

Міністерство освіти і науки України
(МОН України)
Національний університет «Одеська морська академія»
(НУ «ОМА»)

ГОЛУБЄВ МАКСИМ ВІТАЛІЙОВИЧ



УДК 621.431.74+621.43.068.4

ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ФІЛЬТРАЦІЇ І ОХОЛОДЖЕННЯ ВІДПРАЦЬОВАНИХ
ВИХЛОПНИХ ГАЗІВ СУДНОВОЇ ДИЗЕЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертація є рукописом.

Робота виконана у Національному університеті “Одеська морська академія” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Голіков Володимир Антонович,
Національний університет “Одеська морська академія”,
проректор з наукової роботи.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Радченко Микола Іванович,
Національний університет кораблебудування
ім. адмірала Макарова, завідувач кафедри кондиціювання
і рефрижерації, м. Миколаїв;

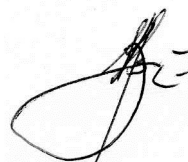
доктор технічних наук, професор
Тітлов Олександр Сергійович,
Одеська національна академія харчових технологій,
завідувач кафедри теплоенергетики та трубопровідного
транспорту енергоносіїв.

Захист відбудеться 6 жовтня 2016 р. о 13.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.106.01 у Національному університеті “Одеська морська академія” за адресою: вул. Дідріхсона, 8, корпус 1, зал засідань вченої ради, м. Одеса, 65029.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету “Одеська морська академія” за адресом: вул. Дідріхсона, 8, корпус 2, м. Одеса, 65029 та за електронною адресою: http://onma.edu.ua/index.php?quater_ua.

Автореферат розісланий 6 вересня 2016 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої
ради Д 41.106.01, д.т.н., професор



В.В. Нікольський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Протягом останніх трьох десятиліть провідні дизелебудівельні компанії здійснюють дослідження по підвищенню екологічності суднових двигунів, що працюють на високов'язких (важких) сортах палива. Після згоряння цього палива в атмосферу викидається значна кількість шкідливих речовин.

Сучасні вимоги щодо обмеження викидів шкідливих речовин NO_x і SO_x регламентовані додатком VI конвенції МАРПОЛ, прийнятої Міжнародною морською організацією (ІМО). Вони стосуються спеціальних морських районів з контролю за викидами сірки (Sulfur Emission Control Area – SECA), в яких норми викиду значно знижені (NO_x до 3,4 г/(кВт·ч), SO_x до нуля), а кількість таких районів зростає з кожним роком.

У процесі інноваційної діяльності з модернізації суднових дизелів основна увага науковців спочатку зверталася на економічні показники суднових установок, потім на надійність, а з переходом двигунів на важкі сорти палива – на екологічність.

Технологічні схеми очищення вихлопних газів (ВГ) суднових теплових двигунів забезпечують: механічне очищення CO_x , використовуючи поверхнево-активні речовини; домішок NO_x – до 90%, використовуючи, наприклад, каталізатор – аміак (метод SCR) та домішок SO_x – на стадіях паливopідготовки та при згорянні палива під час генерації механічної енергії.

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

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

Дисертаційна робота спрямована на реалізацію Закону України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2020 р.», Транспортної стратегії України до 2020 року (розпорядження КМУ №2174-р від 20 жовтня 2010 р.) і виконувалась у рамках НДР в НУ «ОМА» «Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології», ДР № 0114U000346 (2014-2017 рр.). У звіті про НДР автору належить окремий розділ: «Дослідження ефективності процесів очищення відпрацьованих вихлопних газів суднових дизелів».

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є підвищення ефективності очищення відпрацьованих вихлопних газів судового дизеля до сучасних вимог.

Робоча гіпотеза дослідження полягає у тому, що на всіх експлуатаційних режимах роботи судового дизеля існує можливість інтенсифікації процесів одночасних фільтрації та охолодження вихлопних газів при їх барботажі у воді.

Головне завдання дисертаційної роботи полягає у створенні принципу роботи фільтро-охолоджуючої установки (ФОУ) вихлопних газів судового дизеля з подальшою розробкою методики побудови її технологічної схеми, конструктивних рішень і експлуатації.

Для її реалізації потрібне виконання трьох допоміжних завдань:

– аналізу процесів тепломасообміну і суцільності потоку бульбашок вихлопних газів, що барботують у шарі води системи «газ-вода»;

– оцінки ступеня впливу геометричних розмірів фільтро-охолоджуючого елемента (ФОВ) обробки вихлопних газів на інтенсивність процесів тепломасообміну;

– розробки конструктивних рішень по забезпеченню фізичних умов: рівномірності подачі потоку газів на вході в ФОВ; запобігання виносу води газами на виході з нього, а також інтенсифікації міжфазної взаємодії в системі «газ–вода» при барботажі.

Об’єкт дослідження – процес випуску відпрацьованих газів судового дизеля.

Предмет дослідження – процеси фільтрації і охолодження потоку вихлопних газів.

Методи дослідження, використані у роботі:

- дедукції – при інформаційному пошуку;
- експертного оцінювання – при виборі теми дослідження;
- системного аналізу – при розробці методології та технологічної карти дослідження;
- математичного моделювання – при теоретичному дослідженні процесів тепломасообміну в системі «газ-вода»,
- кінцевих різниць – при чисельному дослідженні процесів фільтрації і охолодження;
- натурних експериментів – в ході побудови і дослідження роботи ФОВ і ФОУ;
- статистичної обробки даних – при оцінці похибок вимірювань і розрахунків, а також оцінці ефективності роботи ФОВ;
- конструктивні – при розробці судової автоматизованої ФОУ.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у тому, що підвищення ефективності очищення ВГ судового дизеля забезпечується ФОУ, яка містить паралельно працюючі за принципом відхилення аеродинамічного навантаження ФОВ та збереження тепломасообмінних (температури та кислотності) властивостей води на виході кожного з них. При цьому методику конструювання ФОУ та ФОВ відрізняє вибір ефективного режиму барботажу в системі «газ -вода» у замкненому просторі ФОВ.

У процесі дослідження вперше були отримані наступні наукові результати:

- математична модель процесів фільтрації та охолодження, що представлена матеріальною точкою у просторі, яка характеризує міжфазну 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 і охолодження вихлопних газів забезпечується барботуючим об’ємом води, що дорівнює 0,85 від висоти камери ФОВ, 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 напрямних пластин під кутом 30 °), обмеженням максимального діаметру бульбашок до 5 мм на вході в ФОВ (установка розподільної решітки) та запобіганням виносу капель води газами (установка каплеуловлювача);

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

– 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 м³/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_x і SO_x – керованою заміною фільтраційної води в камері ФОЕ при відхиленні значення її кислотності (тобто значення pH) від початкового,
- температурний градієнт газів – керованою заміною фільтраційної води в камері ФОЕ при перевищенні значення її температури у 98 °С.

Отримали подальший розвиток теоретичні особливості взаємодії багатозфазних газоподібних і однофазних рідких середовищ.

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 судового 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 судового дизеля.

Результати дисертаційної роботи впроваджені і використовуються в наступних організаціях:

- судноплавній компанії ТВ Marine Hamburg (акт від 27.08.2014), що дозволило знизити температуру судових вихлопних газів, що викидаються в атмосферу, в середньому в 1,5 рази, а зниження викидів SO_x 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 судових енергетичних установок і технічна експлуатація судових 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).

Особистий внесок здобувача. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належить: [1] – аналіз структури світового транспортного флоту і сформульовані основні напрями в розробці нових технологій для судової енергетики; [2] – виконана постановка завдань досліджень, а також сформульована і описана загальна функціональна схема судової енергетичної установки, що є ресурсозберігаючою; [5] – виконано аналітичний огляд допустимих меж викидів для основних компонент ВГ і описана технологічна схема їх очищення, [15] – результати експериментального

дослідження установки очищення вихлопних газів суднового дизеля.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та отримали позитивні відгуки на науково-практичних, науково-технічних і науково-методичних конференціях: International scientific-practical conference «Safety of shipping and human element», 5-8 серпня 2004 р.; Міжнародній науковій конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та прикладні аспекти інформаційних технологій (ISDMIT'2005)», Євпаторія, 18-21 травня, 2005 р.; Міжнародній науковій та науково-методичній конференції «Сучасні проблеми суднової енергетики – 2007», Одеса, 15-17 травня 2007 р.; XIV Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», Севастополь, 25-28 червня 2013 р.; IV Міжнародній науково-практичній конференції «Управління проектами в умовах транзитивної економіки», Одеса, 13-14 грудня 2013 р.; Всеукраїнської науково-практичної конференції «Современные энергетические установки на транспорте, технологии и оборудование для их обслуживания СЭУТТОО-2013», Херсон, 2013; 6-тій Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні порти – проблеми та рішення», Іллічівськ, 2014 р.; 5-й Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2014». – Херсон, 2014.

Публікації. Основні результати дисертації опубліковано у 7 наукових статтях, з яких 3 статті у виданнях, що індексуються міжнародними наукометричними базами, та 8 матеріалах конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел зі 109 найменувань та 2 додатків. Повний обсяг роботи складає 165 стор., у тому числі 158 стор. основного тексту, рисунки 35 стор., таблиці на 8 стор. і 2 додатки на 7 стор.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У **першому розділі** здійснено огляд проблеми хімічного і теплового навантажень на навколишнє середовище унаслідок експлуатації суднових енергетичних установок.

Завдяки проведеній класифікації основних технологічних газоподібних викидів при експлуатації суден було встановлено, що газоподібні викиди на судах бувають двох видів: озоноруйнівні гази і продукти згоряння палива в теплових машинах суднової енергетичної установки.

Перший вид викидів складається з різних холодильних агентів суднових систем кондиціювання та охолодження. До них відносять: хлорпентафторетан (газ рефрижераторний R 115); бромхлордіфлорметан (хладон 12B1); бромтріфлорметан (хладон 13B1); трихлорфлорметан (фтор-тріхлорметан, фреон R11, фреон-11, хладон-11, CFC-11, R-11); 1,2-дибром-1,1,2,2-тетрафторетан

(фреон 114B2); гідрохлорфторвуглеці (холодоагенти: R21, R22, R141b, R142b, R123, R124); дихлордифторметан (холодоагент хладон-12); 1,1,2-трихлор-1,2,2-тріфторетан (холодоагент K113); 1,2-дихлор-1,1,2,2-тетрафторетан (газ рефрижераторний R 114).

Другий вид викидів включає в себе всі компоненти продуктів згоряння. Встановлено, що, незважаючи на те, що судові дизелі відрізняються за конструктивними і експлуатаційними характеристиками, при використанні ідентичного по характеристикам сорту палива компонентний склад ВГ для них є загальним. При роботі судових дизелів нешкідливі або нейтральні (N_2 , O_2 , і H_2O) речовини в сумі складають до 99% від загального обсягу випускних газів. Решта включають в себе оксиди азоту (NO_2), сірки (SO_2), окис вуглецю (CO), вуглеводні (C_2H_4) і частинки (сажа, зола).

У зв'язку з посиленням національних та міжнародних екологічних норм і правил протягом більше ніж трьох десятиліть провідні дизелебудівні компанії приступили до практичного розв'язання завдань щодо захисту навколишнього середовища від шкідливого токсичного впливу відпрацьованих вихлопних газів дизелів. Проте на сьогоднішній день жодний сучасний судовий технологічний контур не передбачає використання системи обробки ВГ, що викидаються у навколишнє середовище. Це вказує на існування нерозв'язаних проблем як наукового, так і практичного плану.

Оцінка стану проблеми абсорбційної очистки вихлопних газів робіт показала, що серед відомих на теперішній час технологій фільтрації найбільш доцільною є технологія, яка базується на контактній взаємодії рухомого потоку ВГ з нерухомою рідиною (водою) всередині робочої камери з жорсткими і непроникними стінками. Процес взаємодії ВГ з водою характеризується високими значеннями коефіцієнтів міжфазного переносу енергії і речовини, а також можливістю отримання великих міжфазових поверхонь в одиниці об'єму середовища.

На даний час налічується до двадцяти способів очищення вихлопних газів дизелів, які поділяють на сухі вологі і електричні. Найбільш перспективним способом дозволяє повністю видалити компоненти NO_x , SO_x і CO_x з газів, залишається каталітичний. Однак цей спосіб, як і термічний, має ряд істотних недоліків, особливо те, що вимагає при очищенні високих температур ($750-1200^\circ C$) вихлопних газів.

Звертає на себе увагу перспективність процесу барботажу води газовими бульбашками, проте нелінійність гідродинамічних процесів при підйомі бульбашок створює проблему нестійкості потоку вихлопних газів, а також проблемні питання абсорбційних якостей утримуваного шару води в газовому потоці, забезпечення його рівномірності, особливості функціонування, контролю та управління фільтруючого пристрою, що може становити інтерес для подальшого дослідження.

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

За результатами огляду наукової і технічної літератури встановлено, що при експлуатації судна водного транспорту залишаються невирішеними дві основні проблеми. Перша проблема відноситься до екологічного напрямку – судові вихлопні гази містять велику кількість шкідливих токсичних складових. Друга проблема відноситься до високих значень температури вихлопних

газів. Зазвичай при експлуатації СЕУ вони відповідають діапазону $t = 180 - 290$ °С, що свідомо знижує енергетичний ККД судна, вказує на нераціональність використання палива і негативно позначається на рентабельності роботи судна під час рейсу.

Актуальність очищення вихлопних газів шляхом утилізації залишкової теплової енергії і видаленні шкідливих і небезпечних домішок викликана відсутністю універсальних технологічних і конструктивних рішень призначених для суднового дизеля.

Передбачувана наукова новизна полягає у створенні способу одночасних фільтрації і охолодження вихлопних газів дизеля, що відрізняється максимальною ефективністю і гомохронністю протікання процесів тепломасообміну в системі «охолоджувач, очисник – вихлопні гази» і розробки ФОУ.

Економічна ефективність дисертаційного дослідження визначається відношенням витрат на теоретичні докази і експериментальне їх підтвердження, проектування і виготовлення ФОУ, а також її випробування на працюючому дизелі до економії коштів від штрафів та арешту суден органами держави порту за недотримання конвенційних вимог.

Дослідження зі створення засобів очистки відпрацьованих вихлопних газів дизеля відповідає Транспортній стратегії України до 2020 року (розпорядження Кабінету Міністрів України №2174-р від 20 жовтня 2010 р.), Закону України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2020 р.» (№ 2818-VI від 21 грудня 2010 р.), паспорту спеціальності 05.05.03, профілю наукової школи кафедри технічної експлуатації флоту, а також науково-дослідній роботі НУ «ОМА» (НДР «Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології», ДР № 0114U000346 (2014-2017 рр.)).

За допомогою методу системного аналізу та загальних методів наукового пізнання була розроблена технологічна схема дослідження. Здійснено постановку цілі дослідження та висунута робоча гіпотеза. Сформульовані головне та допоміжні завдання. Визначено об'єкт дослідження і предмет дослідження.

На основі технологічної карти розроблена загальна методика дослідження. Здійснено вибір методів дослідження та його обґрунтування. Визначено, що у ході дослідження будуть використанні графоаналітичні методи, метод кінцевих елементів та статистичної обробки даних. З метою експериментальної перевірки розробленої ФОУ було вирішено проводити натурні експерименти. Схема дослідної установки представлена на рис. 1.

У **третьому розділі** наводиться розв'язок першого допоміжного завдання, яке полягало в аналізі процесів тепломасообміну і суцільності потоку вихлопних газів у барботуючому шарі води системи «газ-вода».

З метою встановлення кількісних характеристик процесу тепломасообміну в системі «газ – вода» була розроблена математична модель процесів фільтрації, охолодження і суцільності потоку бульбашок вихлопних газів в нерухомій рідині, що представлена системою рівнянь (1).

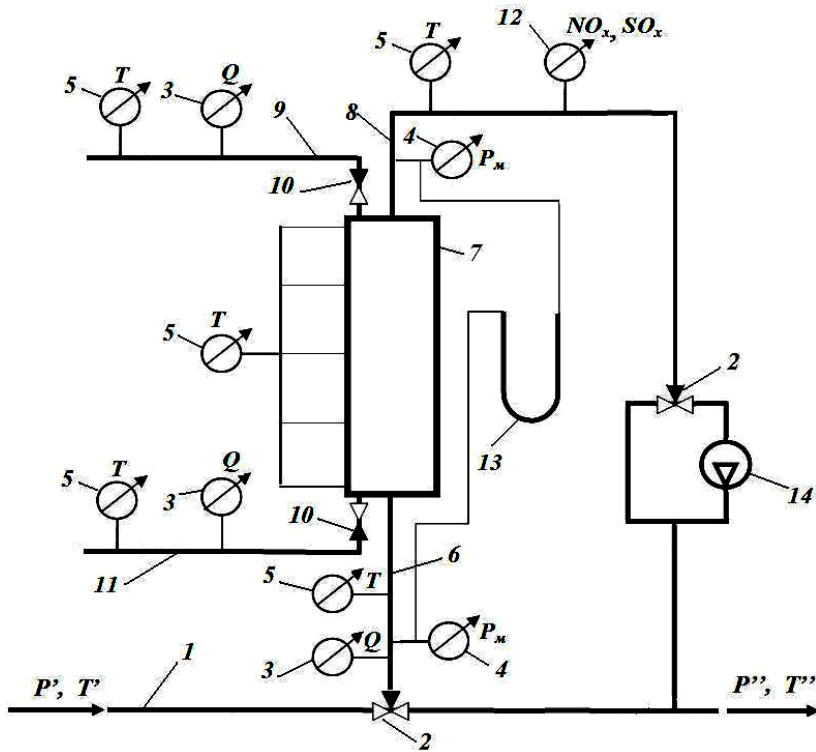


Рис. 1. Схема дослідної установки:

- 1 – судновий димохід;
- 2 – автоматичний клапан;
- 3 – витратомір;
- 4 – манометр;
- 5 – термометр;
- 6 – лінія подачі ВГ в ФОЕ;
- 7 – ФОЕ;
- 8 – лінія відведення оброблених ВГ;
- 9 – лінія подачі води у фільтраційний елемент;
- 10 – незворотний клапан;
- 11 – лінія дренажу забрудненої води;
- 12 – газоаналізатор;
- 13 – дифманометр;
- 14 – вентилятор.

$$\begin{cases}
 \frac{\partial m}{\partial t} = A_{\zeta} \sqrt{D_t \frac{1}{f_n} \zeta \frac{\rho V^3}{2\sigma}} (C_n - C), \\
 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho_{\text{в.г}} c_{\text{п}}} \left[\frac{\partial (\lambda_{\text{в.г}} \text{grad}(T))}{\partial x} + \frac{\partial (\lambda_{\text{в.г}} \text{grad}(T))}{\partial y} \right] - V_{\text{в.г}} \text{grad}(T) + \frac{1}{\rho_{\text{в.г}} c_{\text{п}}} \frac{dP}{dt}, \\
 \frac{dV^i}{dt} = F + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial y} \right) - \frac{1}{\rho} \sum_j \left[\frac{\partial (\rho (V^i - V)(V^j - V))}{\partial x} + \frac{\partial (\rho (V^i - V)(V^j - V))}{\partial y} \right],
 \end{cases} \quad (1)$$

де m – маса A_{ζ} – секундна робота, f_n – формпараметр бульбашки вихлопних газів, ρ – густина, ζ – коефіцієнт гідравлічного опору, σ – коефіцієнт поверхневого натягу, C_n – концентрація газу при повному насиченні води; C – поточна концентрація розчиненого в рідині газу, D_t – коефіцієнт турбулентної дифузії; V – швидкість спливання бульбашки вихлопних газів, T – температура, $\lambda_{\text{в.г}}$ – теплопровідність вихлопних газів, $\rho_{\text{в.г}}$ – густина вихлопних газів, $c_{\text{п}}$ – теплоємність бульбашки газу.

Математична модель відтворює процеси швидкості масопередачі основних компонент вихлопних газів (CO , SO_x , NO_x) у воду, теплопровідності ВГ всередині бульбашки, що підіймається у воді, та рух багатокомпонентного потоку газів всередині однорідної рідини.

Науковим результатом розв'язання першого допоміжного завдання є математична модель тепломасообміну окремих бульбашок вихлопних газів у нерухомій воді на межі їх розділу, основні характеристики якої представлені в часовій диференціальній формі, яка залежить від діаметра

бульбашок, їх складу і початкового стану, але без врахування обмежень пов'язаних з об'ємом взаємодіючих робочих тіл і режиму їх руху в процесі взаємодії.

На початку **четвертого розділу** виконується розв'язання другого і третього допоміжних завдань, що полягали в оцінці ступеня впливу геометричних елементів ФОУ обробки вихлопних газів на інтенсивність процесів тепломасообміну та розробки конструктивних рішень по забезпеченню фізичних умов: рівномірності подачі потоку газів на вході в ФОЕ; запобіганню виносу води газами на виході з нього, а інтенсифікації міжфазної взаємодії в системі «газ–вода» при барботажі.

У ході розв'язання другого допоміжного завдання було отримано адаптовану до геометричних розмірів досліджуваного ФОЕ математичну модель процесів фільтрації і охолодження шляхом використання кінцево-різницевого методу. Модель у кожній точці на площині, число яких дорівнює i , на невідомому розрахунковому часовому рівні визначає швидкість, тиск, температура і концентрації складових компонент судових ВГ $V_{i,j}$, $P_{i,j}$, $T_{i,j}$, $C_{NOxi,j}$, $C_{SOxi,j}$ (рис. 2) із використанням наведених в табл. 1 формул дискретизації.

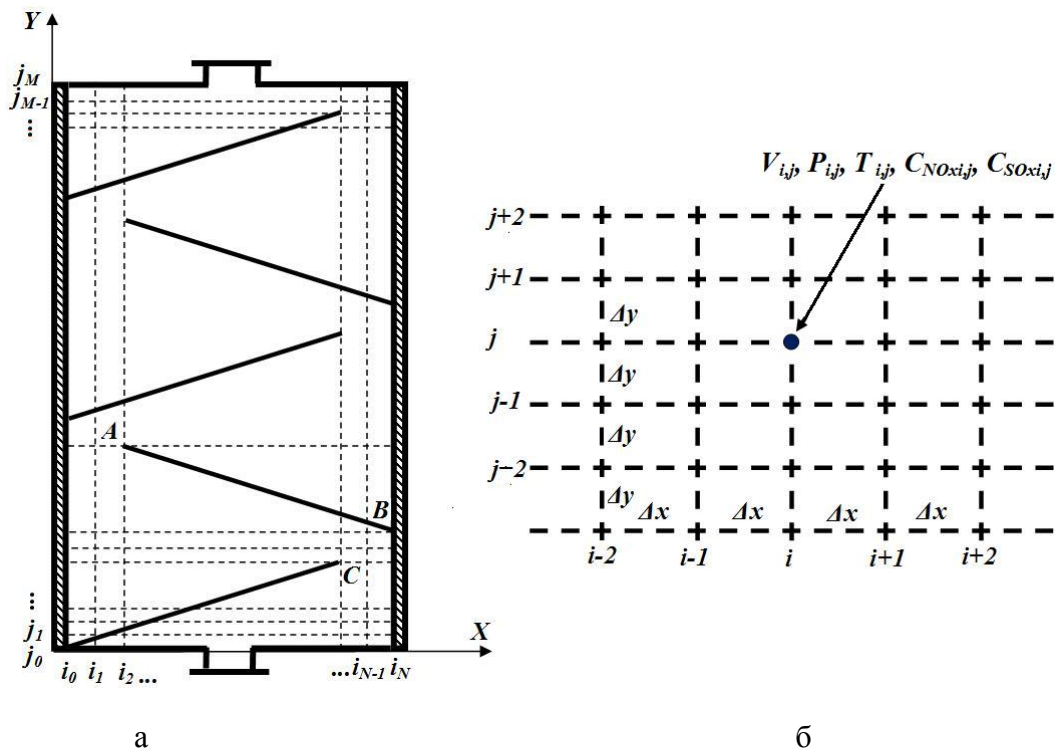


Рис. 2. Розрахункова сітка:

а – розрахунковий об'єм;

б – виділена область розрахункової сітки

Здійснений шляхом чисельного моделювання аналіз ступеня впливу геометричної конфігурації робочої камери ФОЕ ВГ на швидкість процесу обробки вказав на необхідність установки на стінках камери ФОЕ направляючих пластин під кутом 30° до площини поперечного перерізу камери. У цьому випадку при висоті камери 2,5 метра ефективний шлях потоку бульбашок збільшується у 1,5 рази, а корисний перепад температур по висоті фільтраційної колони – до 12°C на 1 відн. од. висоти камери у порівнянні з порожнім циліндром. Темп

охолодження вихлопних газів при цьому склав $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ на метр висоти ФОЕ при температурі води на вході в елемент, що знаходиться в межах $26 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 3).

Таблиця 1

Формули дискретизації похідних першого порядку

Найменування доданка	Математичний вираз
Лівосторонні різниці	$\frac{\partial V_{i,j}^n}{\partial x} = \frac{3V_{i,j}^{n-1} - 4V_{i-1,j}^{n-1} + V_{i-2,j}^{n-1}}{2\Delta x}$
Правосторонні різниці	$\frac{\partial V_{i,j}^n}{\partial x} = \frac{-3V_{i,j}^{n-1} + 4V_{i+1,j}^{n-1} - V_{i+2,j}^{n-1}}{2\Delta x}$
Центральні різниці	$\frac{\partial V_{i,j}^n}{\partial x} = \frac{V_{i+1,j}^{n-1} - V_{i-1,j}^{n-1}}{2\Delta x}$
Нелінійний доданок	$V \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{1}{2} (3V_{i,j}^n - V_{i,j}^{n-1}) \frac{\partial V}{\partial x}$
Нестаціонарний доданок	$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{3}{2} V_{i,j}^{n+1} - 2V_{i,j}^n + \frac{1}{2} V_{i,j}^{n-1} \right)$

Було знайдено величину швидкості дифузії NO_x компоненти ВГ у воду. Як видно з рис. 4, по висоті колони величина V^{NO_x} змінювалася неоднаково. Встановлено, що максимальний відбір токсичною компоненти ВГ спостерігався в її нижній частині. Починаючи з висоти, що перевищує $0,7$ висоти робочої камери H дифузія оксидів азоту в воду різко падала, а починаючи з висоти $0,8H$ приймала практично нульове значення.

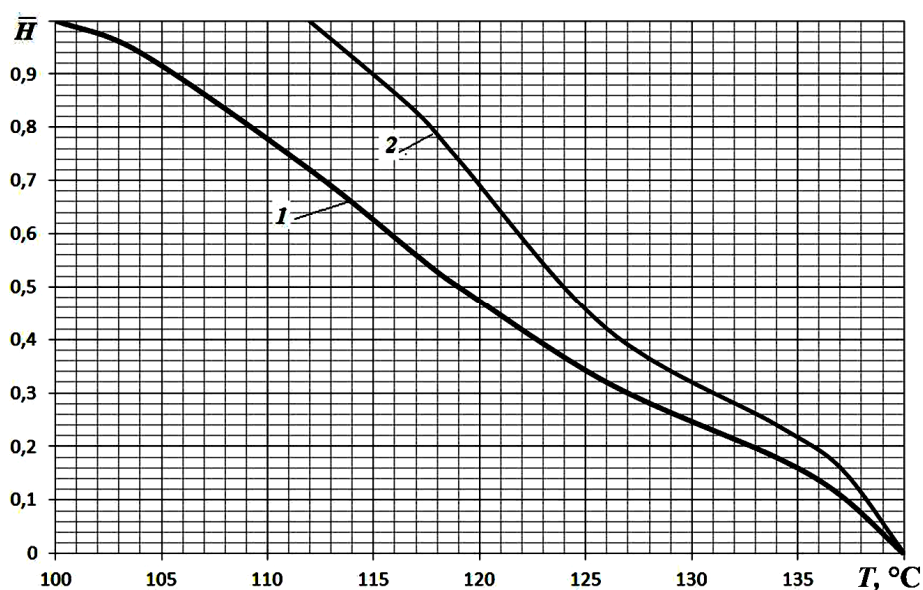


Рис. 3. Розподіл температури по висоті колони:

1 – камера з направляючими пластинами; 2 – пустотіла камера

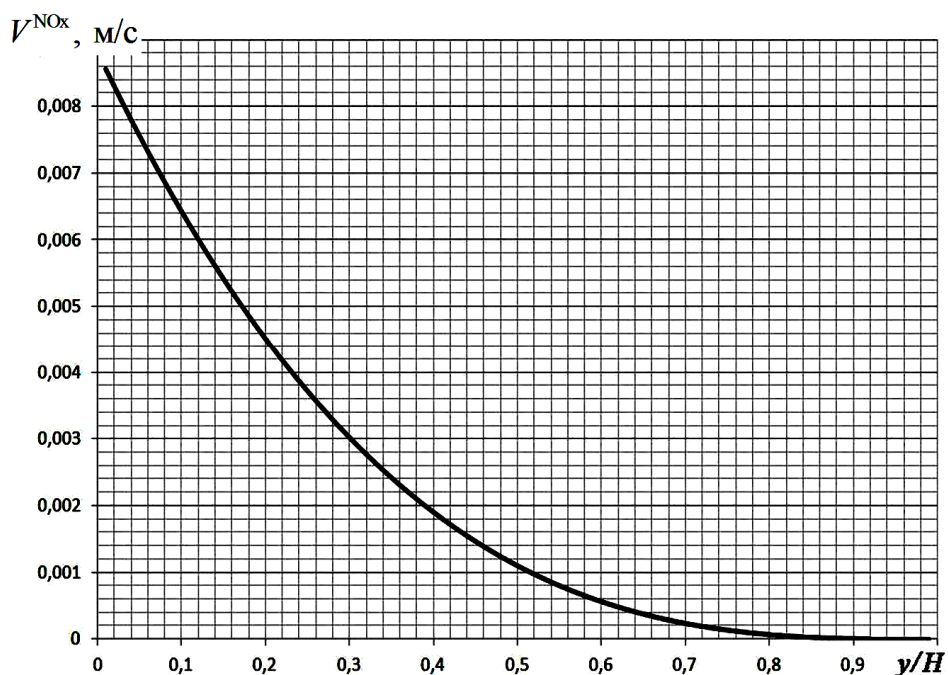


Рис. 4. Зміна швидкості дифузії оксиду азоту по висоті робочої камери

Науковим результатом розв'язку другого допоміжного завдання є наступні твердження:

- максимальний відбір оксиду азоту з вихлопних газів досягається в нижній частині ФОЕ, а починаючи з висоти, що перевищує 0,7 висоти робочої камери H , дифузія оксидів азоту в воду різко падає і практично припиняється при збільшенні висоти до 0,8 H і вище;
- площа контактної взаємодії вихлопних газів з водою залежить від швидкості їх введення в ФОЕ – починаючи з величини 5 м/с, вона різко збільшується більш ніж на порядок, і саме це значення може розглядатися, як нижній поріг швидкості подачі суднових вихлопних газів на обробку.

Для знаходження розв'язку третього допоміжного завдання з метою конструктивного забезпечення фізичних умов рівномірності подачі потоку газів на вході в ФОЕ, запобігання виносу води газами на виході з нього, а також інтенсифікації міжфазної взаємодії в системі «газ–вода» при барботажі були проведені експериментальні модельні дослідження ФОЕ.

На рис. 5 показана розрахункова залежність тиску всередині бульбашки газу від швидкості подачі ВГ у фільтраційну камеру, висота якої дорівнює 2,5 м. Як видно на графіку, робоче значення тиску, що є необхідним для подолання гідростатичного напору фільтраційної води отримувалось при значенні швидкості подачі ВГ у 5 м/с і більше. Як очікувалось, значення тиску вихлопних газів в камері обладнаній направляючими пластинами більше ніж в два рази перевищує значення тиску в пустотілій камері.

Зміна швидкості підйому бульбашок вихлопних газів різного діаметру в залежності від їх швидкості на вході в ФОЕ має лінійний характер (рис. 6). Однак зростання швидкості при збільшенні діаметра бульбашки є явно нелінійним і вимагає подальшого вивчення. Діаметр бульбашки d_n задається на дні колони за допомогою розподільчої решітки (рис. 7). Було

встановлено, що необхідним діаметром бульбашки для забезпечення максимальної ефективності тепломасообміну є величина 5 мм.

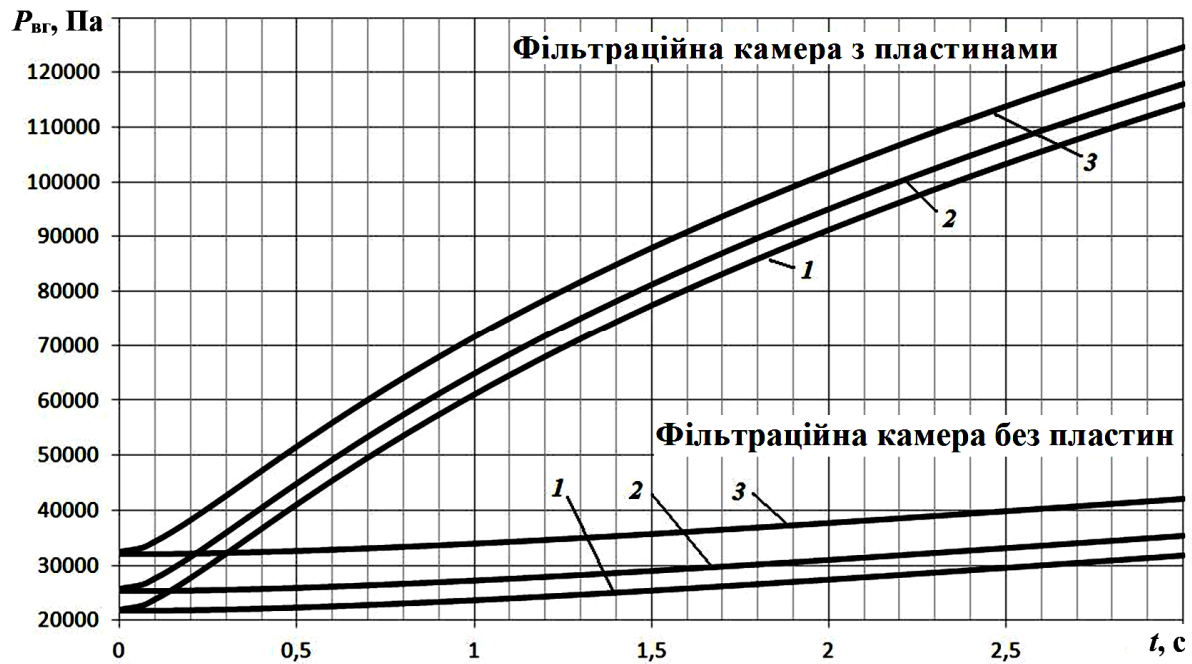


Рис. 5. Характер зміни розрахункового тиску всередині бульбашок вихлопних газів на вході в ФОЕ при різних швидкостях їх подачі:

1 – $V_{vx} = 2$ м/с; 2 – $V_{vx} = 3,4$ м/с; 3 – $V_{vx} = 5$ м/с.

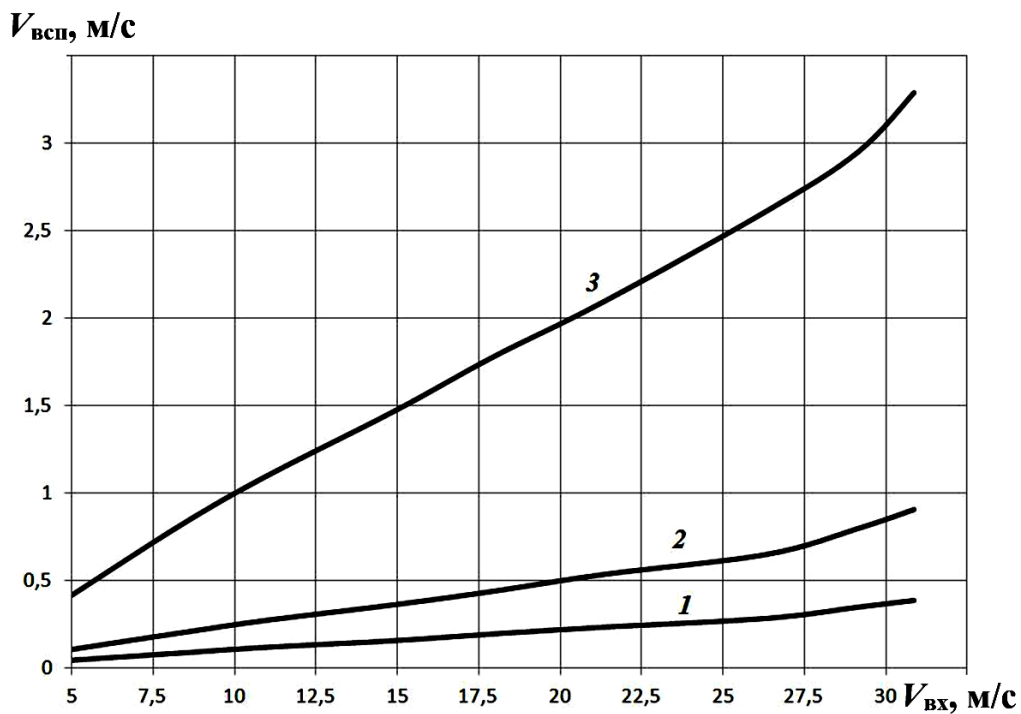


Рис. 6. Зміна швидкості підйому бульбашок вихлопних газів в залежності від їх діаметра і швидкості на вході в ФОЕ:

1 – $d_n = 3$ мм; 2 – $d_n = 5$ мм; 3 – $d_n = 6$ мм

Оскільки частина води буде уноситися разом із вихлопними газами, для затримки капель води у верхній частині фільтраційної камери ФОЕ необхідно встановлювати каплеуловлювачі (рис. 8). Конструктивно останні представляють собою дві направляючі решітки, прохідний перетин яких знаходиться під кутом 45° до потоку газів і 90° між собою.

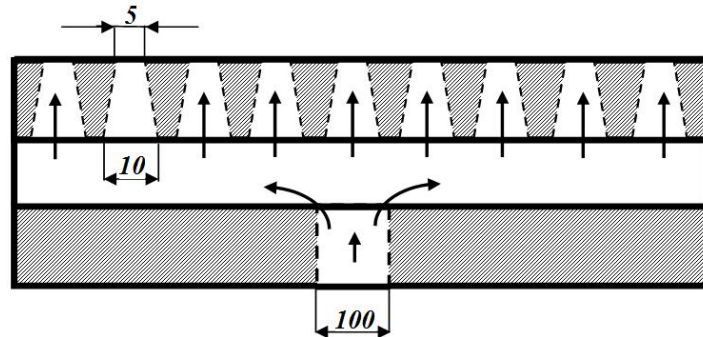


Рис. 7. Розподільча решітка ФОЕ

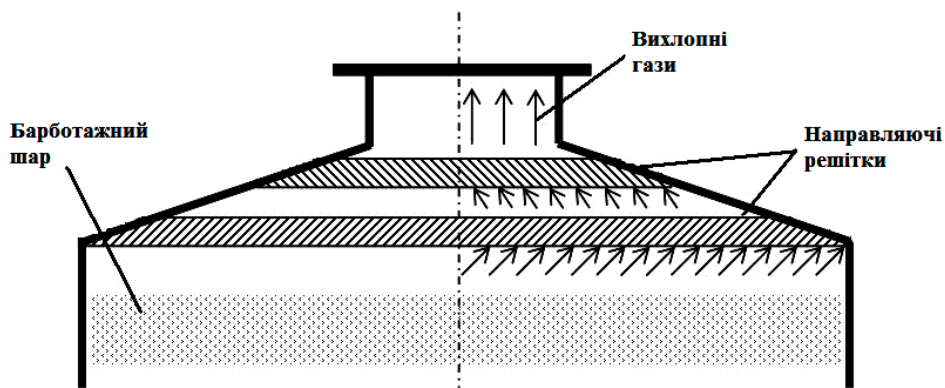


Рис. 8. Розміщення решіток для уловлювання капель води

Науковим результатом знайденого розв'язку третього допоміжного завдання є встановлений факт того, що для підвищення ефективності процесу обробки судових вихлопних газів необхідно збільшувати поверхню контакту судових вихлопних бульбашок газів з водою всередині ФОЕ. Конструктивно це можливо зробити шляхом генерування в нижній частині елемента газових бульбашок мінімального діаметра і вибором кута нахилу напрямних пластин ФОЕ рівним 30° , що забезпечить у 1,5 разів довший контакт вихлопних газів з водою при збереженні допустимого рівня гідростатичного опору.

Четвертий розділ закінчується розв'язанням головного завдання дослідження – синтезу принципу роботи ФОУ вихлопних газів судового дизеля. З цією метою були проведені натурні дослідження ФОУ і визначені умови забезпечення ефективності процесів фільтрації і охолодження.

Проведення натурних експериментальних досліджень в умовах роботи судової енергетичної установки на судні Chemical product tanker "Аму" було здійснено із використанням розробленої експериментальної установки (див. рис. 1).

Відпрацьовані ВГ подавалися на очистку по судновому димоходу 1. Канал, для підведення газів був циліндричної форми діаметром 1,5 м. На лінії подачі ВГ 6 в ФОВ 7 було встановлено ряд приладів. Витрата ВГ контролювалася за допомогою ультразвукового витратоміра 3. Він був встановлений на вхідній ежекторній ділянці ФОВ 7. Тиск і температура ВГ на вході в камеру обробки вимірювалися за допомогою манометра 4 і термометра 5, відповідно. Падіння температури по висоті ФОВ контролювалося в п'яти створах за допомогою термопар, які були складовою частиною автоматичної системи управління.

При проведенні експериментів було досліджено, як змінюється температура ВГ по висоті фільтраційної колони. Як і слід було очікувати, зростання швидкості потоку ВГ на вході в фільтраційну колону призводило до погіршення процесу відбору тепла (рис. 9). Скорочення часу контактної взаємодії призводило до зменшення різниці температур ВГ на вході і виході в установку. Як видно на графіку, зміна швидкості всього на 2,123 м/с призвела до збільшення температури на виході з 90 до 98 °С.

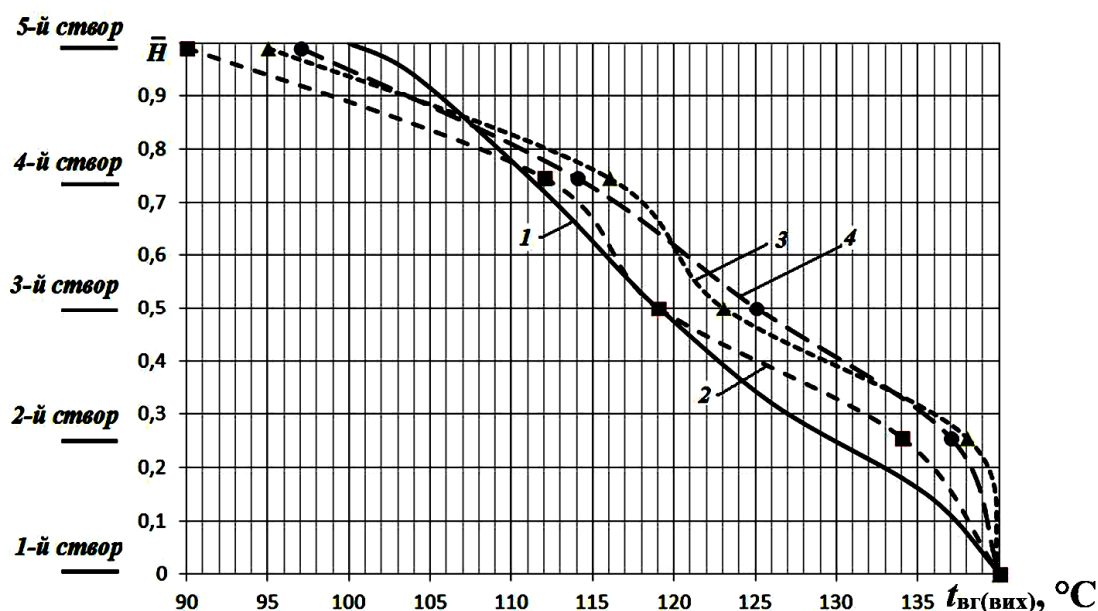


Рис. 9. Розподіл температури по висоті колони в залежності від швидкості подачі ВГ: 1 – розрахунок; 2 – $V = 1,415$ м/с; 3 – $V = 2,739$ м/с; 4 – $V = 3,538$ м/с

Запропонована емпірична залежність зміни температури вихлопних газів в залежності від висоти ФОВ, що представлена кусочно-лінійною функцією:

$$t_{\text{ВГ(вих)}} = \begin{cases} t_{\text{ВГ(вих)}} - 14H & \text{при } 0 \leq H \leq 1; \\ t_{\text{ВГ(вих)}} - 16(H - 0,125) & \text{при } 1 \leq H \leq 2; \\ t_{\text{ВГ(вих)}} - 30(H - 1) & \text{при } 2 \leq H \leq 2,5. \end{cases} \quad (2)$$

В ході досліджень було виконано оцінку ступеня ефективності очищення ВГ від шкідливих складових NO_x і SO_x . На рис. 10 і 11 для різних значень площі контакту ВГ з водою показані

різниці концентрацій на вході і виході з установки в залежності від площі контактної взаємодії при барботажі. Площа взаємодії задавалась шляхом генерування на вході ФОЕ бульбашок двох різних діаметрів. Отримані результати добре узгоджуються з відомим якісним результатом – оксиди сірки у воді розчиняються менш інтенсивно, ніж оксиди азоту.

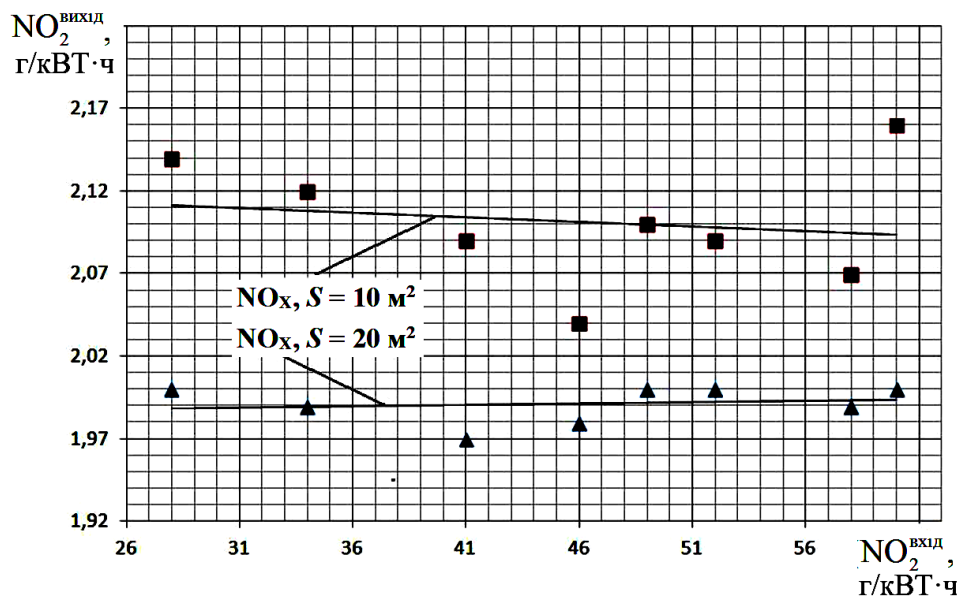


Рис. 10. Падіння концентрації NO_x в залежності від площі контакту

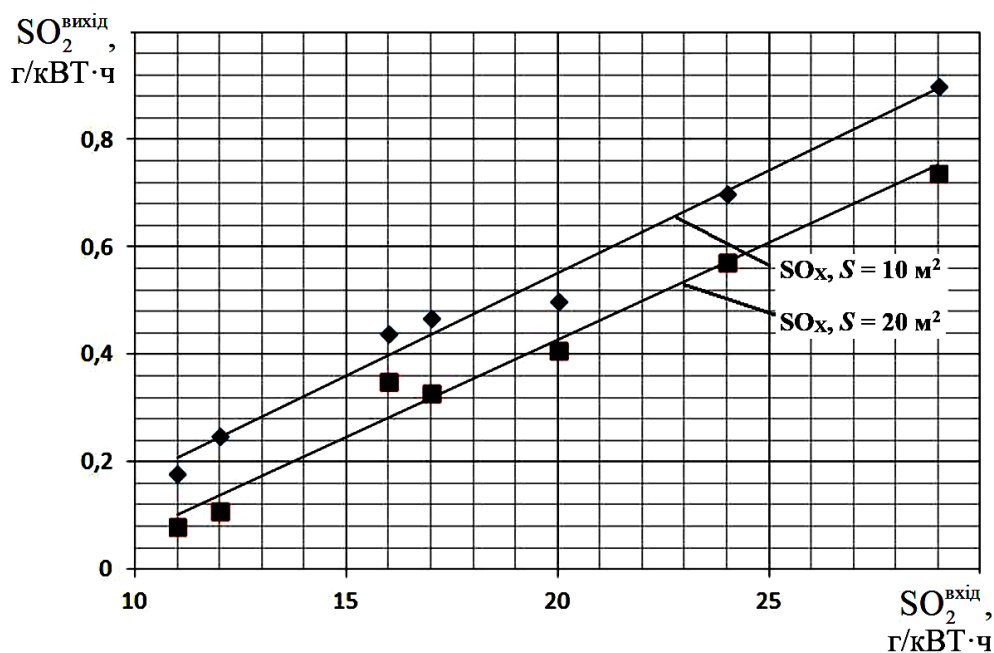


Рис. 11. Падіння концентрації SO_x в залежності від площі контакту

Наведені на рис. 10 і 11 результати отримані при однакових умовах експерименту, але при цьому їх порівняння показує, що падіння концентрації оксидів сірки було на 2% менше ніж оксидів азоту.

Мінімальна кількість елементів також лімітується величиною остаточної температури ВГ. При роботі установки її граничне значення не повинно перевищувати величину 90 °С.

Емпіричні залежності $\text{NO}_2^{\text{вихід}} = f(\text{NO}_2^{\text{вхід}}, S)$ і $\text{SO}_2^{\text{вихід}} = f(\text{SO}_2^{\text{вхід}}, S)$ представляються у лінійному вигляді:

$$\text{NO}_2^{\text{вихід}} = (\text{NO}_2^{\text{вхід}}) / [0,1 - 0,005S + (0,425 + 3,75 \cdot 10^{-3} S) \text{NO}_2^{\text{вхід}}], \quad (3)$$

і

$$\text{SO}_2^{\text{вихід}} = (0,0455 - 5,5 \cdot 10^{-4} S) \text{SO}_2^{\text{вхід}} - 0,004S - 0,22. \quad (4)$$

У результаті розв'язання головного завдання дослідження встановлено принцип роботи та експлуатаційні параметри ФОУ вихлопних газів:

- функціональні:
 - ступінь охолодження: до 30%;
 - ступінь фільтрації NO_x : 99,7%;
 - ступінь фільтрації SO_x : 97,7%;
- структурні:
 - кількість ФОЕ (од.): 4;
 - резерв на регенерацію ФОЕ (од.): 1;
 - зв'язки однозначні;
- управління:
 - регульований параметр: падіння тиску газів в ФОЕ (максимум $1,25 \cdot 10^5$ Па);
 - тип управління – дискретний;
 - порядок роботи ФОЕ ступінчастий;
 - діапазон роботи ФОЕ ($\text{м}^3/\text{с}$): до 5,0;
 - діапазон роботи ФОУи ($\text{м}^3/\text{с}$): до 15,0 (max 20,0);
 - час розгону ФОЕ по тиску газів (с): 3,0;
 - постійна часу ФОЕ по тиску газів (с): 1,0;
 - період циклічної роботи ФОЕ (с): $1500 \div 2000$;
 - період циклу регенерації ФОЕ (с): $300 \div 360$.

Науковим результатом знайденого розв'язку головного завдання дослідження стало встановлення, того що для підвищення ефективності очищення вихлопних газів від шкідливих складових NO_x і SO_x при незмінному значенні об'ємної витрати і однакових конструктивних розмірах установки визначальним фактором є площа міжфазного контакту, а також те, що оксиди сірки у воді розчиняються менш інтенсивно, ніж оксиди азоту. Число працюючих ФОЕ, які повинні бути задіяні в робочому процесі, визначається навантаженням на дизель, а періодичність циклічної роботи ФОЕ встановлюється по падінню концентрації NO_x і SO_x в газах на виході з ФОЕ.

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

Методика тепломасообмінного розрахунку представлена розрахунковою математичною моделлю, що дозволяє визначити як масогабаритні показники ФОУ та ФОЕ, так і техніко-експлуатаційні вимоги до них. Виконання математичного розрахунку проводиться у чотири етапи:

- розрахунок вхідних характеристик потоку ВГ,
- визначення геометричних розмірів робочої камери установки, які безпосередньо впливають на якість очищення,
- розрахунок матеріального балансу суднових ВГ при їх проходженні через ФОВ);
- оцінка викидів ВГ в навколишній простір.

Зіставлення результатів, що одержуються на підставі наведеної методики конструкторського розрахунку судової установки фільтрації і охолодження ВГ, з результатами натурних досліджень дозволило визначити відносну похибку моделювання, що склала 4,7%.

Розроблена і запатентована автором експлуатаційна схема судової ФОВ (рис. 12) для роботи судового дизеля на всіх експлуатаційних режимах передбачає паралельне використання від двох до чотирьох ФОВ. При цьому вихлопні газу, які подаються на очищення із загального судового газоходу 1, направляються по окремим газоходам до ФОВ 3. Подача газу та води по лініях 5 до елементів керується дистанційними клапанами 2 і 7, відповідно.

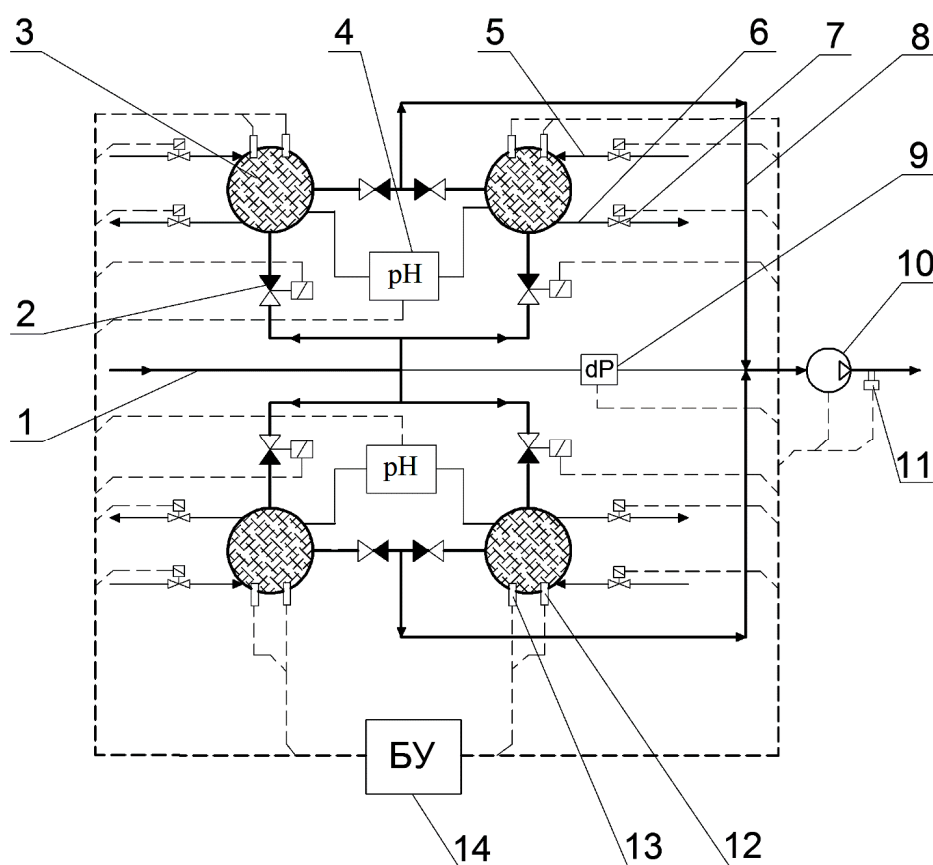


Рис. 12. Експлуатаційна схема судової ФОВ вихлопних газів

По висоті ФОВ температура і концентрація шкідливих домішок у вихлопних газах буде зменшуватися, досягаючи свого мінімуму на виході з камери очистки. Концентрація шкідливих домішків на виході з елементів контролюється по показнику pH води в камері ФОВ за допомогою вимірювача pH 4, перепад тиску – диференціальним манометром 9, а температура газів на виході з ФОВ – термометром 11.

Для досягнення максимальної ефективності процесів фільтрації і охолодження ВГ в судових умовах експлуатації були розроблені структурна схема і алгоритм роботи системи автоматичного управління судовим вузлом обробки ВГ. Закон управління ФОУ описується емпіричною функцією, що враховує стан робочих клапанів ФОЕ ($i = 1..4$), об'ємну витрату газів, що подаються на очищення; рівень води в i -му елементі; температурний діапазон для вихлопних газів на вході в ФОУ (120-600 °С); температурний діапазон для вихлопних газів на виході з ФОУ (60-90 °С); значення рН води в i -му елементі.

Повністю очищені і охолоджені вихлопні гази відводяться по лініях 8. З метою інтенсифікації процесу відведення на виході ФОУ встановлений вентилятор 10. Для контролю за рівнем води в ФОЕ і її температурою встановлені відповідні датчики 12 і 13. Блок управління 14 призначений для реалізації, описаної вище функції управління.

При розгляді загальних вимог до матеріалів, що використовуються при виготовленні судового вузла обробки і очищення ВГ показано, що вони є стандартними по відношенню до теплообмінних апаратів і установок, що експлуатуються. Всі матеріали повинні мати теплостійкість і стійкість до механічних і вібраційних навантажень, окислення і корозії.

При розгляді питань експлуатації судової ФОУ запропоновані дві схеми технологічні схеми використання: безпосередньо за турбоагнітачем та після котла-утилізатора.

Друга схема (рис. 13) є завідома краще, оскільки температура ВГ, що подаються на обробку, буде значно нижче, ніж в попередньому варіанті і частина домішок у вигляді летючого попелу буде затримуватися в утилізаційному котлі. Тривалість експлуатації ФОЕ і ступінь абразивного зносу їх робочих елементів буде також перевершувати показники першої схеми підключення.

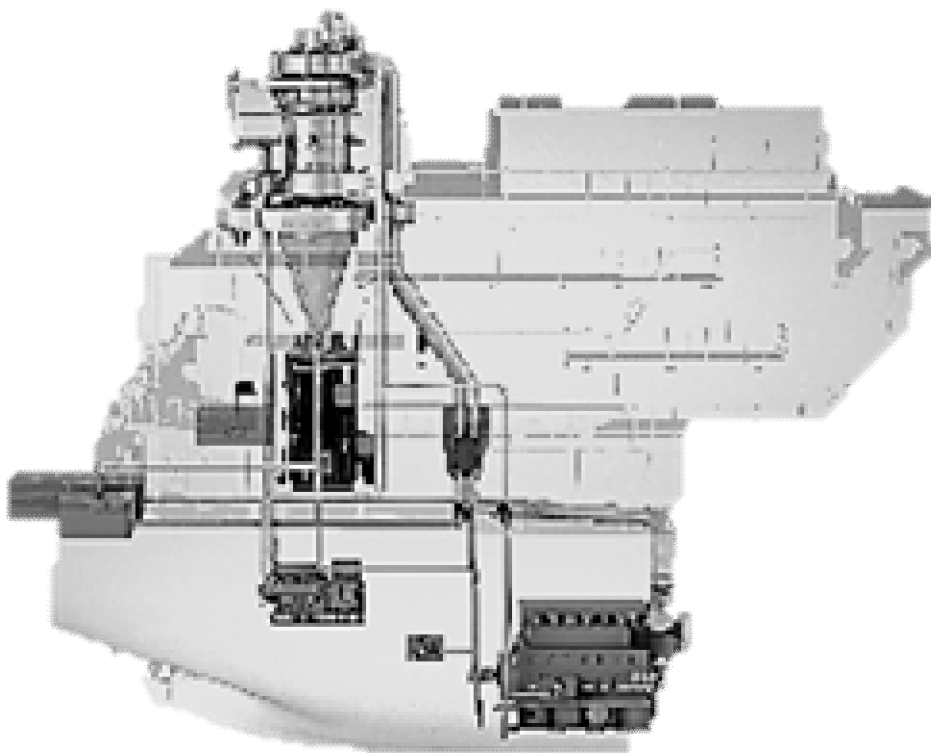


Рис. 13. Розроблена ФОУ у складі судового технологічного контура

ВИСНОВКИ

Дисертаційне дослідження містить теоретичне узагальнення і новий розв'язок актуального науково-практичного завдання створення принципу функціонування фільтро-охолоджуючої установки шляхом удосконалення процесів фільтрації і охолодження відпрацьованих вихлопних газів суднового дизеля. Гостра проблема екологічного забруднення навколишнього середовища шкідливими і токсичними складовими судових продуктів згоряння палива на час початку дослідження залишалася невирішеною, оскільки жодна з існуючих судових технологічних схем утилізації відхідних вихлопних газів не передбачала у своєму технологічному контурі систему їх очищення.

Удосконалення очищення вихлопних газів забезпечується за рахунок уніфікації та інтенсифікації процесів фільтрації і охолодження газового потоку шляхом міжфазної контактної взаємодії у барботуючому шарі води.

Розроблена математична модель процесів охолодження і фільтрації повною мірою відтворює кількісний взаємозв'язок між взаємодіючими речовинами в системі «газ-вода», що дозволило визначити необхідні умови для максимальної інтенсифікації тепломасообміну. Адекватність моделі залежить від вибраного методу чисельного розв'язку рівнянь у частинних похідних. Використаний у дослідженні метод кінцевих елементів показав добре узгодження з експериментом, оскільки відносна похибка моделювання не перевищувала 4,7 %.

Зменшення концентрації шкідливих сполук NO_x на 99,7%, SO_x на 97,7% та теплового навантаження на 30% здійснюється дискретною зміною площі контактної взаємодії газів з водою у герметичному ФОЕ у діапазоні об'ємної витрати газів 2-5 $\text{м}^3/\text{с}$. Для збільшення площі контакту запропоновано нове конструктивне рішення по установці напрямних пластин під кутом 30° на стінках робочої камери ФОЕ, за рахунок чого у 1,5 рази збільшується час контактної взаємодії, і розподільчої решітки з отворами, розмір яких забезпечує генерування бульбашок необхідного діаметру у 5 мм.

Експлуатація судової ФОУ ВГ повинна проводитися за принципом почергового використання набору ФОЕ, що пов'язано з необхідністю утилізації тепла та накопиченої твердої фази у фільтраційній воді. Зміна продуктивності в більшу або меншу сторону має досягатися зміною кількості одночасно працюючих ФОЕ.

Розроблена методика тепломасообмінного розрахунку, конструювання, виготовлення та випробування ФОУ вихлопних газів враховує всі експлуатаційні параметри суднового дизеля, що дозволяє безпосереднє інтегрування ФОУ у будь-який технологічний контур.

Результати дисертаційного дослідження впровадженні і використовуються у судноплавній компанії TB Marine Hamburg, що дозволило знизити температуру судових вихлопних газів, в

середньому в 1,5 рази, а зниження викидів SO_x при роботі судна на паливі з високим вмістом сірки до показників до рівня, що відповідає використанню палива з низьким вмістом сірки, та в НУ «ОМА» при проведенні лекційних занять з дисциплін оптимізація режимів роботи судових енергетичних установок і технічна експлуатація судових енергетичних установок і в НДР «Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Голиков, В. А. Системный подход к решению задач повышения эффективности эксплуатации судовых энергетических установок [Текст] / В. А. Голиков, М. В. Голубев // Судовые энергетические установки: научно технический сборник. Вып. 10. – Одесса: ОНМА, 2004. – С. 50–53.
2. Голиков, В. А. Энергетическая эффективность судовых дизельных установок [Текст] / В. А. Голиков, М. В. Голубев // Судовые энергетические установки: научно технический сборник. Вып. 12. – Одесса: ОНМА, 2005. – С. 66–75.
3. Голубев, М. В. Исследование характерных процессов при обработке судовых дымовых газов [Текст] / М. В. Голубев // Проблеми техніки: науково-виробничий журнал. – Одеса: ОНМУ, 2013. – №3. – С.133–141.
4. Голубев, М. В. Совершенствование системы фильтрации уходящих газов на судовых дизельных установках [Текст] / М. В. Голубев // Вісник національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”. Машинобудування. – Київ: НТУУ “КПІ”, 2013. – 68. – С.157–165.
5. Голиков, В. А. Управление процессом фильтрации продуктов сгорания на судовых энергетических установках [Текст] / В. А. Голиков, М. В. Голубев // Одесса: Куприенко. – Сборник научных трудов SWorld, 2013. Т.2. – С.15–18.
6. Golubev, M. V. Automatization of the ship system for exhaust gases cleaning [Text] / M.V. Golubev // Электротехнические и компьютерные системы: научно-технический журнал. – Киев: “Техника”, 2013. – № 10 (86). – С.74–79.
7. Голубев, М. В. / Экспериментальное изучение процесса очистки судовых дымовых газов от токсичных составляющих [Текст] / М. В. Голубев // Судовые энергетические установки: научно-технический сборник. Одесса: ОНМА, 2014. – №31. – С.44 – 58.
8. Голубев, М. В. Современные проблемы технической безопасности судоходства [Текст] / М. В. Голубев // Proceedings of the International scientific-practical conference «Safety of shipping and human element», August 5-8, 2004. – Odessa. – P. 177-179;
9. Голубев, М. В. Математическая модель энергосберегающей системы СДУ [Текст] / М. В. Голубев // Матеріали Міжнародної наук. конф. «Інтелектуальні системи прийняття рішень та прикладні аспекти інформаційних технологій (ISDMIT'2005)», 18-21 травня 2005 р. – Євпаторія. – С. 23–25;

10. Голубев, М. В. Повышение экономической эффективности энергетических установок газозовов [Текст] / М. В. Голубев // Матеріали Міжнародної наук. та наук.-метод. конф. «Сучасні проблеми суднової енергетики – 2007», Одеса, 15-17 травня 2007 р. – С. 37-40;
11. Голубев, М. В. Судовая система очистки дымовых газов [Текст] / М. В. Голубев // Матеріали XIV Міжнародної наук.-тех. конф. «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 2013. – Севастополь. – С. 114–116;
12. Голубев, М. В. Модернизация судового контура обработки дымовых газов [Текст] / М. В. Голубев // Матеріали IV Міжнародної наук.-практ. конф. «Управління проектами в умовах транзитивної економіки», 13-14 грудня 2013 р. – Т. 2. – Одеса. – С. 57-58;
13. Голубев, М. В. Метод обработки дымовых газов в условиях работы судовой энергетической установки [Текст] / М. В. Голубев // Матеріали 4-ї Всеукраїнської наук.-практ. конф. «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2013», 9-11 жовтня 2013 р. – Херсон. – С. 345–349;
14. Голубев, М. В. Экологическая нейтрализация токсичных примесей в дымовых газах [Текст] / М.В. Голубев // Матеріали 6-ї Міжнародна наук.-практ. конф. «Сучасні порти – проблеми та рішення». – Іллічівськ, 2014. – С.20–23;
15. Голиков В. А. Судовые технологические схемы очистки и регенерации тепла уходящих дымовых газов [Текст] / В. А. Голиков, М. В. Голубев // Матеріали 5-ї Всеукраїнської наук.-практ. конф. «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2014», 1-3 жовтня 2014 р. – Херсон – С.136-139.

АНОТАЦІЯ

Голубев М. В. Вдосконалення процесів фільтрації і охолодження відпрацьованих вихлопних газів суднової дизельної установки. – Рукопис.

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

Дисертаційне дослідження містить теоретичне узагальнення і новий розв’язок науково-практичного завдання створення принципу функціонування фільтро-охолоджуючої установки шляхом удосконалення процесів фільтрації і охолодження відпрацьованих вихлопних газів суднового дизеля, актуальність якого обумовлена сучасними вимогами до показників екологічності дизелів.

Розроблена методика тепломасообмінного розрахунку, конструювання, виготовлення та випробування фільтро-охолоджуючої установки вихлопних газів, яка враховує всі експлуатаційні параметри суднового дизеля, що дозволяє безпосереднє інтегрування установки у будь-який технологічний контур. Експлуатація суднової фільтро-охолоджуючої установки вихлопних газів повинна проводитися за принципом почергового використання набору фільтро-охолоджуючих елементів, що пов’язано з необхідністю утилізації тепла та накопиченої твердої фази у

фільтраційній воді. Зміна продуктивності в більшу або меншу сторону має досягатися зміною кількості одночасно працюючих фільтро-охолоджуючих елементів.

Зменшення концентрації шкідливих сполук NO_x на 99,7%, SO_x на 97,7% та теплового навантаження на 30% здійснюється дискретною зміною площі контактної взаємодії газів з водою у герметичному фільтро-охолоджуючому елементі у діапазоні об'ємної витрати газів 2-5 м³/с. Для збільшення площі контакту запропоновано нове конструктивне рішення по установці напрямних пластин під кутом 30° на стінках робочої камери фільтро-охолоджуючого елемента, за рахунок чого удвічі збільшується час контактної взаємодії, і розподільчої решітки з отворами, розмір яких забезпечує генерування бульбашок необхідного діаметру у 5 мм.

Ключові слова: вихлопні гази, фільтро-охолоджуючий елемент, оксиди азоту та сірки, тепломасообмінний процес.

АННОТАЦІЯ

Голубев М. В. Совершенствование процессов фильтрации и охлаждения отработавших выхлопных газов судовой дизельной установки. – Рукопись.

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

Диссертационное исследование содержит теоретическое обобщение и новое решение актуального научно-практической задачи создания принципа функционирования фильтро-охлаждающей установки путем усовершенствования процессов фильтрации и охлаждения отработанных выхлопных газов судового дизеля. Острая проблема экологического загрязнения окружающей среды вредными и токсичными составляющими судовых продуктов сгорания топлива на момент начала исследования оставалась нерешенной, поскольку ни одна из существующих судовых технологических схем утилизации отходящих выхлопных газов не предусматривала в своем технологическом контуре систему их очистки.

Для достижения цели исследования – повышения эффективности очистки отработавших выхлопных газов судового дизеля до современных требований – была выдвинута гипотеза о том, что на всех эксплуатационных режимах работы судового дизеля существует возможность интенсификации процессов одновременных фильтрации и охлаждения выхлопных газов при барботаже в воде.

Главной задачей диссертационного исследования стало создание принципа работы фильтро-охлаждающей установки выхлопных газов судового дизеля с последующей разработкой методики построения ее технологической схемы, конструктивных решений и эксплуатации. Решение главной задачи требовало выполнения трех вспомогательных задач: анализа процессов тепломассообмена и сплошности потока пузырьков выхлопных газов барботирующих в слое воды системы «газ-вода», оценки степени влияния геометрических размеров и конструктивных решений фильтро-охлаждающих элементов обработки выхлопных газов на интенсивность процессов тепломассообмена и разработки конструктивных решений по обеспечению физических

условий: равномерности подачи потока газов на выходе из ФОЭ; предотвращения уноса воды газами на выходе из него, а также контактной поверхности в системе «газ-вода» при барботаже.

Решение вспомогательных задач исследования осуществлялось графоаналитическим методами: математического моделирования и конструирования (метод конечных разностей), постановки и проведение эксперимента, статистической обработки данных, а также методами теории автоматического управления при решении главной задачи.

Разработанная в ходе решения первой вспомогательной задачи математическая модель процессов охлаждения и фильтрации полностью воспроизводит количественный взаимосвязь между взаимодействующими веществами в системе «газ-вода», что позволило определить необходимые условия для максимальной интенсификации тепломассообмена. Адекватность модели зависит от выбранного метода численного решения уравнений в частных производных. Используемый в исследовании метод конечных элементов показал хорошее согласование с экспериментом, поскольку относительная погрешность моделирования не превышала 4,7%.

Результатом решения второй вспомогательной задачи стало установление следующих характеристик процессов фильтрации и охлаждения:

- максимальный отбор оксида азота из выхлопных газов достигается в нижней части фильтро-охлаждающего элемента, а начиная с высоты, превышающей 0,7 высоты рабочей камеры Н, диффузия оксидов азота в воду резко падает и практически прекращается, при увеличении высоты до 0,8Н и выше;

- площадь контактного взаимодействия выхлопных газов с водой зависит от скорости их введения в фильтро-охлаждающий элемент – начиная с величины 5 м/с, она резко увеличивается более чем на порядок и именно это значение может рассматриваться как нижний порог скорости подачи судовых выхлопных газов на обработку;

В ходе решения третьей вспомогательной задачи был установлен факт того, что для повышения эффективности процесса обработки судовых выхлопных газов необходимо увеличивать поверхность контакта судовых выхлопных пузырьков газов с водой внутри фильтро-охлаждающего элемента. Конструктивно это достигается путем генерирования в нижней части элемента газовых пузырьков минимального необходимого диаметра в 5 мм и выбором угла наклона направляющих пластин внутри фильтро-охлаждающих элементов равным 30°, что обеспечивает увеличение продолжительности контакта выхлопных газов с водой в 1,5 раза при сохранении допустимого уровня гидростатического сопротивления.

Для решения главной задачи были проведены натурные исследования фильтро-охлаждающей установки выхлопных газов судового главного дизеля. В результате было установлено, что уменьшение концентрации вредных соединений NOx на 99,7%, SOx на 97,7% и тепловой нагрузки на 30% осуществляется дискретным изменением площади контактного взаимодействия газов с водой в герметичном фильтро-охлаждающем элементе в диапазоне объёмного расхода газов 2-5 м³/с.

Полученные результаты экспериментального исследования позволили синтезировать принцип работы фильтро-охлаждающей установки выхлопных газов, который заключается в том, что работа установки характеризуется последовательным использованием набора фильтро-

охлаждающих элементов, что связано с необходимостью утилизации тепла и накопленной твердой фазы в фильтрационной воде. Изменение производительности в большую или меньшую сторону должно достигаться изменением количества одновременно работающих фильтро-охлаждающих элементов.

Разработана методика тепломассообменного расчета, конструирования, изготовления и испытания фильтро-охлаждающей установки выхлопных газов, в которой учитываются все эксплуатационные параметры судового дизеля, что позволяет непосредственное интегрирование фильтро-охлаждающей установки в любой технологический контур.

Результаты диссертационной работы внедрены и используются в судоходной компании ТВ Marine Hamburg, что позволило снизить температуру выхлопных газов судовых дизелей, в среднем в 1,5 раза, а снижение выбросов SO_x при работе судна на топливе с высоким содержанием серы до показателей до уровня, отвечающего использованию топлива с низким содержанием серы, и в НУ «ОМА» при проведении лекционных занятий по дисциплинам оптимизация режимов работы судовых энергетических установок и техническая эксплуатация судовых энергетических установок и в НИР «Развитие современной теории и практики технической эксплуатации морского и речного флота: концепции, методы, технологии».

Ключевые слова: выхлопные газы, фильтро-охлаждающий элемент, оксиды азота и серы, тепломассообменный процесс.

THE ANNOTATION

Golubev M. V. Improvement of processes of filtration and cooling of exhaust gases of marine diesel plant. – Manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.05.03 – engines and power plants. National University "Odessa Maritime Academy". Odessa, 2016.

The dissertation research contains theoretical generalization and new solution of scientific and practical task of creating a functioning principle of filtering and cooling unit by improving filtering and cooling process of exhaust gases of marine diesel engine, the relevance of which is due to modern requirements for environmental performance of diesel engines.

The technic of calculation of heat and mass transfer, design, production and testing of exhaust gases filtering and cooling unit, considering all operating parameters of marine diesel engine, that allows its direct integration into any technological scheme of the power plant. Ship exhaust gas filtering and cooling unit operation should be carried out on the principle of use of alternate set of filtering and cooling elements, due to the need of recovery of heat and solids accumulated in water during gas treatment process. Changing performance up or down side is achieved by changing the number of concurrent filtering and cooling elements.

Reduction of the concentration of harmful NO_x compounds by 99.7%, SO_x by 97.7% and heat load by 30% is achieved by a discrete change in the area of gases and water contact interaction in a sealed filtering and cooling element in the range of exhaust gas volumetric flow of 2-5 m³ /s. To increase the contact area, there were new design solutions proposed that consist in installation of guide plates at the

angle of 30° on the walls of the filtering and cooling element working chamber that doubles an effective contact interaction time, and distribution lattice, size of holes of which ensures the generation of bubbles with a desired diameter of 5 mm.

Keywords: exhaust gases, filtering and cooling element, nitrogen and sulfur oxides, heat and mass transfer process.

Підп. до друку 05.09.2016. Формат 60x84/16. Папір офсет.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 1,4.
Тираж 100 пр. Зам. № И16-09-12

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