

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

КАЛІНІЧЕНКО ІВАН ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 621.57

**УТИЛІЗАЦІЯ ТЕПЛОТИ СУДНОВОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ
ТЕПЛОВИКОРИСТОВУЮЧИМИ ХОЛОДИЛЬНИМИ МАШИНАМИ І
ТЕПЛОВИМИ НАСОСАМИ**

Спеціальність 05.05.14 – холодильна, вакуумна та компресорна техніка,
системи кондиціонування

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2018

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Радченко Микола Іванович,
завідувач кафедри кондиціювання та рефрижерації
Національного університету кораблебудування імені
адмірала Макарова МОН України

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор
Петраш Віталій Дем'янович,
завідувач кафедри опалення, вентиляції та охорони
повітряного басейну Одеської державної академії
будівництва та архітектури МОН України

доктор технічних наук, професор
Ткаченко Станіслав Йосипович,
завідувач кафедри теплоенергетики Вінницького
національного технічного університету МОН України

Захист дисертації відбудеться «19» листопада 2018 р. о 13⁰⁰ годині
в ауд. 108 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д41.088.03 в Одеській
національній академії харчових технологій за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м.
Одеса, 65082, Україна.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеської національної
академії харчових технологій за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082,
Україна.

Автореферат розіслано «13» жовтня 2018 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д41.088.03,
доктор технічних наук, професор



В.І. Мілованов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність дослідження. Утилізація скидної теплоти в енергетичних установках тепловикористовуючими холодильними машинами (ТХМ) – один з найбільш перспективних напрямів розвитку холодильної техніки й енергетики в цілому і суднової зокрема. Так, паливна ефективність судових енергетичних установок (СЕУ) значною мірою визначається тепловими втратами з випускними газами двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) і знижується з підвищенням температури повітря на їх вході.

Ефективність утилізації теплоти та охолодження повітря в енергетичних установках досліджувалась провідними академічними інститутами і навчальними закладами: ІТТФ НАНУ, НТУУ "КПІ" (Київ), НТУ "ХПІ", НАУ "ХАІ" (Харків), НУК (Миколаїв), ОНАХТ, НУ "ОМА", ОНМУ (Одеса), а також фірмами-виробниками судових дизелів "MAN", "Wartsila", "Mitsubishi". Вирішенню цієї проблеми присвячені публікації Захарова Ю.В., Селіверстова В.М., Маслова В.В., Марченка А.П., Клименка В.М., Білеки Б.Д., Радченка М.І., Хмельнюка М.Г., Тимошевського Б.Г., Івановського В.Г., Варбанця Р.А., Рей Д., Макмайл Д. та інших відомих вчених і фахівців.

В ряді досліджень, проведених в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК), раніше – в Миколаївському кораблебудівному інституті (МКІ), а також в ОТІХП-ОДАХ-ОНАХТ показана доцільність охолодження повітря на вході двигунів тепловикористовуючими ежекторними холодильними машинами (ЕХМ) як найбільш простими та надійними в експлуатації. Проте залишаються невирішеними питання раціонального використання скидної теплоти СЕУ власне в самих ТХМ відповідно до кліматичних умов експлуатації упродовж рейсу, а отже зміни їх теплових навантажень, і передусім питання використання високо- та низькопотенційної теплоти для нагріву та випаровування холодоагенту в теплосиловому контурі ТХМ. Окрім того, у відповідності до зміни споживання холоду та теплоти упродовж рейсу постають питання покриття дефіциту холодопродуктивності на окремих ділянках рейсу шляхом додаткового її виробництва з використанням теплоти, потенціал якої підвищують тепловим насосом (ТН).

Науково-прикладною задачею, яка вирішується в дисертаційній роботі, є розробка системи утилізації теплоти випускних газів суднової енергетичної установки з охолодженням повітря на вході в ТХМ і ТН, що забезпечує зниження витрати палива.

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

Наведені в дисертації матеріали узагальнюють результати робіт, виконаних автором у рамках фундаментальних і прикладних НДР: № ДР 0115U000300 "Науково-технічні основи тригенераційних полінарних технологій на низькокиплячих робочих тілах для двигунів і енергетичних

установок", № ДР 0116U008669 "Розробка концепції комбінованого виробництва енергії в судновій та стаціонарній енергетиці на основі внутрішньоциклової низькотемпературної тригенерації", № ДР 0116U005729 "Розробка енергозберігаючих теплонасосних технологій для суднової енергетики", в яких автор брав участь на посаді молодшого наукового співробітника.

Об'єктом дослідження є процеси утилізації скидної теплоти випускних газів енергетичної установки судна тепловикористовуючими холодильними машинами і тепловими насосами.

Предмет дослідження – параметри процесів утилізації скидної теплоти випускних газів головного двигуна енергетичної установки судна тепловикористовуючими холодильними машинами і тепловими насосами на рейсовій лінії.

Метою наукового дослідження є підвищення ефективності утилізації теплоти випускних газів енергетичної установки судна шляхом застосування тепловикористовуючих холодильних машин і теплових насосів відповідно до споживання тепла та холоду на рейсовій лінії.

Основні задачі наукового дослідження:

- виявити резерви підвищення ефективності утилізації теплоти випускних газів головного двигуна СЕУ відповідно до споживання тепла та холоду на рейсовій лінії;
- розробити математичну модель процесів утилізації теплоти випускних газів СЕУ з охолодженням повітря на вході головного двигуна в ТХМ з бустерним ТН, яка враховує наявний тепловий потенціал, підтвердити адекватність моделі;
- встановити особливості процесів утилізації теплоти випускних газів СЕУ з охолодженням повітря на вході в ТХМ з бустерним ТН залежно від співвідношення теплових навантажень і визначити їх раціональні параметри та характеристики (теплові коефіцієнти), що забезпечують необхідну глибину охолодження повітря за мінімальних витрат палива на привід ТН;
- розробити способи раціональної організації процесів утилізації теплоти випускних газів головного суднового двигуна в ТХМ з ТН відповідно до споживання тепла та холоду на рейсовій лінії, визначити параметри процесів, які забезпечують потреби і скорочення споживання палива за рахунок охолодження повітря на вході з урахуванням змінних кліматичних умов експлуатації на рейсовій лінії.

Методика і методи дослідження. Використані відомі й апробовані методи фізико-математичного дослідження, розроблена автором математична модель процесів утилізації теплоти ДВЗ тепловикористовуючими холодильними машинами з тепловим насосом, програми фірм-розробників холодильних машин і теплових насосів ("Sabroe", "Viessman", "TripleAqua" тощо) та ДВЗ суднових енергетичних установок ("MAN"). Для розрахунку параметрів зовнішнього повітря і забортної води упродовж рейсу застосована

програма "mundomanz.com", доступна в режимі "on-line". Дослідження включає аналіз ефективності утилізації теплоти випускних газів ДВЗ, розробку математичної моделі процесів утилізації теплоти і перевірку її адекватності, виявлення закономірностей процесів утилізації теплоти випускних газів ДВЗ з охолодженням повітря на вході, визначення раціональних параметрів процесів, розробку способів раціональної організації процесів та їх реалізацію в схемних рішеннях систем утилізації теплоти судових ДВЗ.

Наукові результати, які автор захищає, та їх **новизна**:

1. За результатами аналізу споживання тепла та холоду на транспортному судні запропоновано й реалізовано новий підхід до підвищення ефективності утилізації теплоти випускних газів СЕУ з охолодженням повітря на вході головного двигуна в ТХМ з бустерним ТН підвищення теплового потенціалу відповідно до кліматичних умов експлуатації на рейсовій лінії.

2. Вперше запропонована система утилізації теплоти випускних газів енергетичної установки судна з охолодженням повітря на вході в ТХМ з бустерним ТН, яка забезпечує раціональне використання низько- та високопотенційної теплоти відповідно для нагріву та випаровування холодоагенту в теплосиловому контурі ТХМ.

3. Вперше розроблена математична модель процесів утилізації теплоти випускних газів СЕУ з охолодженням повітря на вході за допомогою ТХМ з бустерним ТН, яка враховує співвідношення теплових навантажень у теплосиловому контурі ТХМ відповідно до параметрів робочого циклу і дозволяє визначати теплові навантаження ТХМ і бустерного ТН. Адекватність моделі підтверджено задовільним узгодженням її результатів з даними фірм-розробників ТХМ і ТН.

4. Встановлено особливості процесів утилізації теплоти випускних газів енергетичної установки судна в ТХМ з бустерним ТН залежно від співвідношення їх теплових навантажень та визначено їх раціональні параметри (температури теплоносіїв) і характеристики (теплові навантаження, теплові коефіцієнти), що забезпечують необхідну глибину охолодження повітря за мінімальних витрат палива на привід ТН.

5. Розроблено способи раціональної організації процесів утилізації теплоти випускних газів СЕУ в ТХМ з ТН відповідно до співвідношення теплових навантажень на випаровування та нагрів холодоагенту в теплосиловому контурі ТХМ, виходячи з параметрів робочого циклу і споживання тепла та холоду на рейсовій лінії, визначено параметри процесів, які забезпечують скорочення споживання палива (скорочення рейсових і річної витрат палива) за рахунок охолодження повітря на вході з урахуванням змінних кліматичних умов експлуатації на рейсовій лінії на 1...3 %, та зниження викидів токсичних і шкідливих речовин на 1,8...2,5 %.

6. Показано ефективність утилізації низькопотенційної теплоти води системи холодження ДВЗ за допомогою теплонасосної парогенеруючої установки на рейсовій лінії в холодній зоні, що дозволяє відмовитися від допоміжного котла і відповідно знизити забруднення навколишнього середовища токсичними димовими газами на 1,7...2,3 %, зменшити теплове забруднення навколишнього середовища на 2...4 %, скоротити споживання котельного палива на 1,8...2,2 %.

Достовірність результатів досліджень підтверджена задовільним узгодженням результатів розрахунку з даними фірм-розробників ТХМ і ТН співставленням коефіцієнтів трансформації теплоти в холод (теплових коефіцієнтів), збереженням встановлених особливостей у широкому діапазоні режимів суднової експлуатації, результатами порівняння паливної ефективності енергоустановки з охолодженням повітря на вході та без нього.

Теоретичне значення мають наступні результати дослідження:

- новий підхід до підвищення ефективності утилізації теплоти випускних газів СЕУ в ТН з бустерним ТН, в основу якого покладено гіпотези раціонального використання низько- та високопотенційної теплоти відповідно для нагріву та випаровування холодоагенту в теплосиловому контурі ТХМ, а також визначення теплових навантажень ТХМ і ТН, виходячи з кліматичних умов експлуатації упродовж рейсу та параметрів робочого циклу ТХМ;

- способи раціональної організації процесів утилізації теплоти випускних газів енергетичної установки судна в ТХМ з ТН відповідно до співвідношення витрат теплоти на випаровування та нагрів холодоагенту в теплосиловому контурі ТХМ, виходячи з параметрів робочого циклу, а також споживання тепла та холоду на рейсовій лінії.

Практичну цінність становлять результати дослідження:

- методика розрахунку параметрів процесів утилізації теплоти випускних газів суднових ДВЗ з охолодженням повітря на вході (теплових навантажень, холодопродуктивності), яка враховує змінні протягом рейсу зовнішні тепловологісні параметри;

- рекомендації з раціональних значень параметрів процесів утилізації теплоти випускних газів суднових ДВЗ з охолодженням повітря на вході, що забезпечують максимальне скорочення рейсових і річних витрат палива.

Використання результатів роботи. Результати роботи (методики розрахунку раціональних параметрів процесів утилізації теплоти й охолодження повітря із застосуванням холодоагентів, конструктивних характеристик охолоджувачів; схеми систем утилізації та охолодження) використані при проектуванні систем утилізації та установок охолодження, теплообмінного обладнання суднових і стаціонарних енергокомплексів: ТОВ "Хладотехніка" (м. Миколаїв), ТОВ "ХІТ ЕНЕРДЖІ ГРУП" (м. Херсон), у навчальному процесі Національного університету кораблебудування імені

адмірала Макарова (НУК) та Херсонській філії НУК при виконанні магістерських робіт зі спеціальності "Холодильні машини та установки".

Особистий внесок здобувача в одержанні наукових результатів полягає в розробці способів охолодження повітря на вході суднових ДВЗ в ТХМ з бустерним ТН і утилізацією високопотенційної теплоти відхідних газів та низькопотенційної теплоти гарячої води системи високотемпературного охолодження ДВЗ, розробці математичної моделі процесів утилізації теплоти ДВЗ в ТХМ з ТН, проведенні розрахункових досліджень, виконанні аналізу й узагальненні отриманих результатів.

Апробація і повнота викладення результатів роботи у публікаціях.

Основні наукові та практичні результати дисертаційного дослідження доповідалися й одержали позитивну оцінку на міжнародних науково-технічних конференціях: "Сучасні проблеми холодильної техніки і технології" (Одеса, 2005, 2011, 2015, 2017); "Проблеми промислової теплотехніки" (Київ, 2005); "Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації" (Миколаїв, 2008, 2017); "Суднова енергетика: стан та проблеми" (Миколаїв, 2005, 2009, 2013, 2017); "Інновації в суднобудуванні та океанотехніці" (Миколаїв, 2012 – 2015, 2017).

Публікації. По темі дисертації опубліковано 49 друкованих наукових праць, у тому числі 16 статей у наукових спеціалізованих виданнях, з них у включених до міжнародних наукометричних баз даних – 7 (без співавторів 1), 31 теза доповідей (без співавторів 9), отримано 2 патенти України на корисну модель.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів і висновків. Обсяг дисертації складає 154 сторінки основного машинописного тексту і 4 сторінки додатків, 65 рисунків і 15 таблиць. Бібліографія містить 119 найменувань на 15 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність теми, наведено зв'язок з науковими програмами і темами, сформульовано науково-прикладне завдання дослідження, об'єкт і предмет дослідження, мету і головні завдання роботи, наведено методи дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, зазначено особистий внесок здобувача, відображено повноту викладення результатів в публікаціях та ступінь апробації на конференціях.

У першому розділі подано огляд теоретичних та експериментальних праць, присвячених ТХМ на базі ежекторних і абсорбційних холодильних машин та ТН. Проаналізовані існуючі способи утилізації високопотенційної теплоти випускних газів та низькопотенційної теплоти води, що охолоджує втулки циліндрів судового дизеля, і визначені резерви підвищення паливної ефективності судових дизелів, пов'язані з використанням їх високо- і

низькопотенційних джерел теплоти для утилізації в ТХМ з бустерним ТН. За результатами аналізу сформульовано мету і задачі наукового дослідження.

У другому розділі наведена розроблена математична модель для розрахунку процесів трансформації теплоти в ТХМ з бустерним ТН, що забезпечують максимальне використання високопотенційної теплоти водяної пари у випарній секції генератора ТХМ.

Математична модель процесів утилізації скидної теплоти відхідних газів суднового малообертового дизеля (МОД) у вигляді теплоти генерованої в УК водяної пари та конденсату шляхом її трансформації в холод в ТХМ з бустерним ТН, що використовують інші джерела низькопотенційної скидної теплоти (воду системи охолодження двигуна) для охолодження повітря на вході турбокомпресора (ТК) МОД, розроблена відповідно до узагальненої схеми системи утилізації на рис. 1 і дозволяє розраховувати процеси трансформації теплоти різного потенціалу в ТХМ різного типу, зокрема ежекторних (ЕХМ) як конструктивно найбільш простих, різних схемних рішень їх спільного використання для охолодження повітря на вході МОД суден морського флоту на конкретних рейсових лініях.

Розглянуто варіант, коли у випарній секції генератора ЕХМ використовується частка теплоти конденсації водяної пари $r(1-x)$, причому коли $x=0$, вся теплота водяної пари утилізується у випарній секції генератора ЕХМ, а відношення теплопродуктивностей секцій генератора ЕХМ $Q_{ГВ}/Q_{ГЕ} = 1,0$. У випадку, коли теплота водяної пари $r \cdot x$ частково утилізується в економайзерній секції генератора ЕХМ для нагріву хладону з різницею температур $t_s - t_{кт4}$ виконується умова: $x > 0$, а $0,5 < Q_{ГВ} / Q_{ГЕ} < 1,0$.

Випарна секція генератора ЕХМ.

Рівняння теплових балансів для випарної секції Γ_B генератора ЕХМ за водяною парою і конденсатом пари:

$$Q_{ГВ}^{пк} = G_{п} [r_{165} (1-x) + c_{кт} (t_s - t_{кт3})],$$

де $t_{кт3}$ – температура конденсату пари на виході з випарної секції генератора ЕХМ, °С; $c_{кт}$ – теплоємність конденсату пари, Дж/(кг·К).

У разі використання в Γ_B теплоти тільки пари r_{165} (при $t_s = 165$ °С, $x = 0$):

$$Q_{ГВ}^{пк} = G_{п} \cdot r_{165}.$$

При використанні частки теплоти водяної пари при конденсації $r_{165}(1-x)$ (при $0 < x < 1$) відповідно без теплоти конденсату $t_{кт3} = t_s$:

$$Q_{ГВ}^{пк} = G_{п} [r_{165} (1-x)]$$

або теплоти конденсату $c_{кт} (t_s - t_{кт3})$ (при $x = 1$):

$$Q_{ГВ}^{пк} = G_{п} c_{кт} (t_s - t_{кт3}).$$

При зниженні $t_{кт3}$ і відповідно температури конденсації $t_{ктН}$ в ТН збільшується значення коефіцієнта трансформації теплоти ТН $\zeta_{ТН}$.

За умови $x = 0$ вся теплота конденсації r_{165} відводиться у випарній секції генератора ЕХМ Γ_B , а при $0 < x < 1$ тільки частка теплоти конденсації r_{165}

де $t_{\text{кт4}}$ – температура конденсату пари на виході з економайзерної секції генератора ЕХМ, °С; $t_{\text{кт3}} = t_{\text{с}}$.

Кількість теплоти зі сторони конденсату НРТ:

$$Q_{\Gamma E}^R = G_{\Gamma \Gamma} c_{R_{KT}} (t_{\Gamma} - t_{R_{KT}}).$$

де $c_{R_{KT}}$ – теплоємність конденсату НРТ, Дж/(кг·К).

Теплонасосна секція генератора ЕХМ.

Дефіцит низькопотенційної теплоти з температурою t_{KT3} для економайзерної секції Γ_E генератора ЕХМ може бути зведений до мінімуму використанням додаткових джерел теплоти з температурою не нижче t_{KT3} або ТН для підвищення теплового потенціалу існуючих джерел низькопотенційної теплоти з подальшим їх використанням у бустерній теплонасосній секції $\Gamma_{E.TH}$ генератора ЕХМ.

Питома та повна холодопродуктивності ЕХМ, що генеруються за рахунок теплового насосу, розраховуються як

$$q_{0.TH} = Q_{0.TH} / G_{\Pi},$$

де G_{Π} – витрата повітря ДВЗ, кг/с;

$$Q_{0.TH} = Q_{\Gamma.EXM+TH} \cdot \zeta_E,$$

де $Q_{\Gamma.EXM+TH}$ – теплопродуктивність ТХМ з бустерним ТН, кВт;

ζ_E – тепловий коефіцієнт ЕХМ.

Зниження температури повітря на вході ДВЗ за рахунок роботи ТН:

$$\Delta t_{\Pi.TH} = Q_{0.TH} / (G_{\Pi} \cdot \xi \cdot c_{\Pi}),$$

де ξ – коефіцієнт вологовипадіння; c_{Π} – теплоємність повітря, Дж/(кг·К).

Теплопродуктивність ТН, тобто теплота, що відводиться від конденсатора ТН:

$$Q_{\Gamma.TH} = Q_{\Gamma B.W} - Q_{\Gamma E.W},$$

де $Q_{\Gamma B.W}$ – кількість теплоти у випарній секції генератора ЕХМ, що відводиться від водяної пари; $Q_{\Gamma E.W}$ – кількість теплоти в економайзерній секції генератора ЕХМ, що відводиться від водяної пари та конденсату пари.

Тепловий коефіцієнт ТН: $\zeta_{TH} = Q_{\Gamma.TH} / N_{E.TH}$.

Частка теплоти ТН в теплоті економайзерної секції Γ_E генератора і теплонасосної секції $\Gamma_{E.TH}$ генератора ($t_{\Gamma} = 120^{\circ}\text{C}$ і $Q_{\Gamma E} = Q_{\Gamma B}$):

$$\delta Q_{\Gamma.TH} = Q_{\Gamma.TH} / (Q_{\Gamma E.W} + Q_{\Gamma.TH}).$$

Нагрів рідкого НРТ R142b в економайзерній секції Γ_E генератора:

$$\Delta t_R = t_{\Gamma} - t_K,$$

в бустерній теплонасосній секції $\Gamma_{E.TH}$:

$$\Delta t_{R.TH} = \Delta t_R \cdot \delta Q_{\Gamma.TH}.$$

Температура рідкого НРТ R142b, нагрітого в $\Gamma_{E.TH}$:

$$t_{R.TH} = t_K + \Delta t_{R.TH}.$$

Розрахунок економії палива СЕУ на основі розробленої математичної моделі.

Зменшення питомої та повної витрати палива суднового ДВЗ за рахунок охолодження повітря на вході перед ТК використовуючи ТХМ з бустерним ТН на величину $\Delta t_{\Pi.TH}$:

$$\Delta b_{T.TH} = \Delta t_{\Pi.TH} \cdot \Delta b_{e1^{\circ}\text{C}}$$

де $\Delta b_{e1^{\circ}\text{C}} = 0,12 \cdot 10^{-3}$ кг/(кВт·год) – зменшення питомої витрати палива суднового ДВЗ за рахунок охолодження температури повітря на вході перед ТК на 1°C ;

$$\Delta B_{\text{Т.ТН}} = \Delta t_{\text{П.ТН}} \cdot 0,12 \cdot 10^{-3} \cdot N_{\text{еДВЗ}},$$

де $N_{\text{еДВЗ}}$ – номінальна ефективна потужність ДВЗ.

Теплота палива, витраченого на привід електрокомпресора ТН:

$$Q_{\text{Т.ТН}} = N_{\text{Е.ТН}} / \eta_{\text{еДВЗ}} = B_{\text{Т.ЕД.ТН}} \cdot Q_{\text{Т}}^{\text{H}},$$

де $B_{\text{Т.ЕД.ТН}}$ – витрата палива на привід електрокомпресора ТН, кг/с; $N_{\text{Е.ТН}}$ – потужність електрокомпресора, кВт; $Q_{\text{Т}}^{\text{H}} = 42500$ кДж/кг – нижня теплота згоряння палива; $\eta_{\text{еДВЗ}}$ – ККД суднового ДВЗ;

$$B_{\text{Т.ЕД.ТН}} = 3600 \cdot Q_{\text{Т.ТН}} / \zeta_{\text{ТН}} / \eta_{\text{еДВЗ}} / Q_{\text{Т}}^{\text{H}},$$

$$\eta_{\text{еДВЗ}} = 3600 / (b_e \cdot Q_{\text{Т}}^{\text{H}}).$$

При порівнянні зменшення повної витрати палива ДВЗ за рахунок охолодження повітря на вході ТК бустерним тепловим насосом, з одного боку, та витрати палива на привід електрокомпресора ТН, з іншого, повинна виконуватися умова $\Delta B_{\text{Т.ТН}} > B_{\text{Т.ЕД.ТН}}$:

$$\Delta t_{\text{П.ТН}} \cdot 0,12 \cdot 10^{-3} \cdot N_{\text{еДВЗ}} > 3600 \cdot Q_{\text{Т.ТН}} / \zeta_{\text{ТН}} / \eta_{\text{еДВЗ}} / Q_{\text{Т}}^{\text{H}}.$$

При цьому необхідний коефіцієнт трансформації теплоти ТН визначається як:

$$\zeta_{\text{ТН}} = 3600 \cdot Q_{\text{Т.ТН}} / (\eta_{\text{еДВЗ}} Q_{\text{Т}}^{\text{H}} \cdot \Delta t_{\text{П.ТН}} \cdot 0,12 \cdot 10^{-3} \cdot N_{\text{еДВЗ}}).$$

На рис. 2 наведено результати зіставлення розрахункових коефіцієнтів $\zeta_{\text{ТНр}}$ з даними $\zeta_{\text{ТНе}}$ фірм-розробників ТН.

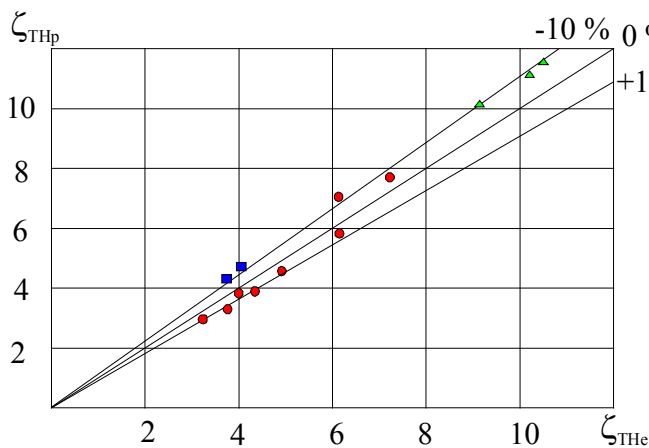


Рис. 2. Зіставлення розрахункових значень теплових коефіцієнтів $\zeta_{\text{ТНр}}$ з даними $\zeta_{\text{ТНе}}$ фірм-розробників ТН:

- ТН фірми "Viessman" Vitocal 350-НТ;
- ТН фірми "Sabroe" HeatPACTM НРХ;
- ▲- ТН фірми "TripleAqua" марки ЗСА

Як видно з рис. 2, при зіставленні розрахункових значень теплових коефіцієнтів $\zeta_{\text{ТНр}}$ і даних $\zeta_{\text{ТНе}}$ фірм-виробників ТН розходження не перевищує 10 %, що підтверджує адекватність математичної моделі.

У третьому розділі в залежності від кліматичних умов експлуатації на окремих відрізках рейсу на прикладі рейсової лінії "Маріуполь-Амстердам-Маріуполь" (рис. 3) балкера типу "Київ" з головним двигуном фірми "MAN" марки

7S50ME-C9.5-ТІІ (номінальна потужність $N_{\text{н}} = 12460$ кВт, експлуатаційна – $N_{\text{е}} = 10580$ кВт) показана необхідність трансформації скидної теплоти дизеля

як з отриманням "енергетичного" холоду для охолодження повітря на вході турбокомпресора тепловикористовуючою холодильною машиною, так і використанням скидної теплоти на теплофікаційні потреби. Визначені шляхи реалізації обох варіантів трансформації теплоти, включаючи і сумісну.

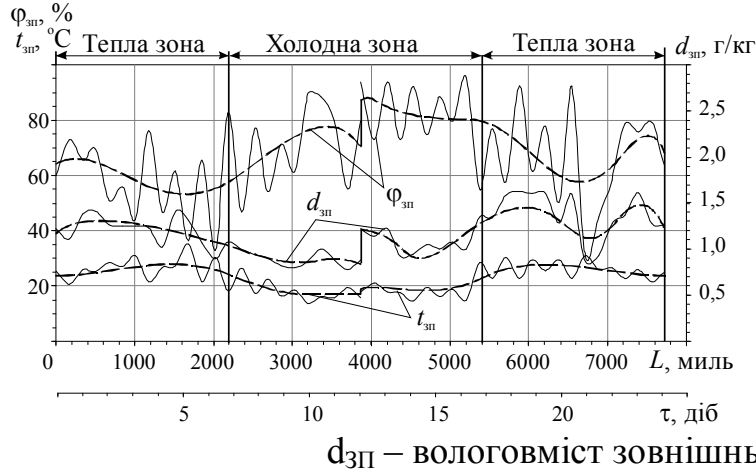


Рис. 3. Зміна параметрів зовнішнього повітря протягом рейсу Маріуполь-Амстердам-Маріуполь (1.07...26.07.2009):
 $t_{зп}$ – температура зовнішнього повітря;
 $\phi_{зп}$ – відносна вологість зовнішнього повітря;
 $d_{зп}$ – вологовміст зовнішнього повітря

На рис. 4 наведений приріст холодопродуктивності $Q_{0.EXM+TH}$ та теплопродуктивності $Q_{Г.EXM+TH}$ при використанні додаткової секції генератора EXM з бустерним тепловим насосом.

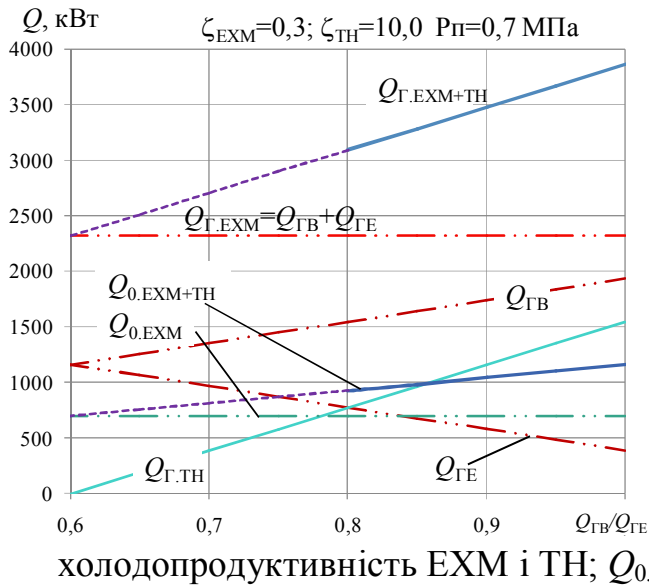


Рис. 4. Зміна холодо- та теплопродуктивності EXM з бустерним ТН: $Q_{Г.EXM+TH}$ – сумарна теплопродуктивність EXM з бустерним ТН; $Q_{Г.EXM}$ – теплопродуктивність EXM; $Q_{ГВ}$ – теплопродуктивність випарної секції генератора EXM; $Q_{ГЕ}$ – теплопродуктивність економайзерної секції генератора EXM; $Q_{Г.ТН}$ – теплопродуктивність ТН; $Q_{0.EXM+TH}$ – сумарна холодопродуктивність EXM і ТН; $Q_{0.EXM}$ – холодопродуктивність EXM

Як видно з рис. 4 (пунктирна лінія), при використанні інших джерел низькопотенційної теплоти на судні можна досягнути приросту холодо- та теплопродуктивності до значення відношення випарної та економайзерної секцій генератора $Q_{ГВ}/Q_{ГЕ}=0,8$, тобто до 80 % високопотенційної теплоти водяної пари можна використовувати у випарній секції Γ_B генератора EXM, а при використанні бустерного ТН можна досягти відношення $Q_{ГВ}/Q_{ГЕ}=1,0$. Тоді приріст холодопродуктивності EXM з бустерним ТН збільшиться від $Q_{0.EXM}=696$ кВт до $Q_{0.EXM+TH}=1159$ кВт, тобто на 39,9 % при тепловому

коефіцієнті ЕХМ $\zeta_{\text{ЕХМ}} = 0,3$; ТН $\zeta_{\text{ТН}} = 10,0$ і тиску насиченої водяної пари $P_{\text{п}} = 0,7$ МПа.

З рис. 5 видно, що при тепловому коефіцієнті ТХМ $\zeta_{\text{ТХМ}} = 0,8$ та умові $Q_{\text{ГВ}}/Q_{\text{ГЕ}} = 1,0$ сумарна економія палива при використанні ТХМ з бустерним ТН зростає до $\Delta B_{\text{т}} = 13 \dots 18$ кг/год, тобто до 2,4...3,0 %.

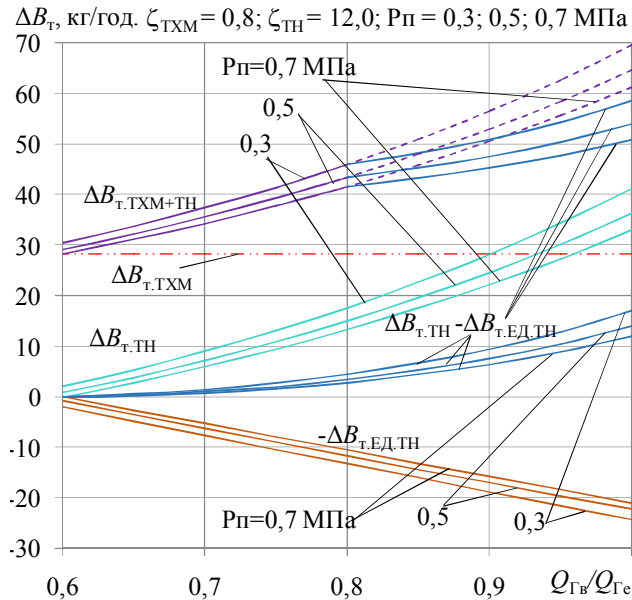


Рис. 5. Зменшення витрати палива $\Delta B_{\text{т}}$ на ТН в залежності від відношення $Q_{\text{ГВ}}/Q_{\text{ГЕ}}$ та тиску насиченої водяної пари в генераторі ТХМ

$P_{\text{п}} = 0,3; 0,5; 0,7$ МПа, $\zeta_{\text{ТН}} = 12,0$, $\zeta_{\text{ТХМ}} = 0,8$: $-\Delta B_{\text{т,ЕД,ТН}}$ – витрати палива на електропривід ТН; $\Delta B_{\text{т,ТХМ}}$ – зменшення витрати палива при роботі ТХМ без ТН; $\Delta B_{\text{т,ТН}}$ – зменшення витрати палива при використанні ТН; $\Delta B_{\text{т,ТЕХМ+ТН}}$ – сумарна економія палива при роботі ТХМ з ТН

В четвертому розділі за результатами аналізу розподілу теплоти конденсату пари, що скидається після суднових споживачів (рис. 6), в ЕХМ з бустерним ТН для охолодження повітря на вході суднового дизеля, одержані залежності для співвідношення теплових навантажень на випарну, економайзерну і теплонасосну секції генератора ЕХМ, подані у графічному вигляді, які дозволяють вибрати їх величини, забезпечити раціональне використання високопотенційної теплоти конденсату водяної пари і низькопотенційної теплоти додаткових джерел при значеннях тиску пари $P_{\text{кп}} = 0,3; 0,5$ і $0,7$ МПа, характерних для суднових утилізаційних котлів.

На рис. 7 наведена зміна витрати палива в залежності від $Q_{\text{ГВ}}/Q_{\text{ГЕ2}}$ при різних значеннях $P_{\text{кп}} = 0,3, 0,5, 0,7$ МПа. Як видно з рис. 7, при зниженні тиску конденсату пари від $P_{\text{кп}} = 0,7$ МПа до $P_{\text{кп}} = 0,3$ МПа сумарна витрата палива зменшується.

На рис. 8 наведені результати розрахунку економії палива за рахунок охолодження повітря на вході головного двигуна в ТХМ з бустерним ТН в теплій зоні рейсу Маріуполь-Амстердам-Маріуполь (1.07...26.07.2009).

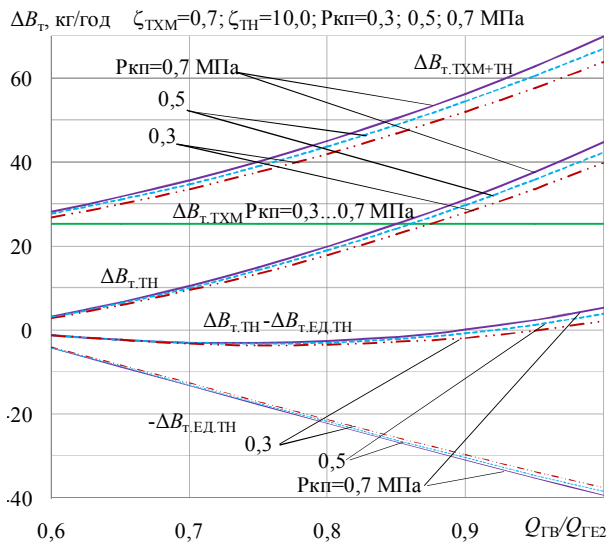


Рис. 7. Зміна витрати палива при використанні ТХМ з ТН в залежності від $Q_{ГВ}/Q_{ГЕ2}$ та $P_{кп} = 0,3, 0,5, 0,7$ МПа:

$-\Delta B_{р.ЕД.ТН}$ – витрати палива на електропривід ТН; $\Delta B_{р.ТХМ}$ – зменшення витрати палива при роботі ТХМ без ТН; $\Delta B_{р.ТН}$ – зменшення витрати палива при використанні ТН; $\Delta B_{р.ТХМ+ТН}$ – сумарна економія палива при роботі ТХМ з ТН

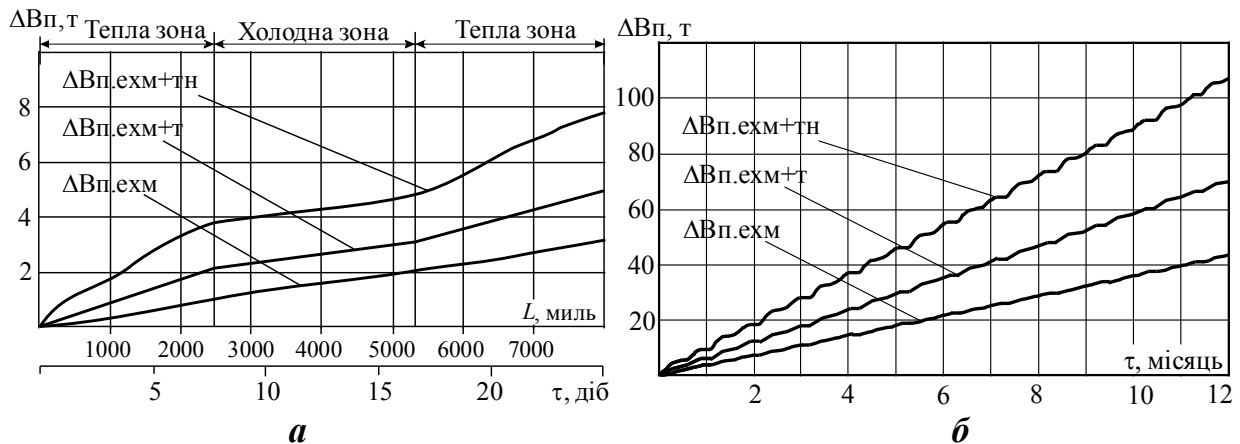


Рис. 8. Економія палива за рахунок охолодження повітря на вході головного двигуна: **а** – протягом рейсу; **б** – протягом року; $\Delta B_{п.ехм}$ – при використанні тільки ЕХМ; $\Delta B_{п.ехм+т}$ – ЕХМ і додаткових джерел низькопотенційної теплоти; $\Delta B_{п.ехм+тн}$ – ЕХМ з бустерним ТН і врахуванням витрат палива на електропривід компресора ТН

З рис. 8 видно, що при охолодженні повітря на вході головного двигуна тільки в ТХМ економія палива протягом рейсу складає 3,2...3,4 тон/рейс, а для ТХМ з бустерним ТН сягає 7,6...7,8 тон/рейс. Сумарна економія палива за рік складе більше 100 тон, а відносна економія палива на судні складе 2,4 %.

В холодній зоні рейсу (див. рис. 3), коли температура зовнішнього повітря $t_{зп}$ стає нижче 20 °С можливе використання теплового насосу як парогенеруючої установки (ТНПУ) для одержання водяної пари з метою заміщення допоміжного котла (ДК) в ходовому режимі судна. Проведені дослідження у **п'ятому розділі** показано ефективність реалізації теплонасосного напрямку утилізації низькопотенційної теплоти охолоджуючої води ДВЗ у ТНПУ, що дозволяє, по-перше, зменшити теплове забруднення навколишнього середовища, по-друге, відмовитися від роботи

допоміжного котла на ходовому режимі судна в холодній зоні, а відповідно знизити забруднення навколишнього середовища токсичними димовими газами і, по-третє, зекономити невідновлювальні джерела енергії (котельне паливо).

Найбільш переважним джерелом низькопотенційної теплоти для роботи ТНПУ є прісна вода системи охолодження втулок циліндрів судових ДВЗ, яка має температуру $80...85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Її теплоти достатньо для одночасної роботи ТНПУ та водоопріснювальної установки (ВОУ) (близько $46...54\%$ теплоти використовується у ВОУ). Проведені розрахунки показують енергетичну доцільність використання двоконтурної ТНПУ для отримання водяної пари тиском $0,3...0,5\text{ МПа}$ для танкера в ходовому режимі в холодній зоні (рис. 9). Водяну пару з тиском $0,7\text{ МПа}$ отримують в утилізаційному котлі (УК).

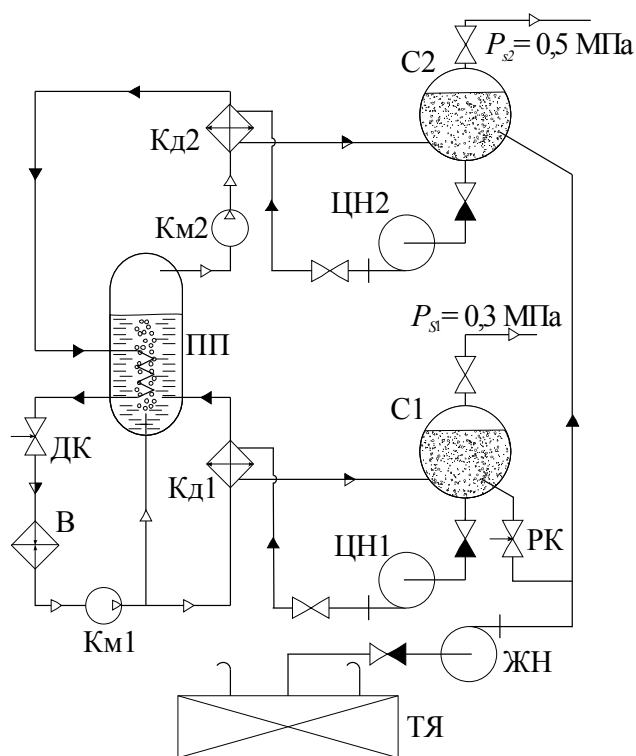


Рис. 9. Схема ТНПУ з одержанням водяної пари двох тисків:

Км – компресор; В – випарник;
ДК – дросельний клапан;
Кд – конденсатор; ПП – проміжна посудина; ЦН – циркуляційний насос води; С – сепаратор водяної пари; РК – редукційний клапан;
ЖН – живильний насос;
ТЯ – теплий ящик

Процеси ТНПУ наведені на рис. 10. Як судно-прототип для проведення розрахункових досліджень був обраний танкер проекту

15966 (типу "Григорій Нестеренко"), водотонажністю $D = 35970\text{ т}$, розробки ЦКБ "Ізумруд" (м. Херсон). На танкері встановлені: головний двигун (ГД) марки 6ДКРН 60/195-10 номінальною потужністю $Ne_{nom}^{ГД} = 9370\text{ кВт}$, два допоміжних котла (ДК), один з яких КАВ 6,3/7 паропродуктивністю $6,3\text{ т/год}$, а інший КАВ 16/16 – 16 т/год , та УК марки КУП 660 паропродуктивністю 5 т/год . В якості альтернативного ГД для танкера розглядались сучасні малообертові двигуни, один з яких фірми "Wartsila" марки 6RTflex52U-B з номінальною потужністю $Ne_{nom}^{ГД} = 9600\text{ кВт}$ (температура та кількість теплоти води, що охолоджує втулки циліндрів ГД відповідно $t_{хвц} = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Q_{хвц} = 1862\text{ кВт}$) та двигун фірми "MAN B&W" марки 6S50ME-C8-ТІІ номінальною потужністю $Ne_{nom}^{ГД} = 9960\text{ кВт}$ ($t_{хвц} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Q_{хвц} = 1450\text{ кВт}$).

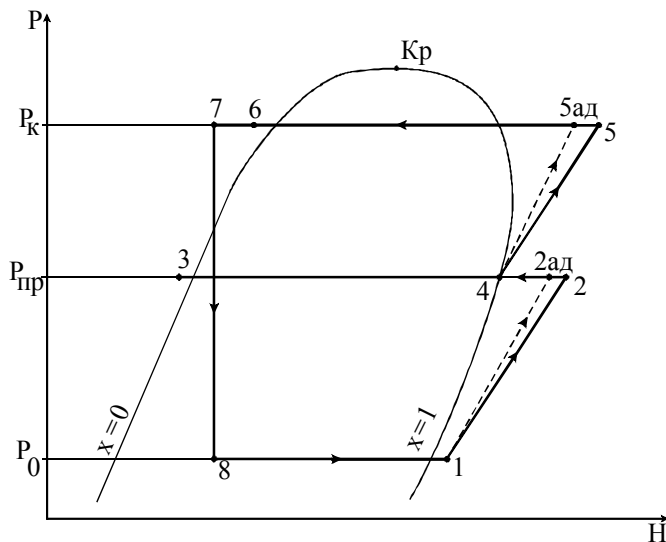


Рис. 10. Процеси ТНПУ в Н-Р (ентальпія-тиск) діаграмі:

- 1-2 – стиснення хладону в компресорі першого ступеня;
- 1-2ад – адіабатне стиснення хладону в компресорі першого ступеня;
- 2-3 – переохолодження хладону в конденсаторі першого ступеня;
- 3-4 – кипіння хладону проміжного тиску в проміжній посудині;
- 4-5 – стиснення хладону в компресорі першого ступеня;
- 4-5ад – адіабатне стиснення хладону в компресорі другого ступеня;
- 5-6 – переохолодження хладону в конденсаторі другого ступеня;
- 6-7 – переохолодження хладону високого тиску в проміжній посудині;
- 7-8 – дроселювання хладону; 8-1 – кипіння хладону у випарнику

Необхідна кількість водяної пари для споживачів на судні в ходовому режимі в холодній зоні 7160 кг/год. В УК максимально виробляється до 5000 кг/год, тому дефіцит водяної пари становить 2160 кг/год, який може компенсуватися роботою ДК, але це призводить до додаткового використання близько 8...10 % палива на судні в цілому.

Згідно з розрахунками сумісна робота ТНПУ та УК забезпечує водяною парою необхідних параметрів всіх споживачів на ходовому режимі в холодній зоні без використання ДК. Загальна кількість отриманої водяної пари при використанні ТНПУ може сягати $G_{\text{сТНПУ}} = 2272$ кг/год з головним двигуном "MAN B&W" та $G_{\text{сТНПУ}} = 2632$ кг/год з головним двигуном "Wartsila", що більше ніж потрібно для покриття всіх потреб споживачів пари на судні в ходовому режимі при експлуатації в холодній зоні (рис. 11, а).

Для генерації водяної пари необхідних тисків конденсація хладону приймалась для першого і другого ступенів відповідно 144 °С і 162 °С, температура кипіння хладону у випарнику 67...75 °С, адіабатний ККД хладонового відцентрового компресора $\eta_{\text{ад.к}} = 0,82$, тепловий коефіцієнт ТНПУ $\zeta = 3,2...3,45$.

З рис. 11, б видно, що завдяки більш високому температурному потенціалу теплоти води системи охолодження ГД фірми "Wartsila", що утилізується в ТНПУ, витрати палива в дизель-генераторі на електропривід компресора ТНПУ становить 95...97 кг/год, що на 5,8...6,1 % менше порівняно з витратою палива при утилізації теплоти ГД фірми "MAN B&W" і на 24...28 % менше порівняно з витратою палива в ДК.

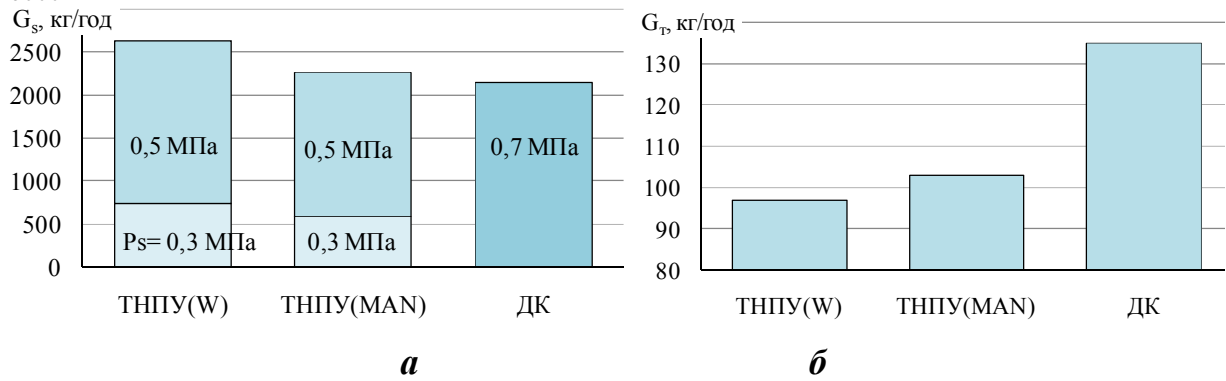


Рис. 11. Результати розрахунків паропроодуктивності ТНПУ та ДК (а); витрати палива при сумісній роботі ТНПУ і УК або ДК і УК в ходовому режимі судна в холодній зоні (б): ТНПУ(W) – утилізація теплоти ГД фірми "Wartsila"; ТНПУ(MAN) – утилізація теплоти ГД фірми "MAN B&W"; ДК – допоміжний котел

Попередні розрахунки показали, що економія палива на судні в цілому при заміщенні ДК в ходовому режимі в холодній зоні на ТНПУ становить 1,8...2,2 % (рис. 12, а).

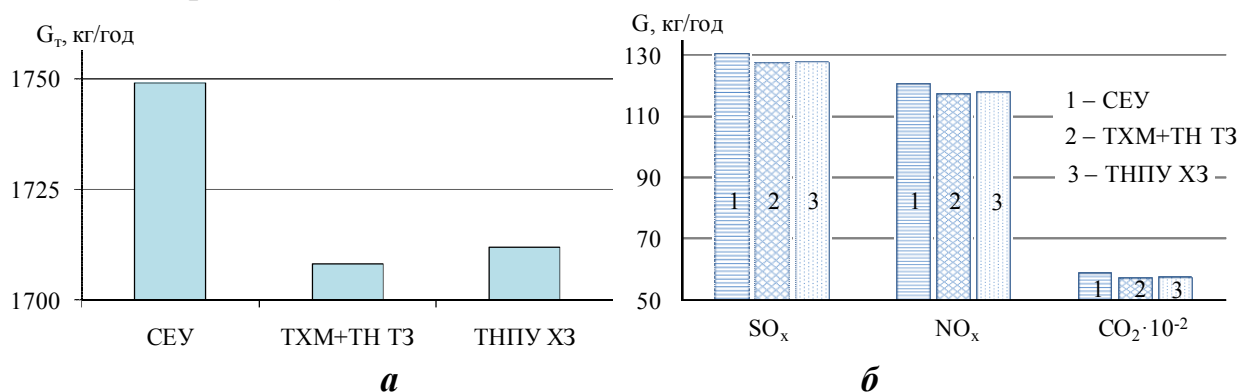


Рис. 12. Зміни витрати палива (а) та викидів токсичних і шкідливих речовин (SO_x , NO_x , CO_2) у відхідних газах ДВЗ (б): СЕУ – при експлуатації СЕУ без використання ТН; ТХМ+ТН ТЗ – при використанні ТХМ з бустерним ТН у теплій зоні; ТНПУ ХЗ – при використанні ТНПУ у холодній зоні

Проведені розрахунки показують (див. рис. 12, б), що зниження температури повітря на вході ДВЗ перед ТК в теплій зоні до $t_{п2}=15^\circ C$ призводить до зменшення викидів токсичних та шкідливих речовин (SO_x , NO_x , CO_2) у відхідних газах ДВЗ. Це відбувається за рахунок зменшення питомої витрати палива на 1,8...2,4 % та завдяки збільшенню масових витрат повітря на 4...7%, що забезпечує значення сумарного коефіцієнта надлишку повітря на припустимому рівні до $\alpha_\Sigma = 2,8...3,2$ при експлуатаційній потужності двигуна $N_e = 75...85\%$. Зниження токсичних і шкідливих речовин (SO_x , NO_x , CO_2) у теплій зоні з використанням теплового насоса у якості

бустерної секції ТХМ, що охолоджує повітря на вході ДВЗ перед ТК становить 1,8...2,5 %.

Як видно з рис. 12, б, в холодній зоні при використанні ТНПУ для заміщення ДК зниження токсичних і шкідливих речовин (SO_x , NO_x , CO_2) становить 1,7...2,3 %.

ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

В дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну задачу розробки системи утилізації теплоти випускних газів СЕУ з охолодженням повітря на вході в ТХМ і ТН, що забезпечує зниження витрати палива і скорочення шкідливих викидів на рейсовій лінії.

1. За результатами аналізу споживання тепла та холоду на транспортному судні на рейсовій лінії визначено резерви і запропоновано та реалізовано новий підхід до підвищення ефективності утилізації теплоти випускних газів енергетичної установки судна з охолодження повітря на вході головного двигуна в ТХМ з ТН підвищення теплового потенціалу джерела теплоти відповідно до кліматичних умов експлуатації та параметрів робочого циклу ТХМ, які визначають витрати теплоти на нагрів та випаровування холодоагенту у теплосиловому контурі ТХМ.

2. Вперше запропонована система утилізації теплоти випускних газів енергетичної установки судна з охолодженням повітря на вході за допомогою ТХМ з бустерним ТН, яка забезпечує раціональне використання низько- та високопотенційної теплоти відповідно для нагріву та випаровування холодоагенту в теплосиловому контурі ТХМ (теплоти водяної пари, гарячої води з високою температурою – для випаровування холодоагенту та низькопотенційної теплоти – для нагріву рідкого холодоагенту).

3. Вперше розроблена математична модель процесів утилізації теплоти випускних газів енергетичної установки судна з охолодженням повітря на вході в ТХМ з бустерним ТН, яка враховує співвідношення теплових навантажень у теплосиловому контурі ТХМ відповідно до параметрів робочого циклу ТХМ і дозволяє визначати теплові навантаження ТХМ і бустерного ТН. Адекватність моделі підтверджено задовільним узгодженням її результатів з даними фірм-розробників ТХМ і ТН.

4. Встановлено особливості процесів утилізації теплоти випускних газів енергетичної установки судна ТХМ з бустерним ТН залежно від співвідношення їх теплових навантажень та визначено їх раціональні параметри (температури та витрати теплоносіїв) і характеристики (теплові навантаження, теплові коефіцієнти), що забезпечують необхідну глибину охолодження повітря на вході головного двигуна за мінімальних витрат палива на привід ТН.

5. Розроблено способи раціональної організації процесів утилізації теплоти випускних газів енергетичної установки судна ТХМ і ТН відповідно

до співвідношення теплових навантажень на випаровування та нагрів холодоагенту в теплосиловому контурі ТХМ, виходячи з параметрів робочого циклу, та споживання тепла та холоду в холодній та теплій зонах рейсової лінії, визначено параметри процесів, які забезпечують скорочення споживання палива (скорочення рейсових і річної витрат палива) за рахунок охолодження повітря на вході з урахуванням змінних кліматичних умов експлуатації на 1...3 %.

6. Показано ефективність утилізації низькопотенційної теплоти охолоджуючої води ДВЗ за допомогою ТНПУ, що дозволяє зменшити теплове забруднення навколишнього середовища на 2...4 %, відмовитися від роботи допоміжного котла на ходовому режимі судна в холодній зоні, відповідно знизити забруднення навколишнього середовища токсичними димовими газами на 1,7...2,3 %, скоротити споживання котельного палива на 1,8...2,2%.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ АВТОРА З ТЕМИ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Калиниченко И.В. Разработка комплексной функции цели для оптимизации параметров работы судовой теплонасосной паропроизводящей установки / И.В. Калиниченко, А.А. Андреев, Н.Б. Андреева // Вісник НУК ім. Адм. Макарова. – Миколаїв: НУК. – 2012. – №3. – С. 143-147. *Особистий внесок: розроблена комплексна функція мети для оптимізації параметрів роботи суднової ТНПУ.*

2. Радченко Н.И. Охлаждение воздуха на входе судового дизеля эжекторной холодильной машиной с бустерным тепловым насосом / Н.И. Радченко, И.В. Калиниченко, Р.Н. Радченко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2017. – №4 (139). – С. 98 – 101. *Особистий внесок: отримано параметри охолодження повітря на вході МОД.*

3. Калиниченко И.В. Тепловой насос в качестве альтернативной судовой парогенерирующей установки // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2014. – №3 (67). – С. 85-88. *Особистий внесок: визначення умов роботи парогенеруючого ТН.*

4. Калиниченко И.В. Математическая и компьютерная модели для расчета цикла теплонасосной паропроизводящей установки / И.В. Калиниченко, А.А. Андреев, В.И. Свиридов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2015. – № 2 (72). – С. 93-96. *Особистий внесок: розробка схемних рішень роботи ТН.*

5. Андреев А.А. Теплонасосная установка для теплоснабжения учебно-административного здания Херсонского филиала УГМУ / А.А. Андреев, И.В. Калиниченко // Холодильна техніка і технологія. – №4. – 2003 р. – С. 62-67. *Особистий внесок: розробка алгоритму розрахунку циклу ТН.*

6. Калиниченко И.В. Получение пара на судне тепловым насосом / И.В. Калиниченко, А.А. Андреев, Н.Б. Андреева // Водний транспорт. – К.:

КДАВТ. – 2015. – №2 (23). – С. 48-57. *Особистий внесок: аналіз умов експлуатації ТН у машинному відділенні.*

7. Утилизация теплоты пара теплоиспользующей холодильной машиной с тепловым насосом для охлаждения воздуха на входе судового дизеля / Н.И. Радченко, И.В. Калиниченко, Р.Н. Радченко, Ю.Г. Щербак // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2017. – №5 (140). – С. 73-77. *Особистий внесок: визначення умов експлуатації ТН.*

8. Андреев А.А. Экологическая и энергетическая целесообразность утилизации низкопотенциальной теплоты на судах с помощью теплового насоса / А.А. Андреев, И.В. Калиниченко // *Техногенна безпека.* – Миколаїв: Вид-во МДГУ ім. П. Могили. – 2008. – Вип. 72. – С. 23-27. *Особистий внесок: доведена можливість використання у якості НПТ теплоту мастила з системи змащення ДВЗ для утилізації в ТНПУ.*

9. Андреев А.А. Эколого-энергетические аспекты внедрения на судах теплонасосных паропроизводящих установок / А.А. Андреев, И.В. Калиниченко // *Техногенна безпека.* – Миколаїв: Вид-во МДГУ ім. П. Могили. – 2007. – Вип. 48. – С. 46-52. *Особистий внесок: доведена можливість використання у якості НПТ теплоту води з системи охолодження ДВЗ для утилізації в ТНПУ.*

10. Андреев А.А. Оценка эффективности утилизации вторичной теплоты судовых ДВС теплонасосной паропроизводящей установкой / А.А. Андреев, И.В. Калиниченко // *Холодильна техніка і технологія.* – 2011. – Вип. 39, т. 1. – С.63-68. *Особистий внесок: визначення показників ефективності ТН.*

11. Оценка эффективности утилизации теплоты судовых главных дизелей теплонасосными паропроизводящими установками / Ю.В. Захаров, А.А. Андреев, И.В. Калиниченко, В.И. Максимов // *Зб. наук. пр. НУК.* – Миколаїв: НУК. – 2005. – № 2 (401). – С. 70-79. *Особистий внесок: проведені розрахунки теплонасосного циклу ТНПУ на різних робочих агентах.*

12. Андреев А.А. Сравнительная оценка энергетической эффективности судовых паропроизводящих установок различных типов / А.А. Андреев, И.В. Калиниченко // *Зб. наук. пр. НУК.* – Миколаїв: НУК. – 2007. – № 2 (413). – С. 100-106. *Особистий внесок: доведена можливість енергетичної ефективності використання двохступінчатої ТНПУ.*

13. Радченко Р.Н. Трансформация сбросной теплоты судового дизеля с охлаждением воздуха на входе в климатических условиях рейсовой линии / Р.Н. Радченко, И.В. Калиниченко, Ю.Г. Щербак // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2015. – №4 (121). – С. 80-84. *Особистий внесок: визначення параметрів роботи системи охолодження повітря на вході з урахуванням кліматичних умов.*

14. Радченко Р.Н. Основы рационального проектирования системы охлаждения наддувочного воздуха судового малооборотного дизеля эжекторным теплотрансформатором / Р.Н. Радченко, Н.С. Богданов, И.В. Калиниченко // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2015.

– №5 (122). – С. 65-68. *Особистий внесок: визначення шляхів підвищення ефективності ежекторного теплотрансформатора.*

15. Андреев А.А. Оценка эффективности применения на судах утилизационной теплонасосной паропроизводящей установки / А.А. Андреев, И.В. Калиниченко // Електронний Вісник НУК ім. Адм. Макарова. – Миколаїв: НУК. – 2011. – №3. – 10 с. *Особистий внесок: запропоновані схемні рішення ТНПУ у складі системи охолодження дизеля.*

16. Калиниченко И.В. Методика комплексной многокритериальной оптимизации параметров работы судовой парогенерирующей теплонасосной установки / И.В. Калиниченко, А.А. Андреев // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2014. – №4 (68). – С. 72-75. *Особистий внесок: визначення показників ефективності роботи ТН.*

17. Патент на корисну модель 27941, Україна, МПК F22B3/00, F25B30/00. Спосіб утилізації низькопотенційної теплоти теплонасосним парогенератором / Андреев А.А., Калініченко І.В.; Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – Заявл. 15.05.2007; Опубл. 26.11.2007. *Особистий внесок: запропоновані схемні рішення двохступінчатої ТНПУ для утилізації теплоти води системи охолодження дизеля.*

18. Патент на корисну модель № 29056, Україна, МПК F22B 3/00, F25B 30/00. Спосіб утилізації низькопотенційної теплоти теплонасосним парогенератором / Андреев А.А., Калініченко І.В. – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – Заявл. 29.05.2007; Опубл. 10.01.2008. *Особистий внесок: запропоновані схемні рішення ТНПУ для утилізації теплоти ДВЗ.*

Основні публікації апробаційного характеру

19. Калиниченко И.В. Учет экологических характеристик рабочих агентов при разработке математической модели теплового насоса // Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації: Матеріали І м-н. н-т. конф. Частина 2. – Миколаїв: НУК. – 2008. – С. 290-291. *Визначення шляхів підвищення енергетичної та екологічної ефективності утилізації теплоти судових ДВЗ.*

20. Калиниченко И.В. Математическая модель для расчета цикла теплонасосной паропроизводящей уставки на ЭВМ / И.В. Калиниченко, А.А. Андреев, В.И. Свиридов // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали VI м-н. н-т. конф. – Миколаїв: НУК. – 2015. – С. 231-234. *Розробка методики обробки результатів розрахунків ТН.*

21. Радченко Н.И. Охлаждение воздуха на входе главного двигателя транспортного судна ежекторной холодильной машиной с тепловым насосом / Н.И. Радченко, И.В. Калиниченко // Сучасні проблеми холодильної техніки

та технології: Матеріали XI м-н. н-т. конф. – Одеса: ОНАХТ. – 2017. – С. 86-88. *Обробка результатів моніторингу роботи ТН.*

22. Калиниченко И.В. Разработка критерия оптимизации для определения эффективности судовой теплонасосной паропроизводящей установки / И.В. Калиниченко, А.А. Андреев, Н.Б. Андреева // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали 3-ї м-н. н-т. конф. – Миколаїв: НУК. – 2012. – С. 248-250. *Розробка методики обробки результатів розрахунків парогенеруючого ТН.*

23. Калиниченко И.В. Комплексный критерий оптимизации параметров судовой теплонасосной парогенерирующей установки / И.В. Калиниченко, А.А. Андреев // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали V м-н. н-т. конф. – Миколаїв: НУК. – 2014. – С. 271 – 277. *Розробка методики обробки результатів розрахунків ТН.*

24. Калиниченко И.В. Учет экологических характеристик рабочих агентов при разработке математической модели теплового насоса / И.В. Калиниченко, В.И. Новиков // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали V м-н. н-т. конф. – Миколаїв: НУК. – 2014. – С. 195-197. *Аналіз умов забезпечення екологічного та термічного стану робочого агенту парогенеруючого ТН.*

25. Андреев А.А. Комплексный критерий оптимизации параметров работы теплонасосной паропроизводящей установки / А.А. Андреев, И.В. Калиниченко // Сучасні проблеми холодильної техніки і технології: Збірник тез доповідей м-н. н-т. конф. – Одеса: ОНАХТ. – 2011. – 2с. *Розробка методики обробки результатів розрахунків ТН.*

26. Андреев А.А. Критерии выбора рабочего вещества теплонасосной паропроизводящей установки / А.А. Андреев, И.В. Калиниченко, В.В. Гладунец // Сучасні проблеми холодильної техніки і технології: Матеріали IV м-н. н-т. конф. – Одеса: Изд-во ОГАХ. – 2005. – С. 69-70. *Розробка методики обробки результатів розрахунків ТН.*

27. Андреев А.А. Оценка эффективности утилизации вторичной теплоты судовых ДВС теплонасосной паропроизводящей установкой / А.А. Андреев, И.В. Калиниченко // Сучасні проблеми холодильної техніки і технології: Збірник тез доповідей м-н. н-т. конф. – Одеса: ОНАХТ. – 2011. – С. 174-175. *Аналіз ефективності експлуатації ТН.*

28. Андреев А.А. Разработка математической модели теплового насоса, использующего различные рабочие агенты А.А. Андреев, И.В. Калиниченко // Проблемы промышленной теплотехники: Матеріали IV м-н. н-т. конф. – Київ: ІТТФ. – 2005. – С.265-267. *Розробка методики обробки результатів розрахунків ТН.*

Журнали, в яких опубліковані статті [2, 3, 4, 7, 13, 14, 16], включені до міжнародних наукометричних баз даних **Index Copernicus Google Scholar** та ін.

АНОТАЦІЯ

Калініченко І. В. Утилізація теплоти суднової енергетичної установки тепловикористовуючими холодильними машинами і тепловими насосами. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 – Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування. – Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, 2018.

Дисертація присвячена розробці системи утилізації теплоти випускних газів суднової енергетичної установки з охолодженням повітря на вході тепловикористовуючими холодильними машинами і тепловим насосом, що забезпечує раціональне використання низько- та високопотенційної теплоти відповідно для нагріву та випаровування холодоагенту в теплосиловому контурі тепловикористовуючої холодильної машини. Розроблена математична модель процесів утилізації теплоти, яка враховує співвідношення теплових навантажень у теплосиловому контурі тепловикористовуючої холодильної машини відповідно до параметрів її робочого циклу і дозволяє визначати теплові навантаження тепловикористовуючих холодильних машин і бустерного теплового насосу. Розроблено способи раціональної організації процесів утилізації теплоти випускних газів енергетичної установки судна тепловикористовуючими холодильними машинами і тепловими насосами відповідно до споживання тепла та холоду на рейсовій лінії, визначено параметри процесів, які забезпечують скорочення споживання палива (скорочення рейсових і річної витрат палива) за рахунок охолодження повітря на вході з урахуванням змінних кліматичних умов експлуатації на рейсовій лінії на 1...3 %.

Ключові слова: тепловикористовуюча холодильна машина, тепловий насос, охолодження повітря, судновий двигун, випускні гази, витрата палива.

ABSTRACT

Kalinichenko I. Utilization of the ship's power plant heat with heat-using refrigeration machines and heat pumps. – The qualification research work as a manuscript.

The dissertation for the scientific degree of the candidate of technical sciences on speciality 05.05.14 – Refrigeration, Vacuum and Compression Engineering, Air Conditioning Systems. – Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, 2018.

The dissertation is devoted to developing the system for utilization of exhaust gas heat in marine power plant with cooling inlet air by waste heat recovery chillers and heat pump, that provides rational using a high- and low potential heat for heating and evaporating a refrigerant in heat-power contour of waste heat recovery chiller. A mathematical model of heat utilization processes is developed that considers the correlation of heat loads in heat-power contour of waste heat

recovery chiller according to the parameters of its work cycle and provides determining of heat loads on waste heat recovery chillers and booster heat pump.

The methods for rational performance of utilization of exhaust gas heat in marine power plant by waste heat recovery chillers and heat pumps according to consumption of heat and cold on route line are developed and parameters of the processes are determined, those provide decreasing a fuel consumption (decreasing annual and route fuel consumption) by 1...3 % due to inlet air cooling with taking into consideration the changeable climatic conditions of operation on route line.

Keywords: waste heat recovery chiller, heat pump, air cooling, ship engine, exhaust gas, fuel consumption.

Підписано до друку 11. 10. 2018 р.
Формат 60х84/16. Папір офсетний.
Гарнітура "Times New Roman". Друк різнографічний.
Обсяг 0,9 авт. арк. Зам. № 16. Тираж 100 прим.

Надруковано ФОП Шуригіна Л.О.
Код за ЄДРПОУ: 2302711442
73000, м. Херсон, вул. Олешківська, б. 9
тел. 0991718122