

## ВІДГУК

офіційного опонента, д.т.н., професора Радченка М. І. на дисертаційну роботу Голубєва Максима Віталійовича на тему «Удосконалення процесів фільтрації і охолодження відпрацьованих вихлопних газів суднової дизельної установки», що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

### 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Структура та обсяг дисертації.** Робота виконана у Національному університеті “Одеська морська академія” Міністерства освіти і науки України. Дисертаційна робота складається зі вступу, п’яти розділів, висновків, списку джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 165 стор., включаючи список використаних джерел зі 109 найменувань, 35 стор. з рисунками і 8 стор. з таблицями.

**Оформлення дисертації.** Дисертаційна робота оформлена відповідно до стандарту ДСТУ 3008-95 "Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення".

Матеріал дисертації подано в логічній послідовності відповідно до поставлених завдань дослідження, їх розв’язки повністю розкрито, матеріал викладено грамотною технічною мовою.

Обсяг і структура роботи відповідають вимогам, що висуваються до кандидатських дисертацій.

Зміст автореферату ідентичний змісту дисертації і відображає основні положення роботи.

**Зміст дисертації, об’єкт і предмет** дослідження відповідають паспорту спеціальності 05.05.03, як за формулою спеціальності, так і за напрямками досліджень:

– за формулою спеціальності (вибірково): науково-технічні проблеми дослідження, проектування, випробувань, експлуатації двигунів (зокрема дизельних) і енергетичних установок, узгодження й оптимізація процесів взаємодії компонентів у двигунах і енергетичних установках;

– за напрямками досліджень (вибірково):

п.1 - теорія двигунів та енергоустановок, експериментальні дослідження процесів в них, дослідження і розрахунки нових схем або типів, теоретичні основи їх проектування, узгодження з характеристиками об’єктів призначення та споживачами енергії;

п.2 - фізичне та математичне моделювання, системний аналіз і синтез термодинамічних, гідродинамічних, газодинамічних, електродинамічних, електрохімічних та інших процесів в двигунах, енергоустановках та їх елементах;

п.12 - методи, технічні засоби та системи поліпшення характеристик двигунів і енергоустановок за екологічними властивостями, зокрема показниками шуму, вібрації і шкідливих викидів.

### **Зміст роботи.**

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано об'єкт і предмет дослідження, мету та основні завдання дисертаційної роботи, визначено наукову новизну, практичну цінність одержаних результатів, відображено повноту їх викладення у публікаціях та ступінь їх апробації на конференціях. Обсяг та форма вступу відповідають загальноприйнятим вимогам до кандидатської дисертації та достатні для ознайомлення з вихідними передумовами і змістом положень, що виносяться автором на захист.

У першому розділі виконано аналіз літературних джерел і наведено аналітичний огляд стану проблеми хімічного і теплового навантажень на навколишнє середовище як результату експлуатації суднових енергетичних установок.

Автор встановив, що, незважаючи на те, що судові дизелі відрізняються за конструктивними і експлуатаційними характеристиками, при використанні ідентичного по характеристикам сорту палива компонентний склад вихлопних газів для них є загальним і поділяється на нешкідливі або нейтральні ( $N_2$ ,  $O_2$ , і  $H_2O$ ) речовини, токсичні (оксиди азоту ( $NO_2$ ), сірки ( $SO_2$ ), окис вуглецю ( $CO$ ), вуглеводні ( $C_2H_4$ )) речовини і частинки (сажа, зола).

У розділі розглянуто близько двадцяти способів очищення вихлопних газів дизелів, які поділяють на сухі, вологі й електричні. Але переважна більшість з них має суттєві недоліки, що пояснює відсутність їх широкого застосування на флоті.

Автор звертає увагу на перспективність процесу барботажу води газовими бульбашками, відзначає нелінійність гідродинамічних процесів при підйомі бульбашок, що створює проблему нестійкості потоку вихлопних газів, а також проблемні питання абсорбційних властивостей шару води в газовому потоці.

У другому розділі здійснено вибір теми, постановку мети та завдань дослідження і викладено загальну методику дослідження.

Здобувачем встановлено, що при експлуатації енергетичних установок суден залишаються невирішеними дві основні проблеми. Перша проблема відноситься до екологічного напрямку – судові вихлопні гази містять велику кількість шкідливих токсичних складових. Друга проблема пов'язана з високою температурою вихлопних газів. Зазвичай при експлуатації СЕУ вона знаходиться в діапазоні  $t = 180-290$  °С, що знижує енергетичний ККД судна, вказує на нераціональне використання палива і негативно позначається на рентабельності експлуатації судна під час рейсу.

Дано визначення актуальності очищення вихлопних газів, передбачуваної наукової новизни та економічної ефективності дисертаційного дослідження. Показана відповідність теми дисертації Закону України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2020 р.» та Транспортній стратегії України до 2020 року (розпорядження КМУ №2174-р від 20 жовтня 2010 р.).

З використанням методу системного аналізу та методології наукового дослідження була розроблена технологічна схема дослідження. Здійснено постановку цілі дослідження та висунута робоча гіпотеза. Сформульовані головне та допоміжні завдання. Визначено об'єкт і предмет дослідження.

Здійснено та обґрунтовано вибір методів дослідження, зокрема, графо-аналітичні методи, метод кінцевих елементів та статистичної обробки даних. З метою експериментальної перевірки розробленої фільтро-охолоджуючої установки (ФОУ) проведено натурний експеримент.

**Третій розділ** дисертації присвячено розробці математичної моделі процесів фільтрації й охолодження бульбашок вихлопних газів в нерухомій рідині, застосуванню методу кінцевих різниць для чисельного моделювання процесів тепломасопереносу, визначенню геометричних характеристик фільтро-охолоджуючого елемента (ФОЕ) та розробці рекомендацій щодо проведення натурних досліджень процесів очищення вихлопних газів в суднових умовах.

Здобувач розробив математичну модель, що відтворює процеси швидкості масопередачі основних компонентів вихлопних газів ( $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ) у воду, теплопровідності вихлопних газів всередині бульбашки, що підіймається у воді, та течії багатокомпонентного потоку газів всередині однорідної рідини.

Також була виконана адаптація вищезазначеної моделі для чисельного розрахунку процесів фільтрації й охолодження у фільтраційній камері відомого розміру із застосуванням методу кінцевих різниць, що становить значний науковий і практичний інтерес.

У **четвертому розділі** роботи досліджено оцінку ступеня впливу геометричних елементів фільтро-охолоджуючої установки обробки вихлопних газів на інтенсивність процесів тепломасообміну та розробки конструктивних рішень по забезпеченню фізичних умов: рівномірності подачі потоку газів на вході у фільтро-охолоджуючий елемент, запобіганню виносу води газами на виході з нього та інтенсифікації міжфазової взаємодії в системі «газ–вода» при барботажі.

У ході чисельного моделювання здобувач робить висновок, що максимальний відбір оксиду азоту з вихлопних газів досягається в нижній частині фільтро-охолоджуючого елемента, а починаючи з висоти, що перевищує  $0,7$  висоти робочої камери  $H$ , дифузія оксидів азоту у воду різко падає і практично припиняється при збільшенні висоти до  $0,8H$  і вище, а площа контактної взаємодії вихлопних газів з водою залежить від швидкості їх введення до камери обробки, починаючи з величини  $5$  м/с, вона різко збільшується більш ніж на порядок, і саме це значення може розглядатися, як нижній поріг швидкості подачі вихлопних газів СЕУ на обробку.

Автор пропонує для підвищення ефективності процесу обробки вихлопних газів збільшувати поверхню контакту бульбашок вихлопних газів з водою всередині фільтро-охолоджуючого елемента.

Запропоновано ряд конструктивних рішень з метою генерування в нижній частині елемента газових бульбашок мінімального діаметра і вибором кута нахилу направляючих пластин фільтро-охолоджуючого елемента у  $30^\circ$ , що забезпечує у  $1,5$

рази довший контакт вихлопних газів з водою при збереженні допустимого рівня гідростатичного опору

У цьому ж розділі автор розв'язує головне завдання дослідження, що полягає в синтезі принципу управління фільтро-охолоджуючою установкою. Завдяки конструюванню, виготовленню та натурному дослідженню фільтро-охолоджуючої установки, яка була інтегрована у технологічний контур головного дизеля на танкері-продуктовозі, автором досягнуте підвищення ефективності очищення вихлопних газів від шкідливих складових  $\text{NO}_x$  і  $\text{SO}_x$  (на 99,7% і 97,7%, відповідно) при експлуатаційних значеннях об'ємної витрати і однакових конструктивних розмірах установки за рахунок розвиненої площі міжфазового контакту. Число працюючих фільтро-охолоджуючих елементів визначається механічним навантаженням на дизель, а періодичність циклічної роботи фільтро-охолоджуючого елемента встановлюється по падінню концентрації  $\text{NO}_x$  і  $\text{SO}_x$  в газах на виході з фільтро-охолоджуючого елемента. Ефект охолодження сягає 30%.

**П'ятий розділ** присвячено розробці методики побудови технологічної схеми, конструктивних рішень і питанням експлуатації фільтро-охолоджуючої установки. Завдання було розв'язане шляхом математичного конструювання елементів фільтро-охолоджуючої установки та синтезу функції ефективного управління процесами фільтрації та охолодження.

Окремо треба відзначити розроблену та запатентовану автором установку фільтрації вихлопних газів дизеля, ефективно управління якою здійснюється в автоматичному режимі із використанням сучасних засобів автоматизації.

## 2. АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ ДИСЕРТАЦІЇ

Сучасні вимоги щодо обмеження викидів шкідливих речовин  $\text{NO}_x$  і  $\text{SO}_x$  судновими дизелями стосуються спеціальних морських районів з контролю за викидами сірки (Sulfur Emission Control Area – SECA), в яких норми викиду значно знижені ( $\text{NO}_x$  до 3,4 г/(кВт·ч),  $\text{SO}_x$  до нуля), а кількість таких районів зростає з кожним роком.

З огляду на необхідність більш глибокого очищення вихлопних газів проблема їх фільтрації і охолодження є актуальною як на науково-методологічному, так і технологічному і конструктивному рівнях.

## 3. СТУПІНЬ ОБҐРУНТОВАНOSTІ НАУКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ, ВИСНОВКІВ І РЕКОМЕНДАЦІЙ

**Методологічну основу** дослідження становить системний підхід до визначення характеристик процесів контактної теплопередачі та дифузії компонент вихлопного газу у воду.

**Фізичну основу** дослідження становлять процеси тепломасообміну, що відбуваються у барботуючому об'ємі води при проходженні бульбашок газу, що містить шкідливі домішки.

**Математичний апарат дисертації.**

Математичне моделювання нелінійних процесів фільтрації та охолодження вихлопних газів під час барботажу у нерухомій рідині (воді).

Фізичне моделювання процесів тепломасообміну в системі «газ-вода» для отримання характеристик фільтрації та охолодження вихлопних газів суднового головного двигуна.

#### 4. ДОСТОВІРНІСТЬ НАУКОВИХ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

Достовірність наукових результатів, висновків і рекомендацій забезпечується проведенням натурних випробувань фільтро-охолоджуючої установки вихлопних газів дизеля в експлуатаційних умовах, задовільним узгодженням теоретичних результатів з отриманими даними випробувань.

#### 5. НОВИЗНА НАУКОВИХ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

**Наукове значення** дисертаційної роботи, на наш погляд, полягає у створенні теоретичної бази проектування вискоелективних ФОР очищення ВГ судових дизелів, в яких паралельна робота ФОР здійснюється за принципом відхилення аеродинамічного навантаження ФОР та збереження тепломасообмінних (температури та кислотності) властивостей води на виході кожного з них, а метод конструювання ФОР і ФОР та побудови їх технологічної схеми базується на виборі ефективного режиму барботажу в системі «газ-вода» у замкненому просторі ФОР, що свідчить про розв'язання поставленого головного завдання дослідження.

У процесі дослідження вперше були отримані наступні наукові результати:

- математична модель процесів фільтрації та охолодження, що представлена матеріальною точкою у просторі, яка характеризує міжфазову взаємодію у системі «газ – вода» під час барботажу за масою, температурою та поточною концентрацією компонентів газу, що очищується;

- математична модель процесів фільтрації та охолодження вихлопних газів, що представлена матеріальною точкою на окремих поперечних перерізах замкненого простору, яка відображає зміну поточної концентрації шкідливих домішок;

- одночасне кероване протікання процесів фільтрації та охолодження вихлопних газів забезпечується барботуючим об'ємом води, який становить 0,85 від висоти камери ФОР, що містить направляючі пластини, оскільки вище цього значення висоти швидкість дифузії компонентів газу і темп охолодження стають мінімальними;

- інтенсифікація поверхневого теплообміну і масопередачі досягається конструктивним збільшенням ефективного шляху потоку бульбашок газу у 1,5 рази (установка направляючих пластин під кутом  $30^\circ$ ), обмеженням максимального діаметру бульбашок до 5 мм на вході в ФОР (установка розподільної решітки) та запобіганням виносу крапель води газами (установка краплеуловлювача);

- зниження температурного градієнту газів до 30%, концентрації NOx на 99,7% і концентрації SOx на 97,7% на виході з ФОР досягається за рахунок забезпечення необхідного значення площі міжфазової взаємодії  $9 \text{ м}^2/(\text{м}\cdot\text{с}^{-1})$  у барботажному об'ємі води, що заповнює камеру працюючого ФОР;

– принцип управління роботою ФОУ визначається трьома нормованими параметрами ефективності процесів фільтрації та охолодження, підтримання яких забезпечується:

- об'ємна витрата вихлопних газів на вході в ФОЕ у діапазоні 2-5 м<sup>3</sup>/с на всіх режимах роботи дизельної установки – керованою зміною числом паралельно працюючих ФОЕ пропорційно перепаду тиску газів на вході і виході з ФОЕ,
- концентрація NO<sub>x</sub> і SO<sub>x</sub> – керованою заміною фільтраційної води в камері ФОЕ при відхиленні значення її кислотності (тобто значення рН) від початкового,
- температурний градієнт газів – керованою заміною фільтраційної води в камері ФОЕ при перевищенні значення її температури у 98 °С.

## **6. ЗНАЧЕННЯ ОТРИМАНИХ В РОБОТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ДЛЯ ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ**

Отримали подальший розвиток теоретичні особливості взаємодії одно- та багатозафазових газоподібних і рідких середовищ у ФОУ з направляючими поверхнями в частині визначення раціональних гідродинамічних і температурних характеристик процесів тепломасообміну у ФОУ барботажного типу, що забезпечують одночасне кероване протікання процесів фільтрації та охолодження.

**Практична цінність** отриманих результатів полягає в підвищенні ефективності очищення відпрацьованих вихлопних газів шляхом розроблених:

- суднової автоматизованої системи фільтрації вихлопних газів;
- методики проектування ФОУ очистки вихлопних газів, що інтегрована у технологічну схему суднового головного дизеля;
- способі автоматичного управління процесами фільтрації і охолодження в установці очистки вихлопних газів;
- комплексі основних операцій для виготовлення, монтажу та ремонту конструкції ФОУ вихлопних газів суднового дизеля.

Результати дисертаційної роботи впроваджені і використовуються в наступних організаціях:

- судноплавній компанії ТВ Marine Hamburg (акт від 27.08.2014), що дозволило знизити температуру суднових вихлопних газів, які викидаються в атмосферу, в середньому в 1,5 рази, а зниження викидів SO<sub>x</sub> при роботі судна на паливі з високим вмістом сірки до показників до рівня, що відповідає використанню палива з низьким вмістом сірки;
- НУ «ОМА» – у навчальному процесі при проведенні лекційних занять з дисциплін «Оптимізація режимів роботи суднових енергетичних установок і технічна експлуатація суднових енергетичних установок» (акт від 14.01.2016);
- НУ «ОМА» – в НДР «Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології» (акт від 21.01.2016).

## **7. ШЛЯХИ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ**

Пропонується впровадження методики проектування та конструювання фільтро-охолоджуючої установки вихлопних газів на судно- та дизелебудівних підприємствах України, а також у вищих навчальних закладах судноплавної та інших галузей під час підготовки фахівців за відповідними навчальними програмами.

## **8. ОЦІНКА ЗМІСТУ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

Зміст дисертації відповідає національним вимогам щодо поліпшення показників шкідливих викидів з вихлопними газами дизелів. Одержані автором теоретичні та прикладні результати у сукупності вирішують поставлену науково-прикладну задачу по розробці установки фільтрації та охолодження вихлопних газів судового дизеля, що забезпечує їх очистку до сучасних вимог незалежно від сорту палива. Матеріал подано у логічній послідовності з обґрунтуванням і узагальненням результатів у вигляді висновків по розділах і загальних висновків по роботі, що сприяє її сприйняттю як цілісного дослідження.

Наведені в роботі результати одержані автором особисто.

## **9. ПОВНОТА ВИКЛАДЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ В ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЯХ**

За темою дисертації опубліковано 15 друкованих наукових праць, серед яких 7 статей у наукових спеціалізованих виданнях (2 – у виданнях, що входить до міжнародних наукометричних баз даних), 8 матеріалах міжнародних і вітчизняних конференцій.

Зміст автореферату відповідає змісту дисертації; наведені в них наукові результати і висновки по роботі ідентичні.

## **10. ЗАУВАЖЕННЯ ДО ЗМІСТУ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

1. Робоча гіпотеза дослідження сформульована без визначення умов її реалізації і звучить дещо декларативно.

2. В літературному огляді розділу 1 показано можливість використання великої кількості методів очистки вихлопних газів, проте надалі автор основну увагу приділяє абсорбційній очистці як найбільш перспективному напрямку, ще не визначивши тему дослідження.

3. У роботі недостатньо висвітлено питання визначення зв'язку між показниками екологічності судової енергетичної установки та абсорбційним очищенням вихлопних газів.

4. Відсутні приклади промислових зразків сучасних установок очищення вихлопних газів судових дизелів.

5. У системі рівнянь (3.18), які складають математичну модель процесів тепломасообміну під час барботажу (стор. 83), не обґрунтоване одночасне застосування похідної та диференціалів часових функцій.

6. Не наведене пояснення до рис. 3.2 та його відношення до дослідницької установкою, що зображена на рис. 2.4.

7. Не зрозуміло, чому в ході натурних досліджень ефективність очищення вихлопних газів контролювалась газоаналізатором, а у розробленій фільтро-охолоджуючій установці для контролю ефективності очищення газів використовується вимірник рН.

8. Не наведено діапазон допустимого рівня кислотності (рН) фільтраційної води в камері фільтро-охолоджуючого елемента.

Втім зроблені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи як за змістом, так і за науковим рівнем.

## 11. ВІДПОВІДНІСТЬ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ ВСТАНОВЛЕНИМ ВИМОГАМ

У результаті вивчення представленої дисертаційної роботи, автореферату і наукових праць можна зробити наступний висновок.

Зважаючи на вищезазначене, вважаю, що науковий рівень та повнота викладення дисертаційної роботи відповідають вимогам ДАК МОН України щодо дисертацій, поданих на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (пп. 9, 11, 13 "Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника"), наведені в ній науково обґрунтовані результати у сукупності вирішують важливу для дизельних енергетичних установок торговельного флоту науково-прикладну задачу розробки установки фільтрації та охолодження вихлопних газів суднового дизеля, а її автор, Голубев Максим Віталійович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки.

Завідувач кафедри кондиціонування і рефрижерації  
Національного університету кораблебудування  
імені адмірала Макарова  
доктор технічних наук, професор



М. І. Радченко

Підпис д-ра техн. наук, професора Радченка М.І. засвідчую:

Проректор




Є. І. Трушляков