

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
імені адмірала Макарова

Андрєєв Артем Андрійович

УДК 621.436.13

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ НАДДУВНОГО ПОВІТРЯ ДЛЯ
СУДНОВИХ МАЛООБЕРТОВИХ ДИЗЕЛІВ**

Спеціальність 05.05.03
Двигуни та енергетичні установки

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Миколаїв 2014

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник – д-р техн. наук, професор **Радченко Микола Іванович**,
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова,
завідувач кафедри кондиціонування і рефрижерації

Офіційні опоненти:

д-р техн. наук, професор **Варбанець Роман Анатолійович**,
Одеський національний морський університет,
Міністерство освіти і науки України,
завідувач кафедри суднових енергетичних установок
і технічної експлуатації,

канд. техн. наук **Дашевський Юрій Яковлевич**,
ДП НВКГ "Зоря"- "Машпроект",
начальник сектора теплових і гідравлічних
розрахунків відділу турбін.

Захист відбудеться " ___ " _____ 2014 р. о _____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради ДЗ8.060.01 Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: 54025, м. Миколаїв, пр. Героїв Сталінграда, 9

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: 54025, м. Миколаїв, пр. Героїв Сталінграда, 9

Автореферат розісланий " ___ " _____ 2014 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
д-р техн. наук, професор

А.П. Шевцов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність дослідження. Умови експлуатації суднових малообертових дизелів (МОД) відрізняються значною зміною температури зовнішнього повітря протягом рейсу, а відтак і повітря на вході турбокомпресора (ТК) та наддувного повітря після ТК. Паливна ефективність МОД залежить, окрім параметрів повітря на вході ТК, ще й від температури наддувного повітря на вході наддувного ресивера, яка, в свою чергу, – від температури охолоджуючої (забортної) води. При високих температурах забортної води штатні охолоджувачі наддувного повітря (ОНП) не справляються із завданням підтримання його температури на прийнятному рівні, достатньому для демпфування підвищених температур повітря на вході ТК і забезпечення високої паливної ефективності МОД.

Оскільки обсяги теплоти, що відводиться від наддувного повітря, доволі значні, то її утилізація тепловикористовуючими установками охолодження (ТУО) – термотрансформаторами (ТТр) – для зниження температури наддувного повітря дозволяло б утримувати її навіть нижче температури охолоджуючої забортної води. Такий принципово новий підхід, коли наддувне повітря є одночасно об'єктом охолодження і джерелом скидної теплоти, дозволяє вирішувати задачі охолодження та утилізації як двоєдину, забезпечуючи стабільно високу паливну ефективність МОД протягом усього рейсу. Застосування низькокиплячих робочих тіл (НРТ) в ТУО як проміжному контурі охолодження наддувного повітря забезпечує зниження температури повітря нижче температури забортної води.

Утилізація теплоти та охолодження повітря в енергетичних установках і двигунах досліджуються провідними навчальними закладами, академічними інститутами та організаціями: НТУ "ХПІ", НАУ "ХАІ" (Харків), ІТТФ НАНУ, НТУУ "КПІ" (Київ), НУК (Миколаїв), ОНМА, ОНМУ, ОНАХТ (Одеса), СевНТУ (Севастополь), а також виробниками суднових дизелів "MAN", "Wartsila", "Mitsubishi". Однак питання підвищення ефективності охолодження наддувного повітря шляхом утилізації його ж теплоти залишаються невирішеними.

Науково-прикладною задачею, яка вирішується в дисертаційній роботі, є розробка тепловикористовуючої системи охолодження (ТСО), що утилізує теплоту наддувного повітря судового МОД і забезпечує його охолодження нижче температури забортної води при підвищених температурах зовнішнього повітря та забортної води.

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

Наведені в дисертації матеріали узагальнюють результати робіт, виконаних автором у рамках державної науково-технічної програми "Новітні та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі" і планів НДР Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, НДР № держ. реєстр. 0106U000828 "Розробка теоретичних основ концепції судової тригенерації", № ДР 0109U002218 "Розробка технологій комбінованого виробництва енергії на низькокиплячих робочих тілах для судових комплексів енергожиттезабезпечення", № ДР 0110U003401 GP/F27/0082 по гранту Президента України, в яких автор брав участь на посаді молодшого наукового співробітника.

Об'єктом дослідження є процеси охолодження в системах наддувного повітря для судових малообертових дизелів.

Предмет дослідження – параметри процесів охолодження наддувного повітря судових малообертових дизелів термотрансформатором.

Метою наукового дослідження є підвищення ефективності системи охолодження наддувного повітря судових МОД.

Основні задачі наукового дослідження:

- вибір типу термотрансформатора та розробка альтернативних схем системи охолодження наддувного повітря для судових МОД;
- визначення глибини охолодження наддувного повітря МОД при характерних температурних напорах в теплообмінних апаратах;
- розробка математичної моделі для мінімізації масогабаритних показників охолоджувача наддувного повітря для МОД (шляхом варіювання параметрів в генераторі, випарнику і водяній секції ОНП);
- розробка математичної моделі для мінімізації масогабаритних показників ежекторного термотрансформатора (варіюванням схемних рішень і робочих параметрів);
- встановлення закономірностей процесів охолодження наддувного повітря МОД з утилізацією його теплоти, а також особливості впливу цих процесів на параметри і показники МОД, які враховують змінні протягом рейсу температури зовнішнього повітря та забортної води;
- розробка та аналіз конструктивних схем системи охолодження наддувного повітря з ежекторним термотрансформатором для судового МОД;

– розробка способів раціональної організації процесів охолодження наддувного повітря суднових МОД з утилізацією його теплоти і системи охолодження, які їх реалізують і мінімізують вплив підвищеної температури заборотної води на паливну ефективність МОД, визначення параметрів процесів, які забезпечують високу паливну ефективність МОД за рахунок охолодження наддувного повітря з урахуванням змінних протягом рейсу зовнішніх параметрів.

Методика і методи дослідження. Використано методологічний підхід до вирішення задачі охолодження наддувного повітря, згідно з яким наддувне повітря розглядається водночас як джерело теплоти і як об'єкт охолодження. Застосовано фізико-математичний метод дослідження, який включає аналіз ефективності охолодження наддувного повітря суднових МОД, розробку математичної моделі процесів охолодження наддувного повітря МОД і перевірку її адекватності, виявлення закономірностей процесів охолодження наддувного повітря МОД з утилізацією його ж теплоти, визначення раціональних параметрів процесів, розробку способів раціональної організації процесів та їх реалізацію в схемних рішеннях систем охолодження наддувного повітря суднових МОД.

Наукові результати, які автор захищає, та їх новизна:

1. Вперше розроблено триконтурну ТСО наддувного повітря суднових МОД, яка включає ТУО прісної води як додатковий проміжний контур на НРТ і забезпечує охолодження наддувного повітря нижче температури заборотної води.

2. Встановлено, що охолодження наддувного повітря судового МОД в ТСО, що утилізує теплоту наддувного повітря з коефіцієнтом трансформації теплоти вище 0,4, забезпечує зниження його температури до 15...25 °С і скорочення питомої витрати палива МОД на 1,5...2,5 г/(кВт·год) порівняно з його охолодженням заборотною водою.

3. Вперше запропоновано принцип охолодження наддувного повітря суднових МОД з використанням його ж теплоти у зворотному циклі трансформації теплоти і розроблено способи раціональної організації процесів охолодження наддувного повітря МОД, що його реалізують, – у двоступеневій триконтурній ТСО з утилізацією теплоти наддувного повітря (в генераторі пари НРТ високого тиску високотемпературного ступеня ТСО) і охолодженням повітря з відведенням теплоти до киплячого НРТ (у випарнику низькотемпературного ступеня ТСО).

4. Вперше виявлені закономірності процесів охолодження наддувного повітря МОД у двоступеневій триконтурній ТСО з утилізацією теплоти наддувного повітря і застосуванням НРТ, а також особливості впливу цих процесів на параметри і показники МОД (температуру наддувного повітря і питому витрату палива) та ТУО (тепловий коефіцієнт, питомі теплові навантаження високо- і низькотемпературного ступенів ОНП), які враховують співвідношення теплових навантажень високо- і низькотемпературного (відповідно тепловикористовуючого та охолоджуючого) ступенів ОНП при змінних протягом рейсу температурах зовнішнього повітря та заборотної води.

5. Розроблено фізичну та математичну моделі процесів охолодження наддувного повітря МОД у триконтурній ТСО з утилізацією теплоти наддувного повітря термотрансформатором на НРТ, які враховують співвідношення теплових навантажень у прямому та зворотному циклах трансформації теплоти (високо- і низькотемпературного контурів відповідно тепловикористовуючого й охолоджуючого ступенів ОНП), дозволяють визначати значення коефіцієнта трансформації теплоти та параметри процесів охолодження з урахуванням змінних протягом рейсу температур зовнішнього повітря та заборотної води.

Способи та схемні рішення тепловикористовуючих систем охолодження наддувного повітря МОД захищені 3 патентами України на винахід.

Достовірність результатів досліджень підтверджена даними з питомої витрати палива судового МОД упродовж рейсу при різних температурах наддувного повітря, забезпечена застосуванням для розрахунку паливної ефективності МОД з охолодженням повітря на вході програми виробника МОД корпорації "MAN", апробованої даними стендових випробувань МОД, збереженням встановлених закономірностей у широкому діапазоні режимів судової експлуатації, результатами порівняння паливної ефективності МОД із охолодженням наддувного повітря та без нього.

Адекватність рівнянь, що використовуються для розрахунку теплообмінних апаратів підтверджено багаторічними обширними дослідженнями на ПО «Екватор» та на кафедрі ТОТ та СПГА Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

Теоретичне значення мають наступні результати дослідження:

– методологічний підхід до підвищення ефективності охолодження наддувного повітря суднових МОД, відповідно до якого наддувне повітря одночасно є джерелом теплоти (для тепловикористовуючого високотемпературного ступеня ОНП) у прямому циклі трансформації теплоти та об'єктом охолодження (для охолоджуючого низькотемпературного ступеня ОНП) у зворотному циклі трансформації теплоти і який дозволяє створити систему глибокого охолодження наддувного повітря – нижче температури заборотної води;

– закономірності процесів охолодження наддувного повітря МОД у двоступеневій триконтурній ТСО з утилізацією теплоти наддувного повітря і застосуванням НРТ, а також особливості впливу цих процесів на параметри та показники МОД і ТУО, які враховують співвідношення теплових навантажень високо- і низько-температурного (відповідно тепловикористовуючого і охолоджуючого) ступенів ОНП в залежності від змінних протягом рейсу температури зовнішнього повітря та заборотної води;

– принципи та способи раціональної організації процесів охолодження наддувного повітря суднових МОД з використанням теплоти наддувного повітря для його ж охолодження у зворотному циклі трансформації теплоти, які враховують співвідношення теплових навантажень високо- і низькотемпературного (відповідно тепловикористовуючого і охолоджуючого) ступенів ОНП і забезпечують охолодження наддувного повітря нижче температури заборотної води.

Практичну цінність становлять результати дослідження:

– створено методику визначення параметрів процесів охолодження наддувного повітря МОД у двоступеневій триконтурній тепловикористовуючій системі охолодження з утилізацією теплоти наддувного повітря, що забезпечує зниження температури наддувного повітря на 15...20 °С, а також її стабілізацію у порівнянні з його охолодженням заборотною водою;

– розроблено рекомендації з вибору раціональних значень параметрів процесів охолодження наддувного повітря суднових МОД, які забезпечують зменшення питомої витрати палива на 2,0...2,5 г/(кВт·год) порівняно з охолодженням повітря заборотною водою;

– запропоновано схемно-конструктивні рішення систем охолодження наддувного повітря для МОД та розроблені рекомендації з їх проектування, що забезпечують ефективну експлуатацію МОД при підвищених зовнішніх температурах;

– показана економічна доцільність застосування запропонованих систем охолодження на прикладі балкера «Libertas» при його експлуатації на лінії Одеса–Гавана.

Використання результатів роботи. Результати роботи (методики розрахунку раціональних параметрів процесів охолодження повітря, конструктивних характеристик охолоджувачів; схеми систем утилізації та охолодження) використані при проектуванні систем охолодження та утилізації теплоти, теплообмінного устаткування суднових і стаціонарних енергетичних комплексів: ЗАТ "Теплотехніка", ЗАТ "Мегаімпекс", ТОВ "Енерго-Комплект" (м. Херсон), ПАТ "Завод" Екватор" (м. Миколаїв), у навчальному процесі Херсонської філії Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова при виконанні дипломних проектів за спеціальністю "Суднові енергетичні установки та устаткування".

Апробація і повнота викладення результатів роботи у публікаціях. Основні наукові та практичні результати дисертаційного дослідження доповідалися й одержали позитивну оцінку на міжнародних конференціях: XII-XVIII Міжнародні конгреси двигунобудівників (Харків-Рибаче, 2007-2013); IV-VII м.-н. н.-т. конф. "Суднового енергетика: Стан та проблеми" (Миколаїв, 2008, 2009, 2011, 2013); 3 і 4 м.-н. н.-т. конф. "Муніципальна енергетика: проблеми, рішення" (Миколаїв, 2007, 2009); I-II м.-н. н.-т. конф. "Холод в енергетиці і на транспорті" (Миколаїв, 2008, 2012).

Публікації. По темі дисертації опубліковано 26 друкованих наукових праць, у тому числі 13 статей у наукових спеціалізованих виданнях, 13 тез доповідей (без співавторів 4), отримано 3 патенти України на винахід.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів і висновків. У додатках наведені результати допоміжних розрахунків, документи, що підтверджують впровадження основних результатів дослідження.

Обсяг дисертації складає 181 сторінок основного машинописного тексту і 30 сторінок додатків, 83 рисунка і 18 таблиць. Бібліографія містить 119 найменувань на 14 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **першому розділі** показано, що при високих температурах заборотної води штатні ОНП не забезпечують підтримання його температури на прийнятному рівні, достатньому для демпфування підвищених температур повітря на вході ТК. В той же час високі температури наддувного повітря після ТК свідчать про значний потенціал його теплоти, використання якого обмежується головним чином теплофікаційними потребами, незначними при плаванні в південних широтах і за теплих кліматичних умов. За результатами аналізу існуючих систем охолодження наддувного повітря МОД та утилізації його теплоти виявлено резерви їх подальшого вдосконалення. Визначено мету та задачі дослідження.

У **другому розділі** обґрунтовано напрям підвищення ефективності охолодження наддувного повітря МОД шляхом використання теплоти наддувного повітря після ТК в ТУО на НРТ для виробництва холоду та його застосування для глибокого охолодження повітря перед наддувним ресивером. Така самодостатня система охолодження, в якій задіяні теплообмінні апарати (ТОА) існуючих систем охолодження наддувного повітря: високо- та низькотемпературні ОНП_{вт} і ОНП_{вт} з проміжними контурами водяного охолодження, має максимальну степінь автономності (незалежності від температури навколишнього повітря та заборотної води), що забезпечує високу

паливну ефективність МОД при підвищених температурах навколишнього повітря та забортної води. Наявність же проміжних контурів водяного охолодження зводить до мінімуму енергетичні витрати на подолання аеродинамічного опору охолоджувачів повітря ТСО.

Обґрунтований методологічний підхід до підвищення ефективності охолодження наддувного повітря суднових МОД шляхом утилізації його ж теплоти та гіпотези в його основі, наведена загальна методика проведення дослідження.

Третій розділ присвячено розробці математичної моделі процесів охолодження наддувного повітря після ТК з утилізацією його теплоти. Основу ТУО становлять ТОА: генератор пари НРТ, конденсатор та випарник НРТ. При цьому генератор пари НРТ високого тиску споживає теплоту, відведену від наддувного повітря водою у високотемпературному ступені охолодження повітря ОНП_{вт} після ТК перед штатним водяним ОНП (штатний ОНП на рис. 1 не показано), а до випарника НРТ низького тиску підводиться теплота, відведена від повітря в низькотемпературному ступені ОНП_{нт} водяного охолодження (після штатного водяного ОНП), що забезпечує глибоке охолодження наддувного повітря – нижче температури забортної води.

Конструктивно найбільш простими і надійними в експлуатації є ТУО ежекторного типу (ЕТУО), основні елементи яких – ТОА, а функцію компресора виконує ежектор. Як НРТ застосовано озонобезпечний хладон R142В.

Основу розробленої математичної моделі робочих процесів ТСО становлять математичні моделі процесів в ТОА: охолодження наддувного повітря водою у дво- або триступеневому ОНП і фазових переходів НРТ в генераторі пари НРТ, який складається з економайзерної Г_Е секції, в якій рідке НРТ, що подається насосом з конденсатора, нагрівається від температури конденсації t_k до температури t_r , та випарної Г_В секції, де рідке НРТ кипить при t_r , та у випарнику (В) – охолоджувачі води проміжного контуру.

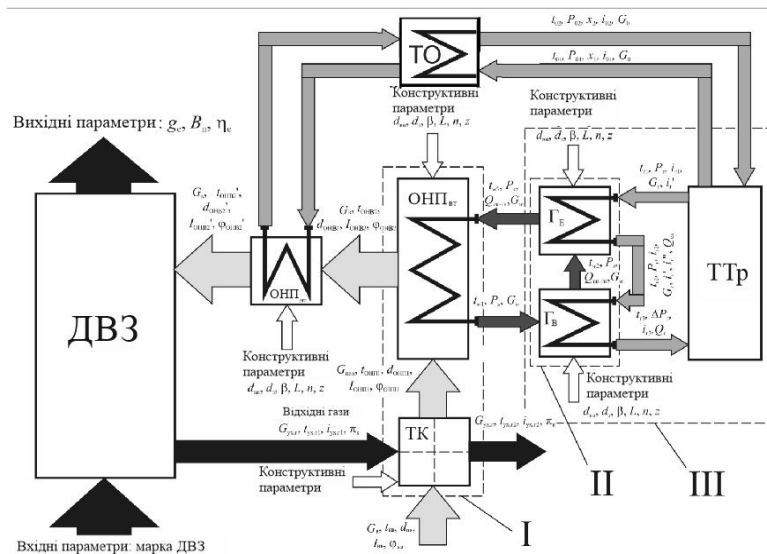


Рис. 1. До математичної моделі тепловикористовуючої системи охолодження наддувного повітря МОД: I – тепловикористовуючий контур водяного охолодження наддувного повітря ДВЗ; II – генератор пари НРТ-споживач теплоти наддувного повітря; III – тепловикористовуюча установка охолодження (ТУО); Г_В і Г_Е – випарна та економайзерна секції генератора; ОНП_{нт} і ОНП_{вт} – низько- і високотемпературні ступені охолодження наддувного повітря; ТК – турбокомпресор; ТТр – термотрансформатор

Метою розрахунків є визначення такої температури кипіння хладону (раціональної) у випарнику t_0 , при якій охолодження повітря здійснюється до мінімальної температури t_{b2} . Оскільки теплопродуктивність парогенеруючого контуру ТУО (теплове навантаження на генератор ТУО Q_r і, відповідно, на тепловикористовуючі, когенераційні, ступені ОНП_{вт} і ОНП_{ст}) визначаються наявним тепловим потенціалом наддувного повітря (температурою повітря після ТК), а співвідношення теплових навантажень парогенеруючого (генератора ТУО Q_r) і холодогенеруючого (випарника ТУО, тобто холодопродуктивність Q_0) контурів ТУО – тепловим коефіцієнтом циклу перетворення теплоти в холод в ТУО: $\zeta = Q_0 / Q_r$, який в свою чергу залежить від температури кипіння НРТ у випарнику t_0 , то алгоритм розрахунку параметрів процесів охолодження наддувного повітря включає ітераційні цикли.

При цьому сходимості ітераційного процесу, чому задовольняє рівняння $Q_{вт} + Q_{ст} = Q_r = Q_0 / \zeta$, добиваються, впливаючи на температуру кипіння НРТ у випарнику t_0 , від якої залежить тепловий коефіцієнт ζ , а відповідно, холодопродуктивність ТУО $Q_0 = \zeta \cdot Q_r$ і глибина охолодження наддувного повітря. Співпадінню значень теплових навантажень

$Q_{вт} + Q_{ст} = Q_{г} = Q_0 / \zeta$ відповідають раціональні значення температур кипіння у випарнику t_0 і наддувного повітря на виході з ОНП_{вт} та повітря, охолодженого в ОНП_{пт}: $t_s = t_0 + (8...12)^\circ\text{C}$.

То ж розрахунки проводять для кількох варіантів з різними температурами t_0 кипіння НРТ (хладону) у випарнику ТУО. При цьому виходять з мінімальної кінцевої температури охолодженого повітря $t_{в2}$ на виході ОНП_{пт}, яка в свою чергу приймається в залежності від температури t_0 : $t_{в2} = t_0 + 5^\circ\text{C} + 12^\circ\text{C}$, де 5°C – різниця температур прісної води та хладону, а 12°C – різниця температур наддувного повітря та прісної води. Холодопродуктивність Q_0 , необхідна для охолодження до цієї температури $t_{в2}$ (надалі – фактична $Q_{0ф}$, для якої розраховують ТОА) зів'язується з наявною $Q_{0р}$, отриманою в ТУО шляхом трансформації в холод теплоти $Q_{г}$, відведеної від повітря в ОНП_{вт}: $Q_0 = \zeta Q_{г}$.

Розрахункова схема випарної секції генератора пари НРТ показана на рис. 2. Довжина прямої трубки L розбивається на k ділянок довжиною dz . Рух НРТ (хладону) та води паралельний. Число ходів хладону в змійовику $n = 2$, а води в міжтрубному просторі – 1. Відповідно напрям течій теплоносіїв в одних трубках змійовика проточний, а других – протигочний. На кожній i -й ділянці трубки змійовика з рівнянь теплових балансів по хладону і гріючій воді та теплопередачі визначались параметри хладону (тиск P_i , температура кипіння t_i , паровміст x_i), води (температура t_{wi}) і кількість теплоти Q_i , відведеної від води.

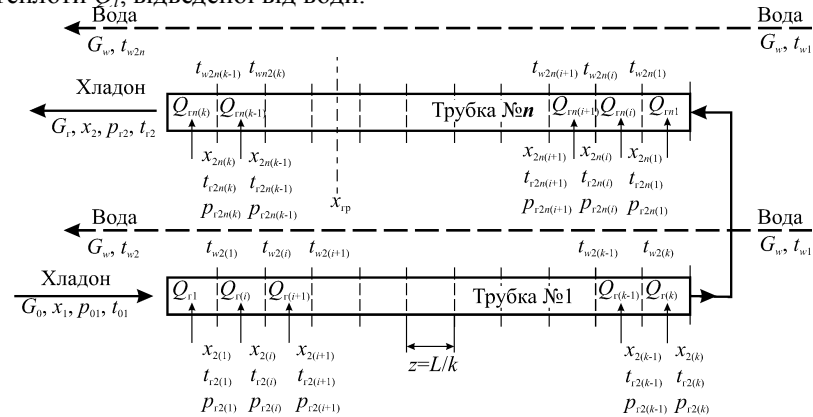


Рис. 2. Розрахункова схема випарної секції генератора ТУО

Критерієм теплової ефективності ТОА, в даному випадку генератора пари НРТ, є густина теплового потоку q , а метою проектування ТОА є досягнення максимальної величини q .

Вхідні параметри: $G_w, G_r, t_{w1}, t_{r1}, P_{r1}, x_1, d_{вн}, d_3, L, n$,

Параметри на виході: $Q_{г}, q, t_{w2}, t_{r2}, P_{r2}, x_2$.

Тут G_w і G_r – витрати води та хладону відповідно через міжтрубний канал і трубку (змійовик); $d_{вн}$ і $d_н$ – внутрішній і зовнішній діаметри трубки; L – довжина трубки (міжтрубного каналу).

Рівняння теплових балансів по хладону, воді та теплопередачі для i -ї ділянки:

$$\begin{aligned} \Delta Q_i &= G_r r (dx_{2(i)} - dx_{1(i)}); \\ \Delta Q_i &= G_w c_{pw} (dt_{wi(i)} - dt_{wi(i+1)}); \\ \Delta Q_i &= k_i d\theta_i F_i, \end{aligned}$$

де r – теплота фазового перетворення хладону; c_{pw} – теплоємність води.

На кожнім i -му кроці інтегрування (на виході з i -ї ділянки) визначали параметри води (температуру $t_{wi(i+1)}$), хладону (тиск $P_{i+1} = P_i - dP$, паровміст $x_{i+1} = x_i + dx$ і температуру кипіння $t_{ri(i+1)} = t_{ri(i)} - dt_r$, кількість теплоти $\Delta Q_i = q_i \pi d_{вн} dz$, яка відводиться на i -й ділянці. Зростання паровмісту dx_i на i -й ділянці обчислюють за рівнянням $dx_i = 4 q_i dz / (d_{вн} (pw) r)$, отриманим з балансу теплоти, підведеної в процесі теплопередачі та сприйнятої хладоном у процесі кипіння: $Q_i = q_i \pi d_{вн} dz = 0,25 \pi d_{вн}^2 (pw) r dx_i$. Густина теплового потоку на i -й ділянці, віднесена до поверхні з боку хладону: $q_i = k_i \theta_i$, де k_i – коефіцієнт теплопередачі. Температурний напір θ_i на ділянках довжиною dz знаходять як різницю температур води та хладону: $\theta_i = t_{wi(i)} - t_{ri(i)}$.

Зміна температури повітря t_b і прісної води t_w першого контуру охолодження (повітря-вода) наддувного повітря та хладону t_0 в генераторі та випарнику НРТ другого контуру (вода-хладон) по глибині триступеневого ОНП по ходу повітря L, m , наведена на рис. 3, коефіцієнтів теплопередачі k та тепловіддачі α , приведених до внутрішньої поверхні труб, температурного напору θ , густини теплового потоку q до внутрішньої поверхні труб і теплового навантаження Q – рис. 4.

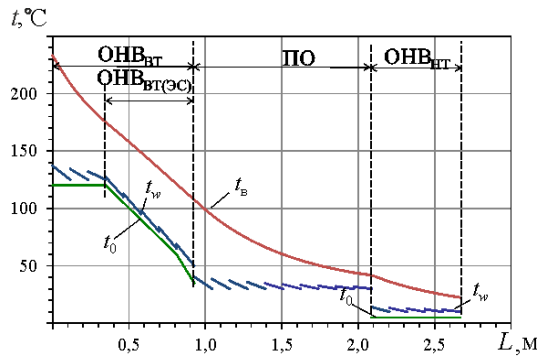


Рис. 3. Зміна температури повітря t_b і прісної води t_w та хладону t_0 в генераторі та випарнику НРТ по глибині L триступеневого ОНП по ходу повітря ($t_0 = 5^\circ\text{C}$; $t_{\text{н}}^{\text{EC}} = 140^\circ\text{C}$)

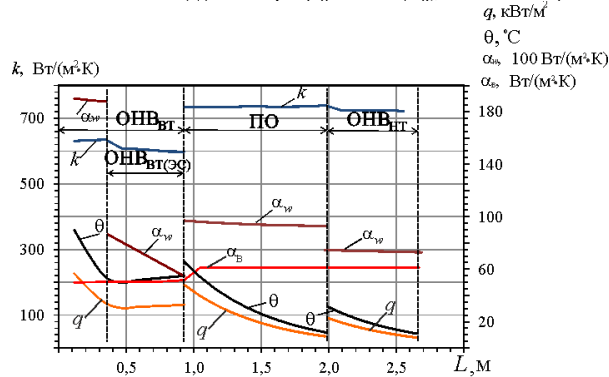


Рис. 4. Зміна коефіцієнтів теплопередачі k та тепловіддачі α , приведених до внутрішньої поверхні труб, температурного напору θ , густини теплового потоку q до внутрішньої поверхні труб і теплового навантаження Q по глибині L триступеневого ОНП по ходу повітря

Як видно, для триступеневого ОНП глибина по ходу повітря $L = 2,6$ м, що в два рази менше глибини L двоступеневого ОНП без проміжного ступеня у вигляді штатного ОНП охолодження забортною водою. Аеродинамічний опір $\Delta P = 3100$ Па, що відповідає показникам сучасних трубчато-пластинчастих ОНП систем наддуву.

Розрахунок параметрів МОД, які, з одного боку, є вхідними параметрами для математичної моделі ТСО (витрата і температура наддувного повітря після ТК МОД), а з іншої, – залежать від вхідних параметрів ТСО (температури охолодженого в ТСО наддувного повітря), а також визначення абсолютної та питомої витрат палива МОД в залежності від температури повітря на вході ТК та охолоджуючої наддувне повітря води проводили за програмою "Mandieselturbo" для суднових МОД корпорації "MAN".

Адекватність математичної моделі процесів утилізації теплоти з виробництвом холоду в ТСО перевіряли за розбіжністю в кількостях теплоти за одиницю часу (теплових потоках) Q , відведеної від наддувного повітря у процесі його охолодження, розрахованих за розробленою методикою та за програмою "Mandieselturbo" при різних температурах t повітря на вході ТК МОД. Також було порівняно питому витрату палива двигуна $b_{e\text{MM}}$, розраховану за математичною моделлю, з отриманою за програмою "Mandieselturbo" $b_{e\text{MD}}$ (рис. 5).

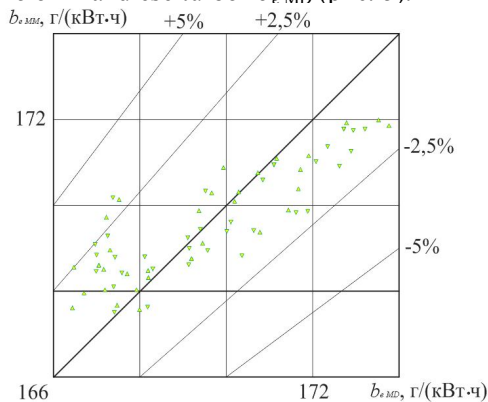


Рис. 5. Порівняння питомої витрати палива двигуна $b_{e\text{MM}}$, розрахованої за математичною моделлю, й отриманої за програмою "Mandieselturbo" $b_{e\text{MD}}$.

Як видно, розрахункові значення b_{eMM} , отримані згідно з математичною моделлю, задовільно узгоджуються з отриманими за програмою "Mandieselturbo" b_{eMD} : розбіжність не перевищує 3%. Це дозволяє зробити висновок про адекватність розробленої в розділі 3 математичної моделі об'єкту дослідження, а отже і можливості її використання при моделюванні роботи судових ТУО в реальних умовах експлуатації: на різних режимах теплових навантажень. Встановлені в ході математичного моделювання закономірності зміни теплових характеристик ТУО були покладені в основу раціонального проектування ефективних ТУО.

У четвертому розділі дано результати розрахунку показників ефективності трансформації теплоти наддувального повітря після ТК МОД в холод для його глибокого охолодження перед подачею в наддувний ресивер. Схеми триконтурних триступеневої та двоступеневої систем охолодження наддувального повітря МОД з ЕТТр, що використовують теплоту наддувального повітря після ТК, наведені на рис. 6.

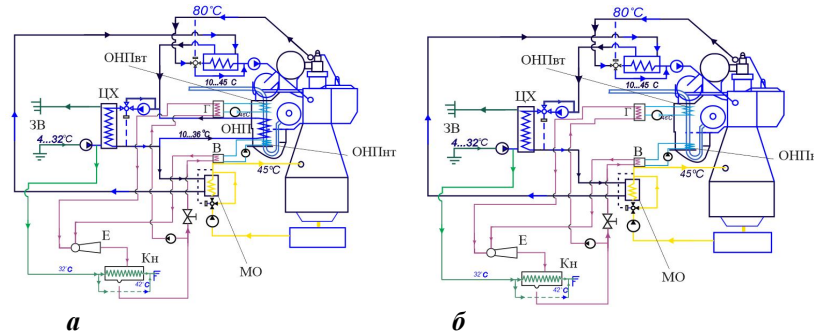


Рис. 6. Схеми триконтурних триступеневої (а) та двоступеневої (б) систем охолодження наддувального повітря МОД з ЕТТр, що використовують теплоту наддувального повітря: ОНП_{ВТ}, ОНП_{НТ} і ОНП – високо- і низькотемпературні ступені та проміжний ступінь охолодження забортною водою (штатний ОНП); ЦХ – центральний холодильник; МО – маслоохолоджувач; ЗВ – забортна вода; ТУО: Г – генератор НРТ; Е – ежектор; Кн – конденсатор НРТ; Н – насос; ДК – дросельний клапан; В – випарник НРТ – охолоджувач води

ЕТТр складається з високотемпературного (силового) та низькотемпературного (холодильного) контурів. Теплота відводиться від наддувального повітря до прісної води в ОНП_{ВТ}, а вже потім від води до НРТ, що випаровується при температурі $t_r = 110...120$ °С в генераторі (Г) пари НРТ силового контуру ЕТТр. Пара НРТ високого тиску є силовим потоком для ежектора. У низькотемпературному контурі ЕТТр теплота відводиться від проміжного холодоносія – прісної води до хладону, що кипить у випарнику (В) при температурі t_0 близько 5 °С, до якого в свою чергу підводиться теплота від наддувального повітря на вході наддувального ресивера. Генератор пари НРТ включає економайзерну секцію, в якій рідке НРТ, що подається насосом з конденсатора, нагрівається від температури конденсації t_k до температури t_r , та випарну, де рідке НРТ кипить при t_r .

Результати розрахунків показали, що автономна, яка практично не залежить від температури забортної води, триконтурна двоступенева система (рис. 6,б) забезпечує охолодження наддувального повітря до температури $t_{B2} = 20...22$ °С в ЕТТр при значеннях теплового коефіцієнта $\zeta = 0,30...0,35$, що мають місце при $t_0 = 5...10$ °С та малій різниці температур в ОНП_{НТ}: $\Delta t_{B2} = t_{B2} - t_w = 5...7$ °С (висока інтенсивність теплообміну та ефективне оребрення поверхні). Більш глибоке охолодження наддувального повітря до температури $t_{B2} = 12...15$ °С в автономній триконтурній двоступеневій системі можливе шляхом використання додаткових джерел теплоти, зокрема випускних газів та охолоджуючої двигун води або ж у триступеневій системі з додатковим, проміжним, ступенем охолодження наддувального повітря забортною водою (штатним ОНП). Додаткове, проміжне, охолодження наддувального повітря забортною водою у штатному ОНП дозволяє не тільки компенсувати дефіцит високопотенційної теплоти повітря для ЕТТр, але й обривати процес відведення теплоти від повітря при більш високих температурах t_{B2} повітря на виході з ОНП_{ВТ}, забезпечуючи тим самим більші температурні напори в ОНП_{ВТ}, а відтак і менші поверхні ОНП_{ВТ} і відповідно аеродинамічний опір.

П'ятий розділ присвячено аналізу паливної ефективності МОД MAN B&W 5S60ME-B8.2-ТН (експлуатаційна потужність 10 МВт) балкера типу "Libertas" із використанням теплоти наддувального повітря для його ж глибокого охолодження з урахуванням зміни зовнішніх тепловологісних параметрів на конкретній рейсовій лінії.

При розрахунках раціональних режимних параметрів ТУО МОД (температур кипіння НРТ в генераторах і випарниках, охолодженого наддувального повітря після тепловикористовуючих-когенераційних і низькотемпературного ступеня ОНП) наявний тепловий потенціал наддувального повітря визначали за його температурою t_k після ТК та витратою, котрі обчислювали за програмою

"Mandieselturbo" при температурах навколишнього повітря, відповідно й повітря на вході ТК, охолоджуючої ОНП води, які змінюються упродовж рейсу.

Зміна температури $t_{нв}$, відносної вологості $\phi_{нв}$ і вологовмісту $d_{нв}$ навколишнього повітря, температури забортної води $t_{зв}$ та наддувного повітря після ТК $t_{г1}$ упродовж рейсу Одеса-Гавана-Одеса (1.07...16.08.2009) наведена на рис. 7.

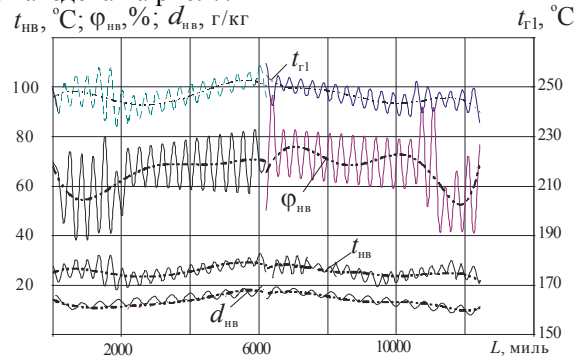


Рис. 7. Зміна температури $t_{г1}$ наддувного повітря після ТК при змінних упродовж рейсу температурі $t_{нв}$ та вологовмісті $d_{нв}$ навколишнього повітря, а також відносній вологості $\phi_{нв}$ упродовж рейсу Одеса-Гавана-Одеса (1.07...16.08.2009)

У випарнику НРТ охолоджують прісну воду проміжного водяного контуру, яку подають в ОНП_{НТ}, до температури 5...10 °С.

Температури наддувного повітря, охолодженого в ОНП_{НТ} ТУО $t_{в2}$ та водяному ОНП традиційної системи охолодження $t_{вв2}$, при змінній температурі забортної води $t_{зв}$ упродовж рейсу Одеса-Гавана-Одеса наведені на рис. 8.

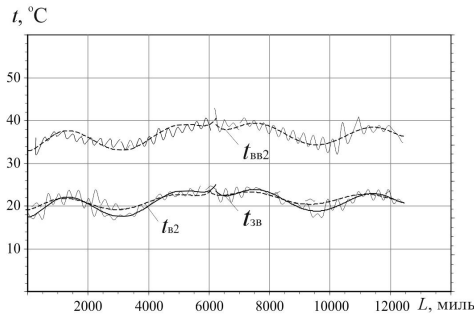


Рис. 8. Температури наддувного повітря, охолодженого в ОНП_{НТ} ТУО $t_{в2}$ та водяному ОНП традиційної системи охолодження $t_{вв2}$, при температурі забортної води $t_{зв}$ упродовж рейсу Одеса-Гавана-Одеса

Як видно, застосування ТУО забезпечує охолодження наддувного повітря до температури $t_{в2}$, яка нижче температури забортної води: $t_{в2} < t_{зв}$, тоді як температура наддувного повітря $t_{вв2}$, охолодженого у водяному ОНП традиційної системи охолодження, значно вище.

Охолодження наддувного повітря в ТУО до температури $t_{в2}$, яка нижче температури $t_{вв2}$ на величину $\Delta t_{во} = t_{вв2} - t_{в2}$, забезпечує скорочення витрати палива. Результати розрахунків зниження питомої Δb_e та загальної B_e витрат палива МОД 5S60ME-B8.2-ТІІ корпорації MAN (номінальна потужність $N_n = 11900$ кВт та експлуатаційна $N_e = 10000$ кВт) в абсолютних ΔB_e та відносних $\overline{\Delta B_e}$ величинах при змінних упродовж рейсу параметрах навколишнього повітря та температурі забортної води $t_{зв}$ наведені на рис. 9.

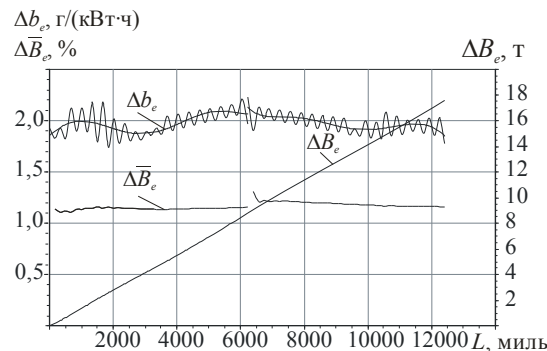


Рис. 9. Значення зниження питомої витрати палива Δb_e , загальної витрати палива МОД в абсолютних ΔB_e та відносних $\overline{\Delta B_e}$ величинах упродовж рейсу Одеса-Гавана-Одеса

Як видно, практично упродовж всього рейсу зменшення питомої витрати палива становить $\Delta b_e = 2,0$ г/(кВт·год), відносна економія споживання палива $\overline{\Delta B_e} = 1,1 \dots 1,2$ %, а абсолютна економія споживання палива ΔB_e за рейс для МОД потужністю 10 МВт становить близько 18 т порівняно з традиційною системою охолодження наддувного повітря МОД. Абсолютна економія палива за окремі рейси для МОД потужністю 10 МВт становить $\Delta B_e = 14 \dots 18$ т і сумарна за 9 рейсів – 144 т, а відносна його економія за окремі рейси – $\overline{\Delta B_e} = 1,0 \dots 1,2$ %.

ВИСНОВКИ

1. У дисертації вирішено важливу для суднової енергетики науково-прикладну задачу – розроблено тепловикористовуючу систему охолодження (ТСО), що утилізує теплоту наддувного повітря суднового МОД і забезпечує його охолодження нижче температури заборотної води при підвищених температурах зовнішнього повітря та заборотної води.

2. Завдання підвищення ефективності охолодження наддувного повітря судових МОД вперше вирішене шляхом використання випарної секції парогенератора НРТ тепловикористовуючої установки охолодження (ТУО) як першого – високотемпературного ступеня ОНП, його економайзерної секції – як другого ступеня стандартного ОНП, охолоджуваного заборотною водою (прісною водою проміжного контуру ОНП у разі центральної системи охолодження МОД), і випарника НРТ ТУО – як низькотемпературного ступеня ОНП.

Функціонування тепловикористовуючої економайзерної секції парогенератора НРТ ТУО як другого ступеня стандартного ОНП дозволяє застосовувати заборотну воду як холодоносії для конденсатора ТУО, а не для ОНП, тобто перейти з двоконтурної на триконтурну систему охолодження наддувного повітря, забезпечуючи глибоке його охолодження.

3. Розроблено способи раціональної організації процесів охолодження наддувного повітря судових МОД та системи охолодження з утилізацією його теплоти, які їх реалізують і забезпечують підвищення паливної економичності МОД транспортних суден при експлуатації на конкретних рейсових лініях (скорочення питомої b_e , рейсової та річної витрат палива).

4. Розроблено математичну модель процесів охолодження наддувного повітря судових МОД у двоступеневій триконтурній ТСО з утилізацією теплоти наддувного повітря в ТУО на НРТ, яка враховує співвідношення теплових навантажень у прямому та зворотному циклах трансформації теплоти в ТУО (високо- і низькотемпературного, відповідно тепловикористовуючого і охолоджуючого ступенів ОНП), дозволяє визначити необхідні значення коефіцієнта трансформації теплоти та параметри процесів з урахуванням змінних протягом рейсу температур зовнішнього повітря та заборотної води.

Адекватність моделі підтверджено задовільним узгодженням розрахункових показників ефективності процесів охолодження наддувного повітря судових МОД з експериментальними даними та даними розробників МОД з теплових показників ОНП і паливної ефективності МОД.

Адекватність рівнянь, що використовуються для розрахунку теплообмінних апаратів, підтверджено багаторічними обширними дослідженнями на ПО «Екватор» і на кафедрі ТОТ та СПГА Національного університету кораблебудування.

5. Вперше виявлені закономірності процесів охолодження наддувного повітря МОД у двоступеневій триконтурній ТСО з утилізацією теплоти наддувного повітря і застосуванням НРТ, а також особливості впливу цих процесів на параметри та показники МОД (температуру наддувного повітря і питому витрату палива) і ТУО, які полягають у взаємно пов'язаному співвідношенні теплових навантажень випарного та економайзерного ступенів генератора пари НРТ, високо- і низькотемпературного (відповідно тепловикористовуючого та охолоджуючого) ступенів ОНП при змінних протягом рейсу температурах зовнішнього повітря та заборотної води.

Розроблені способи та схемні рішення тепловикористовуючих систем охолодження наддувного повітря МОД захищені 3 патентами України на винахід.

Основні результати дисертації опубліковані в наукових **спеціалізованих виданнях**:

1. Андреев А.А. Теплоиспользующая система охлаждения наддувочного воздуха судового малооборотного дизеля / А.А. Андреев, Н.И. Радченко, А.А. Сирота // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 1 (98). – С. 66 – 70. (науком.)

2. Андреев А.А. Сравнительная оценка охлаждения наддувочного воздуха главного судового дизеля с утилизацией его теплоты и заборотной водой / А.А. Андреев, Н.И. Радченко, А.А. Сирота // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 2 (99). – С. 92–96. (науком.)

3. Радченко Н.И. Трехконтурная теплоиспользующая система охлаждения наддувочного воздуха малооборотного дизеля транспортного судна / Н.И. Радченко, Т. Бохдаль, А.А. Андреев, Д.В. Коновалов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. № 9 (106). – С.86–91. (науком.)

4. Андреев А.А. Повышение топливной эффективности главного двигателя транспортного судна охлаждением наддувочного воздуха / А.А. Андреев, Н.И. Радченко // *Холодильная техника та технологія*⁹. – 2012. – Вип. 4 (138). – С. 249–253.

5. Андреев А.А. Основные положения математической модели теплообменников тепловикористовуючої системи охолодження наддувного повітря суднових малооборотних дизелів / А.А. Андреев, Д.В. Коновалов, М.І. Радченко // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса: ОНАХТ. – 2011. – Вип.39. – Т.1. – С. 68–73.
 6. Радченко Р.Н. Использование теплоты уходящих газов для охлаждения циклового воздуха дизелей / Р.Н. Радченко, А.А. Андреев // Электронное издание "Вісник національного університету кораблебудування". НУК, 2010. – № 1. – С. 117–122.
 7. Радченко Н.И. Использование избыточной энергии продуктов сгорания для охлаждения наддувочного воздуха ДВС / Н.И. Радченко, А.А. Андреев // Электронное издание "Вісник національного університету кораблебудування". НУК, 2010. – № 2. – С. 77–84.
 8. Радченко Н.И. Повышение эффективности контура охлаждения наддувочного воздуха судовых ДВС / Н.И. Радченко, А.А. Андреев // Авиационно-космическая техника и технология – 2010. – № 6(73). – С.71–74.
 9. Радченко Н.И. Использование теплоты уходящих газов для охлаждения наддувочного воздуха судовых малооборотных дизелей / Н.И. Радченко, А.А. Андреев // Двигатели внутреннего сгорания. – 2009. – № 2. – С. 90–93.
 10. Андреев А.А. Сокращение затрат на охлаждение наддувочного воздуха судовых малооборотных дизелей / А.А. Андреев, Н.И. Радченко // Вестник двигателестроения. – 2008. – № 2. – С. 64–67.
 11. Радченко Н.И. Теплоиспользующая система охлаждения наддувочного воздуха судовых МОД / Н.И. Радченко, А.А. Андреев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 9(56). – С. 120–124.
 12. Капустин В.В. Тригенерационные системы промежуточного охлаждения воздуха судовых ДВС / В.В. Капустин, А.А. Андреев, Д.В. Коновалов, Н.И. Радченко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 4 (40). – С. 40–44.
 13. Сирота А.А. Методология рационального проектирования теплоиспользующих систем охлаждения воздуха судовых двигателей / А.А. Сирота, Р.Н. Радченко, А.А. Андреев, Д.В. Коновалов, Н.И. Радченко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 7 (43). – С. 29–35.
- Основні публікації, в яких додатково викладено зміст дисертації:**
14. Радченко Р.Н. Когенерационные контуры дизельных энергоустановок на основе теплоиспользующих абсорбционных холодильных машин / Р.Н. Радченко, А.А. Андреев, Д.В. Коновалов, Н.И. Радченко, Е.А. Красильщиков // Муниципальная энергетика: проблемы, решения: Материалы 2 международной научно-технической конференции. – Николаев: НУК, 2007. – С. 63–68.
 15. Андреев А.А. Визначення раціональних параметрів охолодження наддувного повітря судових ДВЗ / А.А. Андреев // Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення: Матеріали другої науково-технічної конференції науково-педагогічних та інженерно-технічних працівників. – Миколаїв: ППІ НУК, 2007. – С. 40.
 16. Радченко Н.И. Оптимальные режимы теплоиспользующих систем промежуточного охлаждения воздуха судовых ДВС / Н.И. Радченко, А.А. Андреев // Сучасні проблеми холодильної техніки і технології: Збірник наукових праць VI Міжнародної науково-технічної конференції, Одеса, 19–21 вересня 2007 р. – Одеса: Вид-во ОДАХ, 2007. – С. 123–124.
 17. Андреев А.А. Визначення раціональних параметрів проміжного охолодження наддувного повітря судових ДВЗ / А.А. Андреев // Суднова енергетика: стан та проблеми: Матеріали III міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів, науковців та фахівців. – Миколаїв: НУК, 2007. – С. 143–146.
 18. Андреев А.А. Охлаждение наддувочного воздуха судовых малооборотных дизелей в теплоиспользующей установке / А.А. Андреев, Д.В. Коновалов, Н.И. Радченко // Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації/ Збірник наукових праць I Міжнародної науково-технічної конференції. Частина 2. – Миколаїв: НУК, 2008. (Додаток до Зб. наук. пр. НУК. – № 3 (420), 2008). – С. 145–151.
 19. Андреев А.А. Сокращение затрат при охлаждении наддувочного воздуха судовых дизелей / А.А. Андреев // Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації/ Збірник наукових праць I Міжнародної науково-технічної конференції. Частина 2. – Миколаїв: НУК, 2008. (Додаток до Зб. наук. пр. НУК. – № 3 (420), 2008). – С. 243–244.
 20. Андреев А.А. Разработка и анализ эффективности теплоиспользующих систем охлаждения наддувочного воздуха дизельных установок / А.А. Андреев // Муниципальная энергетика: проблемы, решения: Материалы третьей международной научно-технической конференции. – Миколаїв: видавець Торубара О.С., 2009. – С.199–202.
 21. Андреев А.А., Радченко Н.И. Повышение эффективности охлаждения наддувочного воздуха главного двигателя транспортного судна/ А.А. Андреев, Н.И. Радченко // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці/ Матеріали III м.-н. н.-т. конф. –Миколаїв: НУК, 2012. – С. 434–435.
 22. Андреев А.А. Основные положения математической модели тепловикористовуючої системи охолодження наддувного повітря судових малооборотних дизелів / А.А. Андреев, Д.В. Коновалов, М.І. Радченко // Современные проблемы холодильной техники и технологи/ Тезисы докладов м.-н. н.-т. конф. – Одесса: ОНАПТ, 2011. – С. 22–24.
 23. Андреев А.А. Оценка топливной эффективности судового малооборотного дизеля с утилизационной системой охлаждения наддувочного воздуха /А.А. Андреев, Н.И. Радченко // Суднова енергетика: Стан та проблеми: Матеріали V міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів, науковців та фахівців. – Миколаїв: НУК, 2011. – С. 239–243.
 24. Андреев А.А. Охлаждение наддувочного воздуха судового малооборотного дизеля утилизацией его теплоты / А.А. Андреев, Н.И. Радченко// Інновації в суднобудуванні та океанотехніці/ Матеріали м.-н. н.-т. конф. – Миколаїв: НУК, 2011. – С. 407–413.
 25. Андреев А.А. Сравнение двух способов охлаждения наддувочного воздуха судового малооборотного дизеля / А.А. Андреев, Н.И. Радченко// Інновації в суднобудуванні та океанотехніці/ Матеріали м.-н. н.-т. конф. – Миколаїв: НУК – 2011. – С. 371–374.

26. Андреев А.А. Оценка эффективности применения теплоиспользующей системы охлаждения воды контура ОНВ судовых ДВС / А.А. Андреев // Суднова енергетика: стан та проблеми: Матеріали ІV міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів, молодих науковців та фахівців. – Миколаїв: НУК, 2009. – С.121-124.

27. Патент України на винахід № 81778 / Радченко М.І. Спосіб перетворення теплової енергії в механічну роботу з утилізацією теплоти продуктів згоряння / М.І. Радченко, Б.Д. Білека, О.А. Сирота, О.О. Філоненко, Р.М. Радченко, А.А. Андрєєв, Д.В. Коновалов, М.О. Тарасенко, А.М. Радченко // Бюлетень № 3. – 2008.

28. Патент України на винахід № 81779 Романов В.В. Спосіб перетворення теплової енергії в механічну роботу з утилізацією теплоти / В.В. Романов, Б.Д. Білека, М.І. Радченко, О.А. Сирота, Р.М. Радченко, А.А. Андрєєв, М.О. Тарасенко, А.М. Радченко, Д.В. Коновалов // Бюлетень № 3. – 2008.

29. Патент України на винахід № 81780 Радченко М.І. Спосіб перетворення теплової енергії в механічну роботу з утилізацією теплоти продуктів згоряння / М.І. Радченко, В.В. Романов, Б.Д. Білека, О.А. Сирота, Р.М. Радченко, А.А. Андрєєв, Д.В. Коновалов, М.О. Тарасенко, А.М. Радченко // Бюлетень № 3. – 2008.

Особистий внесок здобувача у праці, що опубліковані у співавторстві: [1, 2] – оптимальні параметри процесів охолодження наддувного повітря; [3, 9–13, 27–29] – схемні рішення та результати оцінки ефективності триконтурних систем охолодження наддувного повітря; [4] – дані з паливної ефективності МОД з охолодженням наддувного повітря; [5, 22] – математична модель термотрансформатора; [6, 7, 8] – схеми та результати розрахунку ефективності охолодження наддувного повітря утилізацією тепла відхідних газів; [6–8, 14, 16, 18] – результати аналізу ефективності систем утилізації теплоти випускних газів МОД для охолодження наддувного повітря; [13, 21, 23–25] – метод розрахунку раціональних параметрів системи охолодження наддувного повітря МОД.

АНОТАЦІЯ

Андрєєв А.А. Підвищення ефективності системи охолодження наддувного повітря для судових малооборотних дизелів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – Двигуни та енергетичні установки. – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2014.

Дисертація присвячена підвищенню паливної ефективності судових МОД за рахунок глибокого охолодження наддувного повітря тепловикористовуючою установкою, що утилізує теплоту наддувного повітря. Вперше запропоновано принцип охолодження наддувного повітря судових МОД з використанням його ж теплоти в зворотному циклі трансформації теплоти в холод. Запропоновано і досліджено триконтурну тепловикористовуючу систему охолодження (ТСО) наддувного повітря судових МОД, яка включає тепловикористовуючу установку охолодження (ТУО) прісної води в якості додаткового проміжного контуру на низькокиплячому робочому тілі (НРТ) і забезпечує охолодження наддувного повітря нижче температури заборотної води. Розроблено математичну модель процесів охолодження наддувного повітря МОД в двоступеневій триконтурній ТСО з утилізацією теплоти наддувного повітря в ТУО на НРТ, яка враховує співвідношення теплових навантажень в прямому і зворотному циклах трансформації теплоти в ТУО (високо- і низькотемпературній, відповідно тепловикористовуючій і охолоджуючій ступенів ОНП), дозволяє визначати необхідні значення коефіцієнта трансформації теплоти і параметри процесів з урахуванням змінних протягом рейсу температур зовнішнього повітря та заборотної води. Розроблено способи раціональної організації процесів охолодження наддувного повітря МОД - в двоступеневій триконтурній ТСО з утилізацією теплоти наддувного повітря (в генераторі пари НРТ високого тиску високотемпературної ступені ТСО) і охолодженням повітря з відведенням теплоти до киплячого НРТ (у випарнику низькотемпературної ступені ТСО). Встановлено, що охолодження наддувного повітря судового МОД в ТСО, що утилізує теплоту наддувного повітря з коефіцієнтом трансформації теплоти вище 0,4, забезпечує зниження його температури до 15 ... 25 °С і скорочення питомої витрати палива МОД на 1,5 ... 2,5 г / (кВт · год) в порівнянні з його охолодженням заборотною водою. Визначено раціональні параметри процесів, що забезпечують мінімальні енергетичні втрати при трансформації теплоти, що знижують температуру наддувного повітря до 15 ... 25 °С і скорочують питому витрату палива на 1,5 ... 2,5 г / (кВт · год) в порівнянні з його охолодженням заборотною водою.

Ключові слова: малооборотний дизель, наддувне повітря, утилізація теплоти, охолодження, питома витрата палива.

АННОТАЦИЯ

Андреев А.А. Повышение эффективности системы охлаждения наддувочного воздуха для судовых малооборотных дизелей. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – Двигатели и энергетические установки. – Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, 2014.

Диссертация посвящена повышению топливной эффективности судовых МОД за счет глубокого охлаждения наддувочного воздуха теплоиспользующей установкой, утилизирующей теплоту наддувочного воздуха.

Впервые предложен принцип охлаждения наддувочного воздуха судовых МОД с использованием его же теплоты в обратном цикле трансформации теплоты в холод. Предложена и исследована трехконтурная теплоиспользующая система охлаждения (ТСО) наддувочного воздуха судовых МОД, которая включает теплоиспользующую установку охлаждения (ТУО) пресной воды в качестве дополнительного промежуточного контура на низкокипящем рабочем теле (НРТ) и обеспечивает охлаждение наддувочного воздуха ниже температуры заборной воды.

Разработана математическая модель процессов охлаждения наддувочного воздуха МОД в двухступенчатой трехконтурной ТСО с утилизацией теплоты наддувочного воздуха в ТУО на НРТ, которая учитывает соотношение тепловых нагрузок в прямом и обратном циклах трансформации теплоты в ТУО (высоко- и низкотемпературной соответственно теплоиспользующей и охлаждающей ступеней ОНВ), позволяет определять требуемые значения коэффициента трансформации теплоты и параметры процессов с учетом меняющихся в течение рейса температур наружного воздуха и заборной воды.

Разработаны способы рациональной организации процессов охлаждения наддувочного воздуха МОД – в двухступенчатой трехконтурной ТСО с утилизацией теплоты наддувочного воздуха (в генераторе паров НРТ высокого давления высокотемпературной ступени ТСО) и охлаждением воздуха с отводом теплоты к кипящему НРТ (в испарителе низкотемпературной ступени ТСО).

Установлено, что охлаждение наддувочного воздуха судового МОД в ТСО, утилизирующей теплоту наддувочного воздуха с коэффициентом трансформации теплоты выше 0,4, обеспечивает снижение его температуры до 15...25 °С и сокращение удельного расхода топлива МОД на 1,5...2,5 г/(кВт·ч) по сравнению с его охлаждением заборной водой.

Определены рациональные параметры процессов, обеспечивающие минимальные энергетические потери при трансформации теплоты, снижение температуры наддувочного воздуха до 15...25 °С и сокращение удельного расхода топлива на 1,5...2,5 г/(кВт·ч) по сравнению с его охлаждением заборной водой.

Ключевые слова: малооборотный дизель, наддувочный воздух, утилизация теплоты, охлаждение, удельный расход топлива.

SUMMARY

Andryeyev A.A. Improving the efficiency of scavenge air cooling system for marine low speed diesels. – Manuscript.

The dissertation for the scientific degree of the candidate of technical sciences on speciality 05.05.03 – Engines and power plants.– National University of Shipbuilding named after admiral Makarov, Mikolayiv, 2014.

The thesis is dedicated to improving of the fuel efficiency of ship low-speed diesel by deep cooling of scavenge air with heat recovery unit that utilizes scavenge air warmth. The first time the principle of scavenge air cooling ship low-speed diesel with his own heat cycle in reverse transformation of heat into the cold. Proposed and investigated three contour waste heat cooling system (WCS) scavenge air of ship low-speed diesel, which includes the installation of waste heat cooling (WHC) of fresh water as an additional contour at intermediate-boiling working solid (IWS) and provides scavenge air cooling below the temperature of seawater. A mathematical model of the processes of scavenge air cooling in a two-step low-speed diesel three contour WCS with waste heat scavenge air in WHC for IWS, which takes into account the ratio of thermal loads in forward and reverse cycles of transformation of heat into WHC (high and low temperature, respectively waste heat and cooling degree SAC) allows you to define the required coefficient of heat transformation processes and parameters given variables during the variable ambient air and seawater temperatures. Techniques rational organization processes scavenge air cooling of low-speed diesel - in a two-step three contour WCS with waste heat of scavenge air (in the steam generators IWS of high pressure stage WCS) and cooled air from diverting heat to boiling IWS (in the evaporator of low temperature stage WCS). Established that scavenge air cooling marine low-speed diesel in WCS, which utilizes the heat from the scavenge air heat transformation ratio above 0.4, provides lower temperature to 15 ... 25 °C and a reduction in specific fuel consumption by 1.5 ... 2.5 g / (kW · h) compared with its seawater cooling. The rational process parameters that ensure minimum energy loss in the transformation of heat which reduces scavenge air temperature up to 15 ... 25 ° C and reduce the specific fuel consumption of 1.5 ... 2.5 g / (kW · h) compared with its seawater cooling.

Keywords: low-speed diesel, scavenge air, waste heat recovery, cooling, specific fuel consumption.