

Тимошук О.М., Боріна М.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОСТІ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Підвищення екологічності суднових енергетичних установок (СЕУ) є важливим та актуальним завданням, пов'язаним з посиленням вимог до екологічності по викидам NO_x, SO_x та CO_x з боку міжнародних організацій, розширення зон контролю (спеціальних районів) за викидами в морському просторі, звертання уваги суднобудівників до питання екологічності. В результаті обчислень з використанням розробленої математичної моделі зроблено висновок про необхідність установлення всередині ФОЕ направляючих пластин, що дозволить збільшити температурний перепад у газовому потоці за рахунок збільшення розміру пухирців ВГ у процесі підйому. У ході дослідження встановлено, що швидкість підйому пухирців ВГ всередині ФОЕ досягає постійної величини за три секунди початку руху, не залежить від швидкості їх підведення або в'язкості отриманої суміші газу з рідиною. Для підвищення ефективності процесу фільтрування суднових ВГ необхідно у рідині необхідно збільшувати поверхню контакту пухирців газів з рідиною всередині ФОЕ. Конструктивно це можливо зробити шляхом генерування в нижній частині елемента газових пухирців максимального діаметра та вибором кута нахилу направляючих пластин всередині ФОЕ, таким чином, щоб забезпечити максимально тривалий контакт ВГ з рідиною.

Ключові слова: екологічність, методи, енергетичні установки, водне середовище

Постановка проблеми. Еволюція дизелебудування передбачала наступний ланцюг підвищення характеристик: “економічність” – “надійність” – “екологічність”. Існуючі методи та способи очищення вихлопних газів (ВГ) СЕУ забезпечують механічне очищення двооксиду вуглецю за допомогою поверхнево активних речовин, каталізаторів для оксидів азоту, оксидів сірки при виконанні заходів паливопідготовки. В той же час існує технічна можливість фільтрації вихлопних газів та охолодження їх у водному середовищі. Підвищення екологічності СЕУ за рахунок розроблення технологічних схем очищення ВГ у водному середовищі. На сьогоднішній день частка дизельних двигунів (ДДВ) у СЕУ складає близько 90%.

До основних світових виробників СЕУ з ДДВ відносяться (в дужках вказано відсоток ринку станом на 2020 рік) [1, 2]:

- “Wartsila Switzerland Ltd” (Швейцарія) (25%);
- “Mitsubishi Heavy Industries Ltd”, (Японія) (10%);
- “Burmester and Wain” (Данія) (7%);
- “MA” (Німеччина) (6,3%);
- “Doksford” (Великобританія) (4,3%);
- “Stork” (Нідерланди) (3,5%);
- “Getaverken” (Швеція) (3,1%);
- “Fiat” (Італія) (2,6%);
- “Pillstick” (Франція) (1,8%).

ДДВ, які випускаються даними компаніями, відрізняються, як за конструктивними, так і за експлуатаційними характеристиками, але при використанні ідентичного за характеристиками сортом палива загальними в їх роботі є склад ВГ.

При роботі СЕУ виникають газоподібні технологічні викиди двох видів:

- 1) озоноруйнуючі технологічні гази;

2) продукти згоряння палива у ДДВ.

Перший вид викидів пов'язаний із присутністю речовин, до яких в основному відносяться різні холодильні агенти суднових систем кондиціонування та охолодження:

- хлорпентафторетан (газ рефрижераторний R 115);
- бромхлордифлорметан (хладон 12B1);
- бромтрифторметан (хладон 13B1);
- трихлорфторметан (фреон R11, фтортрихлорметан, фреон-11, хладон-11, CFC-11, R-11);
- 1,2-дибром-1,1,2,2-тетрафторетан (фреон 114B2);
- гідрохлорфторвуглець (холодоагенти: R21, R22, R141b, R142b, R123, R124);
- дихлордифторметан (холодоагент хладон-12);
- 1,1,2-трихлор-1,2,2-трифторетан (холодоагент ДО 113);
- 1,2-дихлор-1,1,2,2-тетрафторетан (газ рефрижераторний R 114).

Другий вид викидів містить усі компоненти продуктів згоряння ДДВ. У відповідності до вимог нормативних документів концентрація шкідливих домішок при викиді в навколишнє середовище визначається для кожного компонента індивідуально.

Найбільш токсичними компонентами ВГ ДДВ СЕУ є оксиди азоту (NO_x), причому їх концентрація залежить саме від конструкції дизеля. Допустимі границі викидів для основних компонентів вихлопних газів, що виникають при роботі суднового дизеля повинні бути менше значень, які наведені у таблиці 1.1.

При роботі СЕУ малошкідливі або нейтральні (N_2 , O_2 , CO_2 та H_2O) речовини в сумі складають до 99% від загального об'єму ВГ. Інші містять у собі окисли азоту (NO_x), сірки (SO_x), окис вуглецю (CO), вуглеводні (C_2H_4) та тверді речовини (сажу).

При роботі судна, відповідно до основних регламентуючих документів для постійного контролю викидів продуктів згоряння використовуються значення концентрації двох основних хімічних газоподібних сполук - оксидів азоту (NO_x) і комбінації оксидів сірки (SO_x) із твердими частками. Саме тому, дослідження методів підвищення екологічності суднових енергетичних установок у водному середовищі є актуальними і вимагають дослідження.

Метою статті є підвищення екологічності СЕУ за рахунок розроблення технологічних схем очищення у водному середовищі.

Питання екологічності СЕУ достатньо повно розглядається у роботах як вітчизняних, так і закордонних фахівців, що умовно можна розділити на ряд взаємопов'язаних груп:

- роботи з дослідження конструктивних особливостей СЕУ та удосконалення конструкції двигунів для підвищення їх екологічності;
- роботи з конструювання додаткових елементів СЕУ, які можуть бути розміщеними в корпусах суден без суттєвих змін їх конструкції;
- роботи з підвищення екологічності інших двигунів (авіаційних, автомобільних, тракторних тощо);

Теоретичною базою дослідження є роботи вітчизняних та закордонних авторів: Ареф'єва М.М., Голікова В.М., Спіркіна В.Г., Солодовнікова В.Г., Сагіна С. В., Шевченка В.А. [1-6]. Практична значимість отриманих результатів полягає в підвищенні екологічності очищення вихлопних газів, шляхом проектування суднової системи фільтрації вихлопних газів, інтегрованої в технологічну схему суднового головного дизеля

Основний матеріал. Розробка математичної моделі процесів тепломасообміна пухирців ВГ з нерухомою рідиною при барботажі необхідна для прогнозування характеристик зміни термодинамічного стану ВГ: температури, концентрації компонентів газової суміші та швидкості руху.

У більшості випадків при моделюванні процесу руху ВГ у рідині використовуються різні емпіричні рівняння, які у цілому враховують специфіку окремо узятих умов фільтрації, але у зв'язку з їх обмеженістю не можуть розглядатися, як універсальні для моделювання кінетики процесів тепломасообміну в цілому.

Іншим методом є побудова математичної моделі, що описується аналітичним рівнянням. Кожен метод та рівняння, які використовуються на його основі, повинні враховувати той факт, що зміна кількості руху в потоці ВГ залежить від різних фізико-хімічних властивостей та зв'язків між рідиною й ВГ. Основні зв'язки наведені на рис. 1.

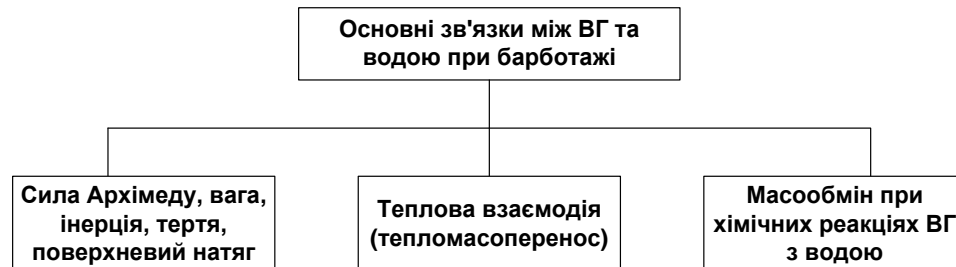


Рисунок 1 – Основні зв'язки між відпрацьованими газами СЕУ та рідиною при барботажі

Для опису процесу передачі маси від основних компонентів ВГ (CO , SO_x , NO_x) у воду використовується поняття швидкості масопередачі.

Вона розраховується за відомим рівнянням:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = J_m S (C_r - C) \quad (1)$$

де J_m – коефіцієнт масопередачі водяної плівки; S – сумарна площа поверхні газових пухирців (площина міжфазового контакту); C_r – концентрація газу при повному насиченні води; C – поточна концентрація розчиненого в рідині газу.

Невідомими, як правило, залишається коефіцієнт масопередачі, який повинен максимізуватися.

Величину коефіцієнта масопередачі водяної плівки знаходять за формулою Хігбі:

$$J_m = 2 \sqrt{\frac{D \cdot V}{\pi \cdot d_n}} \quad (2)$$

де D – середньозважене значення коефіцієнту дифузії основних складових ВГ в рідині; V – швидкість спливу пухирця ВГ; d_n - діаметр пухирця ВГ.

Формула (2) дає можливість моделювати процес масопередачі при нестационарній молекулярній дифузії, коли водяна плівка, що є одночасно границею розділу фаз «газ»-«рідина» рухається разом із пухирцем.

Чисельними границями області її застосування, що відповідають перехідному (від ламінарного до турбулентного) режиму спливання пухирця є:

– нижня границя $d_n = 0,12 \cdot 10^{-3}$; $V = 0,0082$; $Re = 1$. Коефіцієнт гідравлічного опору складає $\xi = 24$;

– верхня границя $d_n = 1,37 \cdot 10^{-3}$; $V = 0,37$; $Re = 500$. Коефіцієнт гідравлічного опору складає $\xi = 0,13$.

У випадку, коли здійснюється турбулентний режим руху пухирців ВГ у нерухомій рідині, необхідно використовувати формулу Данквертса [7]. Вона враховує взаємодію поверхні пухирця ВГ з турбулентними вихрами, які генеруються при його спливанні. Саме в ході такої взаємодії відбувається виникнення дрібних поверхневих пухирців на границі розділу та зміна форми основного спливаючого пухирця, а точніше границі розділу двох фаз – газу, що знаходиться всередині пухирця, й оточуючого його води.

Ця формула має вигляд:

$$J_m = \sqrt{D_t \cdot R_r} \quad (3)$$

де D_t – коефіцієнт турбулентної дифузії; R_r – фактор оновлення кордону розділу фаз.

Величина R_r у зв'язку зі складністю характеру турбулентного руху в аналітичному виді не може бути отримана й повинна визначатися емпірично за наближеними формулами.

Найбільш адекватним підходом для отримання величини фактору відновлення границі розділу фаз можна вважати аналіз енергетичного балансу.

На основі термодинамічного підходу приймається, що процес відновлення розділу фаз під дією турбулентних вихрів, повинен бути пов'язаний з витратами енергії на поверхні міжфазного розділу. За рахунок дії сил поверхневого натягу при відновленні поверхні міжфазної взаємодії між ВГ та рідиною виконується робота A . Чисельне значення нової поверхні розділу, що утвориться в одиницю часу за рахунок турбулентного обміну елементів рідини на одиниці поверхні з урахуванням виконаної роботи може бути розраховано, як:

$$S' = \frac{A}{\sigma} \quad (4)$$

де A – робота, яка виконується в одиницю часу на одиниці поверхні; σ – коефіцієнт поверхневого натягу.

Якщо в першому наближенні вважати, що виконана робота порівняна з добутком швидкості спливання газових пухирців на втрату тиску DU за висотою стовпа рідини:

$$A = V \cdot \Delta P = V \xi \frac{pV^2}{2} = \xi \frac{pV^3}{2} \quad (5)$$

то кінцеве значення величини S знайдемо за формулою:

$$S' = \xi \frac{pV^3}{2\sigma} \quad (6)$$

Урахування фактора форми пухирця дозволяє отримати уточнене значення величини S у порівнянні з (6). У цьому випадку виконана робота обчислюється як відношення секундної роботи A_ξ , що витрачається на подолання гідродинамічного опору, до поверхневої енергії пухирця ВГ E_ξ :

$$A_\xi = S_{п.с} \xi \frac{pV^3}{2} \quad (7)$$

$$E_\xi = \sigma \cdot S_{п.п.} \quad (8)$$

де $S_{п.с.}$ – площа поперечного розтину пухирця; $S_{п.п.}$ – площа поверхні пухирця ВГ.

З урахуванням формул (7) та (8) формула для отримання величини оновлення поверхні міжфазової взаємодії в ході очищення судових ВГ може бути записана у вигляді:

$$S' = \frac{1}{f_n} \xi \frac{pV^3}{2\sigma} \quad (9)$$

де f_n – форма параметру пухирця вихлопного газу.

Величина f_n дозволяє враховувати вплив сил поверхнього натягу на поверхні міжфазового розділу та гідродинамічного опору на пухирець ВГ при його спливанні.

При використанні формули (9) рівняння (1) може бути наведено у вигляді:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = A_\xi \sqrt{D_t \xi \frac{pV^3}{2\sigma}} (C_r - C) \quad (10)$$

Інтегрування рівняння (10) в інтервалі $0 \leq \partial m \leq \Delta m$ та $0 \leq \partial t \leq \Delta t$ дозволяє записати формулу:

$$\Delta m = A_\xi \sqrt{D_t \xi \frac{pV^3}{2\sigma}} (C_r - C) \Delta t \quad (11)$$

де Δm – загальна маса складових ВГ, що розчиняється у воді за час фільтрації Δt .

Для поодинокого пухирця ВГ з площею поверхні $S_{п.п.}$ та об'ємом $W_{п.п.}$ зниження концентрації компонент вихлопних газів можливо розрахувати як:

$$\Delta C = \frac{1}{\Omega_{п.п.}} \sqrt{D_t \xi \frac{pV^3}{2\sigma}} (C_r - C) \Delta t \quad (12)$$

де ΔC – зниження концентрації компонент вихлопних газів, кг/м³; $\Omega_{п.п.} = W_{п.п.}/S_{п.п.}$ – відносний розмір пухирця ВГ, м.

Коефіцієнт фільтрації, як узагальнююча характеристика даної математичної моделі представляє собою відношення маси складових частин ВГ, які будуть розчинені в воді в ході фільтрації Δt , до маси m даних компонент у УГ, що подаються на фільтрацію після судового утилізаційного котла (УК):

$$K_f = \frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta C}{C_{вх}} = \frac{1}{C_{вх} \cdot \Omega_{п.п.}} \sqrt{D_t \xi \frac{pV^3}{2\sigma}} (C_r - C) \Delta t \quad (13)$$

де $C_{вх}$ – концентрація компонент ВГ на вході у фільтроохолоджуючу установку (ФОУ), кг/м³.

Рівняння динаміки та балансу енергії ВГ при проходженні через водяний фільтр можуть бути отримані підсумовуванням ідентичних рівнянь, що складаються для кожного, окремо взятого компонента (NO_x, SO_x). При цьому можна вважати, що всі отримані значення будуть середніми величинами для усіх фаз одночасно.

При розробці математичної моделі були також використані теоретичні результати роботи [8]. У ній відзначається, що у зв'язку зі складністю математичного опису процесів, пов'язаних з рухом газів усередині однорідної рідини, дотепер відсутні універсальні рівняння, які можуть описати такий рух.

Розглянемо чисельне моделювання процесу тепломасопереносу для обґрунтування характеристик фільтроохолоджувального елемента. Рішення даного завдання пов'язане з установленням впливу форми ФОЕ на об'ємні коефіцієнти тепломасопередачі, геометричні характеристики якої адаптовані до прогностичної математичної моделі і визначають початкові та граничні умови процесу барботажу.

Особливістю рішення даного завдання є вибір методу рішення диференціальних рівнянь у частинних похідних щодо просторових координат та часу з можливістю наступної його експериментальної перевірки в ході визначення геометричних розмірів ФОЕ.

Як видно з наведених раніше рівнянь математичної моделі усі вони складені для двовимірного плину у вертикальній площині фільтруючого елемента. Це зроблено на підставі наступних передумов:

- робоча камера ФОЕ є призмою з квадратною основою, а висхідні лінії плину ВГ у розрахунковій вертикальній площині можуть прийматися в першому наближенні, як цілком ідентичні один одному;

- вихрові утворення, які виникають у кутових зонах, утворених основою направляючих пластин і корпусом, а також на краях направляючих пластин усередині робочої камери через незначну швидкість руху зникають при взаємодії між собою пухирців ВГ. При руйнуванні вихрів дисипація енергії в навколишню рідину не робить впливу на процес тепло- або масопереносу.

Для проведення розрахунків на підставі записаних вище рівнянь необхідно задавати початкові та граничні умови.

Найбільш раціональним способом завдання граничних умов є рівність нулю всіх складові швидкості на твердих поверхнях моделюемого об'єму. Для кожного розрахункового часового шару така умова герметичності твердих поверхонь розрахункового об'єму записується в наступному вигляді:

$$V = V_x = V_y = 0 \quad (14)$$

Самий нижній перетин розрахункового об'єму, що відповідає індексу $j = 0$ також повинен розглядатися, як вхідна границя. На даному перетині у всіх розрахункових вузлах при чисельному моделюванні необхідно задавати наступні умови для вхідних динамічних характеристик потоку:

- температура в кожній розрахунковій точці ($i=0..N$), яка чисельно дорівнює значенню вхідної температури ВГ:

$$T = T_{вх} \quad (15)$$

- поперечна складова швидкості відсутня, а повна швидкість визначається вертикальною складовою, яка дорівнюється швидкості подачі ВГ у фільтраційну колону:

$$V = V_y = V_{вх} \quad (16)$$

$$V_x = 0 \quad (17)$$

– тиск у першому перетині визначається сумою динамічного тиску ВГ на вході у розрахунковий об'єм та статичний тиск, який створюється висотою стовпа фільтруючої води:

$$P = P_{\text{вх}} + P_{\text{ст}} = \frac{\rho V^2}{2} + \rho g H \quad (18)$$

– концентрація та маса ВГ визначається їх вихідним складом на вході в розрахунковий об'єм:

$$C_{NOx} = C_{NOx}^{\text{вх}}; \quad C_{SOx} = C_{SOx}^{\text{вх}}; \quad M_{\text{в.г.}} = M_{NOx}^{\text{вх}} + M_{SOx}^{\text{вх}} \quad (19)$$

– діаметр пухирців ВГ у перших трьох розрахункових перетинах ($j < 4$) дорівнює діаметру вихлопних отворів роздавальних ґраток:

$$d_{\text{в.г.}} = d_{\rho} \quad (20)$$

Початкові умови для проведення наступних чисельних розрахунків необхідно задавати по всій розрахунковій області на перших двох часових рівнях.

У цьому випадку вважається, що у початковий момент часу всередині розрахункового об'єму знаходиться тільки нерухома фільтруюча вода і швидкість у всіх її точках дорівнює нулю, а тиск (за винятком першого перетину, див. (18)) описується тільки основним законом гідростатики:

$$V = V_x = V_y = 0 \quad (21)$$

$$P = P_{\text{ст}} = \rho g H \quad (22)$$

Температура по всьому розрахунковому об'єму задається однаковою, що дорівнюється початковій температурі фільтраційної води:

$$T = T_{\text{вх.}} \quad (23)$$

Концентрація та маса ВГ у всіх точках розрахункового об'єму за виключенням перетину $j = 0$, задаються нульовими:

$$C_{NOx} = 0; \quad C_{SOx} = 0; \quad M_{\text{в.г.}} = 0 \quad (24)$$

Оскільки при моделюванні процесу очищення суднових ВГ розглядається газо-повітряна суміш, то її динамічна в'язкість повинна бути набагато менше, ніж у води. При завданні початкових умов у ході чисельних експериментів вона приймалася: $\mu = 10^{-3} \text{Па} \cdot \text{с}$.

Кінцево-різницева схема була складена для розвитку наведеної в попередньому підрозділі магістерської роботи математичної моделі з використанням розрахункової сітки, наведеної на рис. 2 (а), для можливості її використання при русі пухирців ВГ по висоті ФОЕ.

У ході математичного моделювання кількість направляючих пластин усередині робочої камери ФОЕ було прийнято рівним їх кількості в натурному об'єкті, а при проведенні розрахунків відповідало п'ятьом одиницям.

Оскільки робоча камера ФОЕ представляє собою призму з квадратною основою, то було прийняте допущення про відсутність градієнтів швидкості (бічних плинів) у

поперечному напрямку. Вважалося, що оскільки основний рух потоку відбувається тільки у вертикальному та поперечному напрямках, то тривимірні ефекти просторового плинущу усередині робочої камери на результати розрахунків не роблять ніякого впливу. З цієї причини всі чисельні експерименти проводяться в пласкій (двовимірній) постановці.

Початок координат (точка відліку перетинів, на яких розташовуються розрахункові вузли) розрахункової сітки (рис. 2 (а)) знаходився в нижньому лівому куті робочої камери.

У напрямку вісі ОХ кількість розрахункових перетинів складало: $i_N = 2500$, а у вертикальному напрямку вздовж вісі ОУ відповідно $j_M = 25000$. Таким образом, кількість розрахункових вузлів, що при дискретизації замінювали весь робочий простір камери ФОВ, складало: $i_N \cdot j_M = 62500000$ од.

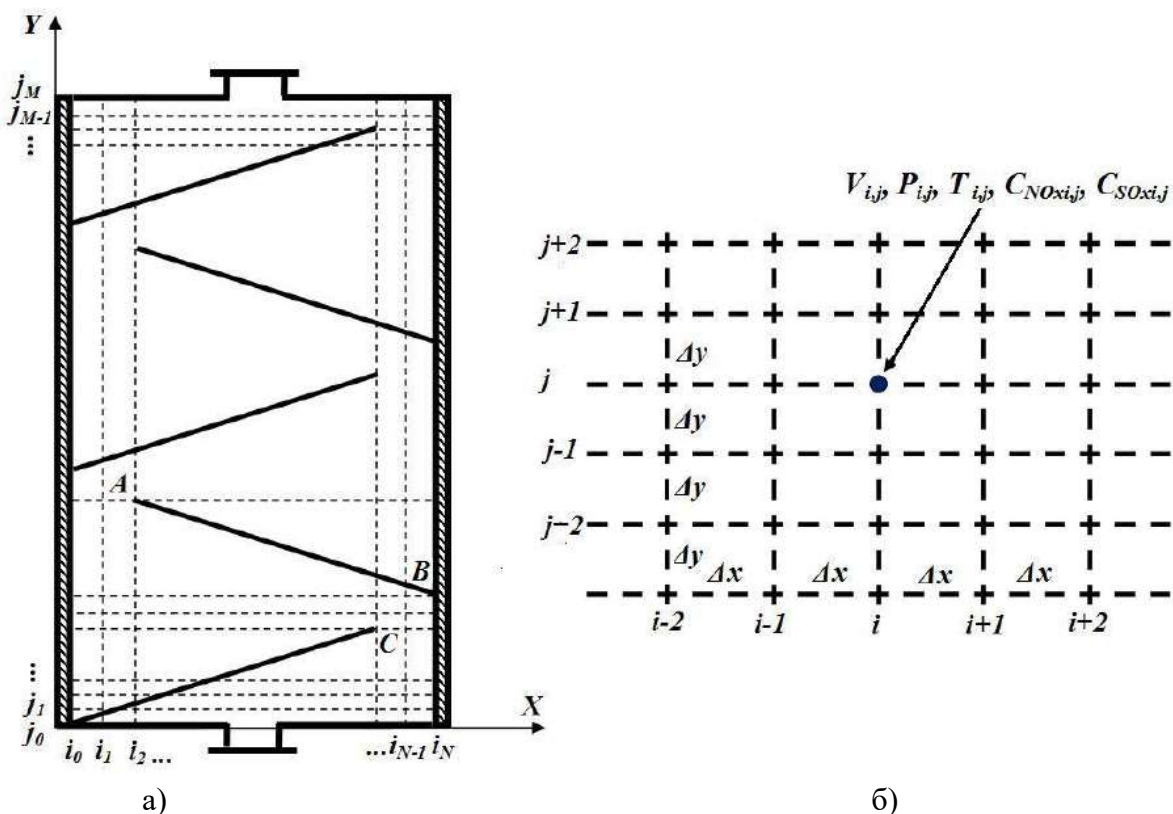


Рисунок 2 – Розрахункова сітка:
а – розрахунковий об’єм; б – виділена область розрахункової сітки

Крок сітки в обох напрямках вибирається таким чином, щоб точки, які відповідають початку й закінченню направляючих пластин усередині робочої камери, мали чіткі та однозначні координати по і-му та j-му індексу розрахункової сітки. Як приклад, на рис. 1 (а) ці точки позначені, як А, В та С.

Усі чисельні експерименти виконуються в розмірній формі. Оскільки моделюємі процеси тепло- та масообміну у більшому ступені залежать від поперечного напрямку руху, то досить важливим було якісно відтворювати зміну всіх параметрів від одного горизонтального шару до іншого. За цією причиною крок сітки вздовж осі ОХ (див. рис. 2.2 (б)) приймався великим у порівнянні з кроком у вертикальному напрямку ОУ.

У цих напрямках вони мали фіксовані значення Δx , відповідно, складали: $\Delta x = x_i - x_{i-1} = 4 \cdot 10^{-4}$ мм, та $\Delta y = y_i - y_{i-1} = 8 \cdot 10^{-6}$ мм,

Наведена на рис. 2 (б) розрахункова сітка використовується для виконання нестационарних розрахунків.

У кожній вузловій точці на поточному та невідомому розрахунковому часовому шарі визначалися: швидкість, тиск, температура й концентрації складових компонентів судових ВГ: $V_{i,j}, P_{i,j}, T_{i,j}, C_{NOxij}, C_{SOxij}$.

Кожна похідна, що входить у рівняння математичної моделі, була записана в кінцево-різницевого представленні. У залежності від розташування на сітці розрахункового вузла всі складові дискретизувалися за допомогою лівосторонніх, центральних та правобічних кінцевих різностей.

Як приклад, для першої похідної швидкості вздовж осі ОХ формули переходу від суцільного розрахункового об'єму до дискретного наведено в табл. 1.

У табл. 1 наведені формули для дискретизації нелінійного (відповідального за зміну якісних характеристик процесу обробки ВГ) та нестационарного (відповідального за зміну просторово-часових значень обумовленого параметра) додатків. У табл. 1 перші три формули дискретизації можна отримати шляхом розкладання відповідного додатка в ряд Тейлора з прибиранням залишкових членів. Усі приведені кінцево-різницеві формули мають другий порядок точності по простору й часу [9].

При дискретизації всіх рівнянь математичної моделі використовується явна апроксимація. У випадку її застосування всі невідомі на новому часовому рівні завжди розраховувалися тільки на підставі уже відомих з попередніх ітерацій. Отже описані початкові умови повинні задаватися для перших двох часових рівнів. Дискрет часу складав $\Delta t = 0,001$ с.

Таким чином, на підставі усіх викладених вище допущень і формул основні рівняння математичної моделі представлені в лінеаризованому дискретному виді.

Таблиця 1 – Формули дискретизації похідних першого порядку

Найменування складової	Математична формула
Лівобічні різниці	$\frac{\partial V_{i,j}^n}{\partial x} = \frac{3V_{i,j}^{n-1} - 4V_{i-1,j}^{n-1} + V_{i-2,j}^{n-1}}{2\Delta x}$
Правобічні 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	$\frac{\partial V_{i,j}^n}{\partial x} = \frac{V_{i-1,j}^{n-1} - V_{i-2,j}^{n-1}}{2\Delta x}$
Нелінійна складова	$V \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{1}{2} (3V_{i,j}^n - V_{i,j}^{n-1}) \frac{\partial V}{\partial x}$
Нестационарна складова	$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{3}{2} V_{i,j}^{n+1} - V_{i,j}^n + \frac{1}{2} V_{i,j}^{n-1} \right)$

У приведених вище рівняннях невідомим залишається часовий рівень, для якого виконується розрахунок параметрів потоку, що позначений як n+1.

При проведенні розрахунків підстановка різницевої формули у загальне рівняння виробляється в залежності від розташування розрахункового вузла. Так, для перших та останнього розрахункових перетинів використовується по напрямку ОХ – однібічні різниці, а в напрямку ОУ центральні різниці, крім першого та останнього розрахункового вузла. У цих вузлах також використовувалася односпрямована апроксимація диференціальних операторів.

Основними вимогами до формування рекомендацій є: забезпечення можливості зміни діаметра пухирців газу в поперечному перерізі ФОЕ; зміни часу контакту робочих середовищ; зниження віднесення абсорбенту з ВГ, пошарового контролю стану барботуючого середовища.

Отже, в її основу покладені умови геометричної та фізичної подоби й критеріальної ідеальності, особливо за критерієм ізохронності Ньютона.

Введення експериментального ФОВ, що складається з трьох паралельно з'єднаних ФОВ різних об'ємів, у робочий процес очищення ВГ ДДВ повинен виконуватися одночасно з початком роботи СЕУ. У такому випадку забезпечується повна відповідність отриманих результатів вимірам робочих характеристик оброблюваного потоку ВГ.

Знаходження розмірів ФОЕ проводиться з використанням трьох варіантів їх габаритних розмірів. Умови проведення експерименту на кожному ФОЕ повинні бути цілком ідентичними (рис. 3). Для цього необхідно під час кожного експерименту з інтервалом від 5 до 10 хвилин за допомогою відповідних безповоротних клапанів по черзі підключати ФОЕ з різними габаритами до лінії очищення ВГ ДДВ СЕУ.

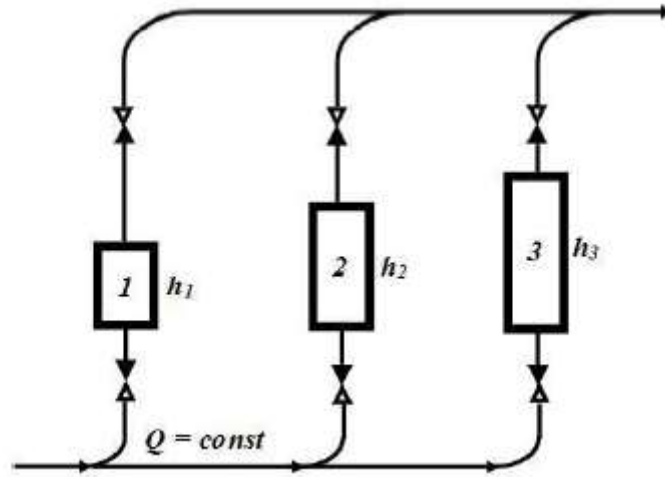


Рисунок 3 – Схема розташування фільтроохолоджувальних елементів у експериментальному варіанті фільтроохолоджувальної установки

Такі умови проведення експерименту дозволять знайти оптимальне співвідношення розмірів ФОЕ та їх кількості у ФОУ. При цьому максимальна кількість ФОЕ не повинна перевищувати чотирьох (за умови компоновки СЕУ).

При визначенні габаритів та/або кількості робочих елементів усі виміри виробляються в режимі ручного управління. При закипанні, миттєвому забрудненні або виносі в димохід фільтруючої води необхідно переключати потік на елемент із найбільшими габаритними розмірами або включити в роботу всі елементи одночасно.

До початку виконання вимірювання необхідно за допомогою газоаналізатора перевірити відповідність величини вхідної концентрації NO_x і SO_x у ВГ відомим даним для відповідного виду палива. У випадку сильної розбіжності цих показань (більш 20 %) виміри не проводяться.

Ефективність процесів фільтрації та охолодження ВГ ДДВ СЕУ визначається за величиною поверхні контакту газової та рідинної складової всередині фільтруючого елемента. З метою її зміни необхідно конструктивним способом забезпечувати генерацію в нижній частині ФОЕ газових пухирців різного діаметра, вибрати та установити кут нахилу направляючих пластин усередині ФОЕ таким чином, щоб забезпечити максимально довгий контакт ВГ з рідиною.

Пошаровий вимір температури суміші за висотою ФОЕ необхідно виконувати після стабілізації режиму роботи СЕУ. З метою зниження розкиду отриманих даних виміри повинні виконуватися не менш восьми разів у кожному створі ФОЕ із наступним їх усередненням.

Визначення оптимальної швидкості подачі ВГ у ФОВ та вимір градієнта спаду температури у ФОВ варто визначати шляхом варіації швидкості подачі ВГ.

Вимір градієнта падіння концентрації NO_x та SO_x залежно від площі контактної взаємодії фаз “газ”-“рідина” виконується зміною діаметра пухирців ВГ у вхідному перетині ФОВ. Зміна розміру пухирців відбувається за рахунок використання двох варіантів плоских роздавальних колекторів.

На їх поверхні рівномірно та симетрично розташовуються отвори однакових діаметрів. Габаритні розміри кожного роздавального колектора повинні відповідати внутрішнім розмірам фільтруючого елемента, а діаметр отворів у першому випадку повинен складати 6 мм, а в іншому 10 мм.

Заповнення елемента фільтруючою рідиною повинно здійснюватися до рівня $0,85H$, де H – висота його робочої камери ФОВ, знята за внутрішнім розміром. Незаповнений об’єм камери забезпечить наявність простору для пінного малодисперсного пухирцевого шару, що неминуче буде утворюватися при виході ВГ з води.

Частина води буде виноситися ВГ, отже для затримки крапель води необхідно у верхній частині фільтруючої камери встановлювати краплевідбійники (рис. 4).

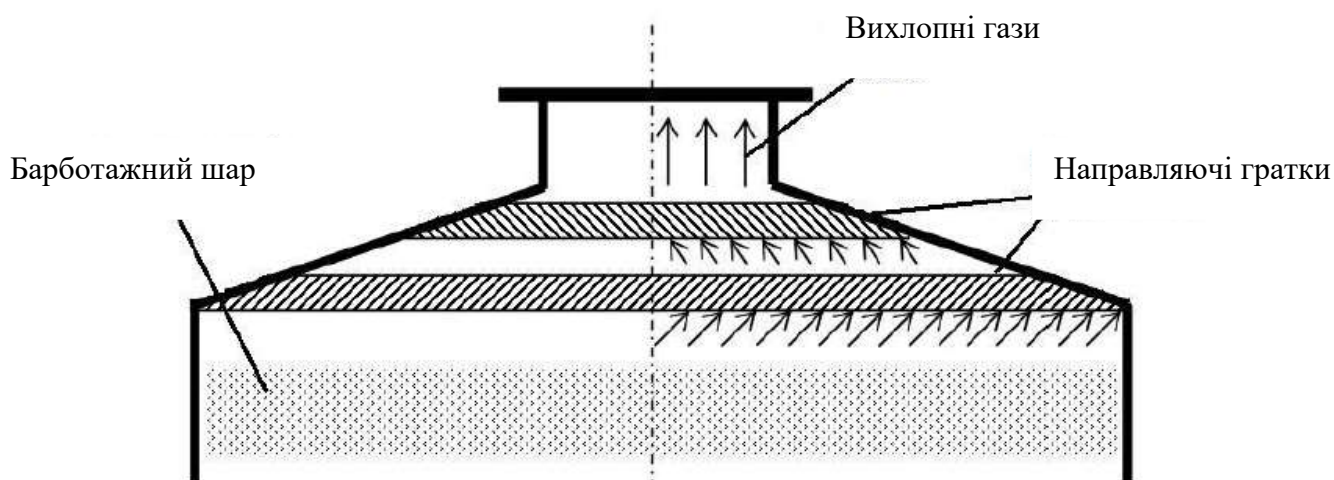


Рисунок 4 – Розташування ґраток для уловлювання крапель води

При наявності двох ґраток, що містять односпрямовані рівнобіжні канали, волога буде конденсуватися на поверхні пластин, і при укрупненні крапель за рахунок сил гравітації вони будуть стікати назад у воду. Частина вологи, що буде виноситися ВГ, потрапить у канали інших ґраток, маючи інший напрямок потоку в порівнянні з першими ґратками з поворотом на 90° . Це призведе до додаткової турбулізації газу й конденсації дрібних крапель води на поверхні направляючих ґраток, викликаючи додатковий аеродинамічний опір газу.

Висновки. У ході дослідження встановлені термодинамічні характеристики протікання процесу барботажу в системі “газ”-“рідина” та конструктивні характеристики засобів забезпечення умов його протікання у ФОВ для:

- прогнозу протікання процесу барботажу газу в нерухомій рідині у вигляді математичної моделі, що встановлює закони зміни температури, маси й швидкості руху газової складової у вертикальній площині перетину ФОВ і представлених у виді системи трьох нелінійних диференціальних рівнянь у часткових похідних;

- адаптації математичної моделі процесу барботажу (18) до моделей конструювання ФОВ шляхом чисельної лінеаризації, здійсненої методом кінцевих різниць диференціальних рівнянь першого порядку;

– установки обмежень на діапазони зміни термодинамічних параметрів й умов протікання процесу за допомогою конструктивних особливостей ФОЕ, представлених у вигляді рекомендацій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сагін С. В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів / С. В. Сагін. // Одеса : НУ «ОМА». – 2018. – №38. – С. 139–149..
2. Сагін С. В. Зниження енергетичних втрат під час експлуатації довгоходових дизелів морських суден / С. В. Сагін, Т. О. Столярик // Матеріали 11-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування», 08-10 вересня 2020 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія. – 2020. – С. 174-176.
3. Ареф'єв М.М. Розробка принципової схеми установки для зниження шкідливих викидів з відпрацьованими газами суднових двигунів. XXII Сесія молодих вчених, технічні науки, Том 2, 2017. С. 192-195.
4. Голиков В. А. Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології / В.А. Голиков, О. А. Онищенко // Судовые энергетические установки : науч.-техн. сб. – 2017. – № 37. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 13-27.
5. Солодовніков В. Г. Удосконалення системи паливопідготовки суднових середньооборотних дизелів шляхом зниження концентрації компонентів, що містять сірку: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03: захищена 03.02.16 / Солодовніков Валерій Григорович. – Одеса, 2016. – 201 с.
6. Шевченко В. А., Онищенко О. А. Проблеми удосконалення, підвищення енергетичної ефективності тенденції розвитку складних суднових технічних систем і комплексів. 4th International scientific and practical conference "Perspectives of world science and education" (December 25-27, 2019) CPN Publishing Group, Osaka, Japan. 2019, p.p. 995-1005.
7. Голиков В. А., Голубев М. В. Управление процессом фильтрации продуктов сгорания на судовых энергетических установках / В. А. Голиков, М. В. Голубев // Одесса: Куприенко. – Сборник научных трудов SWorld, 2013. Т.2. – С.15-18.
8. Sagin S. V. Estimation of Operational Properties of Lubricant Coolant Liquids by Optical Methods / S. V. Sagin, V. G. Solodovnikov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Vol. 12. – Num. 19. – P. 8380-8391.
9. Антонов, А. В. Системный анализ: учеб. для вузов / А. В. Антонов – М.: Высш. шк., 2004. – 454 с.

REFERENCES

1. Sagin S.V. Reduction of energy losses in precision steam fuel equipment of ship diesels / S. V. Sagin // Odesa: NU "OMA". – 2018. – №38. – P. 139–149..
2. Sagin S. V. Reduction of energy losses during the operation of long-range diesel engines of marine vessels / S. V. Sagin, T. O. Stolaryk // Materials of the 11th International Scientific and Practical Conference "Modern energy installations on transport and technologies and equipment for them maintenance", September 8-10, 2020 - Kherson: Kherson State Maritime Academy. – 2020. – P. 174-176.
3. Arefiev M.M. Development of the principle scheme of the installation for reducing harmful emissions with exhaust gases of ship engines. XXII Session of Young Scientists, Technical Sciences, Volume 2, 2017. P. 192-195.

4. Golikov V.A. Development of modern theory and practice of technical exploitation of the sea and river fleet: concepts, methods, technologies / V.A. Golikov, O. A. Onyshchenko // Naval power plants: scientific and technical. Sat. – 2017. – No. 37. – Odesa: NU "OMA". - P. 13-27.
5. Solodovnikov V.G. Improvement of the fuel preparation system of marine medium-speed diesel engines by reducing the concentration of sulfur-containing components: abstract of the dissertation. Ph.D. technical Science: 05.05.03: protected 02.03.16. - Odesa, 2016. - 201 p.
6. Shevchenko V. A., Onyshchenko O. A. Problems of improvement, increase in energy efficiency and development trends of complex ship technical systems and complexes. 4th International scientific and practical conference «Perspectives of world science and education» (December 25-27, 2019) CPN Publishing Group, Osaka, Japan. 2019, year 995-1005.
7. Golykov V. A., Golubev M. V. Control of the process of filtration of combustion products on ship power plants / V. A. Golykov, M. V. Golubev // Odessa: Kuprienko. – Collection of scientific works SWorld, 2013. Volume 2. - P.15-18.
8. Sagin S. V. Estimation of Operational Properties of Lubricant Coolant Liquids by Optical Methods / S. V. Sagin, V. G. Solodovnikov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Vol. 12. – Num. 19. – P. 8380-8391.
9. Antonov A. V. System analysis: textbook for universities / A. V. Antonov – M.: Vyssh. school.

Tymoshchuk O., Borina M.

RESEARCH OF METHODS OF ENHANCING THE ENVIRONMENTAL FACILITY OF SHIP POWER PLANTS IN THE AQUATIC ENVIRONMENT

Increasing the environmental friendliness of ship power plants (SEU) is an important and urgent task related to the strengthening of environmental requirements for emissions of NO_x, SO_x and CO_x by international organizations, the expansion of control zones (special areas) for emissions in the sea space, drawing the attention of shipbuilders to the issue of environmental friendliness. As a result of calculations using the developed mathematical model, it was concluded that it is necessary to install guide plates inside the FOE, which will allow to increase the temperature difference in the gas flow due to the increase in the size of HV bubbles during the rise. In the course of the research, it was established that the speed of the rise of gas bubbles inside the FOE reaches a constant value within three seconds of the start of movement, and does not depend on the speed of their introduction or the viscosity of the resulting gas-liquid mixture. In order to increase the efficiency of the process of filtering shipboard gas, it is necessary to increase the contact surface of gas bubbles with the liquid inside the FOE in the liquid. Structurally, this can be done by generating gas bubbles of the maximum diameter in the lower part of the element and choosing the angle of inclination of the guide plates inside the FOE, in such a way as to ensure the longest possible contact of the HV with the liquid.

Keywords: environmental friendliness. methods, power plants, water environment