір пропульсивного комплексу сучасних метановозів // Конф. : "Енергетика судна: експлуатація та ремонт", 2015
3. Чепаліс І.В. Аналіз систем подачі природного газу в двотактні газодизелі на суднах-метановозах // Технічні гази, 2016. - № 3. - С. 65-70.
4. І. І. Костильов, Д. В. Коняєв. Бункерування як фактор стримування застосування газового палива на суднах // Вісник ГУМРФ. - 2016.
5. Christos Frangopoulos George Dimopoulos. A dynamic model for liquefied natural gas evaporation during marine transportation. // International Journal of Thermodynamics - 2008.
6. R.F. Barron Cryogenics systems Oxford University Press, 1985.-406p.
7. International Code of Safety for Ships Using Gases or other Low-Flashpoint Fuels (IGF Code)

8. Project Guide "ME-GI Dual Fuel MAN B & W Engines" [Електронний ресурс]: https://marine.mandieselturbo.com
9. Баскаков С.П. Перевезення зріджених газів морем. – 2002
10. Herve Irvoas. LNG containment systems - retrofitting options. // 8th Gasfuelled ships conference. - 2017. - p. 135
11. Jo Ann Cantu. Training and competence of personnel for gas fuelled ships and bunkering. // 8th Gasfuelled ships conference. - 2017. - p. 125
12. Arrigo Battistelli. Boil off gas handling on LNG fueleed vessels with high pressure gas injected engines. - 2015.
13. Geir Skaugen. Liquefaction of natural gas. How can fundamental rd help the industry? // 6th Annual LNG TECH Global Summit. SINTEF Energy Research, 2011
14. P. Neksa, E. Brendenga, M. Dreschera, and B. Norberg. Development and analysis of a natural gas reliquefaction plant for small gas carriers // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2010

10.31653/smf39.2019.56-68

Малахов О.В., Колегаєв М.О., Бражнік І.Д., Ліхогляд К.А.
Національний університет "Одеська морська академія"'

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕСУ ТЕПЛО-МАСОПЕРЕНОСУ В ЗАСТОСУВАННІ ДО ВЕНТИЛЯЦІЇ ІНЕРТНИМИ ГАЗАМИ ВАНТАЖНИХ ТРЮМІВ ТАНКЕРІВ

Постанова проблеми

Ефективність експлуатації танкерів визначається двома основними напрямками:

- якістю проведення транспортних операцій під час виконання рейсу;
- технологічними схемами і виробничими операціями, які використовуються під час підготовки судна до прийому нового вантажу.

Перший напрямок визначається якістю управління судном і, зокрема його технічним менеджментом. Другий напрямок визначається виробничими процесами, які використовуються при проведенні вантажно-розвантажувальних операцій. У другому напрямку особливе значення має якість експлуатації системи інертних газів танкера. Її головне призначення полягає в реалізації комплексу заходів, які забезпечують створення атмосфери, безпечної з точки зору виникнення вибухів або пожеж всередині трюму. Скорочення часу роботи системи інертизації трюмів танкеру безпосередньо визначає вартісні показники його роботи. Ця система повинна підтримувати в будь-якій частині вантажного трюму атмосферу із вмістом кисню не більше 8% за обсягом і надлишковий тиск на 20% більше атмосферного. При цих параметрах буде забезпечуватися протидія надходженню зовнішнього атмосферного повітря (надлишкової концентрації кисню) в середину трюму.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз конструктивних розмірів вантажних трюмів на танкерах показує, що вони не є універсальними. При переході від судна до судна вони завжди між собою різняться. Саме з цієї причини у всіх нормативних документах відсутня універсальна вимога до об'ємної продуктивності системи інертних газів на танкерах. У світовій практиці експлуатації танкерів існує одне універсальне правило, яке формулюється наступним чином: об'ємна витрата інертних газів, що виробляються на танкері повинна становити в кількісному вираженні вели-

чину, яка дорівнює 125% від величини об'ємної витрати суднового нагнітального устаткування яке використовується при розвантаженні судна на режимі максимальної продуктивності. В ході досвіду експлуатації танкерів встановлено, що така величина об'ємної витрати інертних газів дозволяє заповнювати вантажні трюми з урахуванням запасу на процес часткового вивітрювання з трюмів деякого їх обсягу.

Загальна схема судової системи інертних газів, детальний опис якої наводиться в роботах [1-3] показана на схематичному малюнку 1, де видно, що основними технічними вузлами в системах інертних газів танкерів виступають: генератор інертних газів 7, який являє собою окремий вузол спалювання мазутного палива з метою отримання інертних газів; скрубер 9, який призначений для зниження температури інертних газів в ході процесу теплообміну з охолоджувальною водою; лінія подачі інертних газів у вигляді складного магістрального трубопроводу 12 з відгалуженнями; гідравлічний акумулятор 15 для запобігання зворотного руху інертних газів від вантажних трюмів в сторону генератора інертних газів або передачі в цьому напрямку стрибків тиску; автоматизована гідравлічна арматура трюмів; засоби контрольно-вимірювальної апаратури 11 (термометри, манометри, вакуумметри, витратоміри, датчики і т. і.).

Загальний вигляд діаграми, що показує взаємний вплив поточних значень концентрації кисню і вуглеводнів, які визначають вибух мікроатмосфери в вантажному трюмі танкеру показаний на малюнку 2. На наведеній діаграмі також відображені контури їх граничних меж [1].

Величина концентрації кисню визначається вимогами вибухової безпеки. Залежно від виду проведеної технологічної операції (завантаження і вивантаження вантажу, вентиляція, видалення інертних газів), виду вантажу (газ, сира нафта і т.д.), виду танка (вантажний, баластної води) і місця проведення робіт (причал, відкрите море, сухий док) загальна діаграма чисельних кордонів концентрації кисню і вуглеводнів в мікроатмосфері трюму може змінюватися.

Аналіз числових характеристик концентрацій кисню і вуглеводнів, які є нормативними залежно від виду технологічної операції (вивантаження сирої нафти або її продуктів, завантаження або мийка трюму, постановка судна в сухий док) і виду трюму (вантажний трюм, баластний танк) показує, що при створенні в мік-

роатмосфері вантажного трюму танкера пожежо- та вибухобезпечних умов концентрація кисню в робочому обсязі може змінюватися в значних межах. У числових значеннях цей діапазон становить від 8 до 21%. З цієї причини для розробки нової системи і принципів вентиляції вантажних трюмів танкера була прийнята умова, що безпечною межею є найменше значення. Концентрація кисню всередині трюму незалежно від умов його експлуатації і виду вантажу, який завантажується або вивантажується, при проведенні операцій заповнення або вивантаження інертними газами не повинна перевищувати величину 8%.

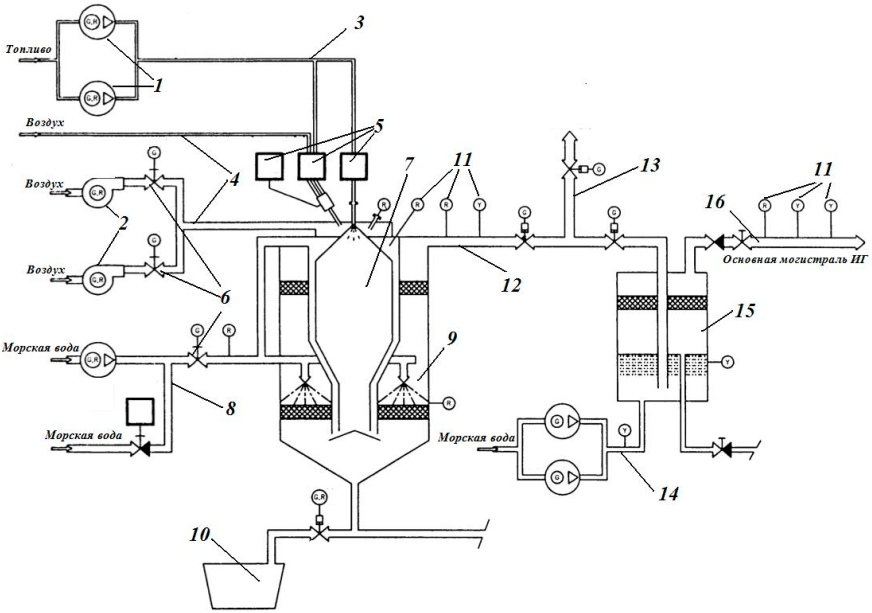


Рисунок 1. Загальна схема суднової системи інертних газів
1 - паливні насоси; 2 - повітряні компресори; 3 - паливна магістраль; 4 – повітряні трубопроводи; 5 - система запалювання з вузлом підготовки паливоповітряної суміші і індикацією її горіння; 6 - регулятори подачі повітря; 7 - генератор інертних газів; 8 - магістраль подання забортної води; 9 - скрубер; 10 - дренажний танк; 11 - елементи КВПіА; 12 - магістраль розподілу інертних газів; 13 - відвідна лінія для скидання інертних газів в атмосферу; 14 - лінія подання забортної води в гідравлічний акумулятор 15.

Рисунок 2. Загальна діаграма подання інертних газів для вантажних трюмів танкера [1]

При виштовхуванні інертними газами повітря з трюму піднімальний вимушений рух повітря в трюмі танкера завжди викликається дією сили, яка з'являється за рахунок зміни щільності потоку. Така зміна викликається взаємопов'язаними між собою процесами теплоперенесення та передачі маси завдяки різним концентраціям інертних газів і повітря. Температурна стратифікація двофазного потоку інертних газів і повітря по висоті трюму також є одним з факторів, що впливають на швидкість витиснення повітря з трюму судна [4]. Саме вона реалізує механізм передачі енергії від інертних газів до повітря. На графіку малюнка 3 взятому з роботи [5] видно, що при зміні температури від 20 до 80 ^{0}C щільність повітря змінюється приблизно на 20 % від 1,2 до 0,99 кг/м^3.

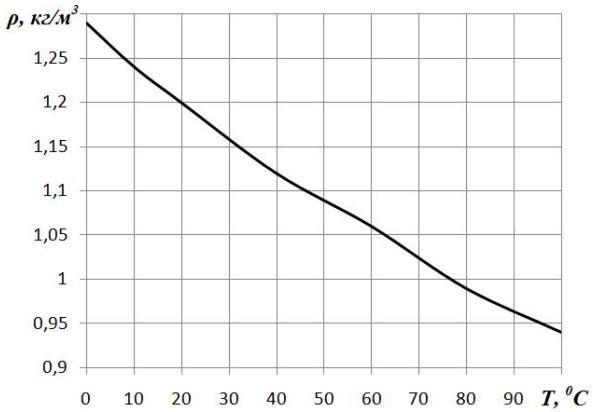


Рисунок 3.Зміна щільності повітря з ростом температури

При роботі генератора інертних газів в ході згоряння палива практично завжди основними хімічними компонентами, що складають на виході обсяг димових газів є [6]: вуглекислий газ CO_2 з об'ємним вмістом від 1 до 10 %; оксид вуглецю CO з об'ємним вмістом від 0,01 до 5 %; вода H_2O з об'ємним вмістом пари від 0,5 до 4 %; діоксид азоту NO_2 і оксид азоту NO з об'ємним вмістом газів від 76 до 78 %; кисень O_2 з об'ємним вмістом від 2 до 18 %; неканцерогенні з'єднання вуглеводнів CH з об'ємним вмістом від 0,009 до 0,5 %; альдегіди з об'ємним вмістом від 0,001 до 0,009 %; оксид сірки SO_2 з об'ємним вмістом від 0,001 до 0,03 %; сажа з об'ємним вмістом від 0,01 до 1,1 г/м^3; бензопірен з об'ємним вмістом до 0,01 г/м^3.

При визначенні щільності інертних газів в більшості випадків можна вважати, що даний обсяг інертних газів складається з чотирьох базових компонент - CO_2, H_2O, NO_2, O_2. В роботі [7] для розрахунків теплової потужності котла наведені середньостатистичні показники цих компонент. Вони показані в таблиці 1.

У більш загальному випадку щільність інертних газів можна розрахувати, як множення їх щільності при нормальних умовах (0 ^{0}C і 760 мм. рт. ст.) на температурну поправку за виразом [8]:

Таблиця 1

Характеристики основних компонент [7]

Компонент	Об'ємний вміст, %	Щільність при 100 ^{0}С, кг/м^3	Ваговий склад, %	Теплоємність після утилізації, кДж/(кг·К)
CO_2	8,64 %	1,977	13,82	1,076
H_2O	18,46 %	0,598	12,2	2,026
NO_2	70,18 %	1,25	71,99	1,076
O_2	1,72 %	1,429	1,99	1,004

$$\rho_{д.г.} = \frac{G_{д.г.}}{V_{д.г.}} \frac{273}{273+T} = \frac{1+\alpha L_0}{22.4\left(m_{CO_2}+m_{H_2O}+m_{NO_2}+m_{O_2}\right)} \frac{273}{273+T} =$$

$$= \frac{1+\alpha\left(\frac{Q_m}{0.21}\right)}{22.4\left(m_{CO_2}+m_{H_2O}+m_{NO_2}+m_{O_2}\right)} \frac{273}{273+T} \qquad (1)$$

де: $\rho_{д.г.}$ – щільність димових газів, *кг/м*^{3}; $G_{д.г.}$ – загальна кількість димових газів, що утворюються при спалюванні 1 кг палива, *кг/кг*; $V_{д.г.}$ – обсяг димових газів, *м*^{3}; T – температура, ^0C; α – коефіцієнт надлишку повітря; L_o – теоретична кількість повітря, необхідна для згоряння 1 кг палива, кг/кг; Q_m – теоретична кількість кисню, необхідна для згоряння 1 кг палива, кг/кг; m_i – мольний зміст *i*–тої компоненти інертних газів (розраховується за емпіричними формулами [8]), *м*^{3};

Формулювання мети дослідження

З урахуванням вищевикладеного була сформульована основна мета наукового дослідження - розробити математичну модель, на підставі якої можливо отримати чисельні діапазони зміни основних чисельних характеристик процесу інертизації вантажних трюмів танкера.

Виклад основного матеріалу досліджень

При розробці математичної моделі через невисокі швидкості руху потоку повітря всередині трюму була використана гіпотеза про його нестислість і, що сам процес його руху є рівноважним. У цьому випадку згідно з результатами досліджень роботи [9] динамічна задача про рух повітря при його витисненні з трюму може розглядатися окремо

від теплової, коли всередині трюму відбувається теплообмін між повітрям і інертними газами.

В якості основних рівнянь, які були прийняті для подальшого використання в теоретичних дослідженнях були використані рівняння руху і рівняння масообміну, що описують зміну масової концентрації інертних газів і повітря в замкненому просторі трюму.

Ізоентропічний рух повітря в трюмі можливо описувати двома способами. Перша система рівнянь є менш точною, але проста у своїй чисельної реалізації [10]

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{\partial \rho V_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(P + \rho V_x^{\,2}\right) = 0\\
&\frac{\partial \rho V_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y}\left(P + \rho V_y^{\,2}\right) = 0\\
&\frac{\partial \rho V_z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}\left(P + \rho V_z^{\,2}\right) = 0\\
&\frac{P}{\rho^{\gamma}} = const
\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

Друга система рівнянь є більш точною, оскільки враховує характер руху потоку з урахуванням поточної концентрації інертних газів [4]. У скороченій формі запису вона має вигляд

$$\rho \frac{dV_i}{dt} = g\left(\frac{\partial \rho}{\partial C_i}\right)\left(C_i - C_i'\right) - \nabla P + \mu \nabla^2 V_i \tag{3}$$

де V_x, V_y, V_z, V_i – проекція швидкості, м/с; P – тиск, Па; C_i, C_i' – концентрація повітря в трюмі і в навколишньому середовищі, кг/м^3; μ – динамічна грузькість повітря, *Па·с*.

Ці рівняння повинні бути доповнені рівнянням нерозривності

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho V_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho V_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho V_z}{\partial z} = 0 \tag{4}$$

Оскільки при подачі інертних газів в вантажний трюм судна використовуються малі (менше 30 м/с) швидкості то стисливість газо-повітряної середовища всередині трюму можна не враховувати. З цієї причини в рівнянні (4) перший доданок можна не враховувати і приймати таким, що дорівнює нулю.

Зв'язок між щільністю і температурою димових газів або повітря описується наступним рівнянням стану [10]

$$\rho = \rho_0\left(1 - C_w\left[T - T_0\right]\right) \tag{5}$$

де C_w – об'ємний коефіцієнт теплового розширення, $^0C^{-1}$; ρ_0, T_0 – початкові значення щільності і температури.

Рух струменів інертних газів в області виходу всередині трюму можна описати з використанням системи диференціальних рівнянь Ейлера. Її використання обґрунтовується експериментально встановленим результатом про відсутність впливу ефектів грузькості на характер руху потоку уздовж початкової ділянки струменя [11]

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial V_x}{\partial x} &= -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial V_y}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y} \\ \frac{\partial V_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z} \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

Зміну концентрації інертних газів всередині трюму можна описати рівнянням, що зв'язує дифузійний потік із градієнтом концентрації, який його визиває

$$\frac{dC_i}{dt} = D_i \nabla^2 C_i + S_i \tag{7}$$

де C_i – масова щільність інертних газів в обсязі повітря, кг/м^3; D_i – коефіцієнт дифузії інертних газів, м^2/с; S_i – швидкість генерування інертних газів в одиниці об'єму трюму, м/с.

Розподіл температури всередині трюму при його вентиляції не є суттєвим. Діапазон її зміни для інертних газів становить не більше 15-20 ^{0}С. Витиснення повітря відбувається за рахунок процесів конвективного переносу, а не теплової дифузії. З цієї причини поле температур можна оцінити шляхом вирішення теплової задачі з точковим джерелом тепла. Згідно роботі [9] за межами кола радіусом r, на якому задана температура $T(r_o)=T_0$ розподіл поля температур при значенні числа Пеклі (Pe) більше двох буде описуватися як

$$T(r) = \frac{q}{2(Pe-2)}\frac{1}{r^2} + \left(T_0 - \frac{q}{2(Pe-2)}\frac{1}{r_0^2}\right)\left(\frac{r}{r_0}\right)^{-Pe} + T_\infty \tag{8}$$

де T – температура, ^0C; r – радіус сферичної поверхні, на якій визначається температура, *м*; q - інтенсивність тепловиділення, *Вт*; Pe – число Пекле; r_0 – радіус теплового сферичного джерела на якому задана температура, *м*; T_∞ – температура на нескінченності, ^0C.

Величини Pe і q можуть бути розраховані за виразами

$$Pe = -\frac{Q}{2\pi\chi} \tag{9}$$

$$q = \frac{4\nu\chi Pe^2}{c_v} \tag{10}$$

де Q – витрата інертних газів, $м^3/с$; χ – температуропровідність $м^2/с$; ν – кінематична в'язкість, $м/с^2$; c_v – питома теплоємність, *Дж/(кг·К)*.

Сукупність рівнянь (1) - (10) є математичною моделлю процесу вентиляції трюму інертними газами в ході його підготовки до наступних вантажних операцій. Для її вирішення використовувалися початкові умови, які моделювали стан потоку повітря всередині всього обсягу вантажного трюму і струменів інертних газів, які подаються на його витіснення.

При завданні кінематичних характеристик струменів було прийнято, що вони мають ідентичні значення швидкості, тиску та температури у всіх розрахункових вузлах. Ці умови в залежності від місця розташування насадок подачі струменів формулювалися в наступному вигляді:

- розташування насадок на верхній стінці вантажного трюму

$$V_z = -const \qquad V_x = 0 \qquad V_y = 0 \tag{11}$$

$$P = const \tag{12}$$

$$T = const \tag{13}$$

– розташування насадок на дні вантажного трюму

$$V_z = const \qquad V_x = 0 \qquad V_y = 0 \tag{14}$$

$$P = const \tag{15}$$

$$T = const \tag{16}$$

Значення констант, що входять до виразу (11)-(16) мають відповідати характеристикам нагнітального обладнання, що використовується для подачі інертних газів на танкерах.

У виразах (11) і (14) знак швидкості приймається позитивним або негативним по відношенню до основного напрямку руху повітря, що витискується. Його відлік завжди повинен вестися від дна вантажного трюму в сторону атмосфери.

Початкові умови для моделювання повітря всередині трюму записувалися у вигляді стану його повного спокою перед початком подачі струменів інертних газів

$$V_x = 0 \qquad V_y = 0 \qquad V_z = 0 \tag{17}$$

$$P = -g\rho_0\left(y - \frac{C_w}{2H}T_0 y^2\right) \tag{18}$$

$$T = const \tag{19}$$

Як видно з рівняння (18) зміна тиску по висоті відповідала гідростатичного тиску. У разі, якщо в ході моделювання для отримання результатів з високою точністю необхідно враховувати кут хитавиці судна γ, то в рівнянні (18) необхідно замінити доданок g на: gcos γ в напрямку віссі OX і gsin γ в напрямку виссі OY. Значення констант, що входять до виразів (18)-(19) мають відповідати характеристкам повітря всередині вантажного трюму в реальних умовах експлуатації танкера.

Для вирішення рівнянь математичної моделі в сукупності з початковими умовами необхідно використовувати граничні умови. З їх допомогою моделюються всі жорсткі поверхні розрахункового обсягу і характеристики струменів інертних газів в місцях розташування їх входу в трюм. Жорсткі стінки трюму можна описувати за допомогою умови непротікання поверхні, коли швидкість потоку дорівнює нулю

$$V_x = 0 \qquad V_y = 0 \qquad V_z = 0 \tag{20}$$

Величина температури на стінках трюму може прийматися незмінною і такою, що дорівнює початковому значенню температури повітря в трюмі.

При проведенні досліджень були виконані натурні вимірювання, що описують процес зміни концентрації кисню в вантажному трюмі танкера в ході його вентиляції шляхом примусової подачі інертних газів. Ці виміри були зіставлені з результатами вимірювання аналогічного параметра при стандартній операції подання інертних газів в трюм судна і з результатами теоретичних досліджень на основі розробленої математичної моделі. Всі результати показані на малюнку 4. Наведені на графіку значення концентрації кисню відповідають точці

виходу повітря з вантажного трюму в атмосферу. Експериментальні дані, показані на цьому графіку, були отримані одночасно, коли два повністю ідентичних вантажних трюми заповнювалися інертними газами за стандартною технологічною схемою і з використанням розробленої комбінованої схеми примусової вентиляції.

Як видно з графіків використання примусової подачі призводило до кількісної, але не якісної розбіжності у змінах в часі концентрації кисню всередині трюму. Отримана розбіжність між двома експериментальними кривими показує, що використання процесу примусової подачі інертних газів всередину трюму призводить до отримання найголовнішого і основного результату - скорочення часу, що витрачається на вентиляційну обробку трюмів танкера перед отриманням нового вантажу. На графіку видно, що на початку процесу вентиляції зміна концентрації кисню відбувається однаково незалежно від способу подачі інертних газів. Істотне розходження між кривими починається через 80 хвилин після початку процесу вентиляції трюму. Залежно від способу вентиляції трюму концентрація кисню всередині його робочого простору, що отримується при закінченні відрізняється і її значення в разі примусової вентиляції стає менше, ніж при стандартній. На графіку видно, що вихід на стаціонарне значення концентрації кисню, яке дорівнює 8% під час примусової подачі інертних газів спостерігається приблизно через 740 хвилин після початку процесу вентиляції трюму. Аналогічна величина концентрації в ході природної вентиляції трюму за цей період часу була більше і становила 9,25%. Її вихід на стаціонарне значення спостерігався приблизно через 1700 хвилин після початку процесу вентиляції трюму.

У процентному співвідношенні поліпшення процесу вентиляції трюму при переході від стандартної до примусової вентиляції трюму склало 13,5 %. Скорочення витраченого часу при інших рівних умовах склало 56,47 %.

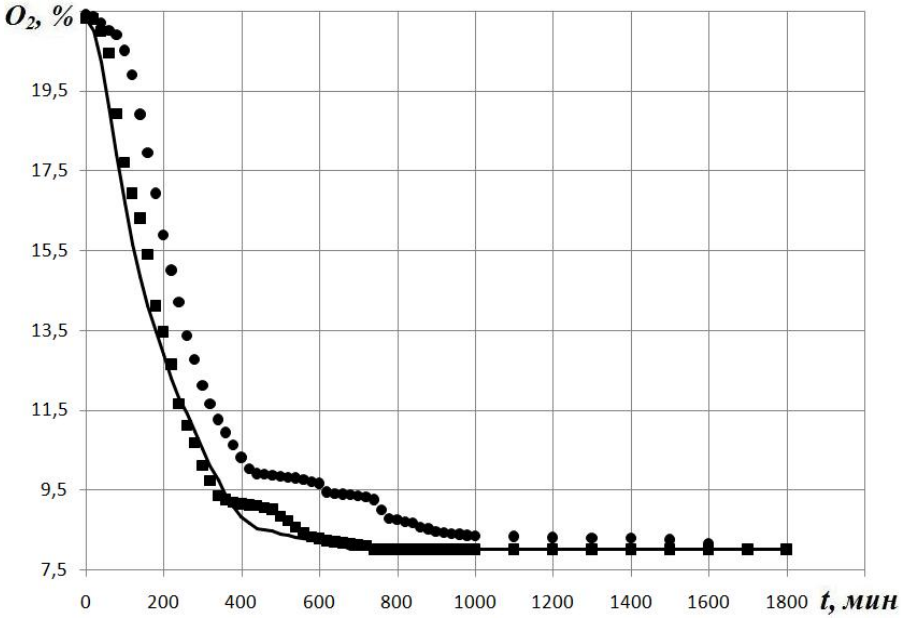


Рисунок 4. Зміна концентрації кисню при поданні інертних газів в вантажний трюм танкера

● – стандартне подання ИГ; ■ – примусове подання ИГ; суцільна лінія – розрахунок.

Висновки

1. У першому наближенні розподіл температури між стінками по ширині і висоті вантажного трюму можна приймати лінійним.

2. В силу невисоких швидкостей руху потоку повітря всередині трюму процес його руху є рівноважним. В цьому випадку динамічна задача про рух повітря під час його витискання з трюму може розглядатися окремо від теплової, коли всередині трюму відбувається теплообмін між повітрям і інертними газами.

3. При розробці математичної моделі використані рівняння руху і рівняння масообміну, що описують зміну масової концентрації інертних газів і повітря в замкненому просторі вантажного трюму танкера.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Малахов А.В., Колегаев М.А., Бражник И.Д. Совершенствование эксплуатационных показателей системы инертных газов на танкерах. Вісник ХНТУ. № 2(65), 2018 р. с. 27–34.
2. Бражник И.Д. Совершенствование системы подачи инертных газов на танкерах / Колегаев М.А., Бражник И,Д. // Матеріали науково–технічної конференції молодих дослідників ”Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт“, – Одеса: НУ “ОМА”, 2017;
3. Бражник И.Д. Исследование процессов принудительной подачи инертных газов в грузовые помещения танкера / Колегаев М.А., Бражник И,Д. // Матеріали науково–технічної конференції ”Річковий та морський флот: експлуатація і ремонт“, – Одеса: НУ “ОМА”, 2018;
4. Джалурия Й. Естественная конвекция. Тепло– и массообмен. – М.: Мир, 1983. – 400 с.
5. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях: Справочник / В.Н. Зубарев, А.Д. Козлов, В.М. Кузнецов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 232 с.
6. Защита атмосферы от промышленных загрязнений. Справочник в 2–х частях. Под ред. С. Калверта. – М.: Металлургия. – 1988. – 760 с.
7. Уваров В.А., Староверов С.В., Феоктистов А.Ю., Юдин А.И. Методики расчёта количества тепла в уходящих газах. Международный научно–исследовательский журнал. № 8(39). Сентябрь.Екатеринбург. 2015
8. Гусейнов Д. А.,Спектор Ш.Ш., Вайнер Л.З. Технологические расчеты процессов переработки нефти. М. Химия. 1964 г.– 305 с.
9. Годштик М.А., Штерн В.Н., ЯворскийН.И.. Вязкие течения с парадоксальными свойствами. – Новосибирск.: Наука, Сиб. Отд–ние, 1989. –336 с.
10.Пейре Р., Тейлор Т. Вычислительные методы в задачах механики жидкости. / Ленинград: Гидрометеоиздат, 1986. 352 с.
11.Абрамович Г.Н. Турбулентное смешение газовых струй / [Г.Н. Абрамович, С.Ю. Крашенников, А.Н. Секундов, И.П. Смирнова] –М. : Наука. Гл. ред. физ.–мат. лит–ры, 1974. – 272 с.

10.31653/smf39.2019.69-77

Кулік В.І.

National University «Odessa marine academy», Ukraine

ПІДВИЩЕННЯ ЦЕТАНОВОГО ЧИСЛА ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА ПРИ ДОМІШКАХ НАНОПОРОШКА ОКСИДА АЛЮМІНІЯ (AL_2O_3)

Abstract. The main trends in modern diesel engines are the increase in fuel efficiency and operational reliability of engines, as well as their environmental safety, mainly related to stringent emission requirements for exhaust gases.

The necessity of the world navy fleet in the non-existent amount of fuel is clarified, the forecast is made, which implies further increase of its consumption. The total capacity of marine engines in the world, and in the long-term perspective, until 2050, is determined. The number of emissions of harmful substances into the atmosphere by the ships of the world fleet is shown, international norms are regulated, which strictly regulate the number of these emissions, as well as the dynamics of the strengthening of norms for the present and for the future.

Certain types of technological emissions and the composition of harmful substances in the exhaust gases of marine engines have been identified. They make up 0.1 - 1.0% of total emissions, are in gaseous state and include carbon monoxide oxides, NOx nitrogen, SOx sulfur, and hydrocarbon CrNy. Emissions of nitrogen oxides (NOx) with off-gas from marine diesel engines account for about 14% of global NOx emissions from the combustion of all types of fossil hydrocarbon fuels

The analysis of methods of their purification is carried out.

An analysis of recent publications has been carried out

It is known that the quality of diesel fuel, its physical and chemical properties, affect the fuel economy and the content of harmful substances in the exhaust gases of the engine. The most common way to ensure the required properties of diesel fuel is the introduction of multifunctional impurities. The groups of impurities to diesel fuel are given. The influence of nano-metal impurity on Al2O3 fuel is analyzed. The analysis of diesel fuel with an admixture of aluminum oxide nanopowders (Al2O3) gamma-modification. It has been established that the additive to diesel fuel based on AL2O3 nanopowders is promising. It is expedient to carry out a complex of motor tests for introduction of an additive on the sea and river fleet

Keywords: world fleet, ship engines, environmental safety, energy efficiency, additives.

ПІДВИЩЕННЯ ЦЕТАНОВОГО ЧИСЛА ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА ПРИ ДОМІШКАХ НАНОПОРОШКА ОКСИДА АЛЮМІНІЯ (Al_2O_3)

Анотація. Базовими тенденціями сучасного дизелебудування залишаються підвищення паливної ефективності та експлуатаційної надійності двигунів, а також їх екологічна безпека, пов'язана головним чином з жорсткими вимогами по емісії випускних газов.

З'ясовано потребу світового морського флоту у необхыдній кількості палива, зроблено прогноз, який передбачає подальше збільшення обсягу його споживання. З'ясована сумарна потужність суднових двигунів в світі, і на віддалену перспективу, до 2050р. Показана кількість викидів шкідливих речовин у атмосферу судами світового флоту, наведені міжнародні норми, котрі строго регламентують кількість ціх викидів, а також динаміка посилення норм на сьогодення і на майбутнє. Визначені певні види технологічних викидів і склад шкідливих речовин у вихлопних газах суднових двигунів. Вони складають 0,1 – 1,0% загального об′єму викидів, знаходяться у газообразному стані та включають до себе окиси вуглецю CO_x, азоту NO_x, сірки SO_x, і вуглеводні C_xH_y. Проведен аналіз методів їх очищення.

Проведен аналіз останніх публі кацій

Відомо, що якість дизельного палива його фізичні і хімічні властивості, впливають на паливну економічність і вміст шкідливих речовин у відпрацьованих газах двигуна. Найбільш поширеним способом забезпечення необхідних властивостей дизельного палива є уведення багатофункціональних домішок. Наведено групи домішок до дизельного палива. Проаналізовано вплив нанометалевої домішки до палива Al_2O_3. Проведено аналіз дизельного палива з домішкою нанопорошку оксиду алюмінію (Al_2O_3) гамма- модифікації.

Ключові слова: світовий флот, суднові двигуни, екологічна безпека, енергоеффективность, домішки.

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ І ПОСТАНОВКА МЕТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У світовому масштабі викиди окислів азоту (NO_x) із суден оцінюються приблизно у 10 мільйонів тонн на рік, що еквівалентно 50 % усіх викидів NO_x на суші у США або 14 % від загального обсягу викидів NO_x усіх природних палив [1].

Морські джерела викидів мають значний вплив на якість повітря на суші, особливо поблизу найбільш завантажених прибережних водних шляхів.

На рис. 1 дано відсотковий розподіл видів речовин в відпрацьованих газах дизельного двигуна [2].

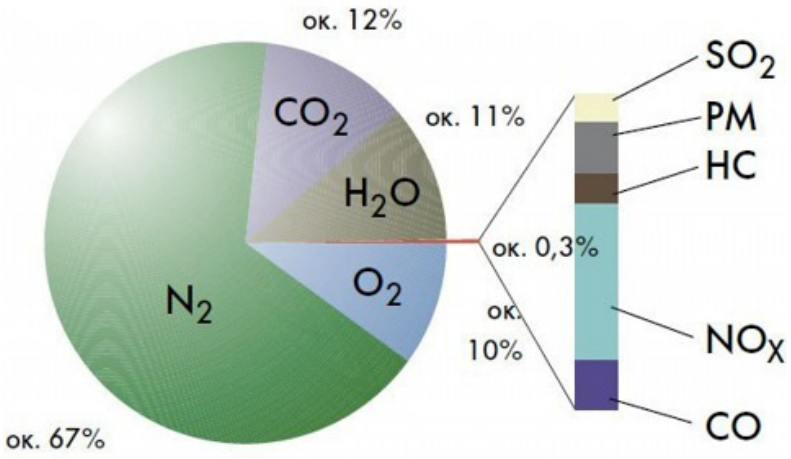


Рис. 1 – Типовий склад відпрацьованих газів суднового дизеля

У додатку VI до МАРПОЛ про забруднення повітря викиди NO_x обмежувалися до 1 січня 2016 року у обсязі 14,4 г/кВт·рік для малооборотних морських дизелів при випробуваннях. Зараз діє ще більша жорсткість вимог по викидах NO_x – 3,4 г/кВт·рік Рис.2 [3].

Відповідно до резолюції MEPC.203 (62) з 1 січня 2013 р. вступили у дію поправки про введення нових правил по енергоефективності суден.

Міжнародною Морською Організацією (IMO) уводиться поняття "конструктивного коефіцієнту енергоефективності" (ККЕ). Це поняття поширене на нові судна; судна які зазнали серйозного переобладнання; на нові або існуючі судна, які зазнали настільки серйозного переобладнання, що вважаються морською адміністрацією держави заново сконструйованими.

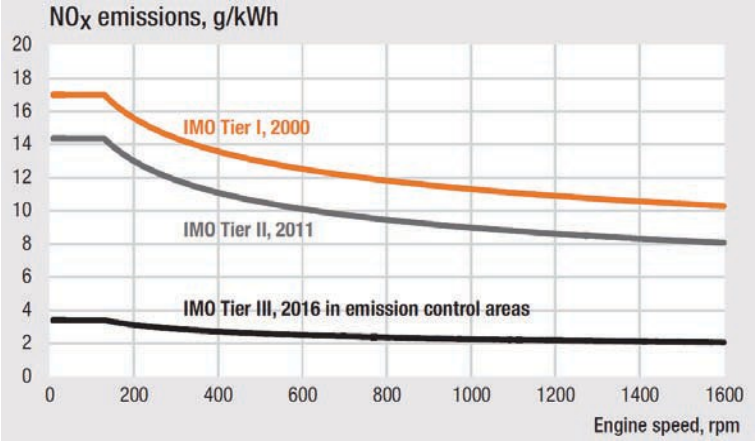


Рис.2 – зниження вмісту NO_x на оденицю потужності по роках

Резолюція вимагає виконати наступне: починаючи з 1 січня 2013 р при первинному огляді нового судна, який потрапив під вимоги глави 4 Додатка 6 до МАРПОЛ, для введення його в експлуатацію слід отримати Міжнародне свідоцтво енергоефективності судна на відповідність вимогам глави 3 Додатка 6 до МАРПОЛ. Один з етапів процесу огляду складається у перевірці стану енергоефективності судна у результаті застосування поліпшуючих заходів за звітний період часу експлуатації судна згідно MEPC.1 / Circ.684

Вищевикладене вказує на необхідність постійної роботи з поліпшення заходів, які б дозволили поліпшити енергоефективність судна [4].

Основною метою роботи є розробка методу підвищення енергоефективність судна, який укладається в поліпшенні якості дизельного палива.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Судна світового флоту є найбільшими споживачами вуглецевого палива, що видобувається з надр Землі. Річна потреба світового флоту в паливі, на думку фахівців, в найближчій перспективі може скласти близько 400млн. тонн в рік. При цьому сумарна потужність суднових двигунів прогнозується в діапазоні 468,9-502,2 мВт до 2020 року. Підвищення споживання вуглецевого палива неминуче супроводжується підвищенням викидів шкідливих речовин в атмосферу [7].

Введення для суден морського флоту серйозних екологічних обмежень при використанні різних сортів палива, установлених морськими кваліфікаційними товариствами, призвело до масштабного процесу розробок провідними дизелебудівними фірмами нових енергозберігаючих технологій. Передбачається їх використання як на знов споруджуваних суднах, так і при модернізації СЕУ суден, що знаходяться в експлуатації.

До таких заходів належать:

- використання систем очищення випускних газів, що дозволяють знизити кількість шкідливих викидів в атмосферу;
- застосування берегового живлення, при стоянці судна в порту;
- використання на ходовому режимі СЕУ валогенераторов або турбогенераторів працюючих від утілізаційних казанів;
- застосування в системах управління подачі палива і газорозподілу електронних компонентів;
- впровадження системи економхода «Slow Steam Mode»;
- використання системи стисненого повітря (MALS), що подається під корпус судна при його русі[5];
- використання домішок до дизельного палива з метою підвищення експлуатаційних показників двигунів;

Жорсткість вимог до експлуатаційних показників суднових енергетичних установок обумовлює необхідність підвищувати якість палива шляхом використання домішок не тільки в процесі виробництва палив, але і в процесі експлуатації дизелів. Саме тому тривають активні дослідження з розробки сучасних домішок до дизельного палива. Домішки для дизельного палива поділяються на такі групи:

- депрессорні-диспергуючі;
- депресорні;
- диспергатори парафінів;
- протизносні (змащувальні);
- цетанопівищюіщі (промотори запалення);
- активатори горіння;
- багатофункціональні;

До числа найбільш важливих відносяться цетанопідвищующі домішки або промотори запалення, вплив яких визначається цетановим числом, і активатори горіння.

Механізм дії цетаноповишюющіх домішок полягає в легкому гомолитичному розпаді їх молекул зі зв'язків O-O або O-N, в прискоренні предпламенной реакції, сприянні розгалуження окислювальних

ланцюгів і утворення нових реакційних центрів. Дані домішки діють тільки на початкових стадіях процесу горіння. В результаті збільшується здатність вуглеводнів до більш повного окислювання (згоряння) і реакція протікає в умовах, близьких до ідеальних [9]. На відміну від цетанопідвищуючих, домішки активатори (каталізатори) горіння сприяють виникненню сил вільного переходу, ослаблення міжмолекулярних зв'язків і спрощенню просторової структури вуглеводнів. Структура палива стає більш однорідною, з рівномірним просторовим розташуванням вуглеводнів у всьому займаному обсязі (рис.3) [6].

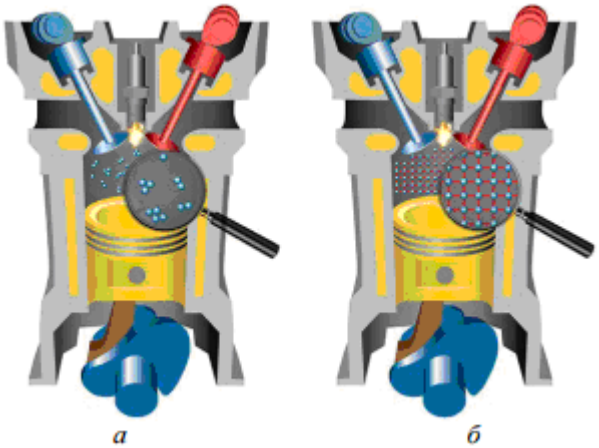


Рис.3 Вплив активатора горіння на структуру топливовоздушной суміші:

а-без активатора горіння; б-з активатором горіння

МЕТА РОБОТИ – розробка методу підвищення енергоефективністі судна, який укладається в поліпшенні якості дизельного палива за рахунок використання домішки нанопорошку оксиду алюмінію (Al_2O_3) гамма- модифікації, яка сприяє підвищенню цетанового числа та теплотворної здатності.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Завдання зниження викидів шкідливих речовин судновими двигунами може бути вирішено комплексом заходів, спрямованих на вдосконалення конструкції дизеля, системи технічного обслуговування та

ремонту дизелів, обліку умов експлуатації, підвищення якості дизельного палива і масла, застосування альтернативних видів палива, створення багатофункціональних домішок до дизельного палива.

На кафедрі ТЕФ проведені аналізи присадки до дизельного палива на основі нанопорошків оксиду алюмінію (Al_2O_3) і етанолу. Визначені порівняльні характеристики чистого дизельного палива і палива з домішкою нанопорошку оксиду алюмінію (Al_2O_3) гамма- модифікації, результати зведені в таблицю 1 та рис.4:

Таблиця №1

№п/п	Диз. пальне		№п/п	Диз. пальне здомішкою	
	% -перегонки	Т-ра - ^{0}C		% -перегонки	Т-ра - ^{0}C
1.	5	137,9	1.	5	112
2.	10	167,8	2.	5	154,6
3.	20	186,1	3.	10	182,6
4.	30	199,0	4.	20	205,6
5.	40	211,7	5.	30	217,9
6.	50	221,2	6.	40	230,8
7.	60	231,8	7.	50	242,3
8.	70	237,7	8.	50	242,6
9.	80	231,6	9.	60	255,6
10.	84	231,6	10.	70	267,8
11.			11.	80	276,4
12.			12.	88	286
13.			13.	89	283,5

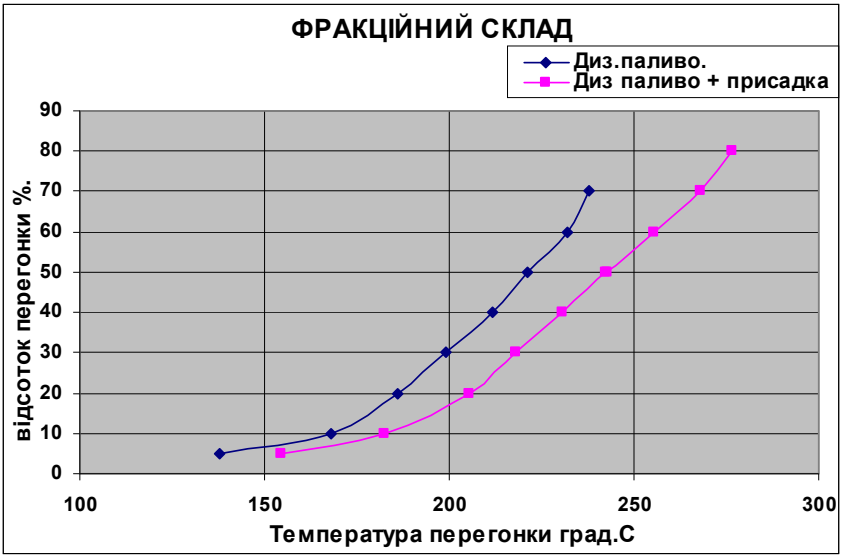


Рис.4 Фракційний склад

1. Фракційний склад: ДТ без домішки перегнано 84% при температурі 231,60С, з домішкою- 89% при температурі 283,50С.

За результатами проведених аналізів бачимо, що випробуване паливо не відповідає стандарту ДСТУ3868 – 99, але паливо з домішкою має кращі показники.

2. Цетанове число визначено розрахунковим методом відповідно до Держстандарту 27768-88.

Дізельное паливо без домішки має ЦЧ = 40 <45, що є неприпустимим.

Дизельне паливо з домішкою має ЦЧ = 45,7> 45, що є припустимим.

ВИСНОВКИ

Таким чином, в результаті даних досліджень встановлено, що домішка до дизельного палива на основі нанопорошків AL_2O_3 є перспективною. Для вровадження присадки на морському і річковому флоті доцільно проведення комплексу моторних випробувань, мета яких: - вибір оптимальних концентрацій присадки в залежності від ступеня форсування і номінальної частоти обертання колінчастого вала двигуна; - визначення впливу присадки на надійність елементів системи

подачі палива; - визначення складу відпрацьованих газів;- вибір оптимальних налаштувань і регулювань топливоподающей апаратури. Доцільним представляється також проведення експлуатаційних випробувань присадки на різних типах суднових дизелів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1.Riom E.,. NO(x) emission reduction with the humid air motor concept. CIMAC, Proceedings of the 23rd World Congress on Combustion Engine Technology for Ship Propulsion, Power Generation, Rail Traction. CIMAC, Hamburg / Riom E., Olsson L.O., Hagström U. 2001. P. 430–439.

2.Marine Engine IMO Tier III – MAN Diesei&Turbo, Germany, 2014 MARPOL Annex VI, MEPC.1/Circ.684. Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency operational indicator (EEOI), 17 August 2009

3.MARPOL Annex VI, MEPC.1/Circ.684. Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency operational indicator (EEOI), 17 August 2009

4. Голиков В.А., Модель расчёта конструктивной энергоэффективности морского судна на примере контейнеровоза / В.А. Голиков ., К.Л.Обертюр , В.А.Кирис. - УДК 656.61.052, ОНМА.

5. Половинка Э.М. Показатели єффективности судовіх єнергетических установок по колтчеству продуктов сгорания: Методическое пособие / Є.М. Половинка, И.Н.Табулинский - ОНМА: каф. СЭУ.- Одесса, 2014.-24 с.

6. УДК 621.43 Безюков, В. А.. Современные присадки к дизельному топливу / В.А. Безюков, . М.М. Жуков - Вестник АГТУ. 2016. №1(61)

7. Голубев М.В. Совершенствование процессов фильтрации и охлаждения отработавших выхлопных газов судовой дизельной установки: Дис. Канд. Техн. наук / М.В. Голубев; ОНМА. УДК 621.431.74+621.43.068.4Одесса, 2016. 158с.

8. Громов А.А. Г87 Горение нанопорошков металлов / А. А. Громов, Т.А.Хабас, А.П.Ильин - Томск. Дельтаплан, 2008. — 38с.

10.31653/smf39.2019.78-88

Савельева О.С., Малахова Д.О.
Одеський національний політехнічний університет

ЗАСТОСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У СУДНОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

Постановка проблеми

У більшості технологічних процесів, що використовують інформаційні технології для візуалізації поточних параметрів, мається на увазі представлення остаточного результату в найбільш зручному для користувача вигляді. У застосуванні до різних тепло- і масообмінних або гідродинамічних процесів, які зустрічаються на суднах можна констатувати, що поля температури, швидкості, тиску, завихореності, концентрації і т. п., які отримуються в кінцевому підсумку дуже часто характеризуються багатовимірними і великими за обсягами масивами чисельних даних. Всі методи, що використовуються для їх обробки вимагають наявність у користувача певних знань і дуже часто характеризуються слабкою інформативністю або завищеними вимогами до обчислювальної техніки.

Не дивлячись на існування цілого наукового напряму під назвою обчислювальна гідродинаміка (CFD - computational fluid dynamics) можна констатувати, що роботи, присвячені методам візуалізації отриманих розрахункових даних зустрічаються не часто. На основі аналізу сучасних досліджень в області візуалізації процесів з переміщенням тепла, газів або крапельних рідин можна констатувати відсутність надійного методу обробки даних. Відомі методи характеризуються відсутністю інформативності подачі кінцевих результатів і вимагають високі витрати з обчислювальної точки зору.

Особливий інтерес представляє собою використання інформаційних технологій в застосуванні до морських суден. Відображення контрольної інформації іноді безпосередньо визначає якість проведення різних вантажних або технологічних операцій. Практично на кожному судні з високим ступенем періодичності проводять роботи, що пов'язані з вентиляцією або мийкою різних робочих обсягів або вантажних трюмів, транспортуванні речовин по гнучких і жорстких трубопроводах і т.п. У більшості випадків всі ці процеси контролюються за допомогою засобів контрольно-вимірювальної апаратури, без використання сучасних методів візуалізації чисельних значень потокових даних.

Можна констатувати, що в застосуванні до багатьох робочих процесів на морських суднах до теперішнього часу інформаційні технології не застосовувалися. Рішення проблеми візуалізації чисельних даних, що відображають якість і швидкість робочого процесу, може привести до отримання найголовнішого результату - підвищенню прибутку від роботи судна.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Найбільш повний і якісний опис сучасного стану питання про візуалізацію процесів перенесення тепла і маси, що зустрічаються при роботі суден приведений в роботах [1-3], проте в них присутні деякі неточності. Наприклад, в якості методу візуалізації розрахункових даних наводиться метод предиктора-коректора, який за фактом може використовуватися тільки на стадії чисельної схеми рішення рівнянь переносу. Ця стадія відповідає отриманню тільки масиву вихідних розрахункових даних, а не його обробці з метою побудови картини візуалізації поля течії або перенесення тепла.

Практично у всіх наукових статтях і монографіях, що відносяться до візуалізації процесів перенесення тепла і маси використовується тільки два варіанти побудови графічних образів отриманих полів швидкості, тиску, ліній струму, завихореності і т. п. Їх вибір визначається тільки самими дослідниками при цьому самі методи не піддаються якісному аналізу або оцінці з точки зору інформаційних технологій.

У процесах перенесення теплоти і маси використовується досить обмежений набір первісних характеристик і параметрів, які їх описують. Відповідно до інформаційних оглядів, що представлені в роботах [1-4] Більшість параметрів описує:

- фізичні властивості речовини, так звані основні параметри стану, наприклад: щільність, питомий об'єм, температура, в'язкість, поверхневий натяг, пружність і т.п .;

- міру рівноважного стану речовини з точки зору термодинаміки або гідромеханіки, наприклад: тиск, температура, напруженість, швидкість перенесення речовини або енергії, ентальпія, ентропія.

В теорії одиниць виміру, що використовується для аналізу різних теплових і гідромеханічних процесів показано, що практично всі параметри властивостей і стану можуть бути записані за рахунок комбінації базових одиниць виміру [5-6]. При складанні критеріїв подоби до таких базових одиниць розмірності відносять: кілограм (кг), метр (м), градуси - температурний (^{0}C) і кутовий (град), секунду (сек).

Такий підхід до розгляду характерних параметрів потоку з направленим рухом з точки зору інформаційних технологій є не зручним. Основна причина цього недоліку полягає в тому, що при побудові характеристик потоків тепла або маси перераховані вище властивості складно піддаються інформаційному аналізу. У числових масивах вихідних даних вони неекономно витрачають виділені для програмних комплексів обсяги пам'яті і збільшують час їх процесорної обробки. З цієї причини замість набору числових масивів доцільним є використання аналітичних виразів або констант, що описують ці властивості. В архітектурі програмних комплексів такий підхід дозволяє ще на початковій стадії формувати необхідні інформаційні потоки і в подальшому їх використання буде виконуватися з найменшими витратами обчислювальної потужності.

Прикладом одного з таких виразів є видозмінене рівняння Менделєєва-Клайперона, яке дозволяє визначати щільність повітря з урахуванням вологості і температури

$$\mathbf{P_в R_в T + \psi P_{н.п} R_п T}. \qquad (1)$$

де ρ – щільність повітря, кг/м^3; $P_в$ – парціальний тиск сухого повітря, Па; $P_{н.п.}$ – парціальний тиск насиченої водяної пари, Па; ψ – відносна вологість, %; $R_в$ – газова постійна для сухого повітря, Дж/(кгК); $R_п$ – газова постійна для пари, Дж/(кгК); Т – температура, К.

Формулювання мети дослідження

Основна мета наукового дослідження полягає у формулюванні основних принципів використання інформаційних технологій на суднах із застосуванням методу візуалізації чисельних масивів даних при відображенні процесів руху різних потоків (теплових, аеро- або гідродинамічних) з виділенням і двовимірним графічним відображенням динаміки зміни головних визначальних параметрів.

Викладення основного матеріалу досліджень

Головним призначенням будь-якого методу візуалізації процесів перенесення тепла і маси є відображення специфічних особливостей рухомого потоку із наданням можливості проведення одночасної чисельної оцінки цих особливостей. В даний час існує два напрямки візуалізації течій - відображення експериментальних образів і побудова чисельних результатів рішення використаних рівнянь руху або даних від засобів вимірювання і контролю. Предметом виконаних досліджень був другий напрямок - інформаційна обробка потокових даних

і побудова допоміжної картини візуалізації за допомогою відповідного програмного забезпечення.

До параметрів розподілу основних властивостей рухомих газів і крапельних рідин можна з точки зору їх подальшої візуалізації віднести наступні:

1. Вектор швидкості. При візуалізації цей параметр потоку, що рухається відображають чотирма способами: спрямованими стрілками (масштаб довжини і просторова спрямованість визначається і будується відповідно до знаків і чисельними значеннями проекцій швидкості на відповідні віссі координат); колірним розподілом (градації і мірі інтенсивності кожного кольору присвоюється невеликий діапазон зміни значень швидкості, зазвичай: синій - мала швидкість, червоний - велика швидкість); монохромним світловим відтворенням (з градаціями сірого кольору); графічним відображенням даних у відповідній системі координат.

З цих чотирьох способів візуалізації швидкості для проведення кількісного аналізу має сенс тільки колірний розподіл і графічне відображення. На їх основі найчастіше робляться висновки про особливості руху потоку. Решта способів візуалізації швидкості дозволяють робити тільки якісні висновки про характерні особливості руху розглянутого потоку.

2. Тиск. При візуалізації цього параметра використовуються два способи, які аналогічні відображенню вектору швидкості. До них відносяться: колірне дво- або тривимірне розподілення ізоліній або ізоповерхонь, а також використовується графічне відображення.

Використання при візуалізації спрямованих стрілок в силу того, що тиск скалярна величина є безглуздим.

3. Функція струму. Вона являє собою лінію, до кожної точки якої вектор швидкості в даний момент часу спрямований по дотичній. У двовимірної площині відображення функції струму є однозначним, проте в разі тривимірного простору коректність відображення лінії струму в силу неоднозначності її визначення є спірною. Виходячи з рівняння запису просторової лінії струму у вигляді

$$\mathbf{dXVx+dYVy+dZVz=\varphi=const}, \qquad (2)$$

можливо стверджувати, що в разі тривимірного простору її відображення неможливо. З цієї причини можна сформулювати висновок, що в сучасній літературі і альтернативних джерелах інформації велика частина наукових результатів візуалізації потоків, що містить просто-

рові лінії струму, не відповідає реальним процесам. У більшості випадків така візуалізація відображає наукові гіпотези про характер руху просторового потоку і не може розглядатися як достовірний результат.

Для візуалізації двовимірних стаціонарних потоків, де числова база даних, що обробляється, являє собою набір скалярних функцій, лінії струму є одним з найбільш якісних варіантів відображення отриманих результатів. При візуалізації ліній струму побудову поля течії можливо зробити досить легко за допомогою наступного двомірного уявлення

$$\mathbf{VzdX\text{-}VxdZ=\varphi dXdZ=const,} \qquad (3)$$

де φ – числове значення функції току, $м^3/с$.

Значення функції струму φ є параметром, який легко порахувати. Ця величина являє собою величину витрат між двома сусідніми лініями струму.

Порівняння рівнянь (2) і (3) показує, що при візуалізації гідродинамічного потоку значення лінії струму не враховують додаткові складові поля швидкості в одному з поперечних напрямків. Ця невідповідність є недоліком. Він може не враховуватися тільки в одному випадку - коли інформаційна технологія використовується для візуалізації результатів просторово-симетричного потоку. Прикладом таких потоків є: рух потоку всередині труб з незмінною формою поперечного перерізу; рух одиночного струменя, сферичний тепловий потік від точкового джерела і т.п.

Для безпосередньої програмної реалізації рівняння (3) пропонується використовувати в різницевому поданні такого вигляду

$$\mathbf{Vzxi+1\text{-}xi\text{-}Vxzi+1\text{-}zixi+1\text{-}xi}, \qquad (4)$$

Якщо в інформаційно-програмному комплексі для візуалізації потоку використовується рівномірна сітка з ідентичним кроком по довжині то рівняння (4) спрощується до

$$\mathbf{Vzxi+1\text{-}xi\text{-}Vxxi+1\text{-}xi} \qquad (5)$$

Після знаходження чисельних значень функції струму φ її можна відобразити з використанням різних методів статистичної обробки вибірки ідентичних значень з заданою межею похибки.

4. Завихореність. Практично всі потоки містять вихори, а ступінь інтенсивності їх обертання оцінюється поняттям завихореності.

Розподіл завихореності в області рухомого потоку можна візуалізувати за допомогою набору вихорових ліній, кожна з яких буде відповідати певному числовому значенню завихореності. У кожній точці вихорової лінії повинно виконуватися умова колінеарності орту дотичної і вектору складової "вихорової" швидкості.

5. Температура. При візуалізації цього параметра використовуються два способи, які є аналогічними відображенню величини тиску. Це - кольоровий розподіл і графічне відображення. Дуже часто при графічному відображенні значення температури прив'язують до зміни будь-яких комплексних характеристик потоку. Ці характеристики, сформульовані у вигляді критеріальних залежностей, відображають співвідношення між основними силами, які формують конкретну картину руху теплового потоку. Найчастіше до таких сил відносять силу інерції, ваги, тиску, поверхневого натягу. Комплексними характеристиками потоку зазвичай є число Рейнольдса, Пекле, Струхаля, Вебера, Фруда і т. д.

6. Концентрація речовини в рухомому багатофазовому потоці. При візуалізації цього параметра використовуються три способи, які аналогічні відображенню вектора швидкості. До них відносяться: кольоровий розподіл, монохромне світлове відображення і графічні образи.

Найчастіше розподіл концентрації за обсягом, який обмежений жорсткими поверхнями візуалізують за допомогою двох або тривимірних графічних образів.

Комбінація і комплексна обробка сформульованих шести параметрів при використанні інформаційних технологій в конкретних суднових технологічних процесах дозволяє під час візуалізації отримати і якісно відобразити всю необхідну інформацію. В даний час подібна обробка інформаційних даних в програмному забезпеченні суден відсутня.

Наступним етапом візуалізації суднових технологічних процесів є конкретна локалізація даних в області потоку, що моделюється. Залежно від виду розглянутого процесу (теплового, гідродинамічного, їх комбінації і т. п.) при візуалізації результатів іноді виникає необхідність використання різних координатних систем. В інформаційних технологіях для характеристики розташування або локалізації конкретного результату можуть використовуватися прямокутна, циліндрична і сферична координатні системи. Перехід між ними легко здійснити за

допомогою коефіцієнтів Ляме. У ряді випадків при візуалізації використовуються криволінійні координатні системи та такі, що самоадаптуються, однак їх використання є дуже специфічним і не завжди відповідає реальним змінам потоку, що відображається.

В даний час всі методи візуалізації спрямовані на побудову картини течії при обробці експериментальних зображень і при моделюванні за рахунок використання багатовимірної хмари даних, що одержується при вирішенні диференціальних рівнянь відповідних математичних моделей.

Для поліпшення існуючих методів візуалізації потоків з метою подальшого використання в судновому програмному забезпеченні була сформульована наукова гіпотеза: при візуалізації необхідно використовувати не специфічні характеристики або параметри потоку тепла або маси в поточний момент часу, а їх математичне подання у вигляді набору операторів векторної алгебри. До таких алгебраїчних операторам відносяться: градієнт скалярного поля (змінність); дивергенція (розбіжність), скалярний диференційний оператор поля вектора; ротор (вихор), векторний диференційний оператор векторного поля. В цьому випадку під час проведення інформаційної обробки можливо використовувати чисельні значення характеристик потоку як в поточний, так і в попередні моменти часу і таким чином при візуалізації відображати з високою якістю тенденцію їх зміни. До теперішнього часу в програмному забезпеченні суднових технологічних процесів такий підхід при візуалізації потоків тепла і маси не використовувався.

Застосування операторів векторної алгебри до побудови картини візуалізації будь-якого гідродинамічного потоку буде виконувати найголовнішу функцію - показувати локальну зміну характеристик з можливістю проведення кількісного аналізу. Такий аналіз можливо проводити вже по не тільки по всій області потоку тепла або маси, що відображається, але і в конкретних локально виділених ділянках потоку. У цьому випадку можливо зробити повне об'єднання інформаційних технологій з термодинамікою або гідро-аеромеханікою і вирішити головне питання візуалізації - створення стаціонарного образу, який відображає динаміку зміни основних особливостей потоку. До таких особливостей можна віднести: виникнення зон підвищеної турбулентності; освіту і подальше існування застійних областей в напівзамкнених або кутових зонах тривимірних просторів трюмів і танків

судна; виділення областей із стійкими великомасштабними вихровими зонами; виникнення хвильових або періодично повторюваних течій, характерних областей температурної стратифікації, зміну локальних областей концентрації вибухо- або пожежонебезпечних газоподібних продуктів в замкнутих обсягах трюмів і т. і.

Практичне значення запропонованого підходу до вирішення проблеми створення наукових основ для методу візуалізації технологічних процесів на суднах добре демонструється на прикладі руху двофазного потоку грунту і води при русі уздовж всмоктувальної ділянки суднового ґрунтопроводу. Таке завдання виникає при роботі суден днопоглиблювального флоту і фактично відображає продуктивність роботи судна за обсягом видобутого грунту. В першу чергу продуктивність залежить від відстані між шаром грунту, що видобувається і грунтозабірним механізмом. Чим воно більше, тим менше концентрація грунту в видобутій пульпі і нижче показники прибутку від роботи судна.

Технологія видобутку грунту за рахунок розрядження, що створюється судновим насосом, не дозволяє змінювати витрату пульпи і води за малий період часу. Фактично оператор, який керує грунтозабірним пристроєм і процесом підйому двофазного потоку води і грунту на борт судна контролює робочі характеристики процесу тільки за одним показником - поточною продуктивністю грунтового насоса. Цей чисельний параметр не є інформативним оскільки він не відображає скільки води і скільки грунту перекачується в одиницю часу і не дозволяє робити якісні висновки про швидкість заповнення грунтом (без води) трюму судна.

Вирішення цієї проблеми, тобто підвищення якості процесу забору грунту при інших рівних умовах можна отримати якщо при візуалізації робочого процесу буде використовуватися зміна градієнта концентрації грунту в пульпі в часі. В цьому випадку при розробці програмного забезпечення необхідно передбачити виведення на монітор оператора графіка, який показаний на малюнку 1. Ця крива є динамічним відображенням робочого процесу і повинна будуватися безпосередньо в ході роботи судна. На наведеному графіку вісь ординат відповідає градієнту концентрації грунту в пульпі, що одержується *C, %*, а вісь абсцис поточному часу роботи судна *t, хв*.

Як видно на графіку використання запропонованого підходу має високу інформативність оскільки в будь-який поточний момент часу оператор може прийняти правильне рішення про якість проведеного

процесу видобутку грунту. Судно працює ефективно тільки при виконанні умови про незмінність або позитивне зростання величини градієнта концентрації. На графіку цій умові відповідають усі значення, які знаходяться вище віссі абсцис. Зростання кривої свідчить про підвищення якості робочого процесу в цілому і про скорочення часу видобутку необхідного обсягу грунту.

У разі, коли величина градієнта приймає негативні значення (на малюнку 1 вони відповідають пунктирній лінії) оператор бачить, що судно не виконує свої функції і в цьому випадку необхідно змінити умови положення грунтозабірного пристрою по відношенню до рівня дна, або змінити зону роботи самого судна.

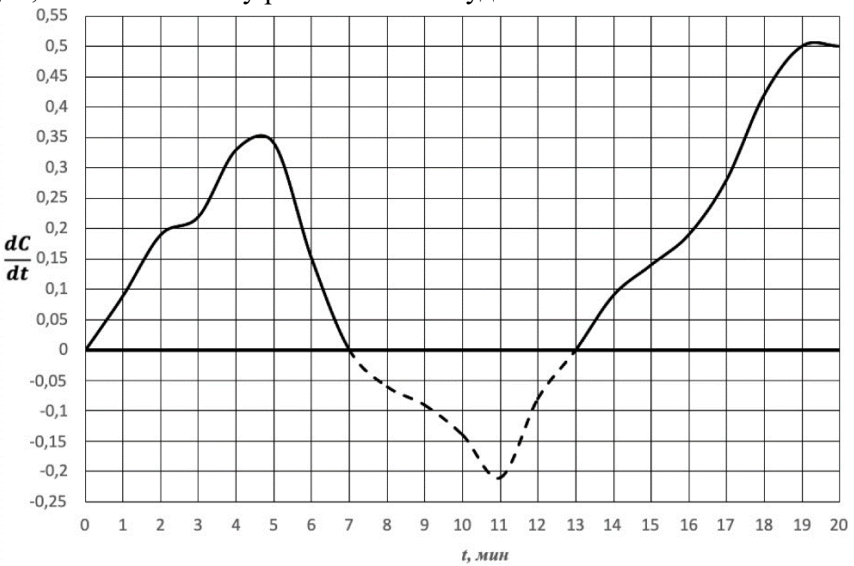


Рисунок 1. Візуалізація якості процесу видобування грунту під водою

У застосуванні до розглянутого робочому процесу на суднах дноглиблювального флоту до теперішнього часу інформаційні технології не застосовувалися. Можна констатувати, що використання запропонованої візуалізації чисельних даних для відображення поточних параметрів процесу роботи судна призведе до отримання найголовнішого результату - підвищенню рентабельності за рахунок скорочення часу робочого процесу і витрат палива на його проведення.

Висновки

1. У сучасній літературі і альтернативних джерелах інформації велика частина наукових результатів візуалізації потоків, що містить просторові лінії струму, не відповідає реальним процесам. У більшості випадків така візуалізація відображає наукові гіпотези про характер руху просторового потоку і не може розглядатися як достовірний результат.

2. При візуалізації необхідно використовувати не специфічні характеристики або параметри потоку тепла або маси в поточний момент часу, а їх математичне подання у вигляді набору операторів векторної алгебри - градієнта скаляра, дивергенції і ротора векторів. В цьому випадку під час проведення інформаційної обробки можливо використовувати чисельні значення характеристик потоку як в поточний, так і в попередні моменти часу і таким чином при візуалізації відображати з високою якістю тенденцію їх зміни.

3. Рішення проблеми підвищення якості процесу забору грунту при роботі суден днопоглиблювального флоту можливо отримати якщо використовувати візуалізацію зміни градієнта концентрації грунту в пульпі у часі. Така візуалізація поточних параметрів процесу роботи судна призведе до отримання найголовнішого результату - підвищенню рентабельності за рахунок скорочення часу робочого процесу і витрат палива на його проведення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Знаменская И.А., Коротеева Е.Ю., Глазырин Ф.Н. Методы цифрового анализа изображений жидких и газоплазменных потоков на основе кросс–корреляционной обработки Научная визуализация, 2018, Т. 10, № 4, с. 111 – 119.
2. Знаменская И.А., Гвоздева Л.Г., Знаменский Н.В. Методы визуализации в механике газа. – М.: МГАИ им. С. Орджоникизде. 2001. – 57 с.
3. Бондарев А.Е., Галактионов В.А., Чечеткин В.М. Анализ развития концепций и методов визуального представления данных в задачах вычислительной физики. Журнал вычислительной математики и математической физики, 2011, Т. 51, N 4, С. 669–683.
4. А.Е. Бондарев. Анализ многомерных данных в задачах вычислительной газовой динамики. Научная визуализация, 2014. Кв. 4. Т. 6, № 5. С. 61-68.

5. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. Изд–во Наука. Гл. ред. физ. – мат. лит–ры. М. 1965. 386 с.
6. Башта Т. М., С. С. Руднев. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. Учебник для машиностроительных вузов. – М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.

10.31653/smf39.2019.89-95

Kaluga O.O., Kozminuh M.A.
National University “Odessa maritime academy

ANALYSIS OF CONSTRUCTION FEATURES OF GASFUELED VESSEL’S STORAGE TANKS

The choice of the type of LNG storage tank is one of the main issues in the design of gas-fueled vessels. The main types of LNG storage tanks, that are currently used, design of tanks, their characteristics and features were considered. The analysis of the possibility of using these types of tanks, depending on the size of the vessels, the duration of their voyage and navigation areas were performed. Based on the analysis, recommendations for use of certain type of LNG storage tanks were suggested.

Keywords: international convention MARPOL 73/78, liquefied natural gas (LNG), LNG storage tanks, independent tanks, boil - off gas (BOG)

АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТАНКІВ ЗАПАСУ СПГ НА СУДАХ ГАЗОХОДАХ

Вибір типу танків запасу ЗПГ є одним з головних питань при проектуванні суден-газоходів. Розглянуто основні типи танків запасу ЗПГ, що застосовуються в даний час, конструкція танків, їх характеристики і особливості. Проведено аналіз можливості використання даних типів танків в залежності від розміру суден, тривалості їх рейсу і районів плавання. Запропоновано рекомендації по використанню танків, ґрунтуючись на проведеному аналізі.

Ключові слова : міжнародна конвенція МАРПОЛ 73/78, зріджений природний газ (ЗПГ), танки запасу ЗПГ, незалежні танки запасу, природньо випарений газ (ПВГ).

According to requirements of international convention MARPOL Annex VI, there is systematic toughening of requirements to the content of nitrogen oxides, sulfur oxides and firm particles in exhaust gases of sea vessels. Such requirements are the main driving force for introduction of use of natural gas as ship fuel. Natural gas allows to exclude sulfur emission almost completely, to reduce significantly emission of nitrogen oxides and carbon and firm particles that improves ecological situation in coastal water areas and on internal waterways.

Except ecological, economic aspects are also very important in this case. Switch-over to gas fuel on vessels provides drop of operating expenses, due to the low cost of gas, smaller costs of maintenance and repair. [1]

According to the latest available data, by the end of 2019 the number of gas-fueled vessels will reach about 200 units in the world, and consumption of LNG as fuel in ship propulsion stations will reach 1 million tons and will promptly grow to value of 8.5 Tons by 2025 [2]

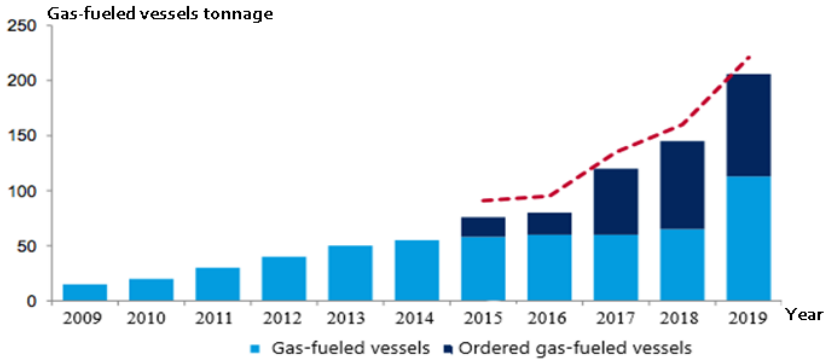


Fig. 1 Bar chart of growth rate of gas-fueled vessels in the world.

Though use of LNG as fuel in ship propulsion stations has advantages, there are also deficiencies. LNG is stored at temperature of -160 °C and pressure to 10 Bars in tanks from the special materials covered with layer of heat insulation more than 0.5 m thickness, they require the organization of secondary barrier, special measures for control of gas composition of the atmosphere and ventilation. So, storage tanks of LNG require in 3-4 times more ship space, than regular fuel tanks. Therefore, the available cargo space becomes one of the main issues for discussion. Increasing duration of the planned sail causes the necessity of increasing the volume of LNG storage tanks [2]. Therefore, one of main objectives when projecting vessels – to optimize the size of storage tanks depending on available cargo space [3].

Today there are several possible ways of installation of LNG storage tanks on gas-fueled transport vessels [3]. Use of such tanks, as independent tanks type A,B C and membrane tanks are permissible according to requirements of IMO. [4].

Each type of tank can be described in such parameters as:

- Maximum operating pressure,

- Tank configuration,
- The material used in design of tank [4]

Membrane tanks are not self-supported, consists of the thin membrane laid on isolation. Isolation is located on bottom of the vessel, so tank's pressure is directly transferred to ship hull structures. The hull in this case is the basic supporting component of such tanks. The membrane of tank so designed, that thermal and other types of expansion or compression are compensated without its excessive tension [4]. Design pressure of vapors in membrane tanks usually does not exceed 25 kPa. Nevertheless, pressure of vapors can reach up to 70 kPa. The main material used at production of membrane tanks is the invar – alloy of nickel and iron and chromium-nickel steel. For increase in safety membrane tanks must be surrounded by a secondary barrier. It is reached by installation of additional membrane in insulation layer. [4]

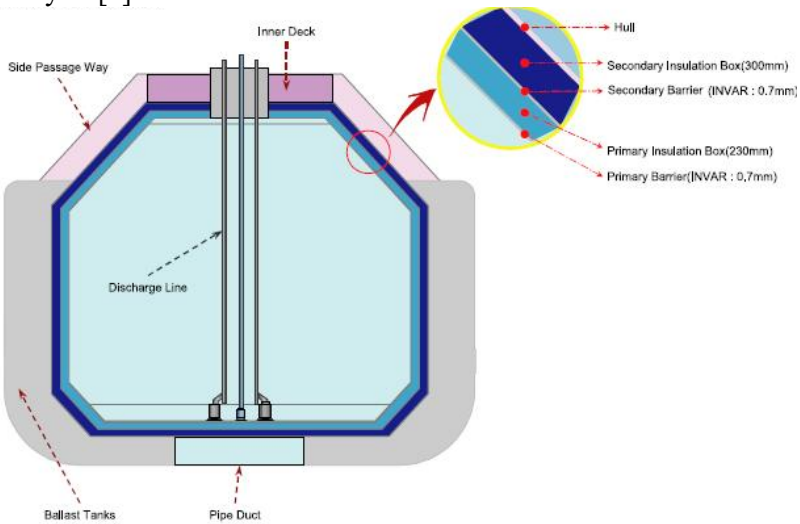


Fig. 2 Construction of membrane tank.

The independent tanks – self-supported. These tanks are not component of hull and do not involved in ensuring overall hull strength. Such tanks fasten to hull only through special supports, which allow them to contract and extend irrespective of ship's hull

Independent tanks can be divided into three groups.

Independent tanks type A - are tanks primarily designed using classical ship-structural analysis procedures in accordance with the requirements of

the Administration.[6] Represent a hermetic shell made of steel or aluminum, which is most fully uses the useful volume of the hull. [4] To provide the necessary stability and reduce the influence of the free surface, the tank is divided by a longitudinal bulkhead into two parts, which are interconnected by a number of holes in the tank dome, i.e. in the gas part. The tank is mounted above the second bottom on special brackets made of solid wood, and is held by these brackets in vertical and horizontal directions. The estimated vapor pressure P should be no more than 70 kPa. [6] For such tanks as well as for membrane tanks, a full secondary barrier is required.

Independent tanks type B are tanks designed using model tests, refined analytical tools and analysis methods to determine stress levels, fatigue life and crack propagation characteristics. In assessing and analyzing the strength of the material from which tank is made, its wear resistance and fragility in the process of aging of the metal is used more stringent criteria. Thus, a type B tank may be the same as type A, but must be inspected as safer than the first. The material usually used is steel with a 9% nickel content, or aluminum. The designed vapor pressure P must not exceed 70kPa. A partial secondary barrier with little leakage protection is required. [6] Thus, a slight leakage of cargo, gradually increasing after its appearance, will lead to the destruction of the tank after about a year, if the vessel is in the North Sea during the storm season. Due to this margin of safety, a continuous secondary barrier is not required, but a small secondary barrier is placed under each tank to detect leaks and collect gas. Today, most popular type B tanks are Kvaerner – Moss technology tanks, but there are also on market IHI SPB independent tanks.

The design basis for type C independent tanks is based on pressure vessel criteria modified to include fracture mechanics and crack propagation criteria. The minimum design pressure is intended to ensure that the dynamic stress is sufficiently low so that an initial surface flaw will not propagate more than half the thickness of the shell during the lifetime of the tank. [6] The secondary barrier around these tanks is not performed. Tanks are made in the form of a single or double cylinder and attached to the hull of the vessel with the help of special pillows made of solid wood. On one of the pillows the tank is fixed rigidly, while the others allow it to contract and expand freely. [4]

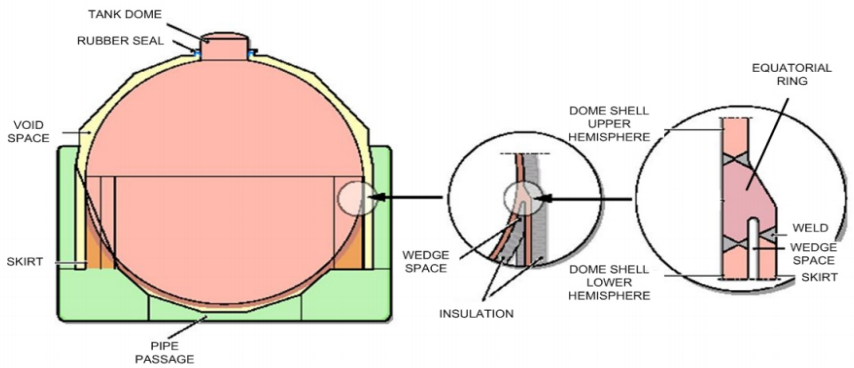


Fig. 3 Construction of independent tank of Kvaerner-Moss technology.

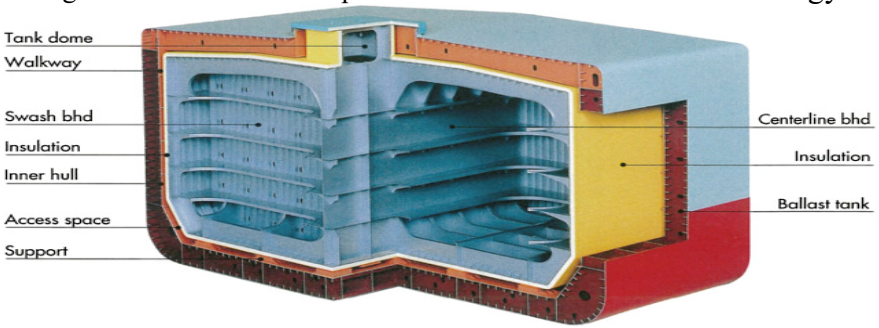


Fig. 4 Construction of IHI SPB independent tank.

Today, the main questions in choosing the type of LNG storage tanks for gas-fueled vessel are the effective use of the useful space of the transport vessel and the utilization of the BOG, which inevitably results from the use of LNG as fuel on sea vessels.

From the point of view of the effective use of the ship's space, spherical tanks type B and cylindrical tanks type C are least attractive. It is enough to compare the contour of the cross section of the vessel with spherical tanks and the contour with prismatic tanks.[7] A more suitable option is prismatic tanks, which better fit into the hull space, but they are give way to membrane tanks, which use a light and thin membrane supported by the vessel's hull.

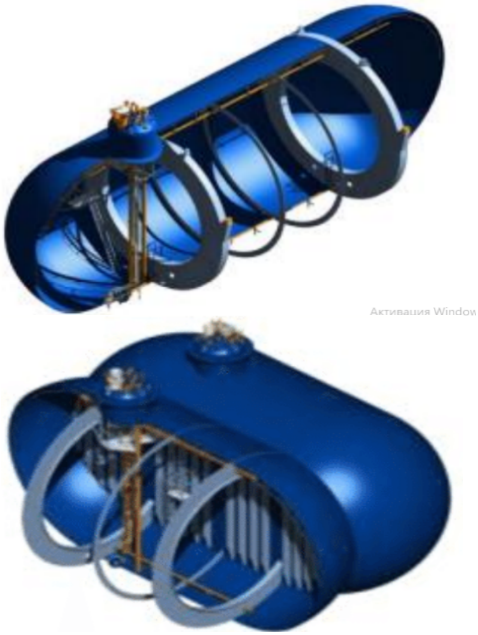


Fig. 5 Construction of independent tank type C.

From the point of view of utilization of BOG, membrane tanks are also the most suitable alternative. Manufacturers of cargo systems say that the average daily evaporation rate is 0.15% for spherical tanks Kvaerner-MOSS and 0.13% for membrane tanks Gas Transport and Technigas Mark III, which are most often used on modern ships. [5]

According to the latest data, it is known that the French campaign GTT announced the delivery of the Mark V cargo system, which guarantees that the daily evaporation rate will be no more than 0.07% of the volume of the tank. In addition, the South Korean shipbuilder DSME announced a developed Solidus membrane type cargo system, which guarantees a daily evaporation rate of 0.049%.

From the above we can conclude that when installing type C tanks, much more space is occupied in comparison with other types of tanks, however this option remains the most attractive from the point of view of saving funds that need to be spent on recycling BOG from more compact membrane tanks.

For example, in a cylindrical tank of type C with a volume of 200 m3 with a working pressure of 0.6 bar to 4 bar and elastic polyurethane foam

as insulation 200mm thick — the maximum allowed pressure of the tank will be reached in about 25 days. [3]

Thus, for ships with a small deadweight - the best choice is to install type C tanks, which are in the presence of different volumes with a maximum allowable working pressure of up to 10 bar. [3] They are most attractive for use on ships with a low consumption of gas fuel, or to those that often call at ports where bunkering is possible. Type C tanks are already used on many ferries and offshore vessels. [3]

However, for large vessels it is advisable to use membrane tanks because the installation of such tanks are more advantageous from the point of view of the optimal use of useful space.

For example, 9 container vessels of CMA CGM company will be built at Chinese shipyards with a capacity of 22,000 containers. It is reported that these vessels will sail between Europe and the Far East with bunkering in Europe. It is planned that the capacity of storage tanks will reach 18,600 m3. The capacity of such storage tanks can be compared with the cargo capacity of a small gas carrier. Thus, it is obvious that in this case is advisable to use only membrane-type tanks.

REFERENCES

1.И. И. Костылев, Д. В. Коняев. Бункеровка как фактор сдерживания применения газового топлива на судах //Вестник ГУМРФ. – 2016.

2.Jo Ann Cantu. Training and competence of personnel for gas fuelled ships and bunkering. // 8th Gasfuelled ships conference. – 2017. – p. 125

3.Herve Irvoas. LNG containment systems – retrofitting options. // 8th Gasfuelled ships conference. – 2017. – p. 135

4.Баскаков С.П. Перевозка сжиженных газов морем. – 2002

5.Чепалис И.В. Козьминых Н.А. Влияние экономических и экологических факторов на выбор пропульсивного комплекса современного метановоза//Конф.: "Энергетика судна: эксплуатация и ремонт", 2015

6.International Code of Safety for Ships Using Gases or other Low-Flash-point Fuels (IGF Code)

Зайцев В.В., Коробанов Ю.Н. Суда – газовозы. - Л.: «Судостроение»,1990.-304с.

10.31653/smf39.2019.96-100

Kiris A.V., Garagulya B.A.
National University «Odessa Maritime Academy»

CALCULATION OF SHIPS ATTRACTION FORCE POWER AT THEIR APPROACH

Problem statement. There are cases of ships accidents with significant damage to the hulls when they follow parallel courses at a relatively small distance from each other. For example, the collision of the passenger ship "Olympic" with the cruiser "Hawk" (1921), "Queen Mary" with the cruiser "Curacao" (1942). The reason of such accidents is usually explained by the attraction forces of "suction" arising from the approach of the ships (in accordance with the Bernoulli equation [1,2]), that is doubtful taking into account the serious damage to the hulls.

Analysis of research and publications. There is a limited number of studies [1, 2] on the hydrodynamic interaction of ships, which state that when ships follow parallel courses at sufficient speed, an accident can occur due to the fact that one of them will be brought in the direction of the other. The reason for this is explained by an increase in the dynamic pressure (proportional to the square of the speed), respectively, by a decrease in the static pressure in the onboard ship.

Purpose of the research study is to analyse the causes and calculate the attraction force of the ships when they approach.

Presentation of the main research material. The vessels have a certain draft and, therefore, the onboard channel has a depth depending on the draft of a smaller vessel (Fig. 1, 2).

Water constrained by the sides will move faster sn a narrowing onboard canal. The Bernoulli equation for two points 1 at the entrance to the onboard ship channel and 2 at the narrowest part of the channel lying on its axis for an incompressible fluid without taking into account energy losses can be written as:

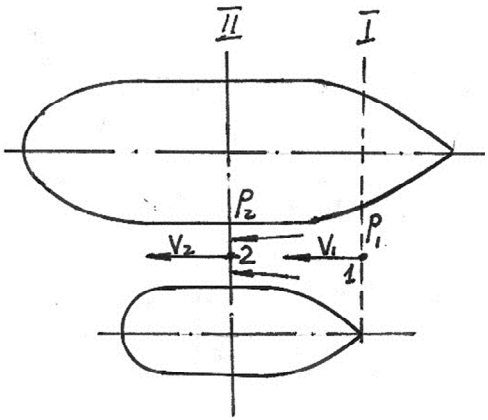


Fig. 1

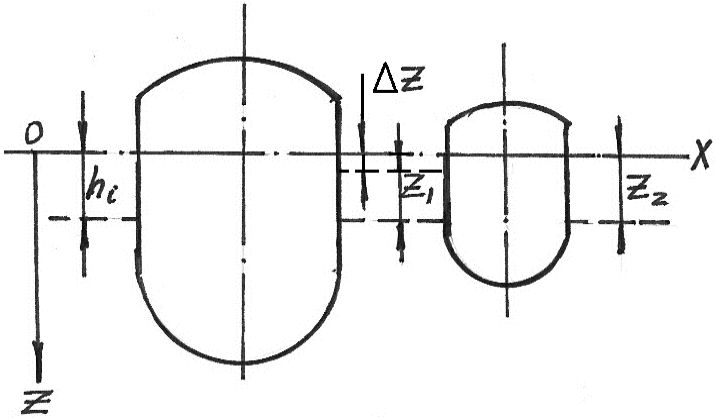


Fig. 2

$$\Delta z + \frac{p_1 - p_2}{\rho g} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}, \qquad (1)$$

where $\Delta z = z_1 - z_2$ – level difference from the external and internal sides of the vessels in the channel;

$\Delta z + \dfrac{p_1 - p_2}{\rho g}$ – hydrostatic pressure;

v_1 – onboard water inlet speed;

v_2 – water velocity in the narrowest section of the channel;

$\frac{v_2^2}{2g}$ – hydrodynamic pressure.

According to the authors of [1,2], the hydrostatic pressure will be unchanged in any horizontal plane and, therefore the water level (Δz) becomes less in the section where the speed is greater. The level difference of the external and internal sides of the vessels causes their approach.

A smaller (overtaking) vessel with a displacement of 8000 tons and a length of 130 m hase a draft of 7.5 m and that the depth of the on-board channel is (taking into account the contours of the ship's hull, as, for example, for naval vessels) - 4 m. In this case, the length of the narrowest part can be considered the inter-ship channel equal to 50 m (where the water level decreases (Fig. 2). The average water level between the vessels in this case decreased by 40 cm. This leads to a difference in hydrostatic pressures from the external and internal sides of the vessels $\Delta p = p_1 - p_2$, that is, to the appearance of a lateral force, shifting the vessel - ΔP. The hydrostatic pressure from the surface of the water to a depth of 0.4 m varies linearly from zero on the surface to a value equal to $p_2 = \rho g h = 3920$ Pa at a depth of 0.4 m. Let us take the average value of this pressure $p_{\text{mid}} = 2/3 p_2 = 2610$ Pa. For square $S = 50 \times 0{,}4 = 20$ m^2, on which this pressure acts, the lateral force will be $\Delta P = p_{\text{mid}} \cdot S = 52200$ N (≈ 53 t).

The obtained value of the force raises doubt on its significant influence on the reason for the attraction of ships and significant destruction of the hulls. For example, the modern tugboat "Myrjan 1" (year of construction 2018), the company "Retro-Rabigh", designed to moor tankers of the VLCC type, develops a towing force of a maximum of 80 tons, the effect of which is even in the worst case (weather conditions, inattention of crews and etc.) does not damage the side of the vessel.

Therefore, it is more reasonable to take into account the flow force effect of the flow of an ideal compressible fluid on the flow around an arbitrary body due to the uneven distribution of hydrodynamic pressure, for which it is advisable to take into account the formation of velocity circulation [3]). The general theory of lifting force of N. E. Zhukovsky, based on the occurrence of attached vortices or fluid circulation, is applicable here

[3,4]. The theorem of N.E. Zhukovsky on the lifting force of a wing is the main theorem of gas dynamics [3]: when a plane-flow stream of an ideal compressible fluid flows around a body, the lifting force acts on the body P_y, equal to the product of the velocity Γ circulation and the leakage rate V_∞ и на плотность ρ_∞:

$$P_y = \rho_\infty \Gamma V_\infty, \tag{2}$$

The closed loop speed circulation is equal to the product of the circumference of the radius *r* and the leakage rate V_∞ [4]:

$$\Gamma = 2\pi r V_\infty, \tag{3}$$

where *r* – radius of an arbitrary circular contour in the physical plane, covering the profile (Fig. 3).

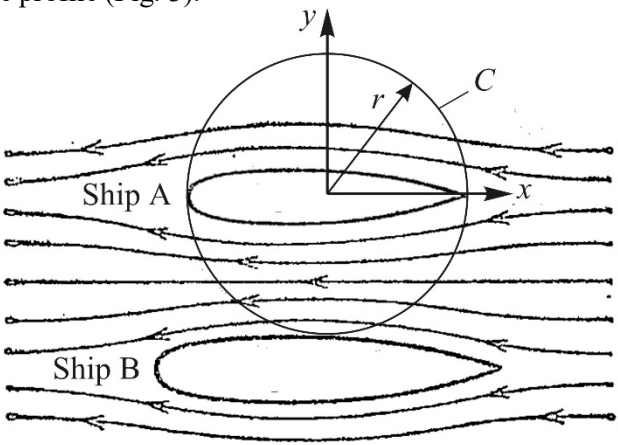


Fig. 3

In the case of flow around not single, but a group of adjacent bodies (profile lattice), a fictitious average velocity is introduced

$$V_\infty = \frac{1}{2}\left(V_1 + V_2\right), \tag{4}$$

where V_1 – velocity at the entrance to the profile grid,
V_2 – output speed.

Here you can take for V_1 – overtaking speed V_2 – speed in the inter-ship channel and apply the theorem of N. E. Zhukovsky for the case of vessels moving in parallel courses with their approach.

Perform a speed calculation V_2 in the onboard canal according to the Bernoulli equation (1), assuming that $\Delta z = 4\ \text{m}$, and the speed of a smaller overtaking vessel $V_1 = 10\ \text{mps}\ (\approx 20\ \text{knots})$. Value obtained V_2 equally 10,4 mps. In this case V_∞ will be 10.2 mps. Using (2) and (3) and taking the value of r in (3) as the radius of a circle covering the length of a smaller vessel ($r = 50\ \text{m}$) determine the values Γ and P_y. As a result of the calculations, we obtain the value of the shear force causing the attraction of the vessels $P_y = 32670 \cdot 10^3\ \text{N}\ (33300\ \text{t})$, which is 625 times the same force obtained using the Bernoulli equation.

Conclusion

The phenomenon of mutual attraction of ships following parallel courses is usually theorized using the Bernoulli equation. This equation is not entirely applicable to fluid flow with a free surface. In this case, the physical reason for the ships attraction is explained by the action of the shear force (as a result of the speed circulation occurrence) during the critical ships approach. The calculation of the magnitude of this force, performed on the basis of the theorem of N.E. Zhukovsky on the lifting force, made it possible to explain the serious damage to the hulls of the vessels during their attraction.

REFERENCES

1. Кингсеп А., Локшин Г., Ольхов О. Курс общей физики, Т1. – М: Наука, 2017. – 157 с.
2. Земляковский Д. К. Теоретические основы безопасности плавания судов. – М.: Транспорт, 1973. – 204 с.
3. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1970. – 904 с.
4. Альтшуль А. Д. и др. Гидравлика и аэродинамика. – М.: Стройиздат, 1987. – 414 с.

10.31653/smf39.2019.101-106

Kozytskyi S.V., Kiriian S.V.
National University "Odessa Maritime Academy"

EFFECTIVENESS OF NANODISPERSED SUBSTANCES UTILIZATION IN SHIP'S MECHANISMS

Introduction

The history of civilization is inseparably associated with the development of high-quality materials technology [1]. Modern materials science, aimed at the production of the materials with special properties, is connected with the fundamental and applied science of nanotechnology which studies the laws of physical and chemical nano-sized systems. Almost all nanosystems are obtained under the conditions far from equilibrium. It allows achieving spontaneous nucleation, and to avoid growth and aggregation of the formed nanoparticles.

Studies have shown that nano-based materials have new and sometimes unusual properties [2]. It is known that for conventional materials the greater the strength of the material the less its ductility. In nanomaterials, a new paradox [3] of strength and ductility (a simultaneous increase in strength and ductility) has been discovered. In addition, nanomaterials have a higher fracture toughness and substantial wear resistance. The physical nature of the new phenomenon is connected with the change of micromechanisms of deformation, when, along with the motion of lattice dislocations at the boundary of formed nanograins, grain-boundary glide occurs [4].

Additives to operating media are widely used in mechanism's systems. In particular, the reliability of friction units is determined in many respect with the presence of antiwear and boundary additives in lube oils. The transition from micron- to nano-sized additives is being widely implemented in technology at present. In this paper, we have analyzed the effectiveness of the utilization of nanodispersed substances and their compounds in order to increase the service life of the ship's equipment.

The effectiveness of nanoparticles

The surface area of a conventional macroscopic physical body is small in comparison with its volume. All physical properties of the body are determined by the properties of the bulk sample, although numerous studies have established that surface properties of solid body differ greatly from volumetric ones. Thus, the properties of the body of 1÷2 nm in diameter – when almost all atoms are located at the surface – will be absolutely unique.

In order to explain the effectiveness of the nanoparticles action, we will estimate the change in the surface energy during the fragmentation of micron-sized particles into nano-sized ones. Considering only spherical particles and unchanged volume at the fragmentation of a micro-sized particle into N nanoparticles, a relationship between the size R of the initial particle and the size of the formed nanoparticles r will be of a form:

$$\frac{4}{3}\pi R^3 = N\frac{4}{3}\pi r^3 . \tag{1}$$

As it follows from (1), the ratio between the radii:

$$r = N^{-\frac{1}{3}} R . \tag{2}$$

Since the surface energy is proportional to the surface, the ratio of obtained surface energy to initial surface energy gives:

$$\frac{W_r}{W_R} = \frac{N\sigma r^2}{\sigma R^2} = N\left(\frac{r}{R}\right)^2 \tag{3}$$

and, considering (2), we have:

$$\frac{W_r}{W_R} = N \cdot N^{-\frac{2}{3}} = N^{\frac{1}{3}} = \frac{R}{r} . \tag{4}$$

Hence, when micron-sized additives are replaced with nano-sized ones, the surface energy increases hundreds of times: the surface area of one gram of particles with a size of 10÷15 nm measures 100÷200 m^2 depending on the material of the nanoparticle. Since the use of antiwear and boundary additives is determined by surface energy, it is obvious how nano-additives utilization benefits [5−8]. The activity of a substance in a solid state increases sharply during dispersion due to the growth of surface energy and the rate of physicochemical interaction with the surroundings. The rate of such interaction is always proportional to the area of a surface. The smaller the structure of the substance, the faster it dissolves, or the faster the solid-state reactions proceed.

The diffusion coefficient, corresponding to the formation of cladding layers which are formed by nano-sized particles on the surfaces of the friction pair, is described by the dependence [9]:

$$D \sim \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \tag{5}$$

where E_a is the diffusion activation energy.

For nanomaterials, the activation energy increases due to the growth of the surface energy and contact area between the nanoparticles and the material of friction pairs. Higher values of the diffusion coefficient correspond to a substantial non-equilibrium of the processes resulting in the self-organization [4] of the cladding layers on the surfaces of friction pairs.

Utilization of nanomaterials

Among the nanomaterials, which are used in the industrial application and may significantly increase the service life of ship's equipment, are nanodispersed powders of metals and their oxides.

The product of nanotechnology research for surface coating and lubrication, called NanoVit, has been recently developed in Germany. This product is a mixture of the lube oil (conventional or base oil) and stable agglomerate of aluminum dioxide (10%), modified silicon dioxide (80%) and plasma processed graphite (10%). The ball-shaped particle aperture is 14 nm; the specific surface of the product is extremely developed and accounts for 155 m^2/g.

The following processes occur in contact of interacting surfaces with lube oil which contains NanoVit [10]:

- it is suggested that oil molecules fix onto the inner surface of the theoretically predicted synthetic polymer SiO_2 units; during operation, this "SiO_2 gel" sediments onto the friction surfaces building "oil-bearing chains" which turn dynamic friction into rolling friction;
- graphite enhances additional lubrication and together with SiO_2 forms a two-dimensional sliding layer; and
- aluminum-oxygen bonds break resulting in the formation of surface cladding layers due to the displacement of iron atoms by aluminum ones. The ductility and strength of these layers are very high as created oxides and carbides of aluminum and iron significantly enhance wear resistance.

As it is observed from Fig. 1, utilization of NanoVit results in the cleaning of interacting surfaces from combustion deposits followed by the formation of firmly adhering wear protective layers.

It should be noted that the increased amount of lube oil (in a form of "gel" with SiO_2) on the surfaces of friction pairs enhances the lubrication and eases the cold start.

Ukrainian company XADO recently developed and patented a unique "building" material called revitalisant [11] that converts the excessive energy to form a tribo-coat when introduced into the contact area. The

a b

Fig. 1. Cleaning and restoration of piston head surface with NanoVit utilization (80.000 km).

revitalisant is a gel which consists of a high-molecular lubricating medium containing a very active carboxyl group COOH and a mixture of oxides Al_2O_3, SiO_2, Fe_2O_3 and their hydrates, or Al_2O_3, MgO and Fe_2O_3 or their hydrates with an average dispersion of 100 nm. Nanoparticles have a shape close to spherical; they act as rolling elements in a friction zone and at the same time they harden the surfaces.

Fig. 2. Stages of revitalization – formation of anti-wear tribo-coats on the interacting surfaces in the friction zone.

The mechanism of tribo-coat formation utilizing revitalisant is depicted in Fig.2.

The process of revitalization, during which antiwear tribo-coats are formed on the surfaces of the friction unit, is based on the physicochemical interaction between tribological surfaces in the presence of revitalisant at the boundary or mixed lubrication. As a result, a metal-ceramic coating is formed on the surfaces of the friction pair. The peculiarity of this process consists in the simultaneous strengthening and growth of the coating. The revitalization phenomenon makes it possible to turn the wear process in the opposite direction and restore the worn surfaces (Fig. 3).

Revitalization begins in the region of the maximum wear characterized by the amount of excess energy sufficient to initiate a new process; and metal atoms have the maximum number of uncompensated bonds.

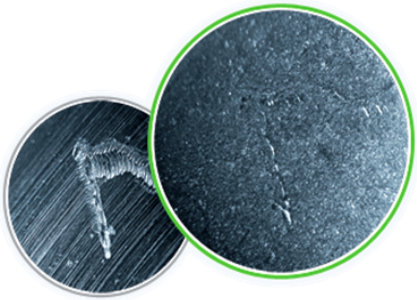


Fig. 3. A real defected surface of the sliding bearing before and after revitalization.

These bonds, acting like magnets, trap and confine the building material – revitalisant – precisely in the wearing zone. When the load is applied, energy activator directs excess energy to the construction of a new crystal lattice. Thus, a new coating is formed on the basis of an old one.

Within 15 minutes of starting revitalization, defect disappears (Fig.3), and perfectly smoothed protective metal-ceramic patch is formed [11].

It should be especially emphasized that all presented substances are nanodimensional, and at this scale, their characteristics and chemistry are totally different from their rough opposites. For example, micron-scale high-silica sand, crystalline corundum, and crystalline graphite are abrasives, presence of which in the friction zone requires the installation of filters. In turn, the same substances exhibit unique anti-wear and anti-friction properties when their nano-sized particles are used as tribo-coat “building” material.

Conclusions

A significant increase in surface energy of nanoparticles compared to micron-sized ones has been analyzed. Utilization of widely used nanomaterials such as nanodispersed powders of metals and their oxides has been presented. It has been demonstrated that metallic nanodispersed substances and their compounds, under the load in the friction area, form ultrastrong and ductile antiwear and antifriction adhesive coatings with excellent tribotechical characteristics.

REFERENCES

1. Valiulis A. A history of materials and technologies development / A. Valiulis. – Technika, 2014. – 444 p.
2. Mukhopadhyay S.M. Nanoscale multifunctional materials: science and applications / S.M. Mukhopadhyay. – Wiley, 2012. – 416 p.
3. Ovid'ko I.A., Vailev R.Z., Zhu Y.T. Review on superior strength and enhanced ductility of metallic nanomaterials. Progress in Materials Science. 94 (2018). P. 462–540.
4. Kozytskyi S.V. and Bacherikov Yu.Yu. Research on physical properties of zink sulfide obtained by self-propagating high-temperature synthesis / S.V. Kozytskyi, Yu.Yu. Bacherikov. – Odesa: Astroprint, 2016. – 272 p. [in Ukrainian].
5. MKA Ali, Xianjun H., Mai L., Qingping C., Turkson R.F., Bicheng C. Improving the tribological characteristics of piston ring assembly in automotive engines using Al_2O_3 and TiO_2 nanomaterials as nano-lubricant additives. Tribology International. 103 (2016). P 540–554.
6. Zak Z., Fleischer N., Zarbuv M., Drangai L., Genut M. Nanomaterials for gear lubrication solutions. Gear solutions. December (2009). P. 30–36.
7. Hwang Y., Lee C., Choi Y., Cheong S., Kim D., Lee K., Lee J., Kim S. H. Effect of the size and morphology of particles dispersed in nano-oil on friction performance between rotating discs. Journal of Mechanical Science and Technology. 25.11 (2011). P. 2853–2857.
8. Ettefaghi E., Ahmadi H., Rashildi A., Mohtasebi S. Investigation of the anti-wear properties of nano additives on sliding bearings of internal combustion engines. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 14 (2013). P. 805–809.
9. Kozytskyi S.V., Zolotko A.N. Molecular physics: textbook. – Odesa:Astroprint, 2011. – 352 p. [in Ukrainian].
10. NanoVit – General Presentation: Surface functionalism concerning nanotribological wear protection, http://www.nanovit.co.uk /linked/tribopresentation.pdf, [accessed 4 March 2019].
11. Visual demonstration of Revitalization process, http://revitalizant.com/, [accessed 4 March 2019].

10.31653/smf39.2019.107-114

Lebediev B.
National university Odessa martimne academy
Lebedieva E., Dmytrieva S., Krolkova M.
Odessa National Polytechnic University

MODIFICATION OF EXOTHERMIC COMPOSITIONS IN ORDER TO INCREASE THEIR HEAT POWER

An opportunity is proposed to increase the competitiveness of Ukrainian shipbuilding due to the introduction of new welding technology with non-volatile means. An example of calculating the power and geometric parameters of a welding rod is given.

Keywords: ship repair, welding, non-volatile welding tool, power

Unfortunately, the state of shipyards in Ukraine and ship repair in general raises significant concern.

Over the past two decades, Ukraine has been losing more and more both in the commercial and technical efficiency of repair work, not only to such "respected" competitors as Poland and Greece, but also to its closest neighbour - Russia. Moreover, the nearest one is not only geographically, but also in terms of starting capabilities.

The crisis in Ukraine deepening, while the Russian shipyards during the "zero"years quite successfully overcame the crisis caused by the collapse of the unitary economy of the USSR, successfully introducing advanced technologies and building new business schemes.

It is clear that to overcome the systemic crisis of Ukrainian ship repair requires a systematic and focused work in many areas: technical, technological, economic, etc.

One of the components of this approach can and should be the introduction of new technologies in the field of ship repair.

The purpose of this article is to propose a new technology in the field of welding, metal cutting, applying special layers on its surface - protective, antifriction, abrasion resistant, etc.

In 2001 a method and a number of devices were proposed that represent welding technology based on oxidative exchange reactions - similar to termite ones, which have a number of advantages over the latter both in the energy efficiency of the process and in the quality of the resulting compound.

The proposed method - the use of welding and cutting non-volatile rods, sticks and other devices, along with the indisputable advantages - thermochemical welding and cutting rods, being "quasi-electrodes" do not require any welding equipment and any external energy sources, can work in hard-to-reach places, in the air and under water, their use does not require high qualifications and special training of personnel, labor protection requirements for protective clothes and other means of protection is significantly lower than with conventional welding; it also has a number of drawbacks, the most important of which is the discreteness of the process — it is impossible to extinguish the ignited device “properly”, and it is not possible to re-ignite. Other disadvantages include insufficient specific thermal power, both emitted by an exothermic rod or other device, or received by a heated metal.

In the work [2] it was shown that the necessary thermal power of a point heat source can be determined by the formula:

$$Q_{\text{т}} = 0.51 \cdot \sqrt[4]{\frac{g \cdot \beta \cdot \lambda_a^{\,4} \cdot \left(t_{\text{ps}} - t_{at}\right)}{a \cdot \nu \cdot l}} \cdot E_r \cdot F_{ar} \cdot \left(t_{\text{ps}} - t_{\text{at}}\right) + \\ + F_{\text{ps}} \cdot \frac{\sigma_0 \left(T_1^4 - T_2^4\right)}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1} + \\ + \frac{D \cdot L \cdot h \cdot \rho}{\tau_{wt}} \cdot \left[\left(T_{\text{melt}} - T_{пл}\right) \cdot C + \Delta H\right] \qquad (1)$$

α - heat transfer coefficient, which can be expressed:

$$\alpha = 0.51 \cdot \sqrt[4]{\frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot \left(t_{\text{mp}} - t_{at}\right)}{a \cdot \nu}} \frac{\cdot \lambda_в}{l} = \\ = 0.51 \cdot \sqrt[4]{\frac{g \cdot \beta \cdot \lambda_в^{\,4} \cdot \left(t_{\text{mp}} - t_{at}\right)}{a \cdot \nu \cdot l}}$$

Where: g - acceleration of gravity [m / s^2];

β - is the coefficient of volume expansion [1 / K].

D - is the diameter of the termite rod,

L - is the length of the fillet weld,

h - is the penetration depth of the main metal,

ρ - is the density of the base metal,
τ - is the welding time,
T_{melt} - is the melting temperature of the base metal,
T_{mp} - - melting point of filler metal,
C – is the heat capacity of the base metal,
ΔH - is the heat of fusion of the base metal.
ε_1 и ε_2 – degree of blackness of heat exchange surfaces;
T_1 и T_2 - are the absolute temperatures of the heat exchange surfaces;
t_0 – is the optical layer thickness
F_{ar} –is the total heat transfer area of the heated plate;
t_{ps} – temperature on the plate surface;
t_{at} – - ambient temperature;
ν - kinematic coefficient of viscosity of the environment [m^2 / s]
a – coefficient of thermal diffusivity of the environment [m^2 / s].
λ - coefficient of thermal conductivity of the plate material [W / m·K].

The next research step was the calculation of the specific thermal power released by various mixtures during exothermic reactions.

Any chemical reaction proceeds with the breaking of bonds between atoms and with the formation of new bonds.

Obviously, heat will be released if the broken bonds are weak and the newly formed bonds are stronger.

The strongest bonds are bonds between atoms of elements of opposite properties, that is, typical metals with typical non-metals, for example, fluorine or oxygen. When non-metals are interconnected, low-strength bonds are formed most often.

Another method for producing high-energy exothermic reactions is the reaction of displacing low-active metals from their oxides with more active metals. These reactions are known as termite.

Based on technological requirements, the chemical composition of the fuel mixture should provide the following:

1. The necessary thermal power for welding products of a certain thickness.

2. The necessary chemical composition of the filler metal to ensure a durable weld.

3. The necessary chemical composition of the slag, providing a crystallization temperature of the slag below the crystallization temperature of the filler metal, so that the liquid slag is displaced from the crystallizing metal during cooling. In any case, the slag should contain a component with a low

crystallization temperature, which will remove solid slag from the crystallizing metal.

As you can see, the undoubted advantages of thermite welding are its low cost, efficiency and independence from external energy sources. However, for such welding, a termite quasi-electrode is required, that is, a termite rod that would work like an electrode but would not consume external energy.

To a large extent, termite rods in which boron is used as a reducing agent correspond to these requirements. The thermite mixture is less energetic, but boron gives fusible slags, therefore, crystallization of the metal occurs before crystallization of the slag. Liquid slag is displaced from the crystallizing metal, as a result of which the seam becomes clean and durable. To increase the penetration depth, mainly copper termite is used, the crystallization temperature of the termite metal - copper is about 500 ° C lower than the crystallization temperature of iron. The process from pure welding shifts towards welding-soldering, which makes it possible to connect parts with a thickness of 6-7 mm.

With all the advantages of these termite rods, there are some disadvantages. Boron is expensive; it is about 50 times more expensive than aluminum. Although it is not needed very much, for the termite reaction to occur - 9-10% of the composition of the mixture, against 25% aluminum, but this amount also significantly increases the cost of production.

When using such rods for welding, the main question is how to give the most energy to thermite compounds, taking into account special conditions of metal heating.

There is a method of modifying termite compositions by adding components that are easily ignited, and when such mixtures are ignited, an exothermic reaction occurs, resulting in products in the form of molten metals forming solder or filler welding metal, as well as various slags of various viscosities and different melting points.

However, when implementing such a modification method, it is difficult to make a welding rod or paste, in addition, such modification methods give a relatively low specific heat of reaction.

In the present work, an attempt is made to develop methods for modifying termite compositions, which make it possible to obtain an amount of metal released that is sufficient to form a weld without the excess mass of a given metal and which allow one to obtain an increased specific thermal power. The specified problem can be solved by calculating correctly the

mass of the standard termite component and by adding it to the specified one.

$$m_м = \frac{(N - K_{1m} \cdot m_m)}{K_{2m}}, \quad (2)$$

where:

m_m - is the mass of the modifier (kg).

N - is the required thermal power for welding a given metal thickness (kW);

K_{1t}- is the thermal power coefficient of the termite component, (kJ / kg);

K_{2t} - modifier thermal power coefficient (kJ / kg);

m_t - is the mass of the termite component (kg).

As practice has shown, a colloidal solution of a solid finely dispersed oxidizing agent with a liquid organic substance or with a mixture of liquid organic substances, when the density of the oxidizing agent and liquid organic substances is approximately equal to ± 5%, can be used to prevent gravitational separation of the colloidal solution. The viscosity of liquid organic matter or mixtures of these substances should be in balance with the effect of gravitational forces and prevents the mentioned fractionation.

A suspension or colloidal solution of a liquid oxidizing agent, solid oxidizing agent with an organic substance, or with a mixture of organic substances can also be used as a modifier. Moreover, the density conditions should be the same as in the first case.

If the densities differ more than indicated, then math expressions are proposed to calculate the mass fraction of a less viscous organic substance in a mixture with a more viscous substance mixed to obtain the necessary viscosity:

$$\eta = 44645 D_1^2 (\rho_o - \rho_l) \quad , \quad (3)$$

D_1 - is the diameter of the dispersed particle of a solid oxidizer (m);

ρ_0 - is the density of the oxidizing agent (kg / m3);

ρ_l - fluid density (kg / m3);

$$m_2 = \frac{\eta_1 - \eta_3}{\eta_3 - \eta_2} \quad , \quad (4)$$

where η is the dynamic viscosity (Pa * s);

m_2 ~ mass fraction of less viscous liquid;

η_1 - is the viscosity of a more viscous fluid (Pa*s);

η_2 - is the viscosity of a less viscous fluid (Pa*s);

η_3 - is the viscosity that must be obtained by mixing the first two liquids (Pa*s).

Using the obtained dependences, exothermic mixtures with additives were calculated to increase power on the basis of reductive-oxidative mixtures.

Thus, a mixture was made for the production of a solder-welding rod for brazing and welding of steel - Steel 20 with a thickness of 4 mm and brazing based on copper alloy. The efficiency of the rod is about 0.7. The required power for welding is 8 kW. Welding speed - 4 mm / s. The burning rate is 7 mm / s. The mass of the termite component (CuO-$CaSi_2$) calculated in the expression (2) m_t is 1.31 g / s. Thermal power - 5.5 kJ / s, Lack of power - ΔN = 8-5.5 = 2.5 kJ / s. Here, silica-calcium $CaSi_2$ is selected as fuel, which is several times cheaper than boron or aluminum. In addition, this component is a raw material for the metallurgical industry, it is produced in large quantities and it is not scarce.

As a thermal modifier, a mixture (KNO_3 + $CaSi_2$) is used. The specific thermal power of the modifier is approximately 10 kJ / g. The mass of the modifier to obtain 2.5 kJ / s will be 0.25 g.

The mass of the modified thermite mixture is 1.31 + 0.25 = 1.56 g.

Based on these requirements, taking into account the data given in [4], [5], the heat of combustion of the compositions emitting various filler metals was calculated.

With the above welding parameters, the diameter of the welding rod will be:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot Q \cdot \varsigma}{\pi \cdot v_{св} \cdot q_{уд}}}, \qquad (5)$$

where

Q – is the power required for welding,

$v_{св}$ - welding speed m / s,

$q_{уд}$ - specific thermal power W,

ς - COP .

For slightly different conditions, namely for overlap braze-welding of Steel J24056 (analog of steel «Сталь 38ХМЮА») and a sheet thickness of 4 mm, we have:

Braze-welding is carried out with brazing alloy based on a copper alloy. COP 0.7, Welding speed is 4 mm / s. Burning rate is 7 mm / s. The required power for soldering-welding is 16 kW.

The cross-sectional area of the fillet weld is δ2 / 2 or 0.4.0.4 / 2 = 0.08 cm^2.

The mass of the termite component ($CuO-CaSi_2$) according to math expression (1):

m_t = 0.4388 g / s;

0.08 is the cross-sectional area of the fillet weld cm^2;

0.4 - welding speed cm / s;

8.9 - copper density g / cm^3;

0.65 - is the proportion of copper released from the termite composition;

thermal power - 1.84 kJ / s;

ΔN = 8-1.84 = 6.14 kJ / s.

As a modifier, we use a mixture ($KClO_4$ + $CaSi_2$). The reaction proceeds with the release of chlorine, which cleans the surface. The specific thermal power of such a mixture is about 10 kJ / g. The required mass modifier 0.614 g.

The final composition of the mixture:

0,438 g (Cu + $CaSi_2$) + 0,614 g ($KClO_4$+$CaSi_2$)

Total 1,052 g

or

(Cu + $CaSi_2$) -41.63%, ($KClO_4$ + $CaSi_2$) - 58.36%.

The diameter of the rod (pencil) d = - 0.94 cm or about 10 mm.

Conclusions:

1. Some aspects related to the European integration of Ukraine are outlined. The difficulties of real tasks, the difficulties of their implementation are shown. One of the options for the new ship repair technology is proposed, which is capable, according to the authors, to facilitate the integration of the repair industry of Ukraine into the European economic system.

2. On the example of copper and mixtures created on its basis, an example of calculating the technological power and geometric dimensions of new non-volatile soldering and welding tools is shown.

LIST OF USED LITERATURE.

1. Gridnev [Electronic resource]. - The mode is free. - Access code: http://gridnev.biz/technics_14.html
2. Международная организация ISO [Electronic resource]. - The mode is free. - Access code: http://metrologu.ru/info/standartizacia/wr-standartizacia/mezhdunarodnaa-organizacia-iso.html
3. NTERNATIONAL CENTER FOR QUALITY CERTIFICATION Национальные стандарты в странах Европейского Союза [Electronic resource]. - The mode is free. - Access code: http://www.icqc.eu/ru/standards.php
4. INTERNATIONAL CENTER FOR QUALITY CERTIFICATION Процесс получения маркировки CE, особенности сертификации продукции в Европейском Союзе, правила сертификации продукции [Electronic resource]. - The mode is free. - Access code: http://www.icqc.eu/ru/certification-eu.php
5. СПРАВОЧНИК ПО ЦВЕТНЫМ МЕТАЛЛАМ [Electronic resource]. - The mode is free. - Access code: http://lib-metal.ru/cu/cu%20mark%202.htm

10.31653/smf39.2019.115-128

Polovinka E.M., Tabulinskiy I.N.
National University «Odessa Maritime Academy»

MODELING OF FUEL INJECTION PROCESSES OF RT-FLEX ENGINES ACCUMULATOR COMMON RAIL FUEL INJECTION SYSTEM

The summary: the article presents hydrodynamic processes modeling results of RT-flex engines common rail fuel injection accumulator system.

The analysis of the structural elements of the system is given; their functions and their combined action algorithm are considered.

A mathematical model of fuel injection processes has been developed and their computer model created. The calculation procedure has been worked out; the example of calculation has been completed. The analysis of processes in the main elements and sections of the system has been performed.

Keywords: process of injection, common rail system, modeling.

Statement of the problem.

The current stage of development of marine diesel engineering is characterized by fundamentally new solutions in the organization of fuel injection. The transition to computer control was carried out with the organization of the accumulator principle of fuel injection (RT-Flex engines) or the use of hydraulic drive for high pressure fuel pumps (ME type MAN&BW diesel engines).

Both options provide free assignment of the main fuel injection parameters: pressure and injection phases. As a result, it became possible to ensure high efficiency and comply with environmental standards that require a sharp reduction in the emission of harmful substances with exhaust gases.

The information on the hydrodynamic processes in the new injection systems is very limited and does not meet the needs of the practice of operating modern marine diesel engines.

The development of tools for modeling injection processes in the mentioned fuel injection systems is relevant for the development of the theory and practice of engine building, as well as ensuring the efficient operation of marine power plants.

Analysis of basic research and publications. Diesel fuel injection systems are a basic component, which operation determines all engine performance.

Researches in the field of working processes of fuel injection systems have been and continue to be one of the most important areas in the theory and practice of engine building.

Along with experimental research methods, a theoretical base has been created that provides not only a reduction in the time and cost of obtaining results, but also information in some cases not available in experiments.

One of the most advanced is the method of fuel injection calculation developed by Professor Yu. Ya. Fomin [2,3,4]. Based on the fundamental provisions of mathematical physics, it allows to take into account all the essential properties of the working fluid and structural elements of the fuel system. Fuel is treated as viscous, compressible fluid, which allows to take into account the wave phenomena and the hydraulic resistance in the system. The telegraph equation is solved by numerical methods and boundary conditions are set in accordance with all design data of fuel equipment.

However, the development of Yu.Ya. Fomin does not cover modern solutions in the field of injection systems for marine diesel engines and their application requires the creation of specific applications.

Work in the field of research on modern accumulator systems began in the international community of specialists simultaneously with the advent of such systems in diesel engineering.

The authors [1] created an animation model of the CR system as a training tool with simulator functions. However, the task of studying the fuel injection processes was not solved at the same time.

Selection of the unsolved parts of general problem.

Previously completed developments in the field of modeling of diesel engines common rail fuel injection system do not provide a fully detailed description of hydrodynamic processes. Further development of common rail modeling aids is relevant, and its results provide the development of the theory and practice of engine building.

The purpose of the article.

The purpose of the research described in the article is the development of mathematical and calculation models of fuel supply by the CR accumulator system, the implementation of initial calculations, the analysis of hydrodynamic processes in the system elements according to the simulation results.

Presentation of the basic material.

At the ship power plants department of NU <OMA> the research of accumulator fuel injection systems (common rail) operational characteristics of RT-Flex engines is conducted. One of the directions of this work is

the creation of fuel injection models and the computational study of fuel injection processes. The results of the research are presented in this article.

The functional diagram of the accumulator fuel injection system AFIS (CR – common rail) for RT-flex engines [1] is shown in Fig. 1. It includes elements directly related to the injection process.

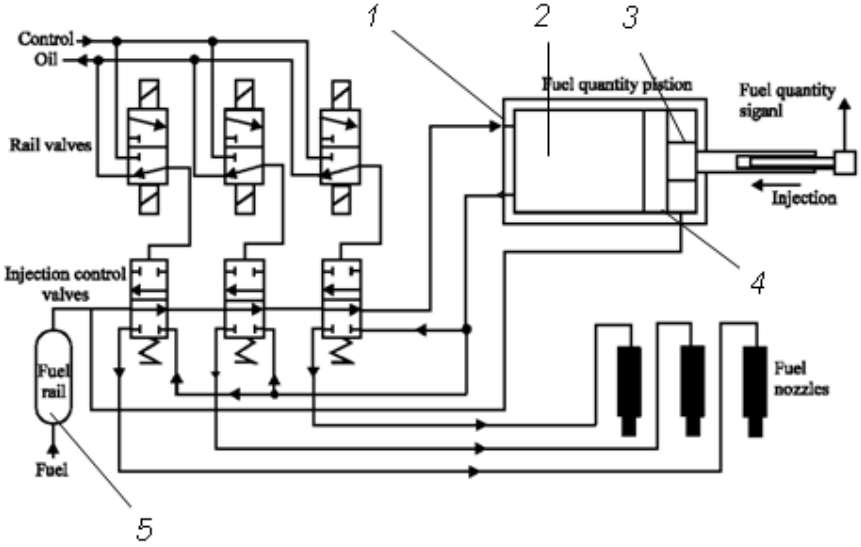


Fig. 1.Accumulator fuel injection system AFIS (CR –Common Rail): 1 - Injection Control Unit –(ICU); 2- work space (WS ICU); 3 - buffer space BS ICU; 4- fuel metering (quantity) piston (FQP ICU); 5 – fuel accumulator FA(Fuel Rail)

The part of the system is equipped with additional devices (Fig. 2), containing at the output the accumulator *1,* indicated above (Fig. 1) as *5*.

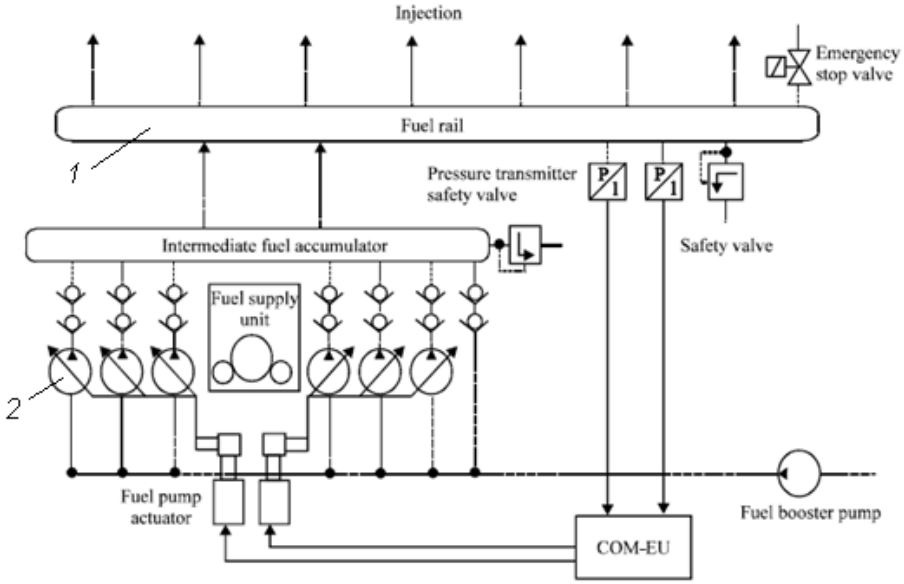


Fig. 2. The fuel supply circuit of the fuel system accumulator (Fuel Rail): *1* – fuel accu-mulator FA (Fuel Rail); *2* –high pressure fuel pumps unit HPFPU (Fuel Supply Unit - FSU)

Fuel is supplied at high pressure (up to 1000 bar) by high pressure fuel pumps unit HPFPU *2* (Fuel supply unit - Fig. 2) driven by the engine crankshaft. The remaining elements provide control and protection against overload by fuel pressure.

The main elements of the accumulator injection system (Fig. 1) are, along with the atomizers (fuel nozzles), *1*- injection control unit - ICU, the fuel accumulator (Fuel Rail) and the valves of the control system.

The working space of the ICU is communicated during the injection period with the nozzles, and in the preparation phase of the next injection, with the fuel accumulator. The buffer space *3* has no connection with the nozzles and is constantly connected to the accumulator.

Valves (two for each injector) control the indicated actions of the injection control unit; one of them (Rail valve) with two-way actuator solenoids is an intermediate link in the control system, working with service oil (Control oil). For fuel supply, it passes oil to the valve injection control (Injection control valve), and then provides the drainage of oil through the drain line

The second valve connects the working space of the ICU alternately with the nozzles (during fuel injection) and with the accumulator (CR). The working stroke of the metering piston (FQP – Fuel Quantity Piston) *4* is ensured by the pressure drop when the WS is connected to the nozzles. Its reverse movement is determined by the difference in the areas of the FQP - it is larger on the WS side. In Fig. 1, the system is shown in the final phase of filling the WS ICU with fuel from the accumulator.

The injection process is controlled by the WECS-9520 computer system (Wartsila Engine Control System).

When developing a model of the fuel supply process, the accumulator fuel injection system AFIS functional diagram is used, shown in Fig. 1.

As the basic provisions of physical and mathematical ideas about the hydrodynamics of injection processes developed by prof. Yu.Ya. Fomin, generalized in his writings [2, 3, and 4] are borrowed.

The task was set of a physical analysis and a mathematical description of the processes occurring in the main elements of AFIS: ICU and nozzles. Valve devices are represented by bistable on-off elements with external control, which sets the mode of operation of the system.

The processes in the ICU are described by the equations of continuity of the working space of the ICU and the movement of the metering piston during the fuel injection period.

The first is represented as

$$\alpha V_w \frac{dp_w}{dt} = f_w \frac{dh}{dt} + Q_{ws} - u_0 f_b - \varepsilon\mu_{sv} f_{sv} \sqrt{\frac{2}{\rho_f}} \sqrt{p_w},$$

and for the movement of the metering piston received:

$$M_p \frac{d^2 h}{dt^2} = f_b p_b - f_w p_w,$$

where p_w, p_b - fuel pressure in the spaces of the ICU hydrocylinder respectively working and buffer;

V_w - the volume of the working space of the ICU;

f_w and f_b – active areas of the metering piston from the side of the working and buffer spaces of the ICU;

h - is the movement of the piston; u_0 - fuel speed in the inlet section of the discharge pipe going to the nozzle;

Q_{ws} - fuel leakage in WS ICU;

M_p - the mass of the piston and moving parts with it;

$\varepsilon\mu_{sv} f_{sv}\sqrt{\frac{2}{\rho_f}}\cdot\sqrt{p_w}$ - fuel consumption through an open safety valve in case of its operation, in which ε is an account control parameter;

μ_{sv} - expiration coefficient for the channel of the safety valve;

f_{sv}- section of the channel;

ρ_f - fuel density.

The individual function considering a condition of a safety valve

$$\varepsilon = \left| \begin{array}{l} 1 \text{ by } p_w \geq p_{sv}; \\ 0 \text{ by } p_w < p_{sv}, \end{array} \right.$$

where p_{sv} is the safety valve setting.

In the given list some of the parameters are structural characteristics given in the source data: f_w, f_b, Q_{ws}, M_p.

For others, initial values are set that change during the calculation: p_w, p_b, V_w, h.

The most challenging task in modeling the fuel injection is a calculation of fuel movement in the high pressure pipeline.

In this study, we used the most accurate method of hydrodynamic calculation, taking into account the wave phenomena and the presence of resistance to movement of the fuel.

If we take the fuel flow in the high-pressure fuel line as one-dimensional, its state is isothermal, and the fuel characteristics are averaged (for small time intervals and the length of the fuel line), then the fuel motion is described by a system of hyperbolic equations

$$\left.\begin{array}{l} \partial u/\partial t + u\cdot\partial u/\partial x + \rho^{-1}\partial p/\partial x = -2Ku; \\ \partial p/\partial t + u\cdot\partial p/\partial x + a^2\rho\partial u/\partial x = 0. \end{array}\right\} \quad (1)$$

where u is the fuel velocity; p is the fuel pressure; x is the coordinate of the length of the fuel line ($x = 0$ at the pump); t is the time; ρ is the density of the fuel; a - velocity of the pressure wave propagation in the fuel; K is the factor of hydraulic resistance.

In case of neglecting the convective terms $u\partial u/\partial x$ and $u\partial p/\partial x$ in equations (1), the system reduces to the telegraph equation

$$\partial^2 u/\partial x^2 - a^{-2}\partial^2 u/\partial t^2 - 2Ka^{-2}\partial u/\partial t = 0,$$

solved by the method of characteristics or damped waves.

In the developed AFIS(CR) model, a closed - type nozzle with mechanical (spring) locking is used (Fig. 3, *a*).

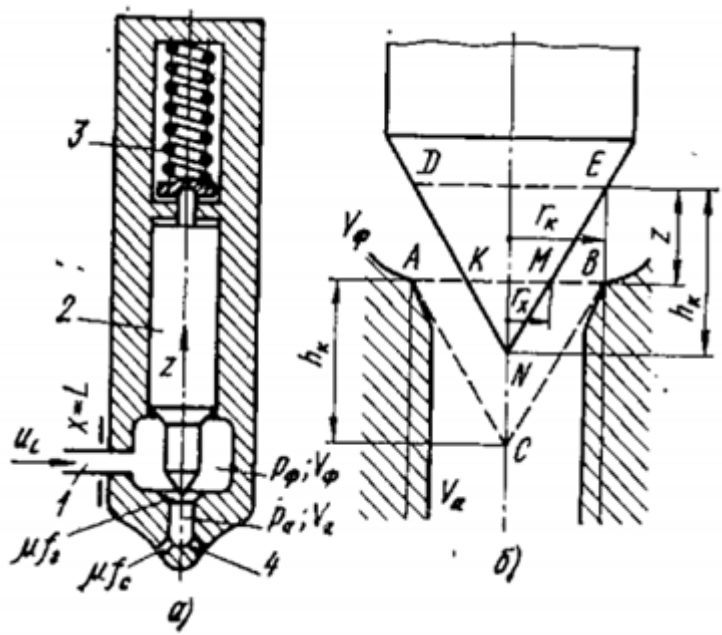


Fig. 3. Closed – type nozzle diagram:

1 - discharge pipe; *2* - nozzle valve; *3* – spring; *4* - nozzle holes

The fuel injection processes in the nozzle are described by the following differential equations:

continuity of fuel flow in the space before the needle

$$\alpha V_b \frac{dp_b}{dt} - f_1 u_L - \varepsilon_n f_n \frac{dz}{dt} + \frac{dV_{rnc}}{dt} -$$

$$- \xi' \mu f_s \sqrt{\frac{2}{q}} \sqrt{|p_b - p_u|};$$

continuity of fuel flow in the space under the needle

$$\alpha V_b \frac{dp_b}{dt} = \xi' \mu f_s \sqrt{\frac{2}{q}} \sqrt{|p_b - p_u|} -$$

$$- \mu f_h \sqrt{\frac{2}{q}} \sqrt{p_u - p_c} - \frac{dV_{rnc}}{dt};$$

nozzle needle movement

$$M_n \frac{d^2 z}{dt^2} = p_u f_n'' + p_b f_n' - c_n (z_0 + z),$$

where p_b and p_u are the fuel pressure in the spray chambers before the needle and under the needle; p_c is the gas pressure in the cylinder; V_b and V_u are the volumes of the spray chambers before and under the needle; V_{rnc} - the volume released by the needle cone when it is raised; f_n the cross-sectional area of the needle; f_n '- differential area of the needle; f_n '' = f_n - f_n '; μf_s and μf_h effective sections in the saddle of the needle and nozzle holes; z is the rise of the needle; and u_L is the speed of the fuel in the outlet section of the discharge pipe; M_n - the mass of the needle and moving parts with it; c_n and z_0 - stiffness and precompression of the nozzle spring;

$$\varepsilon_n = \begin{vmatrix} 1 \text{ by } 0 < z < z_{\max}; \\ 0 \text{ by } z = z_{\max} \end{vmatrix} \quad \xi' = \begin{vmatrix} 1 \text{ by } p_b \geq p_u; \\ -1 \text{ by } p_b < p_u, \end{vmatrix}$$

z_{max}- the maximal rise of a needle of an atomizer.

The calculation of the fuel supply process in the nozzle (in the output section of the high pressure pipeline) is carried out taking into account the position of the needle. Three calculation options are possible:

1) the nozzle needle is on the saddle, which takes place before and after injection;

2) the needle moves, i.e., rises or falls;

3) the needle is at the stop.

The analytical diagram of the CR accumulator system, compiled in the GT-Power package in relation to the basic data of the RT-flex 50 engine, is shown in Fig. 4. The main elements providing a description of the injection processes in various devices of the system are:

▪1- accumulator - Rail;

▪2- Injection Control Unit - ICU;
▪3- ICU valve - DCV42;
▪4 (4.1,4.2) - nozzles - Nozzle-1, Nozzle-2;
▪5 (5.1,5.2) - high pressure fuel pumps - Supply Pump;

To provide an adequate description of the fuel injection process, the model adopted a number of assumptions related to the operation algorithms of individual elements specified by the programming environment. The most significant of them are as follows.

High - pressure pumps (5.1, 5.2 - Supply Pump) functionally present in the model as fuel sources with a constant pressure at the outlet specified in the parameters of this device.

The injection control unit *2* is the most critical device that sets the basic parameters of injection: phase, pressure, injection rate. These functions in the model are implemented by a hydraulic cylinder from the composition of the prototypes of the settlement package. Its design and algorithm of action cor-responds to a real ICU.

On-off valve *3* is represented in the model by an autonomous device from among the prototypes of the package. Its working functions are reduced to two options for connecting the input A, B and output P, T ports. The control is carried out by applying voltage to the solenoid coil, returning to its original position by a spring. In the diagram, the valve is shown in the closed state.

Despite the design differences with the actual valve ICU, their functional parameters are identical.

Of the number of model elements, nozzles *4* are fully consistent in configuration and parameters with the real component of the system.

The high-pressure fuel pumps *5* in the model provide a constant fuel pressure at the inlet to the accumulator. The workflow of a real fuel pump system is not considered. This assumption is fully justified, since during the operation of the system it does not directly affect the injection process.

The diagram shows the registration points for the injection parameters: fuel pressure and movement of the working elements. Oscillograms of these quantities are given in Fig. 5.

The following parameters are the source data at the time the program is launched:

▪ fuel pressure in all areas, starting from the accumulator, including ports A, P, is 800 bar;

▪ pressure behind the valve, including nozzles, is 100 bar;

▪ nozzles are closed, the piston of the injecting control unit is in the extreme position from the rod side against the stop.

The oscillograms Fig. 5 and the circuit model of Fig.4 present the following parameters (the numbers circled):

1- fuel pressure at the inlet to the valve *3* port A;

2- pressure in the accumulator *1*;

3- pressure in the working space (WS ICU) *2*;

4,5 - pressure in the nozzle channel (4.1, 4.2);

6,7 - pressure at the inlet to the nozzle;

8,9 - raising the nozzle needle;

11 - movement of the piston ICU;

12 - pressure at the valve outlet - port T,

13 - the movement speed of the metering piston - fuel quantity piston (FQP ICU).

An analysis of the operation of individual elements of the system and the processes occurring in them can be carried out using oscillograms and a model diagrams.

When the program starts, two phenomena are observed.

Under the action of the difference in the forces acting on the piston, it moves within the elastic deformation of the stop. The sensor (13) of the ICU piston speed responds to the displacement (from + 0.3 to - 0.1 m/s). This leads to the appearance of damped pressure fluctuations (11) in the buffer space of the ICU *3* with maximum amplitude in the range of 766÷830 bar.

A similar process (3) with lower intensity is observed in the working space of the ICU. The incentive impulse is negative. In the accumulator *1*, a pressure wave (2) from the buffer space of the ICU causes slight fluctuations. A similar thing is noted with respect to pressure in all elements with hydraulic connection: from accumulator *1* to port A of valve *3* (oscillograms (2) and (1)).

The rest of the system from the port T of the valve *3* to the channel of nozzles *4* (oscillograms (12) - (4,5)) does not react to what is happening because it is separated by the valve *3*.

The injection process begins with applying voltage to the solenoid valve *3* and the ports A, T connecting at the angle of rotation $\varphi = 120^{o}$ CA. As a result, a section of the system, which was at a working pressure of 800 bar, is connected to high-pressure pipelines connecting the injection control unit with the nozzles.

This causes a change in the parameters of all elements of the system.

The pressure at the outlet of the valve (12) at port T rises from 100 to 625 bar and remains at this level throughout the entire injection time. Further, the wave propagates through the high pressure pipeline to the nozzles. In each nozzle, the needle (8), (9) rises, reaching the stop and remaining in this position.

The injection process is characterized by a stable state of all parameters. This applies to both needle position and fuel pressure. The latter is: at the inlet to the nozzle (6), (7) 525 bar, and in the channel (4), (5) 527 bar. In practice, these values coincide.

The fuel injection process is determined by the phenomena occurring in the ICU. As a result of opening the valve, the pressure in the working space decreases (3) from the initial 800 bar to 672 bar. As a result, the ratio of forces acting on the piston changes and the force from the side of the buffer space causes the piston to move. The pressure in the buffer space decreased, amounting to 772 bar. It can be noted that the same pressure is maintained in the accumulator, due to the minimum length of the channel connecting these elements of the system.

With the start of the piston movement, the nozzle needles (8.9) rise and fuel is injected. The pressure in the nozzle elements reaches the following values: at the inlet (6.7) 526, almost the same in the channel (4.5) - 527 bar.

The main component that forms the further injection process, the ICU reacts as follows. The pressure in the working space and the buffer space of the ICU remains constant at the above level. Under the action of a differential pressure, the piston moves (10), displacing the fuel from the working space of the ICU into nozzles. The full stroke of the piston is 20.4 mm for the angle of rotation φ_p = 32,1° CA (range 120.6°÷152.7° CA), which corresponds to the time τ_p = 89 ms. The average speed of the ICU piston over the injection period is equal to v_p = 0.234 m/s according to the program (13).

The main parameters that determine the functional properties of the system are as follows: injection angle φ_{in} = 33.6 °CA, cyclic supply q_c = 43.8 g for each nozzle. The fuel pressure in the nozzle, which characterizes the spraying parameters and the law of injection, was, as mentioned above, p_b = 527 bar.

To complete the injection, the solenoid of valve *3* is deenergized, and it returns to its original position by connecting the ports A - P and B - T. This occurs at an angle of rotation of 152.7° CA. As a result, the pressure in the valve-nozzle section decreases to the initial value: port T- from 625

to 100 bar (12). The pressure at the inlet to the valve (1) changes in a similar way. It rises to an initial 800 bar with an intermediate section of 745 bar.

A similar nature is the change in pressure in the element closest to the valve - the working space of the ICU. The difference in values (3) does not exceed 5 bar, and the stepped form of the graph is repeated.

In the buffer space of the ICU, the pressure oscillogram (11) also in the increase section at the end of injection contains an intermediate section. At the same time, however, its level is slightly higher than the established value (806 bar compared to 800 bar). There is also a track of the moment the ICU piston reaches the stop in the extreme position. Visible is the oscillatory process on the pressure curve.

And, finally, with respect to the element furthest from the valve *3* - accumulator *1*- here, the pressure line (2) repeats the oscillogram (11), keeping its shape and, within 5 bar, the pressure values.

The described phase of the fuel injection process in the range of 150÷190º CA also corresponds to the reverse movement of the ICU piston (10) with noticeably less than with the forward stroke speed: v_p = 0.197 m/s in comparison with 0.234 m/s.

The rest of the fuel injection cycle time up to 360º CA is characterized by a stable state of all elements of the system. The pressures are kept at the initial values, and the valve and nozzles remain closed.

Conclusions

The fuel equipment of modern marine diesels is characterized by the transition to computer program control, which, together with a change in the configuration of the hydro mechanical design, provides free specification of the fuel supply parameters.

The functional diagram of the Common Rail accumulator fuel injection system of the RT-flex type engines, widely used in the merchant marine, is presented.

A calculation model of the system is compiled and the results of simulation modeling are presented. The processes in the main elements of the system are described and the injection parameters are determined.

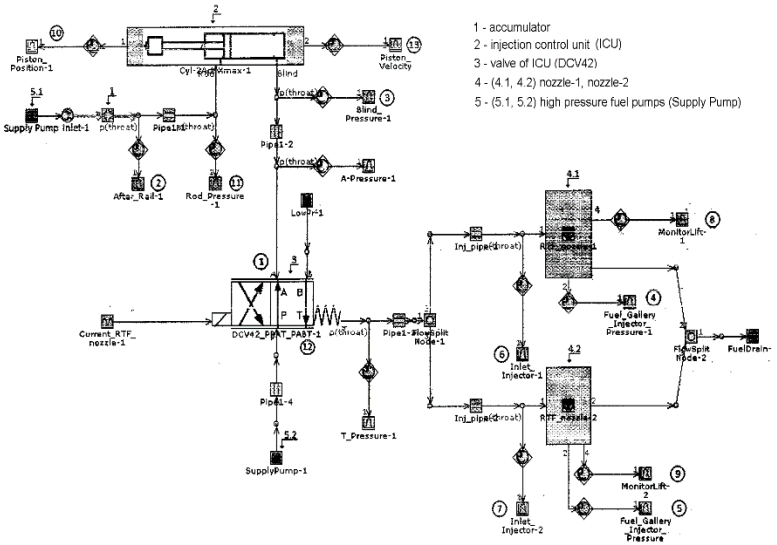


Fig.4. The analytical model of the accumulator fuel injection system (Common Rail) for RT-flex type diesel engine; ① – the measuring point

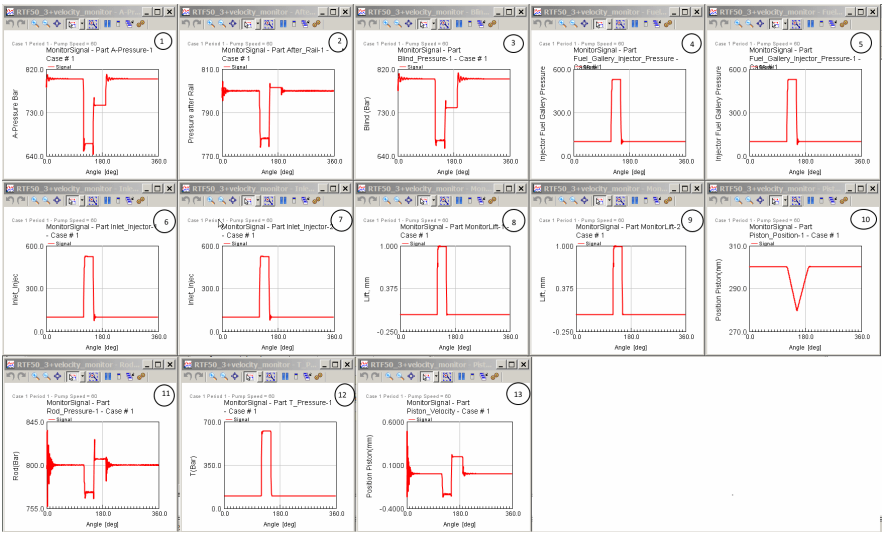


Fig. 5. Parameters of fuel injection process

THE LITERATURE

1. Shen Haosheng, Zhang Jundong, Cao Hui. Visualization Simulation Research of Fuel Common Rail System of Marine Intelligent Diesel Engine. Information Technology Journal 13 (9) : 1648-1655, 2014

2. Фомин Ю. Я. Гидродинамический расчёт топливных систем судовых дизелей.- М.: Морской транспорт,1959.- 84 с.

3.Фомин Ю. Я. Топливная аппаратура судовых дизелей. М: Транспорт, 1966.- 240 с.

4. Топливная аппаратура дизелей: Справочник/ Ю.Я. Фомин, Никонов Г. В., Ивановский. В. Г - М.: Машиностроение, 1982.- 168 с.

10.31653/smf39.2019.129-142

Polovinka E.M., Yakovenko A.Y.
National University «Odessa Maritime Academy»

DEVELOPMENT AND TESTING OF SYSTEMS FOR MONITORING OF MARINE DIESEL ENGINES WORKING PROCESSES ON THE BASIS OF COMBINED MEASURING CONVERTERS

Abstract. The results of the development of combined measuring converters based on the structural elements of marine diesel fuel injection systems are presented. As a controlled parameter of the fuel supply process, the fuel pressure in the high-pressure fuel pump (HPFP) was selected. The design of the converter, combined with the mounting studding of the injection pump drive of a marine medium-speed diesel engine, is described. Engineless tests of the measuring system showed the metrological parameters of the combined converter close to the base case. Researches were continued in ship environment. Combined converters were tested to register two parameters: fuel pressure in the high-pressure fuel pump and gases in the engine cylinder. The resulted oscillograms have confirmed an opportunity of application of the offered converters for the operational control of the specified parameters**.**

Keywords. Fuel injection systems of diesel engines, measurements, combined converters.

Statement of the problem.

The central issue in creating measuring systems is the development of measuring converters. For monitoring injection processes, these are converters for fuel pressure recording. Existing systems use autonomous sensors of various types, requiring the inclusion in the fuel supply system of additional structural elements that affect the fuel supply process. Promising is the creation of systems with combined converters based on the main structural elements. Creation of this kind measuring systems is the subject of development and research, the results of which are presented in this article.

The analysis of the basic researches and publications

With the advent of small-sized electronic components of measuring devices, it became possible to create sensors built into the structural elements of engines.

For high-speed diesel engines, the practice of connecting a pressure sensor to the combustion chamber through glow plugs has become widespread, which does not require modernization of the cylinder head. However, piezoelectric inserts in glow plugs are not stable and durable due to the influence of factors such as the operation of valves and nozzles, engine vibration, the tightening torque of the threaded glow plug fasteners, changes in the temperature of the engine, wear and damage to parts.

The Fiber-Optic Pressure Sensors developed by Optrand [1], in which the measuring diaphragm does not come in contact with the optical fiber, is free from these drawbacks (Fig. 1). In addition, since the sensor element welded into the heater does not have moving parts and preloading, then it is not affected by negative factors associated with the operation of the engine. The result is high accuracy at all angles of rotation of the crankshaft, under all engine operating conditions and low pressures, which provides the most advanced engine control strategy.

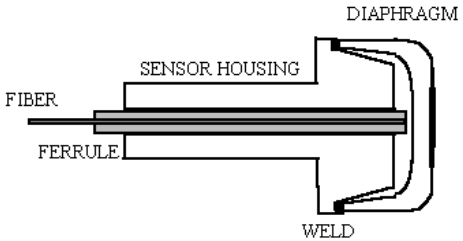


Fig. 1.The sensitive element of fiber optic sensor

Selection of the unsolved before parts of the general problem.

The above figure is for high-speed diesel engines, having as combined measuring converters glow plugs. Marine medium and low speed diesel engines such decision is unacceptable due to the lack of these structural elements. Therefore realization of the stated principle of configuration of systems on the basis of the combined measuring converters for such diesel engines demands the further development.

The purpose of the article.

The aim of the research, the results of which are given in this article is the development and testing of the measuring system on the basis of the structural elements of marine medium speed diesel engine. The system is designed for process control of fuel injection, as well as the working process in the cylinder of the engine.

Presentation of the basic material.

One of the promising directions for the development of diesel engine working process control systems is the use of combined measuring converters based on engine structural elements. This solution does not require the use of separate sensors and provides continuous monitoring of the considered parameters. The automated analysis of characteristics of processes with integration into the overall alarm monitoring system (AMS) of the engine, and in the future, the creation of an adaptive control system that ensures optimal engine control.

The Ship Engineering Department of the National University "Odessa Maritime Academy" developed the measuring system to control workflows based on the combined converters. As the basic variant tracking the fuel injection was chosen. The most informative for this process is the pressure in the high-pressure fuel pump (HPFP).

The studies were carried out in relation to the ship medium-speed diesel engine CHN 25 / 34. Its fuel equipment has the following basic parameters:

Spool type injection pump with regulation at the end of fuel injection;

diameter and stroke of the plunger 16 mm;

uncooled injection valve, number of nozzles 9 holes of Ø 0.35 mm each.

When choosing the registered parameter and the basic structural element of the fuel injection system, preference was given to the fuel pressure in the high-pressure fuel pump, as the most informative parameter of the fuel supply process. Of the elements of the high-pressure fuel pump, the fastening pin connecting the pump flange to the camshaft shelf is adopted as the basic element for the combined measuring transducer. The stud perceives the force caused by the fuel pressure.

The measuring transducer is assembled using strain gauge elements - wire strain gauges of the PKB type. The drawing of the stud processed for the installation of strain gauges and the general view of the transducer assembly are presented in Fig. 2, 3. The converter is called a "stud-sensor" - "S-S".

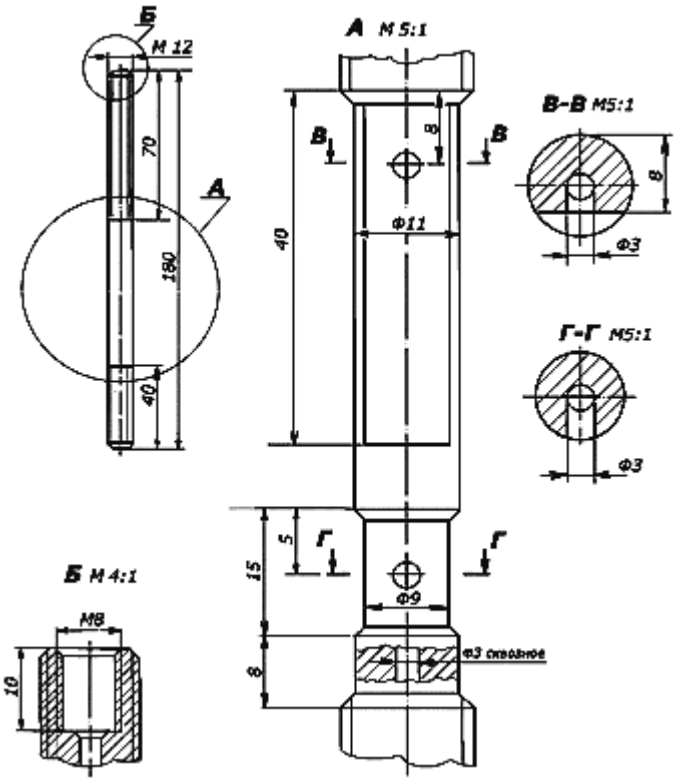


Fig. 2. Stud, prepared for the installation of strain sensors

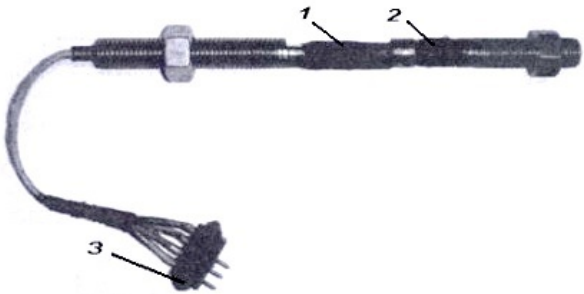


Fig. 3. "Stud sensor" - «S-S» assembly: 1-active sensors, 2 - compensation sensors, 3 - electrical connector

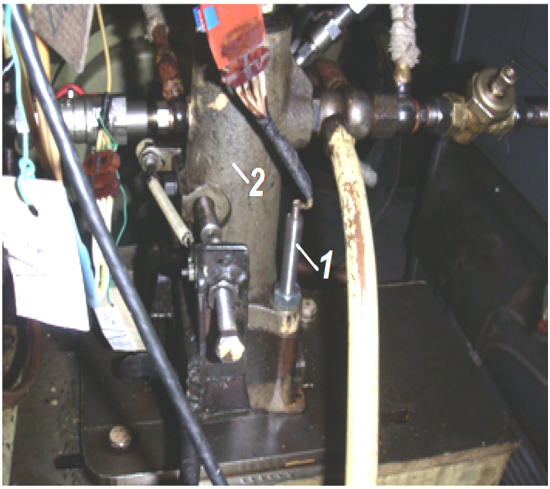


Fig. 4. Fuel pressure stud sensor («S-S») on a engineless injection pump stand: *1* — stud sensor - «S-S», *2* — HPFP

The basic metrological characteristics of the measuring system with a combined pressure sensor are determined by testing on the engineless stand. A comparison of the pressure waveforms in the HPFP are recorded using the basic and combined sensors.

Placement of «S-S» on the high-pressure fuel pump during tests on the HPFP when tested on engineless stand is shown in the photograph Fig. 4.

The recording of the oscillogram is performed (Fig. 5, 6) simultaneously by two sensors: a conventional strain gauge mounted on the fuel injection pump nipple, p_p and a «S-S» stud sensor - p_s.

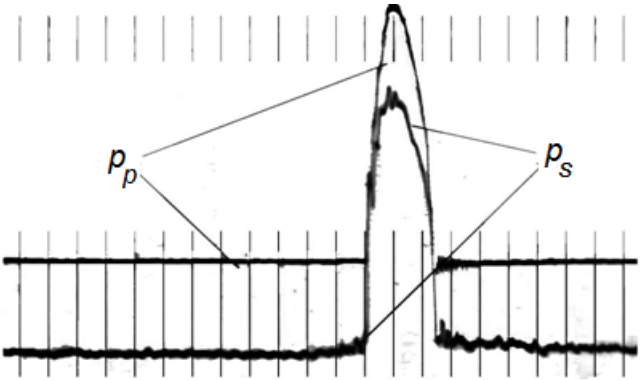


Fig. 5. Oscillogram of the fuel supply when n_p= 46rpm, m = 27

Modes in which the trials were carried out correspond to the full operating frequency range of fuel equipment of the engine.

Visual assessment of the fuel pump pressure p_p and deformations p_s, recorded by «S-S» stud sensor curves indicates acceptable for the practice informativeness of the latter. A similar conclusion is obtained for the result of the frequency analysis of the oscillograms.

Conducted testing and analysis of obtained data allowed to draw the following basic conclusions.

As a basic part for creating a combined high pressure fuel gauge in a high-pressure fuel pump, a stud pin for fastening its drive can be used.

The parameters of the elements of the developed measuring system are coordinated with a significant margin for deflections, including their limit values.

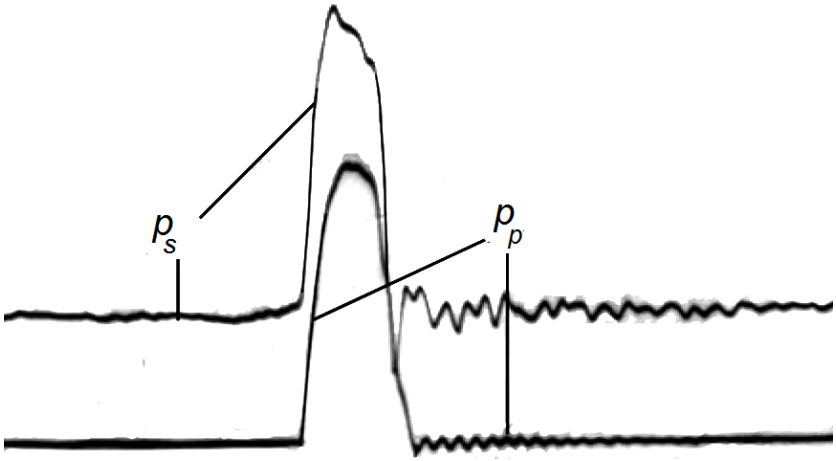


Fig. 6. Oscillogram of the fuel supply when n_p=248 rpm, m = 32

The control data of the fuel supply parameters obtained using the basic and experimental sensors are equivalent for all operating modes, with the exception of the minimum rotational speeds with fractional injection.

Further work on the implementation of workflow control systems with combined converters was the development of an experimental on-board version of such a system.

The sensors were structurally consistent with the data of the engines on which the DCS tests were provided. These are medium-speed two-stroke engines D30 / 50 with the following characteristics: cylinder diameter 300 mm, piston stroke 500 mm; rated speed 300 rpm; rated power 441 kW.

The electronic module with the basic function of tensometric amplifier is created. A recorder is equipped. The software for monitoring of diesel engines control systems DCS is worked out. Measuring sensors are designed and made for two parameters: fuel pressure in HPFP and gases pressure in a cylinder.

The sensors are structurally consistent with the data of the engines on which the DCS tests were performed. These are medium-speed two-stroke engines D30 / 50 with the following characteristics: cylinder diameter 300 mm, piston stroke 500 mm; rated speed 300 rpm; rated power 441 kW.

The work was carried out on two ships - the tugboats "Mars" and "Typhoon", where these diesel engines are used as the main ones. On the first check of assemblability of sensors and initial start of DCS is carried out.

On mv "Typhoon" full-scale start of system is carried out. The components of the tested experimental version of DCS are shown in the photo. 7.

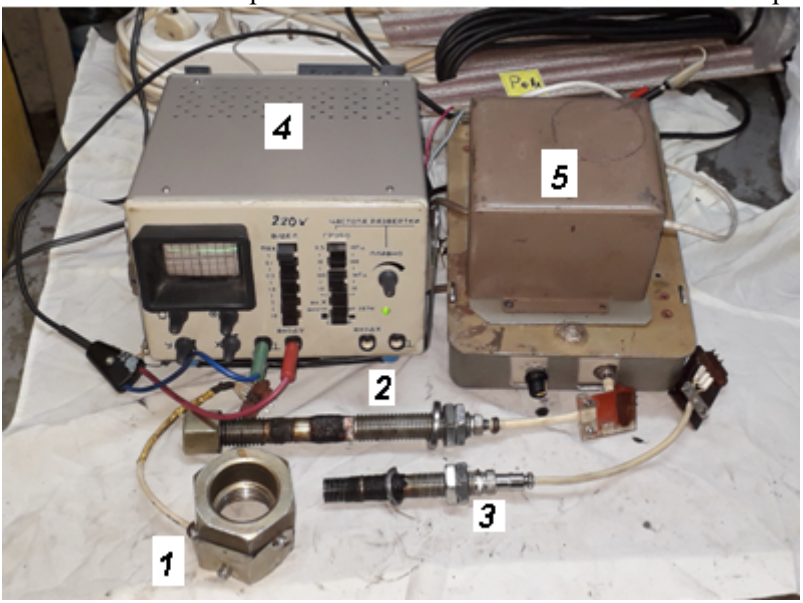


Fig. 7. Structure of a control system of diesels on the basis of the combined pressure transformers: *1* - pressure sen-sor of gases (nut) N-S; *2* -fuel pressure sensor in HPFP the main S-Sm (long stud); *3* - fuel pressure sensor in HPFP short stud S-Ss; *4* – oscillograph; *5* – amplifier for sensors

The system included two versions of the fuel pressure sensor in the high-pressure fuel pump *2*; *3* - combined measuring transducers based on the high-pressure fuel pump mounting stud pins. One of them, the main «S-Sm» -*2*, of greater length, is created on the basis of a pump head mounting stud, the other shortened one «S-Ss» combines the mounting functions of the fuel pump flange.

To record the gas pressure, a sensor *1* was made on the basis of a nut «N-S» for fastening the cylinder cover.

The system also includes an oscillograph *4* for recording controlled processes and a strain gauge amplifier *5*. A personal computer was also used to record parameters.

The placement of sensors on the engine 6D30 / 50 m/v «Typhoon» is shown in Fig.8,9.

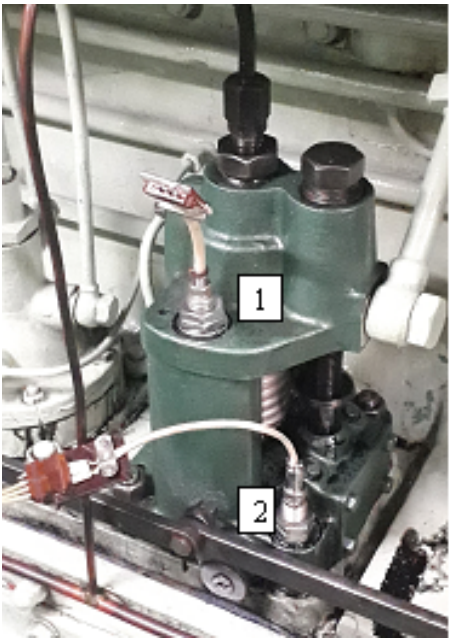


Fig. 8. Fuel pressure sensor on HPFP:1 - the basic «S-Sm» long stud sensor , 2 - «S-Ss» short stud sensor

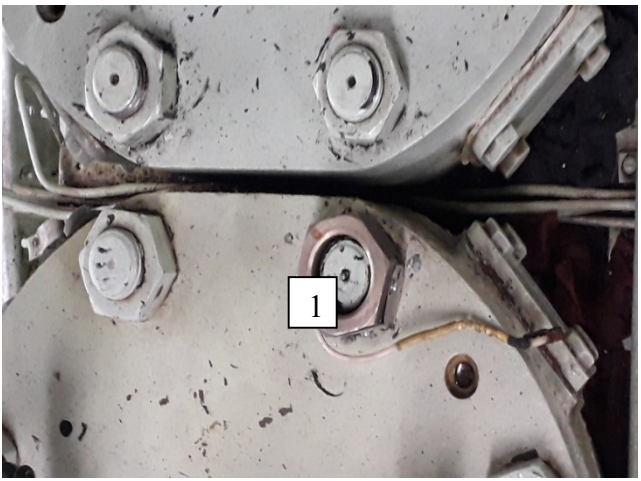


Fig. 9. The gases pressure gauge on a cylinder cover: 1 - the nut sensor of gases pressure "N-S"

The recording of gas pressure in the cylinder and fuel in the high-pressure fuel pump passed sequentially along one channel in two modes:

▪ at idle (with zero pitch of control pitch propeller CPP) at a speed of 200 rpm;

▪ at 300 rpm with zero pitch of CPP and shaft generator load of 8 kW.

During the tests, the following parameters were recorded:

▪ gas pressure in the cylinder by the «N-S» sensor;

▪ fuel pressure in the high pressure fuel pump with the main «S-Sm» sensor;

▪ fuel pressure in the high-pressure fuel pump with a short «S-Ss»sensor.

The oscillograms of the pressure in the high pressure fuel pump and the gas pressure were photographed from the screen of an analog oscilloscope. Recording was carried out continuously for several revolutions. The oscillograms below are a sample of many oscillograms. Along with the photographs, their copies are given.

An example of gas pressure recording made using a PC is shown in Fig. 10. The characteristic points are clearly visible on the diagram: pressure at the moment of the beginning of visible combustion, maximum combustion pressure. You can appreciate the dynamism of the workflow.

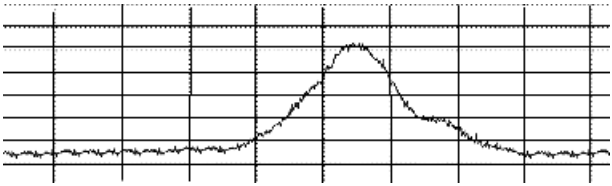


Fig. 10. Gases pressure record on the personal computer

The remaining oscillograms (Fig. 11-16) were obtained by filming from the oscilloscope screen. The first four of them reflect the fuel pressure in the HPFP. The recording was made with two sensors: "S-S": main "S-Sm" Fig. 11, 12 and shorter length "S-Ss" Fig. 13, 14.

"S-Sm" recording is preferable, both in signal level and in the absence of significant interference. Obviously, a large load on this sensor determines its high sensitivity

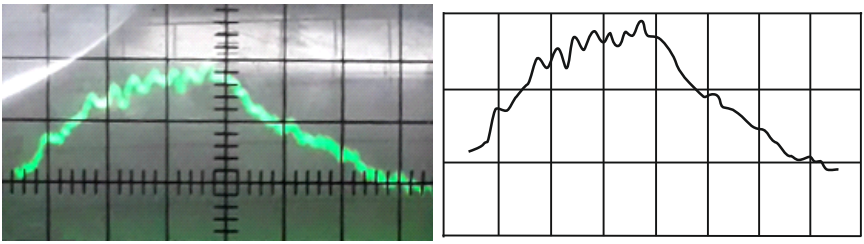


Fig. 11. The fuel pressure by idling at 200 rpm - "S-Sm" long stud sensor

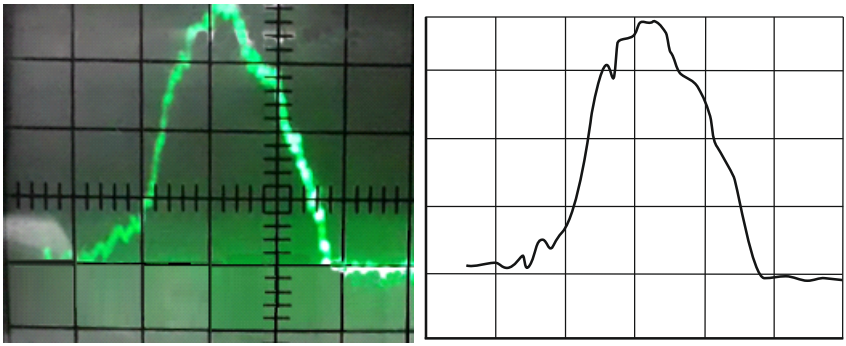


Fig. 12. Fuel pressure at 8 kW, 300 rpm - "S-Sm" long stud sensor

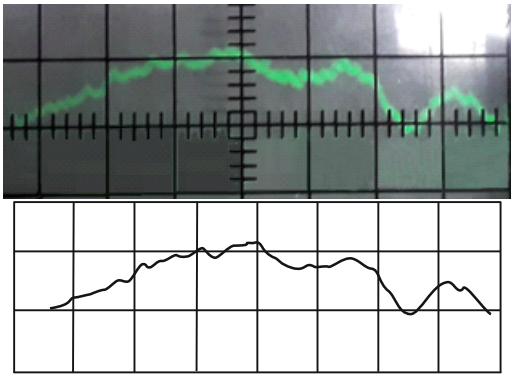


Fig.13. Fuel pressure by idling at 200 rpm - "S-Ss" short stud sensor

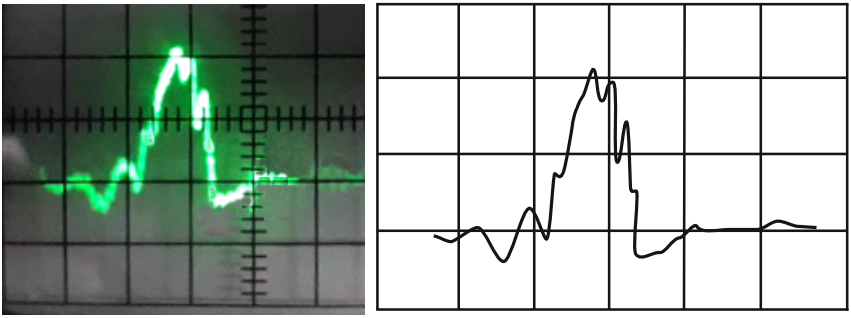


Fig.14. Fuel pressure at 8 kW, 300 rpm - "S-Ss" short stud sensor

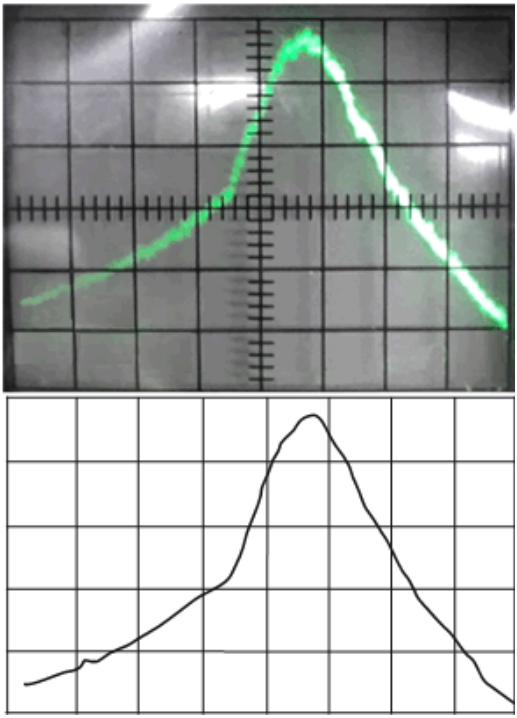


Fig.15. Pressure of gases by idling at 200 rpm - "N-S" nut sensor

When recording the injection process in a high-pressure pump and working process, it is possible to transform oscillograms for a more detailed analysis of individual sections or to obtain the required form when documenting it. This is achieved by varying the scanning frequency and scale

when displaying an oscilloscope. Additional features in this area arise when editing an image on a computer.

Oscillograms of the working process in the cylinder (Fig. 15, 16) are developed indicator diagrams. The quality of registration provides obtaining the necessary information about the characteristics of the processes that form the working cycle: compression, combustion, expansion.

Conclusions

Ship trials of experimental control diesel system (CDS) variants based on combined measuring converters confirmed at a qualitative level (without numerical parameters) the possibility of its use for recording fuel injection and the working process of marine diesel engines.

The main task has been fulfilled - checking the system's operability and the quality of the engine's work processes registration using combined transducers as high pressure sensors for fuel and gases pressure in the cylinder.

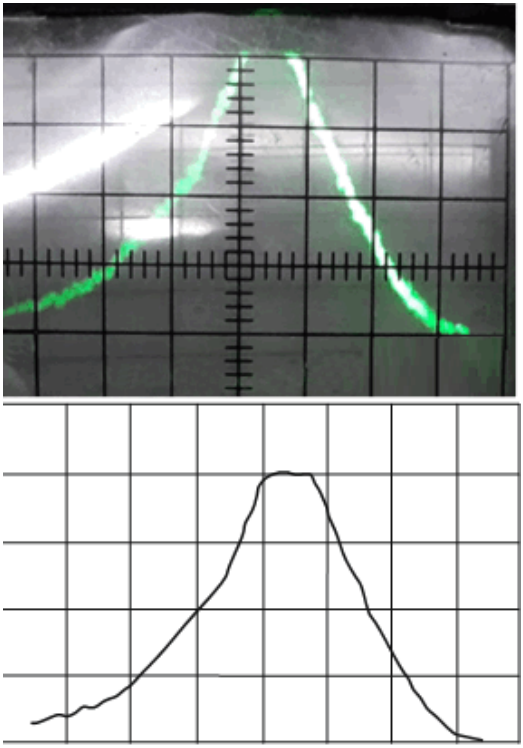


Fig.16. Gas pressure with a load of 8 kW at 300 rpm - "N-S" nut sensor

SOURCES

Tom Poorman, Jacob Arnold, Terry Coleman and Marek T. Wlodarczyk. Long-life fiber-optic pressure sensors for reciprocating machinery monitoring. Optrand, Inc.46155 Five Mile Rd., Plymouth, MI 48170, USA.

10.31653/smf39.2019.143-149

Zhuralov Yu.I., Melnik A.A., Muradyan P.S.
National university "Odessa maritime academy"

USE EFFICIENCY OF THE FLEXIBLE CONNECTIONS (FC) OF DECK MECHANISMS

Statement of the problem in a general case and its connection with the important scientific or practical problems. The flexible connections (FC) of large length are used at towages, deep-water well-drilling and other works in the marine economy complex of Ukraine as a part of ship power plants. The solving of the problem for an estimation of oscillations in flexible working tools of large length will allow to reduce the terms and amount of the works related to their assembling, and, in turn, will bring down the expenses on acquisition and exploitation (FC). The deriving of the oscillations ' equations (FC) is of undoubted interest, since they can be used for the study of the World ocean, investigation and exploitation of submarine mineral deposits, submarine geology and topography, choice of routes of submarine cable lines and pipelines, control of works' quality on their laying, study of the sea ecology.

Analysis of the last achievements and publications, where the beginning of this problems' solving was done and the selection of unsolved before parts of the general problem.

In flexible connections under the longitudinal perturbations there are not only longitudinal oscillations U, but also torsion oscillations V [1]. Well-known equations of longitudinal torsional oscillations (FC) are written in case-insensitive his transversal narrowing. At the same time, the static tests show that there are its considerable transversal deformations at the tension and rollup (FC). It grounds to suppose that in the process of longitudinal torsional oscillations the transversal oscillations (FC) ω in radial direction can also take place.

The study of such oscillations is of interest, foremost, as it applies to (FC) with the organic core used for the works on transporting of docks and other objects of the different purpose [1]. The logging reserved cables, consisting of the insulated current-carrying conductor covered by two layers of steel wires – armor [2, 3], are the complete mechanical analogue of such (FC).

Keywords: flexible connections, longitudinal and torsional oscillations, wave equations, elastic waves.

Exposition of the basic material of the research.

On the basis of works [1, 2, 3] the dynamic equations (FC) with regard of the radial transversal oscillations can be written as three equations

$$\left.\begin{aligned} &A\frac{d^2U}{dx^2}+C\frac{d^2V}{dx^2}+D\frac{d\omega}{dx}=P\frac{d^2U}{dt^2};\\ &C\frac{d^2U}{dx^2}B\frac{d^2V}{dx^2}+E\frac{d\omega}{dt^2}=m\frac{d^2V}{dt^2};\\ &D\frac{d^2U}{dx^2}+E\frac{d^2V}{dx^2}+F\frac{d\omega}{dx}=P_1\frac{d^2\omega}{dt^2}, \end{aligned}\right\}. \qquad (1)$$

where *A, B, C, D, E, F* are elastic rigid coefficients (FC); *P* is a linear density (FC); *m* is a linear kinetic moment of inertia (FC); P_1 is a linear density of elements (FC) participating in radial oscillations.

In (FC) with a non-metal core the main mass is concentrated in steel wires that also simultaneously participate in radial oscillations. Therefore for such (FC) and cables with sufficient exactness it is possible to accept $P_1=P$.

The problem is to transform the system of dynamic equations (1) by means of passing to the so-called main coordinates or to the main oscillations, by analogy with work [2] to three independent wave equations. For this purpose we define from the first equation of the system (1)

$$\frac{d\omega}{dx}=\frac{P}{D}\frac{d^2U}{dt^2}-\frac{A}{D}\frac{d^2U}{dt^2}-\frac{C}{D}\frac{d^2V}{dx^2}.$$

Solving of the system (1) together, we get

$$(EA-CD)\frac{d^2}{dx^2}\left(U+\frac{BD-EC}{CD-EA}V\right)=EP\frac{d^2}{dt^2}\left(U-\frac{n}{k}\right. \qquad (2)$$

$$(CF-DE)\frac{d^2}{dx^2}\left(U+\frac{BF-E^2}{CF-DE}V\right)=\frac{d^2}{Dt^2}(mFV-P_1E\omega) \qquad (3$$

$$(D^2 - FA)\frac{d^2}{dx^2}\left(U + \frac{ED - FC}{D^2 - FA}V\right) = \frac{d^2}{dt^2}(PD\omega - FPU). \quad (4)$$

Multiplying the equations (3) and (4) on β and adding with the equation (2) we derive

$$\frac{EA - CD + \beta(CF - DE)}{EP}\frac{d^2}{dx^2}\left(U + \frac{CE - BD + \beta(B}{AE - CD + \beta(C}\right.$$
$$= \frac{d^2}{dt^2}\left(U + m\frac{\beta E - D}{EP}V - \beta\omega\right); \quad (5)$$

$$\frac{AE - CD + \beta(D^2 - AF)}{P(E - \beta F)}\frac{d^2}{dx^2}\left(U + \frac{CE - BD + \beta(E}{AE - CD + \beta(D}\right.$$
$$= \frac{d^2}{dt^2}\left(U - \frac{mD}{P(E - \beta F)}V + \frac{\beta D}{E - \beta F}\omega\right), \quad (6)$$

Herewith β is chosen with regard to get the same function in both parts of the equations (5) and (6) under the signs of the second derivatives. As the result we can write down

$$\frac{CE - BD + \beta(BF - E^2)}{AE - CD + \beta(CF - DE)}V = m\frac{\beta F - D}{EP}V - \beta\omega;$$

$$\frac{CE - BD + \beta(DE - CF)}{AE - CD + \beta(D^2 - AF)}V = \frac{\beta D}{E - \beta F}\omega - \frac{mD}{P(E - \beta F)}V.$$

Excluding ω and V we get the dependence for the determination of β

$$a\beta^3 + b\beta^2 + c\beta + d = 0 \quad (7)$$

where

$$a = EFP(CF - DE)^2 + mDF(CF - DE)(AF - D^2);$$
$$b = EFP(CF - DE)(BD - CE - CD + AE) -$$
$$-mDF(AE - CD)(CF - DE + D^2 - AF) +$$
$$+DEP(BF - E^2)(D^2 - AF) + E^2P(CF - DE)^2 -$$
$$-mD(D + E)(CF - DE)(D^2 - AF);$$
$$c = DEP[(CE - BD)(D^2 - AF) + (BF - E^2)(AE - CD)] +$$
$$+EP\{(CE - BD)^2[E(CF - DE) - F(AE - CD)] + E(AE - CD)(DE - CF$$
$$+mD(D + E)(AE + CD)(CF - DE + D^2 - AF);$$
$$d = (D + E)(AE - CD)[E\rho(CE - BD) + mD(AE - CD)].$$

Denoting in (7) $\gamma = \beta + \dfrac{b}{3a}$, we get the reduced equation

$$\gamma^3 + \rho r + q = 0, \tag{8}$$

where

$$\rho = \frac{3ac - b^2}{3a^2}; \qquad q = \frac{2b^3}{27a^3} - \frac{bc}{3a^2} + \frac{d}{a}.$$

The solving of the equation (8) can be presented as

$$\beta_1 = -2r\cos\frac{\varphi}{3} - \frac{b}{3a};$$
$$\beta_2 = 2r\cos\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\varphi}{3}\right) - \frac{b}{3a}; \tag{9}$$
$$\beta_3 = 2r\cos\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\varphi}{3}\right) - \frac{b}{3a}.$$

Here

$$\varphi = arc\cos\frac{q}{2r}; \qquad r = \sin q\sqrt{\left|\frac{P}{3}\right|}.$$

The system of equations (1) with the regard of β from (9) can be written as the following

$$\frac{AE-CD+\beta(CF-DE)}{EP}\frac{d^2}{dx^2}\left(U-\frac{mD}{\rho(E-\beta_i F}+\frac{\beta_i D}{E-\beta_i F}\omega\right)=$$

$$=\frac{d^2}{dt^2}\left(U-\frac{mD}{\rho(E-\beta_i F)}V+\frac{\beta_i D}{E-\beta_i F}\omega\right).$$

Each value of the root β has its own function

$$W_1=U-\lambda_{11}V+\lambda_{12}\omega;$$

$$W_2=U-\lambda_{21}V+\lambda_{22}\omega;$$

$$W_3=U-\lambda_{31}V+\lambda_{32}\omega.$$

Here

$$\lambda_{i1}=\frac{mD}{\rho(E-\beta_i F)};\qquad \lambda_{i2}=\frac{\beta_i D}{E-\beta_i F};\qquad i=1,\ 2,\ 3.$$

Thus, passing to the new variables of W_1, W_2, W_3 the expression (10) can be replaces by three wave equations

$$\overline{a}_i^2\frac{d^2W_i}{dx^2}=\frac{d^2W_i}{dt^2};\qquad i=1,\ 2,\ 3, \tag{11}$$

where

$$\overline{a}_i^2=\frac{AE-CD+\beta_i(CF-DF)}{\rho E}.$$

Results and prospects for further work.

Possibility of division of the system (1) on three independent wave equations, means that in (FC) there are three independent elastic waves of W_1, W_2, W_3, which have different speeds of distribution $\overline{a}_1$, $\overline{a}_2$ and $\overline{a}_3$.

Using the expression (11), it is possible to pass to the previous variables

$$U_1 = \frac{\begin{vmatrix} W_1 - \lambda_{11}\lambda_{12} \\ W_2 - \lambda_{21}\lambda_{22} \\ W_3 - \lambda_{31}\lambda_{32} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 - \lambda_{11}\lambda_{12} \\ 1 - \lambda_{21}\lambda_{22} \\ 1 - \lambda_{31}\lambda_{32} \end{vmatrix}}; \qquad U_2 = \frac{\begin{vmatrix} 1 - \lambda_{21}W_2 \\ 1 - \lambda_{21}W_2 \\ 1 - \lambda_{31}W_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 - \lambda_{11}\lambda_{12} \\ 1 - \lambda_{21}\lambda_{22} \\ 1 - \lambda_{31}\lambda_{32} \end{vmatrix}}; \qquad U_3 = \frac{\begin{vmatrix} 1 - \lambda_{12}W_1 \\ 1 - \lambda_{22}W_2 \\ 1 - \lambda_{32}W_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 - \lambda_{11}\lambda_{12} \\ 1 - \lambda_{21}\lambda_{22} \\ 1 - \lambda_{31}\lambda_{32} \end{vmatrix}}.$$

In conclusion we will define the frequency of free oscillations of flexible connection by the well-known formula from strength of materials formula

$$\omega^2 = \frac{E_к A_к}{L_к \left(m + \frac{1}{3} m_0 \right)}$$

where Eк - is the elastic module of wire's material (FC); $A_к$ - is an area of cross-sectional (FC); $L_к$ is length (FC); m is cargo weight; m_0 is mass (FC).

Taking into account that

$$m = \frac{Q}{g}$$

where Q is weight of load, and g is an acceleration of the free falling, it is possible to write down that

$$A_к = \frac{q_к}{\gamma \cdot 10^2}$$

where $q_к$ is linear weight (FC); γ is specific gravity of steel, from which the wire is stretched. Accepting $Q = 10 \div 10^2$ *кН*, $q_к$ - 35 *H* (at *d* (FC) equals 32 *mm*), and $L_к = 1 \div 10^2$ *m* and executing the necessary calculations, we will get the dependence $\omega(q_к, L_к)$, the graphic of which is shown at the figure

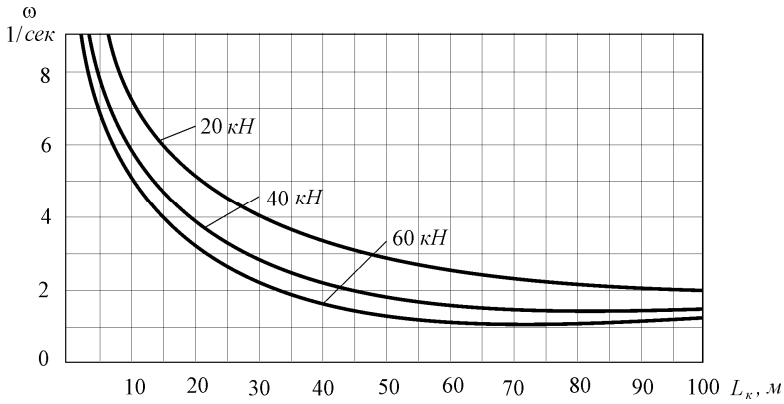


Figure 1

Conclusions

1. It is proved that in (FC) under the longitudinal perturbations there are not only longitudinal oscillations also torsion oscillations.

2. The wave equations of transversal oscillations (FC), representing the interest during the selection and calculation (FC) of the large lengths which are used for the study of the World ocean, investigation and exploitation of submarine mineral deposits, submarine geology and topography, choice of routes of submarine cable lines and pipelines, control of works' quality on their laying, study of the sea ecology.

3. At length (FC) more than 80 *m* the frequency of free oscillations is equal to 2 Hertzs. And considering that the frequency of force oscillations of the most ship devices is also equal to 2 Hertzs, then the phenomenon of resonance is inevitable during the work of such devices.

LIST OF LITERATURE

1. Bekersky V.I. Application of ropes on courts and in ports. Moscow, "Transport", 1986.

2. Glushko M.F. Steel lifting ropes. Kyiv, "Technique", 1977.

3. Glushko M.F., Shakhnazaryan E.A. Mechanical calculation of logging cables taking into account the transversal pliability of isolations. "Applied geophysics", vol. 39, 1964.

4. Shakhnazaryan E.A. Influence of the hydrostatical pressure in a drillhole on the tense state of the reserved cable. "Steel ropes", vol. 2, Kyiv, "Technique", 1965.

РЕФЕРАТИ

10.31653/smf39.2019.5-13

Афтанюк В.В., Даниленко Д.В., Афтанюк А.В. Моделирование и анализ гидродинамики парогазовых потоков в скруббере вентури

В статье представлены результаты численного моделирования скруббера Вентури для очистки загрязненных газов от SOx, выделяемых в атмосферу судовыми двигателями. Для моделирования аэродинамики была разработана твердо-тельная модель скруббера Вентури. Очистка газа в аппарате осуществляется за счет добавления в горловину скруббера Вентури пресыщенной пары. Исследование проведено для трех режимов работы скруббера, которые отличаются количеством пресыщенной пара, подаваемого в аппарат (1, 5, 10 м^3/с).

Результаты моделирования позволили проанализировать распределение скоростей и давлений газа в скруббере, эффективность распыления и смешивания газового потока и пара; На основании анализа гидродинамика определен рациональный режим работы скруббера (подача пара – 10 м^3/с).

Разработанная модель может использоваться как отдельная единица в больших моделях систем очистки, которые включают несколько типов скрубберов для различных отраслей промышленности.

Ключевые слова: судовые системы очистки выбросов от SOx, твердо-тельные модели скрубберов, численное моделирование газовых потоков.

10.31653/smf39.2019.5-13

Афтанюк В.В., Даниленко Д.В., Афтанюк А.В. Моделювання та аналіз гідродинаміки парогазових потоків у скрубері вентурі

У статті представлено результати числового моделювання скрубера Вентурі для очищення забруднених газів від SOx, що виділяються в атмосферу судновими двигунами. Для моделювання аеродинаміки була розроблена твердо-тільна модель скрубера Вентурі. Очищення газу в апараті здійснюється за рахунок додавання в горловину скрубера Вентурі пересиченої пари. Дослідження проведено для трьох режимів роботи скрубера, які відрізняються кількістю пересиченої пари, що подається в апарат (1; 5; 10 м^3/с).

Результати моделювання дозволили проаналізувати розподіл швидкостей і тисків газу в скрубері, ефективність розпорошення і змішування газового потоку та пару. На підставі аналізу гідродинаміки визначено раціональний режим роботи скрубера (подача пара – 10 м^3/с).

Розроблена модель може використовуватися як окрема одиниця в більших моделях систем очищення, які включають кілька типів скруберів для різних галузей промисловості.

Ключові слова: суднові системи очищення викидів від SOx, твердо-тільні моделі скруберів, чисельне моделювання газових потоків.

10.31653/smf39.2019.5-13

Aftanyuk V.V., Danilenko D.V.. Aftanyuk A.V/. Simulation and analysis of hydrodynamics of vapor-gas flows in scrubber venturi

The article presents the results of numerical simulation of a Venturi scrubber for purifying contaminated gases from SO_x emitted into the atmosphere by marine engines. To model aerodynamics, a solid-state model of a Venturi scrubber was developed. Gas purification in the apparatus is carried out by adding a saturated pair to the neck of the Venturi scrubber. The study was conducted for three modes of operation of the scrubber, which differ in the amount of saturated steam supplied to the apparatus (1, 5, 10 m^3/s).

The simulation results allowed us to analyze the distribution of gas velocities and pressures in the scrubber, the efficiency of spraying and mixing of the gas stream and steam. Based on the analysis of hydrodynamics, the rational mode of operation of the scrubber is determined (steam supply – 10 m^3/s).

The developed model can be used as a separate unit in large models of cleaning systems, which include several types of scrubbers for various industries.

Keywords: shipboard systems for cleaning emissions of SO_x, solid-state scrubber models, numerical simulation of gas flows.

10.31653/smf39.2019.14-21

Афтанюк В.В., Гаврилкин О.Е. Моделирование гидродинамики корпуса судна с учетом биологического загрязнения

В статье представлено исследование влияния шероховатости и волнистости (в том числе с учетом биообрастання) на гидродинамические характеристики судна. Для выполнения опытов была разработана модель корпуса судна, которая включает погруженную подводную часть судна и специальный канал в котором моделируется течение.

На модели исследовано изменение скорости жидкости при обтекании для «чистой поверхности» с шероховатостью 75, 100, 125 мкм. Численное моделирование показало незначительное влияние изменения шероховатости покрытия для «чистой поверхности».

Численное моделирование для поверхности загрязненной биологическими загрязнителями (шероховатость 750 мкм) выявило существенное влияние на изменение скорости жидкости вдоль корпуса судна.

Разработанная модель может быть использована при проведении научно-исследовательских работ для сравнительной оценки энергетической эффективности судов.

Ключевые слова: биологическое загрязнение судов, твердо-тельные модели судов, численное моделирование жидкостных потоков.

10.31653/smf39.2019.14-21

Афтанюк В.В., Гаврілкін О.Є. Моделювання гідродинаміки корпуса судна з урахуванням біологічного забруднення

У статті представлено дослідження впливу шорсткості та хвилястості (у тому числі з урахуванням біообрастання) на гідродинамічні характеристики судна. Для виконання дослідів була розроблена модель корпусу судна, яка включає занурену підводну частину судна та спеціальний канал в якому моделюється течія.

На моделі досліджено зміну швидкості рідини при обтіканні для «чистої поверхні» з шорсткістю 75, 100, 125 мкм. Числове моделювання показало незначний вплив зміни шорсткості покриття для «чистої поверхні».

Числове моделювання для поверхні забрудненої біологічними забруднювачами (шорсткість 750 мкм) виявило суттєвий вплив на зміну швидкості рідини вдовж корпусу судна.

Розроблена модель може бути використана при проведенні науково-дослідних робіт для порівняльної оцінки енергетичної ефективності суден.

Ключові слова: біологічне забруднення суден, твердо-тільні моделі суден, чисельне моделювання рідинних потоків.

10.31653/smf39.2019.22-29

Богач В.М. Дослідження роботи системи "Puls" без акумулювання тиску масла / *В.М Богач, А.М. Шебанов, І.М. Слободянюк* // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вып. 39. - Одеса: НУ «ОМА», 2019. – С14-29…

Дослідження присвячені вирішенню актуальної прикладної задачі підвищенню ефективності експлуатації суднових довгоходових дизелів за рахунок удосконалення систем мащення циліндрів. У роботі виконано аналіз стану питання по досліджуваній проблемі, в результаті якого визначені основні недоліки систем мащення циліндрів дизелів RTA.

Проведені експериментальні дослідження по вивченню процесів подачі мастила в циліндри суднових двигунів, при цьому використані сучасні методи досліджень: осцилографування і швидкісна кінозйомка. Визначено характеристики процесу маслоподачі, і їхній взаємозв'язок з конструкцією мастильних пристроїв.

Ключові слова: судновий дизель, система мащення, лубрикатор, мастилопідводящий канал, процес мастилоподачі, циліндрова втулка, поршень, поршневе кільце, знос, нагар.

10.31653/smf39.2019.22-29
Богач В.М. Исследование работы системы "Puls" без аккумулирования давления масла / *В.М Богач, А.М. Шебанов, И.М. Слободянюк* // Судовые энергетические установки: научно-технический сборник. Вып. 39. - Одеса: НУ «ОМА», 2019. – С…

Исследования посвящены решению актуальной задачи по повышению эффективности эксплуатации судовых дизелей путем усовершенствования систем смазывания цилиндров. Выполнен анализ состояния вопроса по исследуемой проблеме, в результате чего установлены основные недостатки существующих лубрикаторных систем судовых дизелей RTA.

Разработана методика экспериментальных исследований по изучению процессов маслоподачи в цилиндры судовых двигателей. Проведены испытания в эксплуатационных условиях, что позволило получить представление об эффективности функционирования систем смазывания цилиндров. При этом использованы современные методы исследований, включающие в себя осциллографирование и скоростная киносъемка.

Определены характеристики процесса маслоподачи, и их взаимосвязь с конструкцией маслоподводящих устройств.

Ключевые слова: судовой дизель, система смазывания, лубрикатор, маслоподводящий канал, процесс маслоподачи, цилиндровая втулка, поршень, поршневое кольцо, износы, нагарообразование.

10.31653/smf39.2019.22-29
Bogach V.M. Research of work "Puls" systems without oil pressure accumulation / *Bogach V.M, Shebanov A.M, Slobodianiuk I.M.* // Судовые энергетические установки: научно-технический сборник. Вып. 39. - Одеса: НУ «ОМА», 2019. – С14-29…

The summary. The publication is devoted the decision of an actual problem increase efficiency operation of ship diesel engines by perfection processes greasing of cylinders. The analysis a condition of a question on an investigated problem is made and lacks systems greasing of diesel engines RTA are defined.

Experimental researches on studying processes greasing of cylinders of ship engines that has allowed to receive representation about an overall performance these systems are spent. Modern methods researches, such as oscillograms and high-speed filming are thus used.

Keywords: ship diesel engine, greasing system, greasing channel, greasing process, cylinder, piston, a piston rings.

10.31653/smf39.2019.30-42

Бутенко А.В., Максимов М.В., Демиденко В.Э., Брунеткин А.И.

Метод поиска решения сложных задач интерпретации для решения обратной задачи определения состава топлива

Тема статьи заключается в разработке метода поиска решения сложной задачи интерпретации для решения обратной задачи по определению состава горючего.

Установление качественного и количественного состава газа различают химические, физико-химические и физические методы. Известны преимущества физико-химических и физических методов перед химическими, а именно, скорость выполнения, возможность автоматизации анализа, сделали возможным их более широкое распространение. В настоящее время наиболее широкое применение находят методы газовой хроматографии. Основными недостатками этих приборов является последовательный измерение компонентов газа, длительное время анализа.

Цель научного исследования заключается в разработке метода поиска решения сложной задачи интерпретации для решения обратной задачи по определению состава горючего.

Научная и практическая значимость работы заключается в определенные общего типа задачи, как обратно некорректно поставленной и выделены ее более узкий класс - сложная задача интерпретации.

Разработаны методы решения задачи контролируемого сжигания газообразного топлива переменного состава и поиска решения обратной задачи интерпретации на базе использования данных библиотеки. Проведено моделирование технологических измерений принятым погрешностями.

Методологии исследования базируется на методе решения - метод Ньютона-Рафсона, числе обусловленности квадратной матрицы и метод библиотеки для решения обратной задачи.

Моделирование предложенными методами при определении состава топлива позволило для рассматриваемых веществ (метан, пропан, этиловый спирт) с принятыми погрешностями измерения позволило получить решение в рамках модели.

Практическая ценность проведенного исследования заключается в том, что показано как погрешности, вносимые увеличивают диапазон возможного решения. Определено влияние точности измерений технологических параметров на погрешность определения состава горючего.

Ключевые слова. углеводородное горючее, горения, обратная задача интерпретации, метод библиотеки, число обусловленности квадратной матрицы, погрешности измерения.

10.31653/smf39.2019.56-68

А.В. Малахов, М.А. Колегаев, И.Д.Бражник, К.А. Лихогляд

Характеристики процесса тепломассопереноса в применении к вентиляции инертными газами грузовых трюмов танкера

В статье рассмотрена проблема вентиляции грузовых трюмов танкера при помощи инертных газов. Приведено описание работы системы генерирования инертных газов. Для процесса движения инертных газов внутри трюма с одновременным вытеснением воздуха разработана и детально описана математическая модель. Приведены основные уравнения, позволяющие рассчитывать такие характеристики процесса как скорость вентиляции и изменение концентрации кислорода. На основе

результатов экспериментальных исследований и выполненных расчетов получен результат, указывающий на перспективность использования метода принудительной вентиляции грузовых трюмов танкера. В ходе натурных исследований подтверждена адекватность научных гипотез, математической модели и установлены показатели эффективности.

Ключевые слова: грузовой трюм, танкер, система инертных газов, концентрация кислорода, уравнение движения, математическая модель.

10.31653/smf39.2019.56-68

А.В. Малахов, М.А. Колегаев, І.Д. Бражнік, К.А. Лихогляд.

Характеристики процесу тепломасопереносу в застосуванні до вентиляції інертними газами вантажних трюмів танкерів

У статті розглянута проблема вентиляції вантажних трюмів танкера за допомогою інертних газів. Наведено опис роботи системи генерування інертних газів. Для процесу руху інертних газів всередині трюму з одночасним витисненням повітря розроблена і детально описана математична модель. Наведено основні рівняння, що дозволяють розраховувати такі характеристики процесу як швидкість вентиляції і зміна концентрації кисню. На основі результатів експериментальних досліджень і виконаних розрахунків отримано результат, який вказує на перспективність використання методу примусової вентиляції вантажних трюмів танкера. В ході натурних досліджень підтверджено адекватність наукових гіпотез, математичної моделі і встановлені показники ефективності.

Ключові слова: вантажний трюм, танкер, система інертних газів, концентрація кисню, рівняння руху, математична модель.

10.31653/smf39.2019.56-68

O. V. Malakhov, M. O. Kolegaev, I. D. Brazhnik, K. A. Lihoglyad

Characteristics of the heat and mass transfer process applied to ventilations of inert gases of the tankers cargo holds

The article discusses the problem of tankers cargo holds ventilation with the use of inert gases. A description is given of the operation of the inert gases generation system. For the process of inert gases movement inside the hold with simultaneous air displacement, a mathematical model is developed and described in detail. The basic equations are given that allow

calculate such process characteristics as the ventilation rate and the change in oxygen concentration. Based on the results of experimental studies and the calculations made, a result is obtained that indicates the prospects of using the method of forced ventilation of tankers cargo holds. In the course of field studies, the adequacy of scientific hypotheses, a mathematical model was confirmed, and performance indicators were established.
Keywords: cargo hold, tanker, inert gas system, oxygen concentration, equation of motion, mathematical model.

10.31653/smf39.2019.78-88

О.С.Савельева, Д.О.Малахова. Применение информационных технологий в судовых технологических процессах

В статье выполнен анализ характерных параметров переноса тепла и массы в применении к технологии визуализации основных параметров рабочих процессов, которые имеют место на судах водного транспорта. Показаны основные недостатки информационных технологий, используемых в судовом программном обеспечении и предложен новый подход, который заключается в использовании при визуализации не специфических характеристик или параметров потока тепла или массы в текущий момент времени, а их математического представления в виде набора операторов векторной алгебры. На примере одного из судовых рабочих процессов показано каким образом визуализация результатов позволяет повысить рентабельность работы судна.
Ключевые слова: перенос тепла и массы; параметр состояния, визуализация, информационный поток данных, программное обеспечение судна.

10.31653/smf39.2019.78-88

О.С.Савельева, Д.О.Малахова. Застосування інформаційних технологій у суднових технологічних процесах

У статті виконано аналіз характерних параметрів переносу тепла і маси в застосуванні до технології візуалізації основних параметрів робочих процесів, які мають місце на суднах водного транспорту. Показані основні недоліки інформаційних технологій, що використовуються в судновому програмному забезпеченні і запропоновано новий підхід, який полягає у використанні при візуалізації не специфічних характеристик або параметрів потоку тепла або маси в поточний момент часу, а їх математичного подання у вигляді набору операторів

векторної алгебри. На прикладі одного з суднових робочих процесів показано яким чином візуалізація результатів дозволяє підвищити рентабельність роботи судна.

Ключові слова: перенесення тепла і маси; параметр стану, візуалізація, інформаційний потік даних, програмне забезпечення судна.

10.31653/smf39.2019.78-88

O.S. Savelieva, D.O. Malakhova. Application of information technologies in ship technological processes

The article analyzes the characteristic parameters of heat and mass transfer in application to the visualization technology of the main parameters of the working processes that occur on vessels. The main disadvantages of the information technologies used in ship software are shown and a new approach is proposed, which consists in using not specific characteristics or parameters of the heat or mass flow at the current time when visualizing, but their mathematical representation in the form of a set of vector algebra operators. Using one of the ship's work processes as an example, it is shown how the visualization of the results makes it possible to increase the profitability of the vessel.

Key words: heat and mass transfer; status parameter, visualization, information data stream, vessel software.

10.31653/smf39.2019.96-100

Кирис А. В., Гарагуля Б. А. Расчет силы присасывания судов при их сближении

Рассмотрено явление присасывания судов, следующих параллельными курсами под действием сдвигающей силы, рассчитанной на основании теоремы Н. Е. Жуковского о подъемной силе, что позволяет объяснить серьезные аварийные повреждения корпусов судов.

Ключевые слова: УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ, ЦИРКУЛЯЦИЯ СКОРОСТИ, ПОДЪЕМНАЯ СИЛА, МЕЖСУДОВОЙ КАНАЛ, УРАВНЕНИЕ ЖУКОВСКОГО.

10.31653/smf39.2019.96-100

Kiris A. V., Garagulya B. A. Calculation of the ships attraction force when they approach

We considers the phenomenon of attraction of the ships following parallel courses under the action of a shear force, calculated on the basis of the

theorem of N. E. Zhukovsky on the lifting force, which allows to explain serious accidental damage to the hulls.

Key words: BERNULLY EQUATION, SPEED CIRCULATION, LIFTING POWER, INTER-SHIP CHANNEL, ZHUKOVSKY EQUATION.

10.31653/smf39.2019.96-100

Кіріс О. В., Гарагуля Б. А. Розрахунок сили присмоктування суден при їх зближенні

Розглянуто явище присмоктування суден, що прямують паралельними курсами під дією зрушувальної сили, розрахованої на підставі теореми М. Є. Жуковського про підйомну силу, що дозволяє пояснити серйозні аварійні пошкодження корпусів суден.

Ключові слова: рівняння бернуллі, циркуляція швидкості, підйомна сила, міжсудновий канал, рівняння Жуковського.

10.31653/smf39.2019.101-106

С. В. Козицкий, С. В. Кириян. Эффективность использования нанодисперсных веществ в судовых механизмах

В работе рассмотрены исключительные свойства веществ и соединений, образованных наночастицами, и проанализированы возможности их применения в качестве противоизносных и противозадирных присадок к маслам вместо традиционных присадок микронных размеров. Было показано, что поверхностная энергия наночастиц возрастает на несколько порядков в сравнении с энергией частиц микронных размеров. Рассмотрен механизм образования плакирующего защитного покрытия на трущихся поверхностях и приведены такие уникальные результаты практического использования нанодисперсных веществ в качестве присадок к маслам как восстановление изнашиваемых поверхностей и «залечивание» дефектов трущихся деталей в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: наночастицы, поверхностная энергия, нанодисперсные вещества, наноприсадки, плакирующее защитное покрытие.

10.31653/smf39.2019.101-106

С.В. Козицький, С.В. Кіріян. Ефективність використання нанодисперсних речовин в суднових механізмах

В роботі розглянуті надзвичайні властивості речовин і сполук, утворених наночастинками, і проаналізовані можливості їх застосування в

якості протизносних і протизадирних присадок до мастил замість традиційних присадок мікронних розмірів. Було показано, що поверхнева енергія наночастинок зростає на кілька порядків в порівнянні з енергією частинок мікронних розмірів. Розглянуто механізм утворення плакувального захисного покриття на поверхнях тертя і наведені такі унікальні результати практичного використання нанодисперсних речовин в якості присадок до мастил як відновлення спрацьованих поверхонь і «заліковування» дефектів деталей в процесі експлуатації.

Ключові слова: наночастинки, поверхнева енергія, нанодисперсні речовини, наноприсадки, плакувальне захисне покриття.

10.31653/smf39.2019.107-114

Б. Лебедєв, Є. Лебедєва, С. Дмитрієва, М. Кролькова/ Модифікація екзотермічних композицій з метою підвищення їх потужності

Запропоновано варіант підвищення конкурентоспроможності українського суднобудування за рахунок впровадження нової технології зварювання енергонезалежними засобами. Наведено приклад розрахунку потужності та геометричних параметрів зварювального стрижня.

Ключові слова: судноремонт, зварювання, енергонезалежний зварювальний інструмент, потужність

10.31653/smf39.2019.107-114

Б. Лебедев, Е. Лебедева, С. Дмитриева, М. Кролькова. Модификация экзотермических композиций с целью повышения их мощности

Предлагается вариант повышения конкурентоспособности украинского судостроения за счет внедрения новых технологий сварки с использованием энергонезависимых средств. Приведен пример расчета силовых и геомерных параметров сварочного стержня.

Ключевые слова: судоремонт, сварка, энергонезависимый сварочный инструмент, энергетика

10.31653/smf39.2019.115-128

Polovinka E.M., Табулинский I.N. Modeling of the fuel injection processes of RT-flex engines accumulator Common Rail system //Ship power plants: scientific and technical collection. // Ship power installations: scientific-and-engineering collection -2019.-__- Odessa: NU <OMA> ___

Results of the analysis of a design of RT-flex engines accumulator fuel injection system Common Rail are presented. The mathematical model of fuel injection system process is developed.

A calculation model of the system was compiled in the environment of the GT-Power package. The fuel supply was simulated, a description of the processes in the main elements of the system was given.

Keywords: process of injection, storage system, modelling.

10.31653/smf39.2019.115-128

Половинка Э.М., Табулинский И.Н. Моделирование процессов впрыскивания топлива аккумуляторной системой топливоподачи Common Rail двигателей RT-flex//Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб..-201__.- № __- Одесса: НУ <ОМА> С.___

Представлены результаты анализа конструкции аккумуляторной системы топливоподачи Common Rail двигателей RT-flex. Разработана математическая модель процесса впрыскивания топлива системой. Составлена расчётная модель системы в среде пакета GT-Power. Проведено моделирование топливоподачи, дано описание процессов в основных элементах системы.

Ключевые слова: процесс впрыскивания, аккумуляторная система, моделирование.

10.31653/smf39.2019.115-128

Polovinka E.M., Табулинский I.N. Моделювання процесів упорскування палива акумуляторною системою паливоподачі Common Rail двигунів RT-flex // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. сб ..-201 __.-__-Одеса: НУ <ОМА> ___

Представлені результати аналізу конструкції акумуляторної системи паливоподачі Common Rail двигунів RT-flex. Розроблено математичну модель процесу упорскування палива системою. Складено розрахункову модель системи у середовищі пакету GT-Power. Розроблено математичну модель процесів подачі палива. Створена їх комп'ютерна модель. Відпрацьована методика розрахунку, виконаний приклад розрахунку. Наведено аналіз процесів в основних елементах і ділянках системи.

Ключові слова: процес упорскування, акумуляторна система, моделювання.

10.31653/smf39.2019.115-128

Polovinka E.M., Tabulinskiy I.N.

Modeling of the fuel injection processes of RT-flex engines accumulator Common Rail system // Ship power plants: scientific and technical collection. - 2019_. - _ - Odessa: NU "OMA." P. __

Results of the analysis of a design of RT-flex engines accumulator fuel injection (Common Rail) system are presented. The mathematical model of fuel injection system process is developed.

A calculation model of the system was compiled in the environment of the GT-Power package. The fuel supply was simulated, a description of the processes in the main elements of the system was given.

Basic elements of the accumulator fuel injection system AFIS (CR – common rail) for RT-flex engines, alongside with atomizers (fuel nozzles), injection control unit - ICU, the fuel accumulator (fuel Rail) and valves of the control system.

Working space of ICU is connected during injection with atomizers, and in a phase of preparation next injection - with the fuel accumulator. The buffer space has no connection with atomizers and is connected constantly to the accumulator.

The task of the physical analysis and the mathematical description of the processes, occurring in basic elements of AFIS(CR) were put: ICU and atomizers. Valve devices are presented by on-off elements with the external management, setting an operating mode of system.

The mathematical model of fuel injection system is developed.

The processes in the ICU are described by the equations of continuity of the working space of the ICU and the movement of the metering piston during the fuel injection period.

Movement of fuel in the high pressure pipeline is described by system of the hyperbolic equations, which is transformed to the telegraphic equation.

A calculation model of the system is compiled and the results of simulation modeling are presented. The processes in the main elements of the system are described and the injection parameters are determined.

The course of fuel injection process is determined by the phenomena, occurring in ICU. As a result of valve opening the pressure in a working space decreases from initial 800 bar down to 672. In the end the ratio of the forces, acting on the piston, changes, and the effort from a buffer space

causes movement of the piston. Pressure in a buffer space thus has decreased, having made 772 bars. The same pressure is maintained and in the accumulator, owing to the minimal length of the channel connecting these elements of the system.

With the start of the piston movement, the nozzle needles rise and fuel is injected. The pressure in the nozzle elements reaches the following values: at the inlet 526 bar, almost the same in the channel - 527 bar.

For phase of the fuel injection process in the range of 150÷190 degrees of crankshaft revolution corresponds also the reverse movement of the ICU piston with noticeably less than with the forward stroke speed: v_p = 0.197 m/s in comparison with v_p = 0.234 m/s.

Keywords: process of injection, accumulator system, modeling

10.31653/smf39.2019.129-142

Половинка Э.М., Яковенко А.Ю. Разработка и испытания систем контроля рабочих процессов судовых дизелей на базе комбинированных измерительных преобразователей// Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2019. – № 39. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 94-107

Представлены результаты разработки комбинированных измерительных преобразователей и систем контроля рабочих процессов судовых дизелей на их базе. Рассмотрены конструктивные решения и метрологические характеристики систем по данным лабораторных и судовых испытаний. Получены выводы о возможности использования таких систем в практике эксплуатации судовых дизелей и исследовательских целях.

Ключевые слова. Системы впрыскивания топлива дизелей, измерения, комбинированные преобразователи.

10.31653/smf39.2019.129-142

Половинка Э.М., Яковенко А.Ю. Розробка й випробування систем контролю робочих процесів суднових дизелів на базі комбінованих вимірювальних перетворювачів// Суднові енергетичні установки: наук.-техн. сб. - 2019_. - № 39_. - Одеса: НУ "ОМА". - С. 94-107

Представлено результати розробки комбінованих вимірювальних перетворювачів і систем контролю робочих процесів суднових дизелів на їхній базі. Розглянуто конструктивні рішення й метрологічні характеристики систем за даними лабораторних і суднових випробувань.

Отримано висновки щодо можливості використання таких систем у практиці експлуатації суднових дизелів і дослідницьких цілях.

Ключові слова. Системи упорскування палива дизелів, виміри, комбіновані перетворювачі.

10.31653/smf39.2019.129-142

Polovinka A.M., Yakovenko A.Y. Development and tests of monitoring systems for working processes of marine diesel engines created on the basis of combined measuring converters//Ship power plants: scientific and technical coll. - 2019. – #39. – Odesa: National University <Odesa Maritime Academy>. Pp 94-107.

The results of the development of combined measuring converters and monitoring systems for the working processes of marine diesel engines based on them are presented. This solution does not require the use of separate sensors and provides continuous monitoring of the considered parameters. Automated analysis of the characteristics of processes is possible with the inclusion in the general system of the emergency warning alarms (EWA) of the engine, and in the future the creation of an adaptive control system that ensures optimal engine control.

Design solutions and metrological characteristics of systems according to laboratory and ship tests are considered.

When choosing the registered parameter and the basic structural element of the fuel injection system, preference was given to the fuel pressure in the high-pressure fuel pump, as the most informative parameter of the fuel supply process. Of the elements of the high-pressure fuel pump, the fastening stud connecting the pump flange to the camshaft shelf is adopted as the basic element for the combined measuring converter. The stud perceives the force caused by the fuel pressure. The measuring converter is assembled using strain gauge elements - wire strain gauges of the PKB type.

The visual assessment of the fuel pressure curves in the pump p_p and the strain p_s recorded by stud sensor «S-S» in the conditions of engineless tests indicates an infor-mative value of the latter that is acceptable for practice. A similar conclusion was also obtained from the result of frequency analysis of oscillograms.

The system was also tested on ship's medium-speed engines. An additional measuring element was the gas pressure sensor in the engine cylinder, combined with the cylinder head mounting nut. The measuring system in the ship's performance included a strain gauge amplifier and various recording devices: oscillographs and a personal computer.

Ship testing materials confirmed laboratory research data on the possibility of using the developed measurement systems based on combined converters of controlled parameters in the practice of ship diesel engines operation and research purposes.
Keywords. Fuel injection systems of diesel engines, measurements, combined converters

10.31653/smf39.2019.143-149
Журавлев Ю.И., Мельник А.А., Мурадян П.С. В статье обоснована актуальность проблемы повышения эффективности использования гибких связей (ГС) палубных механизмов. Подчёркнуто, что решение задачи по оценке колебаний в гибких рабочих органах большой длины позволит сократить сроки и объем работ, связанных с их монтажом, и, в свою очередь, снизит затраты на приобретение и эксплуатацию (ГС). Получение уравнений колебаний (ГС) представляет несомненный интерес, поскольку они могут быть использованы при изучении Мирового океана, разведке и эксплуатации подводных месторождений полезных ископаемых, подводной геологии и топографии, выборе трасс подводных кабельных линий и трубопроводов, проверке качества работ по их прокладке, изучению экологии моря.
В настоящем исследовании доказано, что в (ГС) при продольных возмущениях возникают не только продольные колебания, но и крутильные. Получены волновые уравнения поперечных колебаний (ГС), представляющие интерес при подборе и расчете (ГС) больших длин, которые используются при проведении исследовательских работ по изучению Мирового океана: разведка и эксплуатация подводных месторождений полезных ископаемых, подводная геология и топография, выбор трасс подводных кабельных линий и трубопроводов и проверка качества работ по их прокладке, изучение экологии моря.
Ключевые слова: гибкие связи, продольные и крутильные колебания, волновые уравнения, упругие волны.

10.31653/smf39.2019.143-149
Журавьов Ю.І., Мельнік А.О., Мурадян П.С. У статті обґрунтована актуальність проблеми підвищення ефективності використання гнучких зв'язків (ГС) палубних механізмів. Підкреслено, що рішення задачі по оцінці коливань в гнучких робочих органах великої довжини дозволить скоротити терміни і обсяг робіт, пов'язаних з їх монтажем, і, в

свою чергу, знизить витрати на придбання та експлуатацію (ГС). Отримання рівнянь коливань (ГС) представляє безперечний інтерес, оскільки вони можуть бути використані при вивченні Світового океану, розвідці і експлуатації підводних родовищ корисних копалин, підводного геології і топографії, виборі трас підводних кабельних ліній і трубопроводів, перевірці якості робіт по їх прокладці, вивчення екології моря.

У цьому дослідженні доведено, що в (ГС) при поздовжніх збурення виникають не тільки поздовжні коливання, але і крутильні. Отримано хвильові рівняння поперечних коливань (ГС), що представляють інтерес при підборі і розрахунку (ГС) великих довжин, які використовуються при проведенні дослідницьких робіт з вивчення Світового океану: розвідка та експлуатація підводних родовищ корисних копалин, підводна геологія і топографія, вибір трас підводних кабельних ліній і трубопроводів та перевірка якості робіт по їх прокладці, вивчення екології моря.

Ключові слова: гнучкі зв'язку, поздовжні і крутильні коливання, хвильові рівняння, пружні хвилі.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ І ПОДАННЯ РУКОПИСІВ ДЛЯ ЗБІРНИКА «СУДНОВІ ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ»

Науково-технічний збірник національного університету «Одеська морська академія» «Суднові енергетичні установки» є науковим виданням, в якому можуть публікуватись основні результати дисертаційних робіт з профілю суднової енергетики.

Стаття повинна відповідати правилам оформлення наукових статей і містити постановку проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями, аналіз останніх досліджень і публікацій за темою статті, формулювання цілей статті (постановку завдання), виклад основного матеріалу з необхідними обґрунтуваннями, висновки та перспективи подальших досліджень.

Рукопис подається на електронному носії у форматі *.doc з паперовою копією і рефератами на українській, російській та англійській мовах, розміром не більше 2 МБ, підписаною всіма авторами, з контактною інформацією: адреси, телефони. Обсяг статті — до 0,5 авторського аркуша з урахуванням ілюстрацій, підмалюнкових підписів і реферату.

Формат паперу А5 (148×210) Усі поля — 16 мм. Текст - через 1 інтервал, Times New Roman, 11 пт; таблиці, заголовки таблиць, підмалюнкові підписи — 10 пт.

На першій сторінці рукопису повинні бути вказані наступні елементи: індекс УДК; ФІО авторів; найменування закладу, в якому виконувалася робота; назва статті, адреса електронної пошти авторів. Заголовок статті оформляти за стилем Заголовок 1, кегль 11 пт, без переносу, усі прописні, інтервал: перед — 8 пт, після — 2 пт.

Наприкінці рукопису наводиться реферат на трьох мовах – українській, російській, англійській, що містить ФІО авторів, назву статті, скорочений зміст та ключові слова.

Якщо рукопис не є повністю англомовним, він супроводжується анотацією на англійській мові обсягом не менше 1800 знаків, включаючи ключові слова.

Змінні, функції, вектори, матриці і т.п. оформляються латинським шрифтом. Змінні виконуються похилим шрифтом, вектори — напівжирним, без нахилу; грецькі символи — у всіх випадках без нахилу; індекси: латинські — з нахилом, кириличні — без нахилу. Розміри в Mathtype: основний — 11 пт, збільшений — 16,5 пт, індекс — 7 пт, субіндекс — 6 пт. У всіх випадках розмітка формул у копії рукопису обов'язкова. Нумеруються тільки ті формули, на які є посилання

в тексті. Формули відділяються від тексту рядками висотою 2 пт. Усі формули повинні бути набрані в Mathtype. Одиниці фізичних величин повинні відповідати ДСТУ 3651.0-97, ДСТУ 3651.1-97, ДСТУ 3651.2-97 "Метрологія. Одиниці фізичних величин" і мати загальноприйняті позначення.

Таблиці слід розташовувати на одній сторінці крім випадків, коли таблиця займає більше 1 сторінки. Заголовок — 10 пт, без переносу, інтервал перед — 8 пт, після — 2 пт, основний шрифт таблиці — 10 пт. Малюнки відділяються від тексту зверху інтервалом 8 пт, від назви — 2 пт. Назва малюнка — кегль 10 пт, без переносу, інтервал після — 8 пт. На всі таблиці і малюнки повинні бути посилання в тексті статті у скороченому вигляді (табл.).

Ілюстрації, які підготовлені в графічних редакторах, додаються в якості окремих файлів у вихідному форматі. Розмір написів повинен забезпечувати їхню читаність (8-10 пт). Для сканованих малюнків додається оригінал у туші на білому папері достатньої щільності. На звороті вказується номер і приналежність до статті.

Бібліографічні описи повинні відповідати діючим вимогам. Посилання на літературні джерела у тексті оформлюються у квадратних дужках з вказанням номера джерела.

Контактна інформація - e-mail: ivanovich1zh@gmail.com

Суднові енергетичні установки:
науково-технічний збірник.
Випуск 39.

Підписано до печатки 30.11.2013. Формат 60×84/16.
Уч.-изд. л. 9,89. Тираж 100. Зауводити, увести до ладу. № И12-12 52.

НУ «ОМА», центр „Видавінформ”
Свідчення ДК № 1292 від 20.03.2003
65029, м. Одеса, вул. Дидрихсона, 8
тел./факс: (0482) 34-14-12
publish@ma.odessa.ua