

УДК 621.438

doi: 10.32620/aktt.2023.4sup.2.02

В. В. КУЗНЕЦОВ, А. П. ШЕВЦОВ

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна

ЕФЕКТИВНІСТЬ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК З ТЕПЛООБМІННИМИ АПАРАТАМИ З ТРУБНИХ ПУЧКІВ З ЛУНКОВИМИ СИСТЕМАМИ

Розглянуто напрямок підвищення ефективності суднових енергетичних установок шляхом використання в їх складі теплообмінних елементів, що реалізують інтенсивні способи переносу теплоти, які характеризуються переважаним зростанням тепловіддачі над аеродинамічним опором. Методом дослідження є математичне моделювання процесів в енергетичних установках на рівні їх окремих елементів – теплового двигуна, енергетичних та технологічних теплообмінних апаратів. Адекватність математичної моделі, для дослідження ефективності енергетичних установок, обґрунтована за результатами верифікації та валідації шляхом порівняння результатів розрахунків з результатами фізичного експерименту, що мають розбіжність не вище 9,3%. Метою дослідження є вдосконалення економічних, екологічних, ресурсних і масогабаритних характеристик енергетичних установок шляхом використання теплообмінних елементів з інтенсифікацією процесів конвективного переносу теплоти і маси шляхом використання оребрених поверхонь з лунками. Завдяки виконанню лункових систем на ребрах круглих труб зі спірально-стрічковим оребренням та еліптичних труб з пластинчастим оребренням можливе підвищення коефіцієнту тепловіддачі до 36%, при цьому коефіцієнт опору пучка залишається незмінним. Використання теплообмінних апаратів із запропонованими теплопередавальними елементами у складі суднових енергетичних установок з малообертовими двигунами та газопаротурбінних установок дозволяє покращити їх економічні та екологічні характеристики. Отримано, що для танкерів типу PANAMAX підвищення коефіцієнта корисної дії суднової енергетичної установки складає 1,3% завдяки використанню в утилізаційному котлі еліптичних поверхонь з пластинчастим оребренням і лунковими системами на ребрах. Індекс EEDI судна при цьому знизився на 1,7%. Для контейнеровозів дедвейтом понад 100000 т зміна цих показників відповідно склала 2,5 та 2,7% відповідно. Для суднової газопаротурбінної установки підвищення ККД склало 2,4%. Представлена математична модель енергетичної установки характеризується позитивними результатами апробації для конструктивних і повітряних розрахунків енергетичних установок суднової енергетики, транспорту і промисловості.

Ключові слова: суднова енергетична установка; ефективність; теплообмінний апарат; трубний пучок; інтенсифікація; оребрення; лунка.

Вступ

Одним зі способів підвищення ефективності суднових енергетичних установок є вдосконалення процесів перетворення теплоти і маси в їх елементах. Ці процеси визначаються законами термодинаміки, гідрогазо-динаміки, тепломасообміну і впливають на ефективний ККД, рівень теплових та шкідливих викидів, ресурс та компактність установок. Значний вплив на ці показники мають їх теплообмінні апарати як елементи енергетичних установок, що в залежності від впливу на робоче тіло підрозділяються на енергетичні і технологічні.

Сучасний стан проблеми вдосконалення процесів перетворення теплоти і маси в теплопередавальних елементах суднових енергетичних установок [1 - 4] свідчить про обмеженість результатів і ре-

комендацій щодо інтенсифікації процесів конвективного переносу теплоти і маси за умов компактності їх теплообмінних апаратів та створення на їх основі обладнання з поліпшеними економічними, екологічними, ресурсними і масогабаритними показниками.

Таким чином, метою представленої роботи є вдосконалення економічних, екологічних, ресурсних і масогабаритних характеристик енергетичних установок шляхом використання теплообмінних елементів з інтенсифікацією процесів конвективного переносу теплоти і маси.

Постановка задач

Для інтенсифікації процесів конвективного переносу теплоти і маси в теплообмінних елементах енергетичних установок широко використовуються різні

способи. Використання оребрених поверхонь характеризується переважанням зростання аеродинамічного опору над зростанням тепловіддачі. Переважне зростання тепловіддачі над аеродинамічним опором спостерігається при використанні лункових систем. Це стимулює розвиток досліджень у напрямку розробки теплообмінних елементів з переважанням зростання теплообміну над аеродинамічним опором шляхом використання оребрених поверхонь з лунками.

Метод дослідження – математичне моделювання процесів в енергетичних установках і їх елементах.

Оцінка ефективності суднових енергетичних установок з теплообмінними елементами виконувалася математичною моделлю, що складається з процедур «Головний двигун», «Енергетичний теплообмінний апарат», «Технологічний теплообмінний апарат», «Показники ефективності енергетичної установки», «Інтегральний коефіцієнт ефективності» [5].

Математична модель процедури «Головний двигун» містить апробоване описання термодинамічних процесів в дизельних та газотурбінних двигунах, що забезпечує її достовірність.

Математичні моделі процедур «Енергетичний теплообмінний апарат», «Технологічний теплообмінний апарат», описують процеси передачі теплоти

в теплообмінних апаратах як системи балансових рівнянь збереження кількості руху, енергії і маси.

Таким чином, для досягнення поставленої мети вирішені наступні задачі:

- виконана верифікація і валідація отриманих результатів інтенсифікації процесів теплопереносу на підставі порівняння розрахункових та експериментальних даних;

- отримані результати інтенсифікації процесу переносу теплоти і маси в трубчастих пучках з різною формою теплообмінної поверхні і розташуванням у просторі;

- виконані розрахунки ефективності і компактності теплообмінних апаратів з трубними пучками різних конструкцій;

- оцінена комплексна ефективність суднових дизельних і газотурбінних установок з теплообмінними апаратами на основі порівняння їх економічних, екологічних, ресурсних і масогабаритних показників.

Результати досліджень

Верифікація і валідація отриманих по математичній моделі результатів виконана для поодиноких і пучків труб і представлена на рис. 1-4.

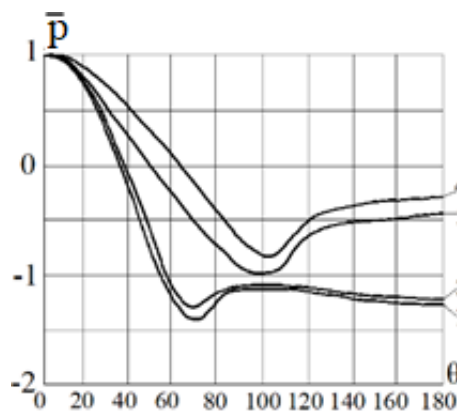
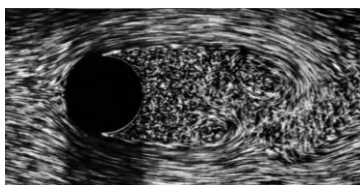


Рис. 1. Результати порівняння розподілу тиску на поверхні циліндрів різних поперечних перерізів при $d_{\text{екв}} = \text{const}$ та $Re = 1,1 \times 10^5$:

- 1 – дані [6], 2 – розрахунок круглий профіль,
- 3 – розрахунок плоскоовальний профіль ($a/b=2,7$),
- 4 – розрахунок еліптичний профіль ($a/b=2,5$)



а

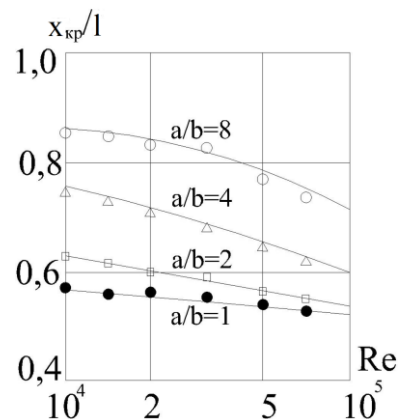
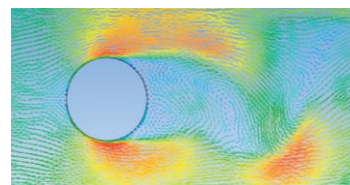


Рис. 2. Результати порівняння положення нейтральної точки на еліптичних циліндрах зі співвідношенням осей a/b : сплошні лінії – дані [7], ●, □, ○, Δ – результати математичного моделювання



б

Рис. 3. Результати порівняння обтікання кругового циліндру при $Re = 2000$: а – за даними [8], б – за даними результатів моделювання

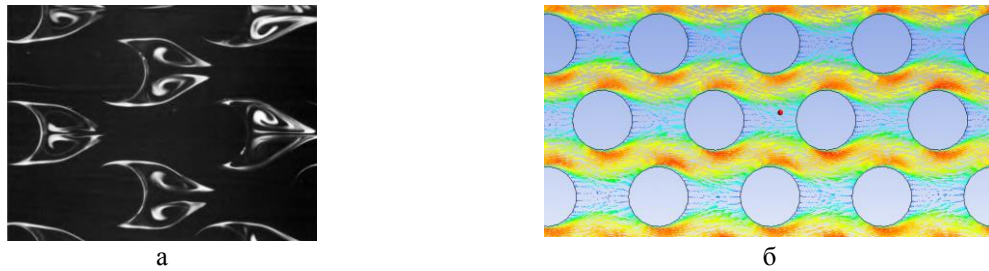


Рис. 4. Результати порівняння обтікання шахової решітки кругових циліндрів при $Re = 3000$: а – за даними [9]; б – результати моделювання

Порівнюючи результати поодиноких труб можна прийти до висновку, щодо ідентичності характеру течії, формування, відриву та руйнування приграничного шару на поверхні тіла з подальшим утворенням турбулентного вихрового сліду за кормовою

Аналізуючи поля течії наведені вище, можливо відзначити їх подібність. Деякі відмінності у характері приграничного шару і положення точки його відриву можливо пояснити тісним розташуванням циліндрів в пучку та їх взаємним впливом, що затримує відрив та наступне за ним руйнування приграничного шару та певною мірою зменшує розміри турбулентного сліду в кормовій частині об'єктів, що досліджувались.

Результати показують адекватність полів обтікання, отриманих за результатами експериментальних даних та розрахунків по запропонованій математичній моделі.

На рис. 5-9 представлено співставлення результатів математичного моделювання зі значеннями, отриманими іншими дослідниками [9-13].

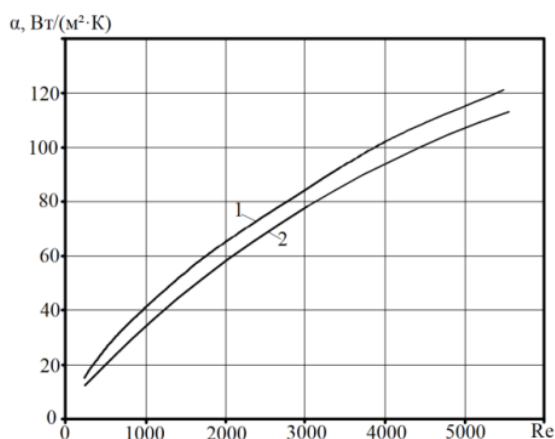


Рис. 5. Результати розрахунків для моделі пучка круглих труб: 1 – данні [9]; 2 – результати математичного моделювання

Таким чином, запропонована математична модель процесів перенесення теплоти в теплопередавальних елементах результатами верифікації та валідації шляхом порівняння результатів розрахунків з результатами фізичного експерименту має розбіжність результатів, що не перевищила 9,3%. Це обґрунтовує її використання у подальших дослідженнях ефективності енергетичних установок.

Ефективність процесів перенесення теплоти при профілюванні лунковими системами спірално-стрічкового оребрення з трубою-осною круглого перерізу. При дослідженнях оцінки ефективності теплообміну, розташування і розміри лункових систем на спірално-стрічковому оребренні, обрані за рекомендаціями [3]: вісь лунки проходить по центру ребра, діаметр лунки 0,004 м, глибина лунки 0,0015 м, крок лунки 0,01 м і отримані наступні критеріальні залежності:

– для коефіцієнту тепловіддачі

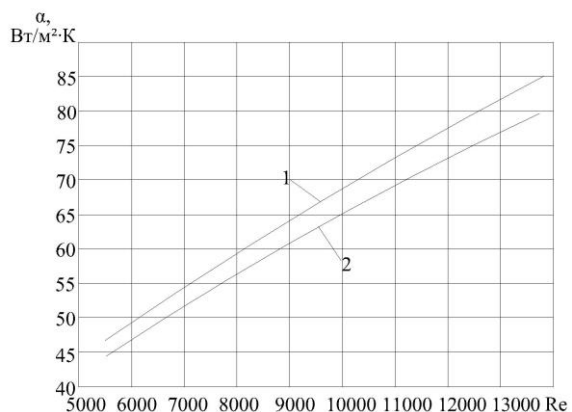


Рис. 6. Результати розрахунків для моделі «розрядженого» пучка еліптичних труб: 1 – данні [10]; 2 – результати математичного моделювання

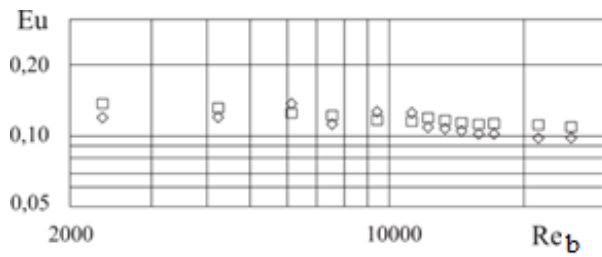


Рис. 7. Результати співставлення розрахунків чисел Eu:

□ – данні роботи [11]; ◇ – результати моделювання

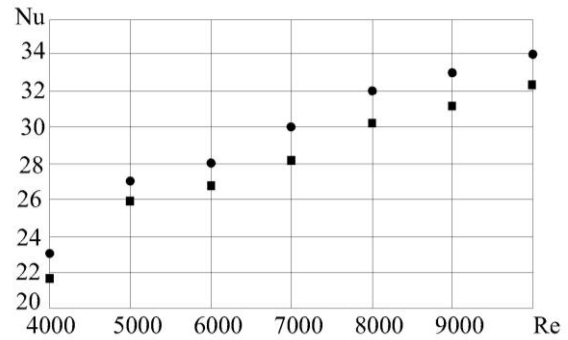
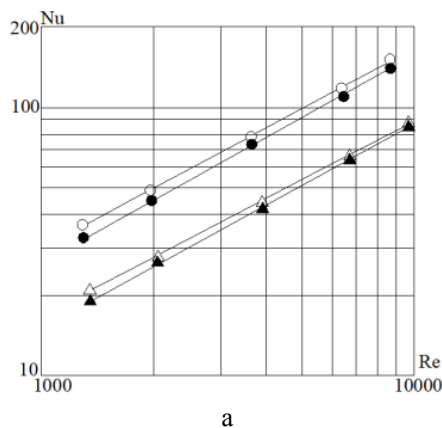
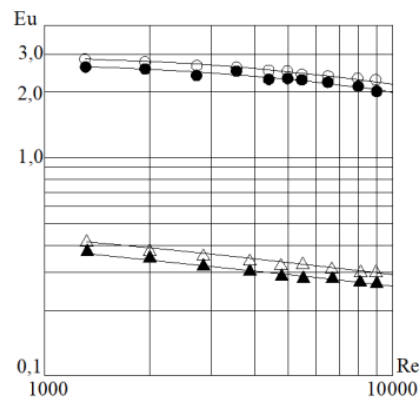


Рис. 8. Порівняння результатів досліджень процесів перенесення теплоти:

● – значення, отримані при експериментальних дослідженнях [12]; ■ – результати моделювання



а



б

Рис. 9. Порівняння результатів розрахункових та експериментальних досліджень залежностей чисел Nu (а) та Eu (б) від числа Re для пучка плоскоовальних труб з лунками:

○, △ – експериментальні данні [13], ●, ▲ – результати моделювання

$$Nu_f = 0,2035 \cdot \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right)^{0,2} \cdot \left(\frac{s}{d_{\text{екв}}} \right)^{0,18} \cdot \left(\frac{h}{d_{\text{екв}}} \right)^{-0,14} \cdot Re^{0,692} \cdot Pr^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}$$

де σ_1 , σ_2 – відповідно повздовжній та поперечний кроки; s та h – крок та висота ребер відповідно, м;
– для коефіцієнту гідродинамічного опору

$$Eu_f = 3,187 \cdot \varepsilon^{0,5} \cdot Re^{-0,25} \cdot \sigma_1^{-0,55} \cdot \sigma_2^{-0,5}$$

де ε – коефіцієнт оребрення.

Ці залежності доводять, що виконання на ребрах лункових систем здатне покращити ефективність тепловіддачі майже до 30% у порівнянні з пучками круглих неореброваних труб.

Ефективність процесів перенесення теплоти при профілюванні лунковими системами пластинчастого оребрення з трубою-оснотою еліптичного перерізу.

Схема розміщення лунк на поверхні пластинчастого оребрення представлені на рис. 10, де розташування і розміри лункових систем наступні [3]: вісь лунки проходить по центру бокової частини ребра по більшій стороні, діаметр лунки 0,003 м, глибина лунки 0,001 м.

В якості першого варіанту був прийнятий варіант з розташуванням лунк по малій осі еліпса (рис. 10, б), варіант в (рис. 10, в) визначав розташування лунк на початковій і кінцевій ділянках ребра, варіант г (рис. 10, г) розглядав оцінку ефективності гіпотези розташування лунк в носовій і кормовій частині ребра по великій осі еліпса.

Як і очікувалося, нанесення лунк на ребро значно інтенсифікує тепловіддачу за рахунок зниження аеродинамічного опору при обтіканні. Найбільш ефективним є варіант рис. 10, в – послідовного розташування лунк на ребрі, оскільки в ньому спостерігається найбільше зростання ефективності тепловіддачі в порівнянні з ростом опору. Варіант рис. 10, г – з носовою і кормовим розташуванням лунк не дав

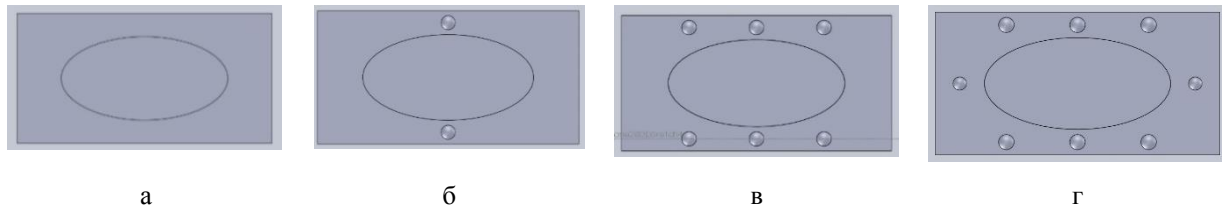


Рис. 10. Варіанти розташування лунок на ребрі:

а – базовий варіант без лунок, б – по малій осі еліпса, в – на початковій і кінцевій ділянках ребра, г – на початковій і кінцевій ділянках та у носовій та кормовій частинах ребра.

очікуваного ефекту, оскільки додатковий опір носовому вихору, який розвивається, створила носова частина труби, а кормова лунка знаходиться в гідродинамічному сліді лунок на ребрах.

Для варіанту рис. 10, в отримані наступні залежності:

– для коефіцієнту тепловіддачі

$$Nu_f = 0,2441 \cdot \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right)^{0,2} \cdot \left(\frac{s}{d_{\text{екв}}} \right)^{0,18} \cdot \left(\frac{h}{d_{\text{екв}}} \right)^{-0,14} \cdot Re^{0,682} \cdot Pr^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25},$$

де h – відстань між стінкою труби і краєм ребра по великій осі еліпса, м;

– для коефіцієнту гідродинамічного опору

$$Eu_f = 2,832 \cdot \varepsilon^{0,5} \cdot Re^{-0,25} \cdot \sigma_1^{-0,55} \cdot \sigma_2^{-0,5},$$

де ε – коефіцієнт оребрення.

В цьому випадку можливо підвищити коефіцієнт тепловіддачі у порівнянні з пучками круглих неореброваних труб до 36%, при однакових значеннях коефіцієнту опору пучка.

Отримані результати дозволили оцінити ефективність використання теплообмінних апаратів із запропонованими теплопередавальними елементами у складі суднових енергетичних установок.

Суднові енергетичні установки з головними малооборотними двигунами. Розглянуто два варіанта енергетичних установок, котрі відрізняються потужністю головних двигунів та складом установки.

Варіант I. Суднова енергетична установка з двигуном MAN B&W 6S50ME-B9.3 потужністю $N_e=8680$ кВт, утилізаційним котлом головного двигуна паропродуктивністю 1,36 т/год та допоміжним котлом паропродуктивністю 16 т/год.

Вихідні дані для розрахунку прийняті за [14]. Для обґрунтування достовірності математичного моделювання процесів термодинамічного циклу двигуна внутрішнього згоряння розрахунки виконані з

використанням трьох програмних середовищ [15 - 17]. Результати показали, що підвищення ефективності охолоджувача з 0,90 до 0,94 дає можливість зниження витрати палива майже на 0,0004...0,0007кг/(кВт·год), а найбільшу ефективність мають оребрені поверхні з еліптичних труб з лунковими системами на ребрах.

Згідно даних [18], пароспоживання на окремих режимах роботи установки досягає 16,5 т/год. Тоді, використовуючи підігрів живильної води котла до 120°C у високотемпературній секції охолоджувача надувного повітря головного двигуна можливо збільшення паропродуктивності утилізаційного котла до 3,63 т/год. Таке підвищення ефективності утилізаційного котла до 0,8 дозволяє економію палива допоміжного котла до 11%.

Варіант II. Суднова енергетична установка з двигуном MAN B&W 12S90ME-C9.2 потужністю 69720 кВт з системою «глибокої» утилізації теплоти з виробленням пари утилізаційним котлом паропродуктивністю 24 т/год для отримання додаткової електричної енергії в паротурбогенераторі. В установці живильна вода спочатку підігривається в охолоджувачі надувного повітря головного двигуна з поверхнею теплопередачі, виконаної з ореброваних еліптичних труб з лунковими системами на ребрах, до 120°C, після чого подається в утилізаційний котел. При оцінці ефективності утилізаційного котла прийняті параметри поверхні теплопередачі: $d_{\text{екв}}=0,022$ м та кроки труб в пучках $S_1/d_{\text{екв}}=1,3$ та $S_2/d_{\text{екв}}=1,6$. В цьому дослідженні та у наступних приймалася сталість масогабаритних та ресурсних показників котла та охолоджувача надувного повітря.

Параметри двигуна прийняті за даними [19], площа поверхні нагріву, паропродуктивність, аеродинамічний опір утилізаційного котла прийняті у відповідності до [20].

Отримані результати показують можливість зниження питомої витрати палива головного двигуна з 0,1522 до 0,1455 кг/(кВт·год), тобто майже на 4,5%.

Суднові газопаротурбінні установки. Аналіз впливу параметрів утилізаційного котла на показники установки виконано для ролкера проекту 1609, параметри якої прийняті за даними [21]. Розрахунки

параметрів циклів газопаротурбінних установок виконано як у [22], а оцінка показників утилізаційного котла у відповідності до рекомендацій [20]. Результати показали підвищення ККД установки на 2,4%.

Кількість шкідливих викидів суднового головного дизельного двигуна 12S90ME-C9.2 знижається пропорційно витраті палива і при підвищенні ККД ЕУ з 55,5% до 57,5% складе 3,5%, а зниження інтенсивності теплових викидів – 8%.

Запропоновані заходи сприятимуть частковому досягненню зниження індексу *EEDI* при обґрунтованні проектних рішень по визначенню ефективних схем та характеристик інноваційних суднових енергетичних установок танкерів та балкерів типу *PANAMAX* та контейнеровозів.

Очікувані результати впровадження інтенсифікації теплопередачі для підвищення ефективності СЕУ танкеру представлені у табл. 1.

Таблиця 1

Очікувані результати впровадження інтенсифікації теплопередачі для підвищення ефективності СЕУ танкеру

№	Показники, од. виміру	Значення	
		Базове [23]	Розрахункове
1	ККД СЕУ, %	50,8	52,1
2	<i>EEDI</i>	8,02	7,88
3	Рівень теплових викидів	0,968	0,936
4	Зниження рівня шкідливих викидів, %	–	1,3

Аналіз складу енергетичних установок балкерів [23] показав, що паропродуктивність утилізаційних котлів, що входять до їх складу, не перевищує 1000...1500 кг/год., що дає можливість забезпечити споживачів СЕУ на ходових режимах. В цьому випадку інтенсифікація теплопередачі в утилізаційному котлі може застосовуватися для зменшення його масогабаритних показників.

Контейнеровози. Згідно даних [23], для контейнеровозів дедейттом понад 100000 т потужність суднової електростанції може досягати 33...41% потужності головного двигуна. Принципова схема системи утилізації теплоти високопотенційних вторинних енергоресурсів головного двигуна енергетичної установки аналогічна вказаній для танкерів.

Встановлено, що використання запропонованих технічних рішень по інтенсифікації процесів перенесення теплоти в охолоджувачі надувного повітря та утилізаційному котлі головного двигуна дозволяє знизити викиди на ходовому режимі завдяки зниженню загальної витраті пального, та відповідно знизити значення коефіцієнта *EEDI* до 2,0% (табл.2).

Таблиця 2

Очікувані результати впровадження інтенсифікації теплопередачі для підвищення ефективності СЕУ контейнеровозу

№	Показники, од. виміру	Значення	
		Базове [23]	Розрахункове
1	Потужність системи WHRS, МВт	2,48	3,24
2	ККД СЕУ	54,3	56,8
3	<i>EEDI</i>	17,31	16,88
4	Рівень теплових викидів	0,842	0,761
5	Зниження рівня шкідливих викидів, %	–	2,5

Заключення

Використання теплообмінних елементів в складі суднових енергетичних установок з інтенсифікацією процесів конвективного переносу теплоти в разі переважного зростання тепловіддачі над аеродинамічним опором забезпечує вдосконалення їх економічних, екологічних, ресурсних і масогабаритних характеристик наступним чином.

1. Для суднових енергетичних установок покращення показників до 5% економічності, 11% теплових викидів, 5% шкідливих викидів досягається при застосуванні термогазодинамічної інтенсифікації сукупних процесів конвективного переносу теплоти і маси за рахунок використання еліптичних пучків труб з оребренням, профільованими лунковими системами, що є найбільш прийнятним напрямком у порівнянні з існуючими.

3. Доведено, що підвищення ефективності перенесення теплоти до 36% в суднових утилізаційних котлах дизельних та газотурбінних установок досягається додатковим використанням лункових систем на ребрах оребрених спірально-стрічковим оребренням круглих та плоским оребренням еліптичних трубах зі співвідношенням висоти лунки H до її діаметру d $H/d = 0,125...0,5$ для спірально-стрічкового оребрення та $H/d = 0,1...0,3$ для плоского оребрення еліптичних труб з послідовним розташуванням лунок у порівнянні з пучками гладких круглих труб

3. Розроблена математична модель енергетичної установки з урахуванням вдосконалення процесів перетворення теплоти і маси в їх теплопередаючих елементах, як сукупність процедур «Головний двигун», «Енергетичний теплообмінний апарат», «Технологічний теплообмінний апарат», «Показники ефективності енергетичної установки», «Інтегральний коефіцієнт ефективності», характеризується позитивними результатами апробації для конструктивних і повірочних розрахунках енергетичних установок суднової

енергетики, транспорту і промисловості, що підтверджено організаціями проєктантами такої техніки

Внесок авторів: формулювання проблеми, верифікація дослідницької математичної моделі, аналіз результатів верифікації, аналіз результатів апробації та перспектив розвитку суднової енергетики, формулювання висновків – **В. В. Кузнецов**; аналіз інформаційних джерел та формулювання висновків – **А. П. Шевцов**.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису

Література

1. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. Интенсификация теплообмена [Текст] : монография / Ю. Ф. Горьшиов [и др.] ; под общ. ред Ю. Ф. Горьшиова. – Казань, 2009. – 531 с.
2. Халатов, А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Т. 7. Вихревые технологии аэротермодинамики в энергетическом газотурбостроении [Текст] / А. А. Халатов, А. А. Авраменко, И. В. Шевчук. – Институт технической теплофизики НАН Украины. – Киев, 2008. – 292 с.
3. Теплообмен и гидродинамическое сопротивление при поперечном обтекании воздухом первого ряда пучка труб со сферическими углублениями [Текст] / А. А. Халатов, А. Ж. Мейрис, Т. В. Доник, А. В. Гамрецькая // Вісник НТУ „ХПИ”. – 2015. – № 16 (1125). – С. 50–53.
4. Халатов, А. А. Обобщение опытных данных по фактору аналогии Рейнольдса для интенсификаторов теплообмена различных типов [Текст] / А. А. Халатов, А. В. Окишев, В. Н. Онищенко // Пром. Теплотехника. – 2010. – Т. 32, № 5. – С. 5–13.
5. Кузнецов, В. В. Математичне моделювання процесів переносу теплоти і маси в суднових енергетичних установках [Текст] / В. В. Кузнецов, А. П. Шевцов // Матеріали XIV МНПК «СЕУТОО», Херсон. – ХДМА, 2023. – С. 221-224
6. Бэтчелор, Д. Введение в механику жидкости [Текст] / Д. Бэтчелор. – М. : Мир, 1973. – 758 с.
7. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя [Текст] / Г. Шлихтинг. – М. : Наука, 1974. – 712 с.
8. Ван-Дайк, М. Альбом течений жидкости и газа [Текст] / М. Ван-Дайк. – М. : Мир, 1986. – 184 с.
9. Тепловой расчет котлов [Текст] : Нормативный метод. Издание 3-е, перераб. и доп. Изд-во НПО ЦКТИ, СПб, 1998. – 256 с.
10. Кутателадзе, С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление [Текст] : Справ. пособие / С. С. Кутателадзе. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
11. Аналіз експериментальних даних з аеродинамічного опору пакетів плоскоовальних труб [Електронний ресурс] / С. М. Письменний, В. А. Кондратюк, О. М. Терех [та ін.] // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Том. 6, № 8 (78). – С. 19-24. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.55529.
12. Гогоренко, А. А. Создание перспективных конструкций охладителей наддувочного воздуха тепловозных двигателей [Електронний ресурс] / А. А. Гогоренко // Вісник НУК. – 2011. – № 1. – Режим доступу: <http://evn.nuos.edu.ua/article/view/23551/21062> (дата звернення 25.03.2023).
13. Кондратюк, В. А. еплообмін та аеродинаміка пакетів плоскоовальних труб з лунками. [Текст] / В. А. Кондратюк, С. М. Письменний, О. М. Терех // Scientific Journal «ScienceRise». – 2015. – № 11/2(16). – С. 10-14.
14. MAN B&W S50ME-B9.3. Project Guide Electronically Controlled Two stroke Engines [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/print-ed/S50ME-B9_3.pdf (дата звернення 25.03.2023).
15. Наливайко, В. С. Суднові двигуни внутрішнього згоряння [Текст] / В. С. Наливайко, Б. Г. Тимошевський, С. Г. Ткаченко. – Миколаїв : видавець Торура В. В., 2015. – 332 с.
16. Blitz-PRO is the Internal Combustion Engines operating cycle simulation tool. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://blitzpro.zeddmalam.com/application/index/signin> (дата звернення 25.03.2023).
17. Расчёт рабочего цикла дизеля (метод В. И. Гриневецкого - Е. К. Мазинга) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://sudoremont.blogspot.com/p/blog-page_19.html (дата звернення 25.03.2023).
18. 17012-360.064.345Г. Запасы топлива, смазочного масла и котельной воды. Паровой баланс котельной установки [Текст]. Расчеты. УкрЦКБ ЧСП. – Николаев, 1993. – 254 с.
19. MAN B&W S90ME-C9.2-TH Project Guide Electronically Controlled Two stroke Engines. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/print-ed/S90ME-C9_2.pdf (дата звернення 25.07.2023).
20. Exhaust gas economizer MISSION™ XW [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.alfalaval.com/products/heat-transfer/boilers/exhaust-gas-economizer/aalborg-xw/> (дата звернення 25.03.2023).
21. ДП НВКГ «Зоря»- «Машипроект» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zmturbines.com/ru/serial-production/engines/> (дата звернення 25.03.2023).
22. Романовський, Г. Ф. Теоретичні основи проєктування суднових газотурбінних агрегатів [Текст] / Г. Ф. Романовський, М. В. Вациленко, С. І. Сербін. – Миколаїв, 2003. – 304 с.
23. Significant Ship 2014-2020 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.libramar.net/news/significant_ships_series/1-0-140 (дата звернення 25.03.2023).

References

- Gortyshov, Y. F. *Teplogidravlicheskaya effektivnost' perspektivnykh sposobov intensivifikatsii teplootdachi v kanalakh teploobmennogo oborudovaniya. Intensifikatsiya teploobmena: monografiya* [Thermal-hydraulic efficiency of promising methods of heat transfer intensification in the channels of heat exchange equipment. Intensification of heat transfer: monograph]. Kazan, 2009. 531 p.
- Khalatov, A. A., Avramenko, A. A. & Shevchuk, I. V. *Teploobmen i gidrodinamika v poljah centrobeznykh massovykh sil. T. 7. Vihrevye tehnologii ajerotermodinamiki v jenergeticheskoy gazoturbostroenii* [Heat transfer and hydrodynamics in the fields of centrifugal mass forces. T. 7. Vortex technologies of aerothermodynamics in power gas turbine construction]. Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Kyiv, 2008. 292 p.
- Khalatov, A. A., Meiris, A. Zh., Donik, T. V. & Gamretskaya, A. V. *Teploobmen i gidrodinamicheskoe soprotivlenie pri poperechnom obtekanii vozduhom pervogo rjada puchka trub so sfericheskimi uglublenniyami* [Heat transfer and hydrodynamic resistance during transverse air flow around the first row of a bundle of pipes with spherical depressions]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*, 2015, no. 16 (1125), pp. 50-53.
- Khalatov, A. A., Okishev, A. V. & Onishchenko, V. N. *Obobshchenie opytnykh dannykh po faktoru analogii Rejnol'dsa dlja intensivifikatorov teploobmena razlichnykh tipov* [Generalization of experimental data on the Reynolds analogy factor for heat transfer intensifiers of various types]. *Industrial Heat Engineering*, 2010, vol. 32, no. 5, pp. 5-13.
- Kuznetsov, V. V. & Shevtsov, A. P. *Matematychni modelyuvannya protsesiv perenosu teploty i masy v sudnovykh enerhetychnykh ustanovkakh* [Mathematical modeling of heat and mass transfer processes in ship power plants]. *Materialy XIV MNPk «SEUTTOO»* [Materials of XIV MNPk "CEUTTOO"]. KSMa, Kherson, 2023, pp. 221-224.
- Batchelor, D. *Vvedenie v mehaniku zhidkosti* [Introduction to Fluid Mechanics]. Moscow, Mir, 1973. 758 p.
- Schlichting, G. *Teoriya pogranychnoho sloja* [Boundary layer theory]. Moscow, Nauka, 1974. 712 p.
- Van Dyke, M. *Al'bom techenij zhidkosti i gaza* [Album of liquid and gas flows]. Moscow, Mir, 1986. 184 p.
- Heat calculation of boilers (Normative method). 3rd edition, rev. and add.* Izd-vo NPO CKTI, 1990. 256 p. (In Russian)
- Kutateladze, S. S. *Teploperedacha i gidrodinamicheskoe soprotivlenie* [Heat Transfer and Fluid resistance]. Moscow, Energoatomizdat, 1990. 367 p.
- Pismenniy, E. M., Kondratyuk, V. A., Terekh, O. M., Rudenko, O. I. & Baranyuk, O. V. *Analiz eksperymental'nykh danykh z aerodynamichnoho oporu paketiv ploskooval'nykh trub* [Analysis of experimental data on aerodynamic drag of flat-oval tube bundles]. *Eastern-European Journal*, 2015, vol. 6, iss. 8 (78), pp. 19-24. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.55529.
- Gogorenko, A. A. *Sozdanie perspektivnykh konstrukcij ohladitelej nadduvochnogo vozduha teplovoznnykh dvigatelej* [Creation of advanced designs of charge air coolers for diesel engines]. *Bulletin of NUK*, 2011, no. 1. Available at: <http://evn.nuos.edu.ua/article/view/23551/21062> (accessed 25.03.2023).
- Kondratyuk, V. A., Pismenniy, E. M. & Terekh, O. M. *Teploobmin ta aerodynamika paketiv ploskooval'nykh trub z lunkamy* [Heat transfer and aerodynamics of packages of flat-oval tubes with dimples]. *Scientific Journal «ScienceRise»*, 2015, no. 11/2(16), pp.10-14.
- "MAN B&W S50ME-B9.3. Project Guide Electronically Controlled Two stroke Engines". Available at: https://man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/printed/S50ME-B9_3.pdf (accessed 25.07.2023).
- Nalyvaiko, V. S., Tymoshevsky, B. G. & Tkachenko, S. G. *Sudnovi dvyhuny vnutrishn'oho zhoryannya* [Marine internal combustion engines]. Publisher Torubara V. V., Mykolaiv, 2015. 332 p.
- Blitz-PRO is the Internal Combustion Engines operating cycle simulation tool*. Available at: <http://blitzpro.zeddmalam.com/application/index/signin> (accessed 25.03.2023).
- Raschet rabocheho tsikla dizelya (metod V. I. Grinevetskogo - E. K. Mazinga)* [Calculation of diesel engine operating cycle (method of V. I. Grinevetsky - E. K. Mazinga)]. Available at: <https://sudoremont.blogspot.com/2014/11/raschetdizelya.html> (accessed 25.03.2023).
- UkrCCB ChSP 17012-360.064.345G. Stocks of fuel, lubricating oil and boiler water. Steam balance of the boiler plant. Calculations*. UkrCCB ChSP. Mykolaiv, 1993. 254 p. (In Russian).
- MAN B&W S90ME-C9.2-TII Project Guide Electronically Controlled Two stroke Engines. Available at: https://man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/printed/S90ME-C9_2.pdf (accessed 25.03.2023).
- Exhaust gas economizer MISSION™ XW*. Available at: <https://www.alfalaval.com/products/heat-transfer/boilers/exhaust-gas-economizer/aalborg-xw/> (accessed 25.03.2023).
- «Zorya»-«Mashproekt». Available at: <https://zmturbines.com/ru/serial-production/engines/> (accessed 25.03.2023).
- Romanovsky, G. F., Vashchylenko, M. V. & Serbin, S. I. *Teoretychni osnovy proektuvannya sudnovykh hazotu-rbinnykh ahrehativ* [Theoretical foundations of designing marine gas turbine units]. Mykolaiv, 2003. 304 p.
- Significant Ship 2014-2020*. Available at: https://www.libramar.net/news/significant_ships_series/1-0-140_ (accessed 25.03.2023).

Надійшла до редакції 05.04.2023, розглянута на редколегії 08.08.2023

EFFICIENCY OF MARINE POWER PLANTS WITH HEAT EXCHANGERS MADE FROM TUBE BUNDLES WITH DIMPLE SYSTEMS

Valerii Kuznetsov, Anatolii Shevtsov

The direction of increasing the efficiency of marine power plants by using heat exchange elements that implement intensive methods of heat transfer, which are characterized by a predominant increase in heat transfer over aerodynamic resistance, is considered. The research method is mathematical modeling of processes in power plants at the level of their individual elements – heat engine, power, and technological heat exchangers. The adequacy of the mathematical model for research the efficiency of power plants is justified by the results of verification and validation by comparing the results of calculations with the results of a physical experiment that have a discrepancy not exceeding 9.3 %. The goal of the research is to improve the economic, environmental, resource and weight-size parameters of power plants by using heat exchange elements with the intensification of the processes of convective transfer of heat and mass by using finned surfaces with dimples. Thanks to the performance of dimple systems on the edges of round pipes with spiral-ribbon finning and elliptical pipes with lamellar finning, it is possible to increase the heat transfer coefficient up to 36 %, while the resistance coefficient of the beam remains unchanged. The use of heat exchangers with the proposed heat transfer elements as part of ship power plants with low-speed engines and gas-and-steam turbine units allows to improve their economic and environmental characteristics. It was obtained that for tankers of the PANAMAX type, the increase in the efficiency of the ship's power plant is 1.3 % due to the use of elliptical surfaces with plate finning and hole systems on the ribs in the utilization boiler. The ship's EEDI index decreased by 1.7 %. For container ships with a deadweight of more than 100,000 tons, the change in these indexes was 2.5 and 2.7 %, respectively. For a marine gas-and-steam turbine plant, the efficiency increase was 2.4 %. The presented mathematical model of the power plant is characterized by positive results of approbation for constructive and verification calculations of power plants in marine energy, transport, and industry.

Keywords: marine power plant; efficiency; heat exchanger; tube bundle; intensification; finning; dimple.

Кузнецов Валерій Валерійович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. технічної теплофізики і суднових паровиробних установок, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Шевцов Анатолій Павлович – д-р техн. наук, проф., проф. Навчально-наукового центру Морської інфраструктури, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Valerii Kuznetsov – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Engineering Thermophysics and Marine Steam-generating Plants Department, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,

e-mail: valeriy.kuznetsov@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3678-595X, Scopus Author ID 54583693600.

Anatolii Shevtsov – Doctor of Technical Science, Professor, Professor of Study and Scientific Center of Marine Infrastructure, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,

e-mail: aootnet@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8692-6458, Scopus Author ID 57267976400.