

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ПИРИСУНЬКО МАКСИМ АНДРІЙОВИЧ



УДК 621.57

**ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГОЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ
СУДНОВОЇ ЕНЕРГОУСТАНОВКИ ОХОЛОДЖЕННЯМ ЦИКЛОВОГО
ПОВІТРЯ ХОЛОДИЛЬНИМИ МАШИНАМИ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2021

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник - кандидат технічних наук, доцент

Радченко Роман Миколайович,

доцент кафедри турбін

Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

Офіційні опоненти—доктор технічних наук, доцент

Гакал Павло Григорович,

завідувач кафедри аерокосмічної теплотехніки

Національного аерокосмічного університету

ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут"

доктор технічних наук, професор

Петраш Віталій Дем'янович,

професор кафедри теплогазопостачання і вентиляції

Одеської державної академії

будівництва та архітектури.

Захист дисертації відбудеться «15» вересня 2021 р. о 12³⁰ 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» серпня 2021 р.

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



В.І. Мілованов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Зниження токсичності і кількості шкідливих викидів з відпрацьованими газами двигунів суднових енергоустановок є складною науково-технічною проблемою. Необхідність її вирішення диктується нормативно-законодавчими вимогами, які стають все більш жорсткими. Найчастіше їх виконання супроводжується зниженням економічних та енергетичних показників двигунів.

Дизельні двигуни внутрішнього згорання (дизелі) є джерелом інтенсивного забруднення атмосферного повітря. Двигуни суднових енергетичних установок викидають у навколишнє середовище значну кількість шкідливих речовин, негативно впливаючи на екологічну обстановку в районах водойм, портів, ремонтних баз, на флору і фауну водних басейнів і на здоров'я людей. Міжнародні конвенції встановлюють жорсткі вимоги до технічного стану суден та процесу експлуатації, при невідповідності яким використання судна може бути в адміністративному порядку обмежено або заборонено. З 2016 року введено в дію нові норми ІМО ТIER III. Відповідно до них в регульованих зонах (ЕСА) кількість шкідливих викидів має бути скорочено у порівнянні з нормами 2011 р. більш, ніж у 3 рази. Одним з перспективних напрямів в екологізації суднових двигунів є нейтралізація шкідливих речовин у випускних газах шляхом їх рециркуляції з очищенням у скруберах і відведенням теплоти забортною водою та подачею очищених газів разом з надувним повітрям після турбокомпресора знову в циліндри двигунів (EGR-технологія). Однак, використання таких технологій пов'язане з додатковими енергетичними витратами на циркуляцію газів та втратами теплоти з забортною водою, що спричиняє зростання споживання палива та зменшення потужності двигунів. В той же час охолодження повітря на вході двигунів забезпечило б зменшення споживання палива, а з використанням ще й теплоти рециркуляційних (екологічних) газів, яка скидається за борт, – зниження енергетичних витрат на їх рециркуляцію й очищення з одночасним скороченням шкідливих викидів.

Науково-прикладною задачею, яка вирішується в дисертаційній роботі, є розробка систем охолодження повітря на вході турбокомпресора двигуна суднової енергоустановки холодильними машинами, що утилізують теплоту випускних і рециркуляційних (екологічних) газів, з урахуванням зміни кліматичних умов і показників екологоенергетичної ефективності суднової енергоустановки протягом рейсу.

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

Дослідження відповідають напрямку «Технології використання нових видів палива, скидних енергоресурсів, відновлюваних та альтернативних

джерел енергії. Теплонасосні технології» (згідно з постановою Кабінету Міністрів України від 7 вересня 2011 р. № 942).

Наукові дослідження дисертаційної роботи використано в темах за грантами Президента України № Ф82/198-2019/2216 від 28.10.2019 «Розробка інноваційної енергоефективної технології кондиціонування повітря автономних теплоелектростанцій», № Ф82/207-2019/2215 від 28.10.2019 «Розробка енергоефективних систем утилізації теплоти когенераційних модулів автономного енергозабезпечення підприємств», держбюджетній науково-дослідницькій роботі № ДР 0121U112132 «Науково-технічні основи енергожиттєзабезпечення суден морського флоту та кораблів берегової охорони», в яких здобувач приймав участь як виконавець.

Об'єктом дослідження є система охолодження циклового повітря двигунів суднових енергоустановок з рециркуляцією випускних газів.

Предмет дослідження - процеси охолодження циклового повітря суднових енергоустановок холодильними машинами, що утилізують теплоту випускних і рециркуляційних (екологічних) газів.

Метою наукового дослідження є підвищення екологоенергетичної ефективності суднової енергоустановки шляхом охолодження циклового повітря холодильними машинами, що утилізують теплоту випускних і рециркуляційних (екологічних) газів.

Основні задачі наукового дослідження:

- проаналізувати існуючі способи і системи охолодження повітря двигунів та екологізації суднових енергоустановок, виявити резерви підвищення їх екологоенергетичної ефективності;
- розробити математичну модель для розрахунку параметрів і характеристик процесів охолодження повітря двигунів суднових енергоустановок з рециркуляцією випускних газів холодильними машинами при змінних протягом рейсу зовнішніх параметрах;
- виявити особливості процесів охолодження повітря двигунів суднових енергоустановок шляхом утилізації теплоти випускних і рециркуляційних (екологічних) газів;
- розробити схемні рішення систем охолодження повітря двигунів суднових енергоустановок з рециркуляцією випускних газів, які забезпечують підвищення екологічної ефективності та паливної економічності двигунів завдяки утилізації теплоти випускних і рециркуляційних газів.

Методика і методи дослідження. При визначенні ефекту та розробці математичної моделі процесів охолодження повітря двигунів суднових енергоустановок з рециркуляцією випускних газів та утилізацією їх теплоти показники паливної та екологічної ефективності обчислювали за програмами фірм-розробників суднових двигунів з рециркуляцією випускних газів ("MAN

Energy Solutions", "Viessman" тощо). Температуру забортної води упродовж рейсової лінії судна визначали за допомогою електронного ресурсу NOAA's (National Oceanic and atmospheric Administration) Американського Національного центру екологічної інформації (NCEI) "nodc.noaa.gov", доступного в режимі "on-line". Параметри зовнішнього повітря (температуру та відносну вологість) брали з електронного ресурсу "meteomanz.com".

Наукові результати, які автор захищає, та їх новизна:

1. Вперше запропоновано й реалізовано новий підхід до підвищення екологоенергетичної ефективності суднової енергоустановки шляхом охолодження циклового повітря холодильними машинами, що утилізують теплоту випускних і рециркуляційних (екологічних) газів і забезпечують компенсацію витрат палива, зумовлених рециркуляцією газів, та додаткове скорочення споживання палива на 2-3%, відповідно і викидів NO_x і SO_x.

2. Розроблено математичну модель розрахунку характеристик і параметрів процесів охолодження повітря і рециркуляційних газів суднових енергоустановок в АБХМ і ЕХМ з урахуванням змінних протягом рейсу кліматичних умов і частки рециркуляційних газів, а також показників паливної та екологічної ефективності суднової енергоустановки.

3. Розроблені способи раціональної організації процесів охолодження циклового повітря суднових енергоустановок шляхом утилізації втрат теплоти рециркуляційних (екологічних) газів з забортною водою, що складають 2-3 % залежно від їх частки (10-40 %), та випускних газів.

4. Розроблені підхід та способи раціональної організації процесів охолодження й утилізації та схемні рішення систем з їх реалізації складають основу **гіпотези** підвищення екологоенергетичної ефективності суднової енергоустановки шляхом охолодження циклового повітря утилізацією теплоти випускних і рециркуляційних екологічних газів.

Практичну цінність становлять результати дослідження:

- методика розрахунку характеристик (холодопродуктивності, скидної теплоти випускних і рециркуляційних газів) і параметрів процесу охолодження повітря суднової енергоустановки з урахуванням змінних протягом рейсу судна зовнішніх параметрів;

- рекомендації щодо раціональних значень характеристик і параметрів процесів охолодження повітря утилізацією теплоти випускних і рециркуляційних (екологічних) газів, що забезпечують скорочення рейсових і річних витрат палива та шкідливих викидів.

Використання результатів роботи. Результати роботи впроваджені в практику проектування систем охолодження та утилізації ТОВ «ХІТ ЕНЕРДЖІ ГРУП» (м. Херсон), ТОВ «МЕГАІМПЕКС» (м. Херсон), в освітній процес у лекційних курсах, на практичних заняттях та у курсовому проектуванні на

кафедрі кондиціювання та рефрижерації Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

Особистий внесок здобувача в одержанні наукових результатів полягає в розробці способів охолодження повітря двигунів суднових енергоустановок з системою рециркуляції відпрацьованих газів і утилізацією теплоти випускних газів включно з рециркуляційними в ТХМ, розробці математичної моделі процесів охолодження повітря двигунів суднових енергоустановок холодильними машинами шляхом утилізації теплоти випускних газів, у т.ч. й рециркуляційних (екологічних) газів, проведенні розрахункових досліджень, виконанні аналізу й узагальненні отриманих результатів.

Апробація і повнота викладення результатів роботи у публікаціях.

Основні результати дисертаційних досліджень доповідалися й були позитивно оцінені на XII Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки та технології» (Одеса, ОНАХТ, 2019 р.); Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених, аспірантів та студентів «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології» (Одеса, ОНАХТ, 2019 р.); XII Всеукраїнській науково-технічній конференції «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології» (Одеса, ОНАХТ, 2019 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Транспорт: Механічна інженерія, експлуатація, матеріалознавство», (Херсон, ХДМА, 2017 р.); Міжнародній науково-практичній Internet-конференції «Моделювання та інформаційні технології в науці, техніці та освіті: Збірник наукових праць». – (Харків, ХНАДУ, 2018 р.); IV Міжнародних техн. конф. «Суднова енергетика: стан і проблеми» (Миколаїв, НУК, 2016 р., 2019 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 29 наукових праць, з них 8 опубліковано у виданнях, включених до міжнародної наукометричної бази Scopus, 3 - Web of Science, 1 розділ у колективній монографії закордонного видавництва та 9 тез міжнародних і всеукраїнських конференцій.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів і висновків. Обсяг дисертації складає 175 сторінок основного машинописного тексту, 71 рисунок і 4 таблиці. Бібліографія містить 133 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано науково-прикладну задачу, об'єкт і предмет та мету дослідження, головні завдання, визначено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів.

У першому розділі подано огляд теоретичних та експериментальних праць, присвячених зниженню токсичності і кількості шкідливих викидів з

відпрацьованими газами двигунів суднових енергоустановок. Досліджено способи зниження токсичності і димності відпрацьованих газів. За результатами проведеного аналізу визначено перспективи застосування технологій зниження кількості шкідливих речовин в енергетичних установках, сформульовано мету і задачі наукового дослідження.

У другому розділі досліджено методи зниження кількості оксидів азоту NO_x і оксидів сірки SO_x та їх вплив на енергетичну ефективність суднової енергетичної установки. Серед методів поліпшення екологічних показників енергетичної установки особливої уваги заслуговує система рециркуляції відпрацьованих газів, яка дозволяє досить доступно і ефективно впливати на утворення оксидів азоту та оксидів сірки в широкому діапазоні. Механізм впливу пов'язаний з термічним характером реакції окислення азоту, відповідно до чого оксиди NO_x утворюються тільки при високій температурі. Отже, знижуючи швидкість тепловиділення, тобто домагаючись, щоб процес згоряння палива протікав при більш низькій температурі, можна обмежити кількість NO_x у відпрацьованих газах (ВГ). Рециркуляція відпрацьованих газів уповільнює процес згоряння палива і, в кінцевому рахунку, призводить до різкого зменшення викидів NO_x . Разом зі зменшенням NO_x зростає вихід продуктів неповного згоряння (зокрема, сажі) і погіршується паливна економічність дизельних двигунів. Супутні негативні явища особливо відчутні на повних навантаженнях двигуна. Зазвичай величину ступеня рециркуляції K_r регулюють перепускним клапаном в залежності від навантаження, частоти обертання, паливної економічності та концентрації NO_x і C .

Поряд з погіршенням паливної економічності двигунів через уповільнення процесу згоряння палива і зниження температури робочого циклу мають місце енергетичні втрати, пов'язані з рециркуляцією та очищенням газів у скруберах з відведенням їх теплоти забортною водою.

За результатами аналізу обґрунтовано підхід до підвищення екологоенергетичної ефективності суднової енергоустановки шляхом охолодження циклового повітря на вході двигунів холодильними машинами, які утилізують теплоту випускних і рециркуляційних (екологічних) газів, що дасть можливість не тільки компенсувати енергетичні втрати, спричинені рециркуляцією відпрацьованих (екологічних) газів, а й додатково зменшити споживання палива.

У третьому розділі наведена розроблена математична модель (блок-схема на рис.1) для розрахунку параметрів процесів охолодження повітря на вході двигунів з рециркуляцією випускних (екологічних) газів холодильними машинами при змінних протягом рейсу зовнішніх параметрах.

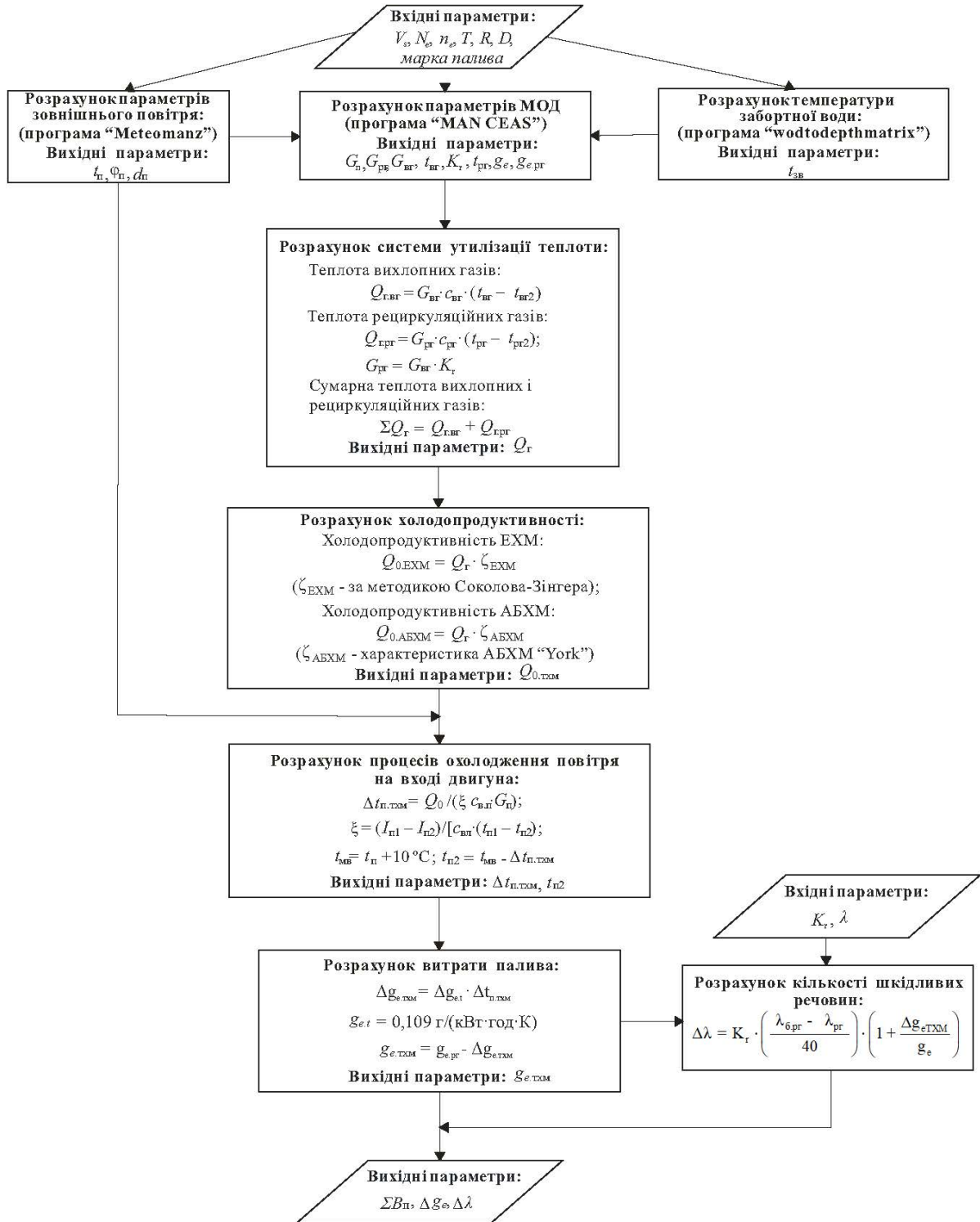


Рис. 1. Блок-схема математичної моделі для розрахунку процесів охолодження повітря на вході двигуна суднової енергоустановки з рециркуляцією випускних (екологічних) газів: K_r – коефіцієнт рециркуляції; $c_{вл}$ – теплоємність вологого повітря; D – осадка судна; T – дата; R – регіон; λ – показник, який відповідає значенню кількості NO_x та SO_x

Температуру забортної води упродовж рейсової лінії судна визначали за допомогою електронного ресурсу NOAA's (National Oceanic and atmospheric Administration) Американського Національного центру екологічної інформації (NCEI) "nodc.noaa.gov", доступного в режимі "on-line". Параметри зовнішнього повітря (температуру та відносну вологість) брали з електронного ресурсу "meteomanz.com". Для розрахунку шкідливих речовин введений показник λ , який відповідає значенню кількості NO_x та SO_x .

Розрахунок характеристик двигуна проводився на експлуатаційному режимі упродовж рейсу суховантажного судна з Одеси (Україна) до міста Шанхай (Китай), що здійснювався в період з 01.07.2018 по 24.07.2018 р. Довжина рейсової лінії судна з Одеси (Україна) до Шанхаю (Китай) складає $L = 8232$ миль, або $L = 15023$ км, при швидкості ходу судна $V_s = 14$ вуз.

Дані зі зміни кліматичних умов протягом рейсу судна (температура зовнішнього повітря $t_{\text{п}}$, температура забортної води $t_{\text{зв}}$, вологовміст зовнішнього повітря $d_{\text{п}}$ і відносна вологість $\phi_{\text{п}}$) наведені на рис. 2.

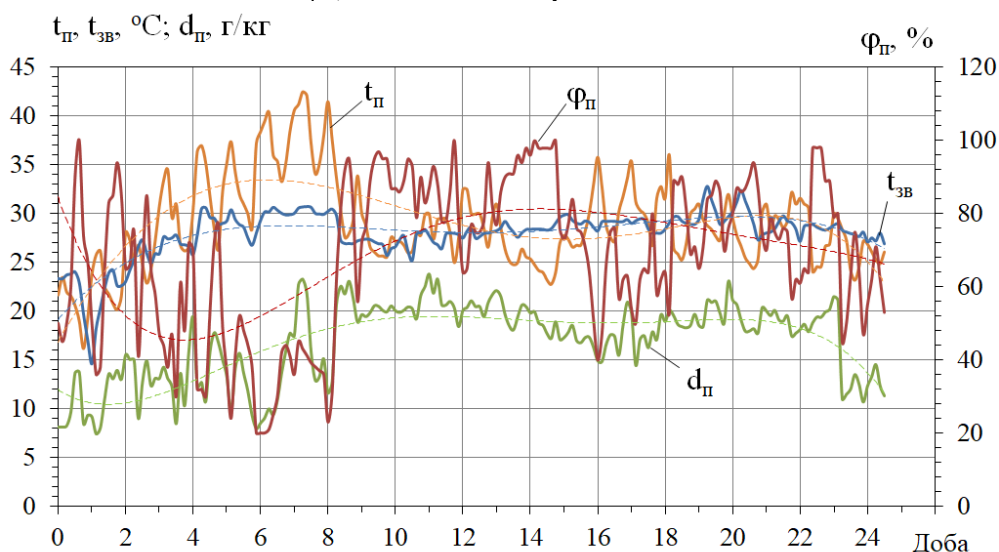


Рис. 2. Зміна температури зовнішнього повітря $t_{\text{п}}$, температури забортної води $t_{\text{зв}}$, вологовмісту зовнішнього повітря $d_{\text{п}}$ і відносної вологості $\phi_{\text{п}}$ протягом рейсу

Зміна кліматичних умов на протязі рейсу призводить до зміни теплового навантаження системи охолодження двигуна, тобто холодопродуктивності Q_0 , необхідної для охолодження повітря на вході двигуна (від температури в машинному відділенні $t_{\text{мв}}$ до температури, наприклад $t_{\text{п2}} = 15$ °C) на величину Δt_{15} , та необхідних для ТХМ витрат теплоти $Q_{\text{г}}$: $Q_{\text{г}} = Q_0 / \zeta$.

При цьому поточну холодопродуктивність Q_0 розраховують як $Q_0 = c_{\text{вл}} \cdot \Delta t_{15} \cdot \xi$, де $\Delta t_{15} = t_{\text{мв}} - t_{\text{п2}}$, де температура в машинному відділенні $t_{\text{мв}} = t_{\text{п}} + 10$ °C; $t_{\text{п2}} = 15$ °C; ξ – коефіцієнт вологовипадіння, $c_{\text{вл}}$ – теплоємність вологого повітря.

Необхідні холодопродуктивність Q_0 і витрати теплоти Q_r порівнюють з наявними теплою рециркуляційних газів $Q_{r,pr}$ та холодопродуктивністю $Q_{0,pr(0,3)}$, яку можна отримати, як приклад, в ЕХМ з тепловим коефіцієнтом $\zeta = 0,3$: $Q_{0,pr(0,3)} = \zeta Q_{r,pr}$ при $\zeta = 0,3$.

Реальне (наявне) зниження температури повітря $\Delta t_{pr(0,3)}$ на вході двигуна при використанні в ЕХМ теплоти рециркуляційних газів $Q_{r,pr}$ знаходять як $\Delta t_{pr(0,3)} = Q_{0,pr(0,3)} / (c_{вл} \cdot \xi)$ при $\zeta = 0,3$, а поточну температуру охолодженого повітря як $t_{п(0,3)} = t_{мв} - \Delta t_{pr(0,3)} = t_{п} + 10 \text{ }^\circ\text{C} - \Delta t_{pr(0,3)}$, де $t_{п}$ – поточні температури зовнішнього повітря ($t_{зп}$).

Скорочення питомої витрати палива двигуна обчислюють за зниженням температури повітря на вході двигуна $\Delta t_{pr(0,3)}$ в ЕХМ (приміром при $\zeta = 0,3$) і порівнюють з його величиною, яку можна було б отримати при охолодженні повітря на вході двигуна, як приклад до $t_{п2} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$. З їх співставлення роблять висновок про надлишок або дефіцит холодопродуктивності Q_0 , отриманої з наявної теплоти, наприклад, рециркуляційних газів $Q_{r,pr}$.

Розрахунок зменшення питомої витрати палива двигуна проводять з урахуванням того, що при охолодженні повітря на вході на кожні $10 \text{ }^\circ\text{C}$ зниження питомої витрати палива складає $\Delta g_{e,t} = 1,09 \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$, або $0,109 \text{ г/(кВт}\cdot\text{год}\cdot\text{K)}$: $\Delta g_{п.тхм} = \Delta t_{п.тхм} \cdot \Delta g_{e,t}$.

З рис. 3 видно, що упродовж рейсу Одеса-Шанхай суховантажного судна з двигуном фірми MAN ENERGY моделі 6G50ME-C9.6 питома витрата палива без рециркуляції відпрацьованих газів $165...167 \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$, а двигуна з рециркуляцією відпрацьованих газів $168...170 \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$. При цьому степінь рециркуляції протягом рейсу $K_r = 13...15\%$. Витрата рециркуляційних газів $G_{r,p} = 2,8...2,9 \text{ кг/с}$ при загальній витраті $G_r = 18...20 \text{ кг/с}$.

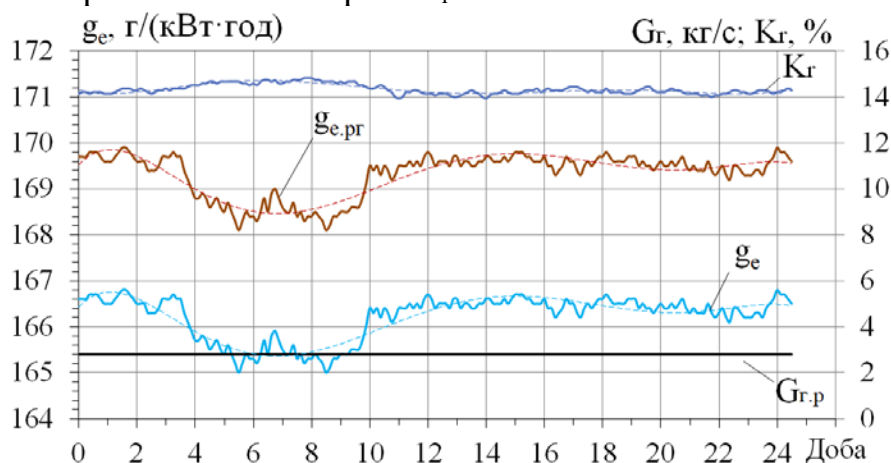


Рис. 3. Зміна питомої витрати палива g_e двигуна фірми MAN 6G50ME-C9.6 без рециркуляції газів, питомої витрати палива з рециркуляцією газів $g_{e,pr}$, ступеня рециркуляції відпрацьованих газів K_r та витрати рециркуляційних газів $G_{r,p}$ на протязі рейсу судна

Таким чином, розроблена математична модель дає змогу обраховувати поточні на протязі рейсу показники паливної ефективності двигуна залежно від ступеня рециркуляції відпрацьованих газів, виходячи з яких розробляти способи раціональної організації процесів охолодження повітря трансформацією теплоти вихлопних і рециркуляційних газів та системи з їх реалізації, що забезпечують максимальні економії палива і скорочення шкідливих викидів.

У четвертому розділі розроблено системи охолодження повітря на вході двигуна утилізацією теплоти рециркуляційних (екологічних) газів в ТХМ. Аналіз ефективності їх застосування проведено шляхом порівняння з базовою системою з рециркуляцією відпрацьованих газів для малообертових дизельних двигунів (МОД) фірми MAN відповідно до умов екологічності Tier III. Рециркуляція здійснюється байпасуванням частки відпрацьованих газів з подальшим їх очищенням від шкідливих речовин у скрубєрі з використанням розчину NaOH та охолодженням у теплообміннику-охолоджувачі газу.

Схемне рішення на базі ЕХМ розглянуто для суднового двигуна MAN Energy марки 6G50ME-C9.6. Для аналізу параметрів системи рециркуляції і екологоенергетичних характеристик двигуна використовувався програмний комплекс CEAS провідної фірми-виробника MAN Energy Solution.

Розрахунок зроблено для вихідних даних: експлуатаційні характеристики двигуна (при умовах ISO) – навантаження на двигун – $NMCR = 90 \%$; потужність $N_e = 9288$ кВт; частота обертання $n_e = 96,5$ хв⁻¹; питома витрата умовного палива $g_e = 165,8$ г/(кВт·год); система рециркуляції відпрацьованих газів (EGR) зі скрубєром і охолоджувачем газу відповідає умовам екологічності Tier III.

На рис. 4 представлена схема системи рециркуляції відпрацьованих газів малообертового двигуна (МОД) фірми MAN Energy Solution з охолодженням повітря на вході в турбокомпресор (ТК) МОД в ЕХМ шляхом утилізації теплоти рециркуляційних (екологічних газів).

Теплоту рециркуляційних газів використовують у генераторі ЕХМ. Зміна кліматичних умов на протязі рейсу судна призводить до зміни теплового навантаження системи охолодження, відповідно й холодопродуктивності Q_0 , необхідної для охолодження повітря. Її порівнюють з наявною (реальною) холодопродуктивністю $Q_{0,pr(0,3)}$, що отримують трансформацією наявної теплоти рециркуляційних газів в ЕХМ при $\zeta = 0,3$ як $Q_{0,pr(0,3)} = \zeta \cdot Q_{г,pr}$.

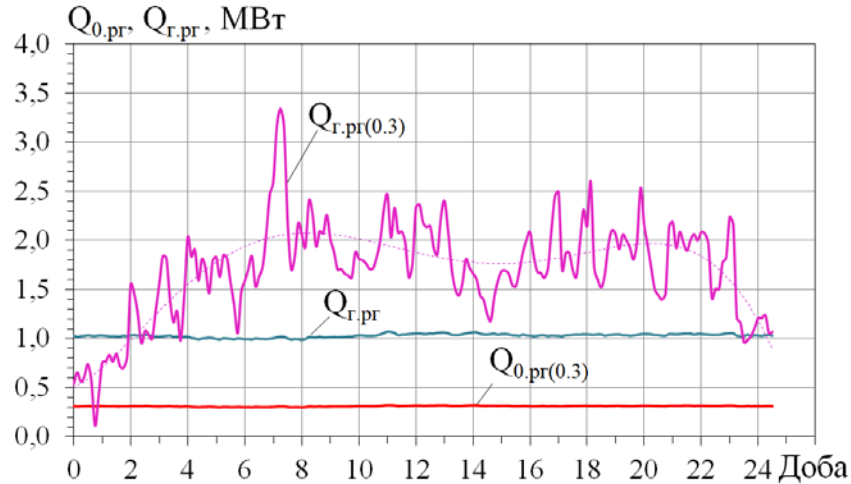


Рис. 5. Поточні значення теплоти рециркуляційних газів $Q_{г,pr}$, холодопродуктивності $Q_{0,pr(0,3)}$, отриманої її трансформацією в ЕХМ та теплоти $Q_{г,pr(0,3)}$, необхідної для охолодження повітря на вході двигуна до $t_{пв} = 15^\circ\text{C}$ при тепловому коефіцієнту $\zeta = 0,3$

Як видно з рис. 5, утилізація в ЕХМ наявної теплоти рециркуляційних газів $Q_{г,pr} = 985 \dots 1075$ кВт, відведеної від них перед скруббером, забезпечує отримання холодопродуктивності $Q_{0,pr(0,3)} = 295 \dots 325$ кВт ($\zeta = 0,3$), якої недостатньо для охолодження повітря на вході двигуна до $t_{пв} = 15^\circ\text{C}$.

Так, застосування ЕХМ з низьким $\zeta = 0,3$ забезпечує охолодження повітря на величину $\Delta t_{п,pr(0,3)} = 7 \dots 13^\circ\text{C}$ проти $\Delta t_{15} = 20 \dots 35^\circ\text{C}$ при охолодженні до 15°C (рис. 6). Недоохолодження повітря становить $\Delta t_{п,pr(0,3)д} = \Delta t_{15} - \Delta t_{п,pr(0,3)} = 15 \dots 23^\circ\text{C}$.

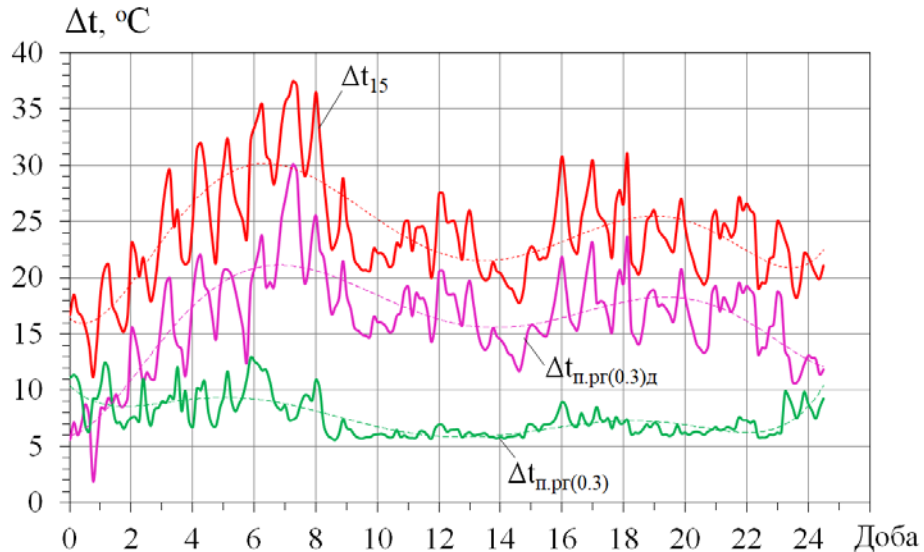


Рис. 6. Поточні значення зниження температури повітря Δt_{15} при охолодженні до 15°C , реальне зниження температури повітря в ЕХМ $\Delta t_{п,pr(0,3)}$ та його недоохолодження (дефіцит) в ЕХМ $\Delta t_{п,pr(0,3)д} = \Delta t_{15} - \Delta t_{п,pr(0,3)}$ (при $\zeta = 0,3$)

Через низький тепловий коефіцієнт ЕХМ $\zeta = 0,3$ холодопродуктивність, яку отримують в ЕХМ за рахунок теплоти рециркуляційних (екологічних) газів $Q_{0,pr(0,3)}$, практично вдвічі менше холодопродуктивності $Q_{0,15}$, необхідної для охолодження повітря на вході двигуна до температури $t_{п2} = 15\text{ }^\circ\text{C}$, про що свідчить значний її дефіцит $\Delta Q_{0,pr(0,3)д} = Q_{0,15} - Q_{0,pr(0,3)}$ (рис. 7).

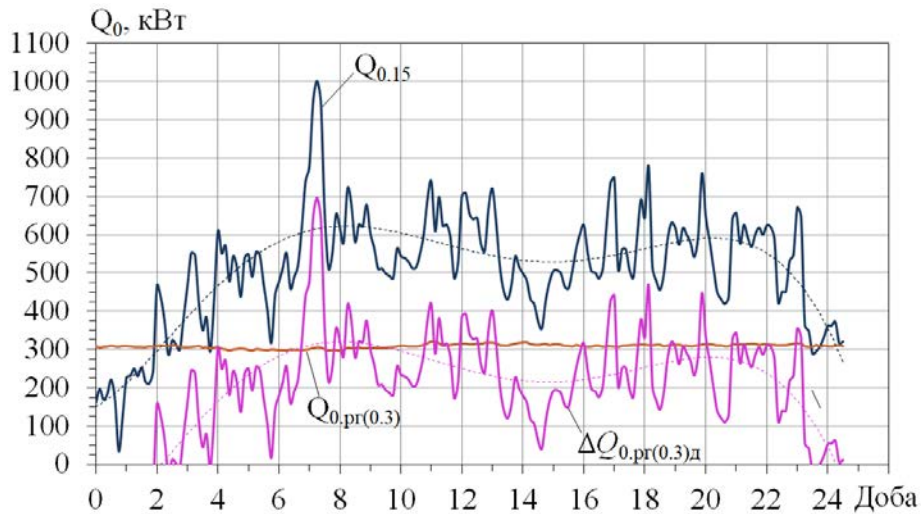


Рис. 7. Поточні значення холодопродуктивності $Q_{0,15}$, необхідної для охолодження повітря до $t_{п2} = 15\text{ }^\circ\text{C}$ на величину Δt_{15} , наявної холодопродуктивності $Q_{0,pr(0,3)}$, отриманої в ЕХМ (при $\zeta = 0,3$) за рахунок теплоти рециркуляційних (екологічних) газів, та дефіциту холодопродуктивності ЕХМ $\Delta Q_{0,pr(0,3)д} = Q_{0,15} - Q_{0,pr(0,3)}$

Скорочення питомої витрати палива двигуна обчислюють за зниженням температури повітря на вході двигуна $\Delta t_{п,pr(0,3)}$ в ЕХМ (при $\zeta=0,3$) і порівнюють з його величиною, яку можна було б отримати при охолодженні повітря на вході двигуна, як приклад до $t_{п2} = 15\text{ }^\circ\text{C}$. З їх співставлення роблять висновок про надлишок або дефіцит холодопродуктивності Q_0 , отриманої з наявної теплоти, наприклад, рециркуляційних газів $Q_{г,pr}$.

Розрахунок зменшення питомої витрати палива двигуна проводять з урахуванням того, що при охолодженні повітря на вході на кожні $10\text{ }^\circ\text{C}$ зниження питомої витрати палива становить $\Delta g_{e,t} = 1,09\text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$, або $0,109\text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{год}\cdot\text{K})$ (рис. 8).

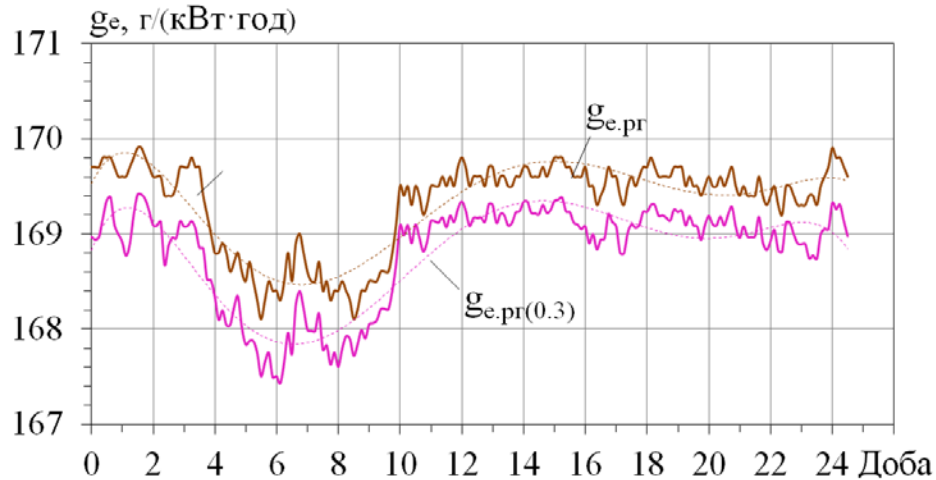


Рис. 8. Поточні значення питомої витрати палива базового двигуна з рециркуляцією відпрацьованих газів $g_{e,pr}$, питомої витрати палива двигуна $g_{e,pr(0,3)}$ з охолодженням повітря на вході в ЕХМ ($\zeta = 0,3$) на протязі рейсу судна

Питома витрата палива становить (рис. 8): $\Delta g_{e,pr(0,3)} = 167,4 \dots 169,4$ г/(кВт·год) ($\zeta = 0,3$).

Економія палива за рейс (рис. 9) становить $\Sigma B_{п(0,3)} = 2,8$ т ($\zeta = 0,3$).

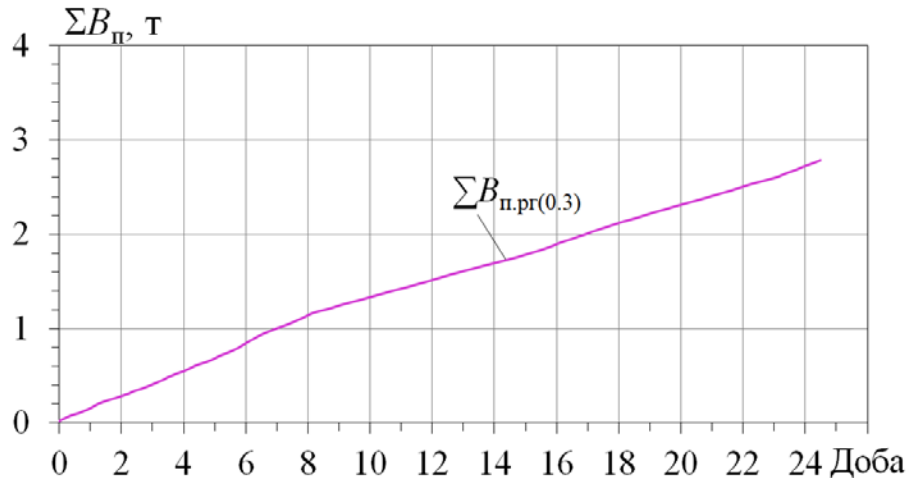


Рис. 9. Загальна за рейс економія палива $\Sigma B_{п,pr(0,3)}$ завдяки охолодженню повітря на вході двигуна в ЕХМ при $\zeta = 0,3$ з використанням теплоти рециркуляційних газів на протязі рейсу судна

На дефіцит холодопродуктивності ЕХМ $\Delta Q_{0,pr(0,3)д}$ при $\zeta = 0,3$ впливають такі чинники: дефіцит наявної теплоти рециркуляційних газів $\Delta Q_{г,pr,д} = Q_{г,pr(0,3)} - Q_{г,pr}$, де $Q_{г,pr(0,3)}$ – теплота, необхідна для охолодження повітря на вході двигуна до $t_{п2} = 15$ °С в ЕХМ при $\zeta = 0,3$ та низький тепловий коефіцієнт ЕХМ $\zeta = 0,3$ трансформації теплоти в холод.

Результати розрахунку системи охолодження повітря на вході двигуна в АБХМ (з $\zeta = 0,7$) з використанням теплоти рециркуляційних (екологічних) газів

$Q_{г.пр} = 985...1075$ кВт (див. рис.5) показують, що отримана холодопродуктивність становить (рис. 10): $Q_{0,пр(0,7)} = 690...750$ кВт ($\zeta = 0,7$). В той же час холодопродуктивність $Q_{0,15}$, необхідна для охолодження повітря до $t_{п2} = 15$ °С практично не перевищує $Q_{г.пр} = 700$ кВт (рис. 10).

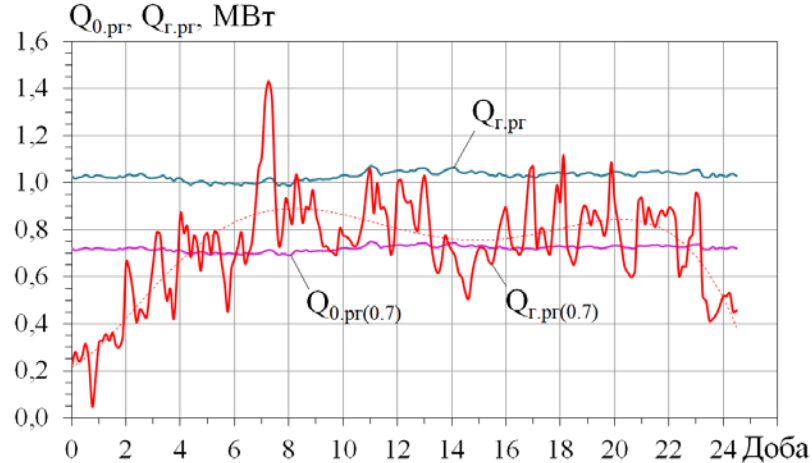


Рис. 10. Поточні значення теплоти рециркуляційних газів $Q_{г.пр}$, холодопродуктивності $Q_{0,пр(0,7)}$, отриманої її трансформацією в АБХМ, та теплоти $Q_{г.пр(0,7)}$, необхідної для охолодження повітря на вході двигуна до $t_{п2} = 15$ °С при тепловому коефіцієнті $\zeta = 0,7$

Розроблена схема системи охолодження повітря на вході двигуна в АБХМ утилізацією теплоти рециркуляційних газів представлена на рис. 11.

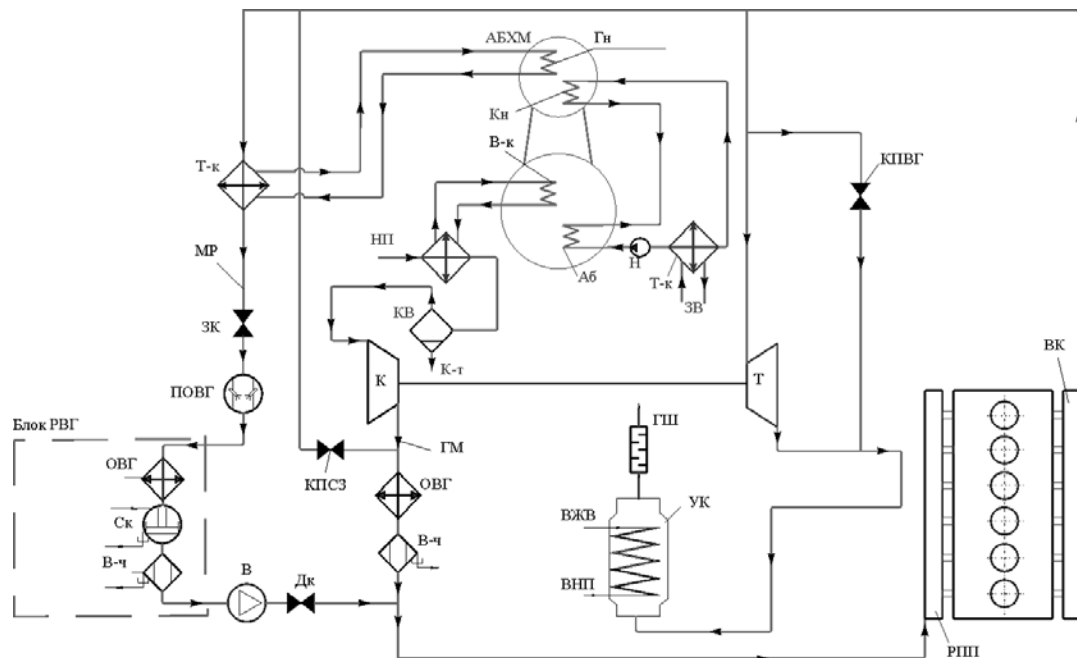


Рис. 11. Схема розробленої системи охолодження повітря на вході суднового двигуна утилізацією теплоти рециркуляційних газів в АБХМ

Утилізація теплоти рециркуляційних газів в АБХМ з високим $\zeta = 0,7$ забезпечує охолодження повітря на величину $\Delta t_{п.пр(0,7)} = 14...28^\circ\text{C}$ проти $\Delta t_{15} = 20...30^\circ\text{C}$ при охолодженні до 15°C (рис.12).

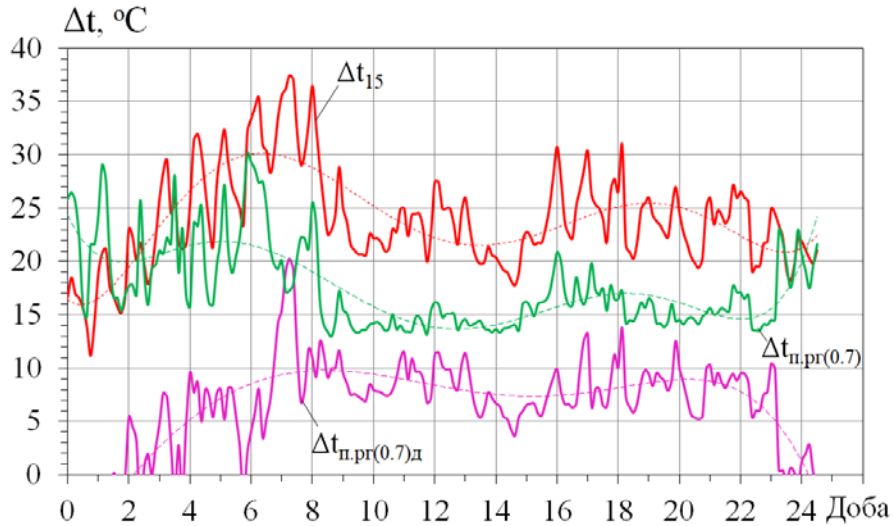


Рис. 12. Поточні значення зниження температури повітря $\Delta t_{15} = 15^\circ\text{C}$ при охолодженні до $t_{п2} = 15^\circ\text{C}$, реального зниження температури повітря в АБХМ $\Delta t_{п.пр(0,7)}$ та його недоохолодження (дефіцит) в АБХМ $\Delta t_{п.пр(0,7)д} = \Delta t_{15} - \Delta t_{п.пр(0,7)}$

Питома витрата палива становить (рис. 13): $\Delta g_{e.пр(0,7)} = 163,0...167,3 \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$ ($\zeta = 0,7$).

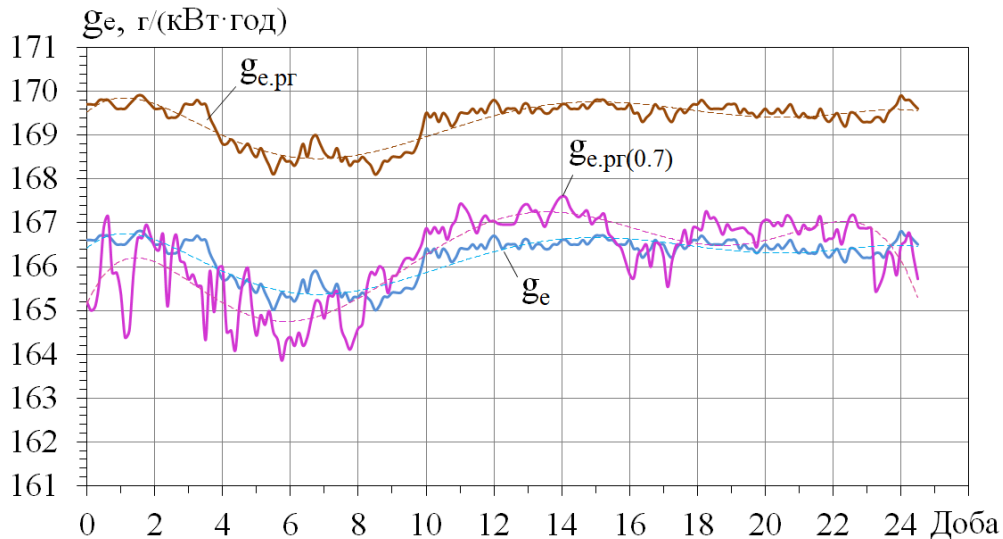


Рис. 13. Поточні значення питомої витрати палива базового двигуна з рециркуляцією газів $g_{e.пр}$ та без неї g_e , питомої витрати палива двигуна $g_{e.пр(0,7)}$ з охолодженням повітря на вході в АБХМ ($\zeta = 0,7$) на протязі рейсу судна

Економія палива за рейс (рис. 14) становить: $\Sigma B_{п,пр(0,7)} = 6,5$ т. ($\zeta = 0,7$).

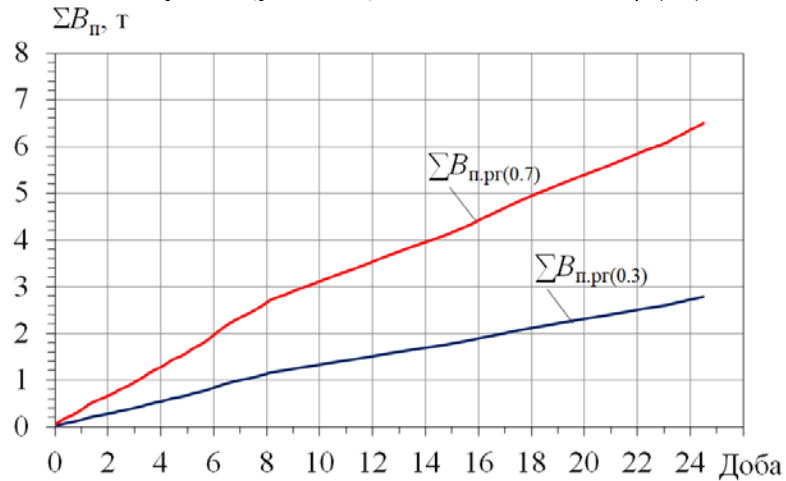


Рис. 14. Загальна за рейс економія палива $\Sigma B_{п,пр(0,3)}$ і $\Sigma B_{п,пр(0,7)}$ завдяки охолодженню повітря на вході двигуна в ЕХМ ($\zeta = 0,3$) та АБХМ (при $\zeta = 0,7$) з використанням теплоти рециркуляційних газів на протязі рейсу судна

У даному розділі проаналізовано способи охолодження повітря на вході в ТК двигуна суднової енергоустановки шляхом утилізації теплоти рециркуляційних (екологічних) газів у ТХМ різного типу (ЕХМ і АБХМ). Запропоновано використовувати теплоту рециркуляційних газів для охолодження повітря на вході ДВЗ. При використанні ЕХМ для охолодження повітря на вході в ТК двигуна суднової енергоустановки, найбільше скорочення питомої витрати палива відповідає тепловому коефіцієнту $\zeta = 0,3$ і дорівнює $\Delta g_{e,пр(0,3)} = 167,4 \dots 169,4$ г/(кВт·год), при цьому загальна питома витрата палива складає $\Sigma B_{п(0,3)} = 2,8$ т. В той саме час, використання АБХМ для охолодження повітря на вході в ТК двигуна суднової енергоустановки, є більш ефективним. Найбільше скорочення питомої витрати палива відповідає тепловому коефіцієнту $\zeta = 0,7$ і дорівнює $\Delta g_{e(0,7)} = 163,0 \dots 167,3$ г/(кВт·год), при цьому загальна питома витрата палива складає $\Sigma B_{п(0,7)} = 6,5$ т.

У п'ятому розділі розглянуто варіанти конструктивних схем і розрахунків при використанні теплоти рециркуляційних (екологічних) та вихлопних газів двигуна суднової енергоустановки для охолодження повітря на вході ТК окремо в ЕХМ і АБХМ, а також розглянуто варіант сумісного використання ЕХМ та АБХМ. Проведено розрахунок зниження кількості шкідливих викидів.

Варіант схеми системи охолодження повітря на вході в ТК суднової енергоустановки за рахунок утилізації теплоти рециркуляційних і вихлопних газів ЕХМ представлено на рис. 15.

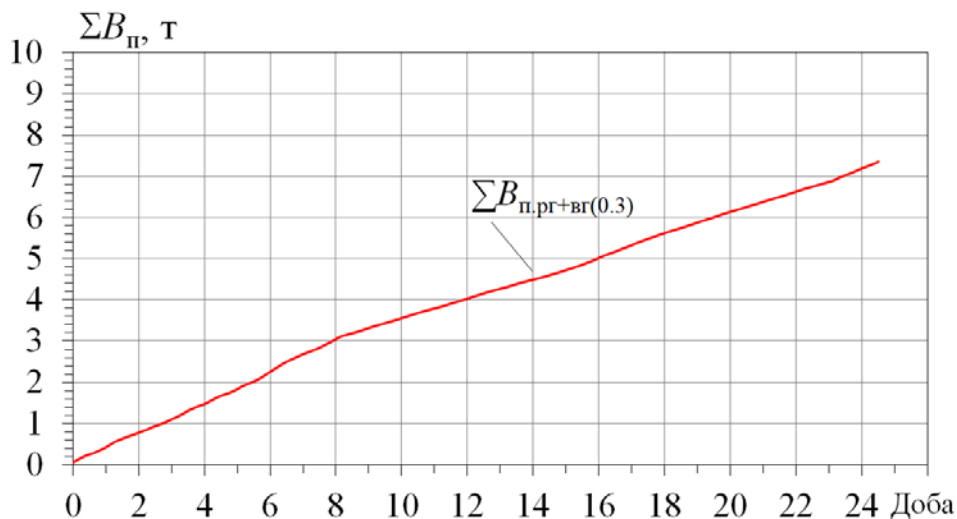


Рис. 17. Загальна за рейс економія палива $\Sigma B_{п,рг+вг(0,3)}$ завдяки охолодженню повітря на вході двигуна в ЕХМ при $\zeta = 0,3$ з використанням теплоти рециркуляційних і випускних газів на протязі рейсу судна

Схема системи охолодження повітря на вході двигуна утилізацією теплоти рециркуляційних і вихлопних газів в АБХМ показана на рис. 18.

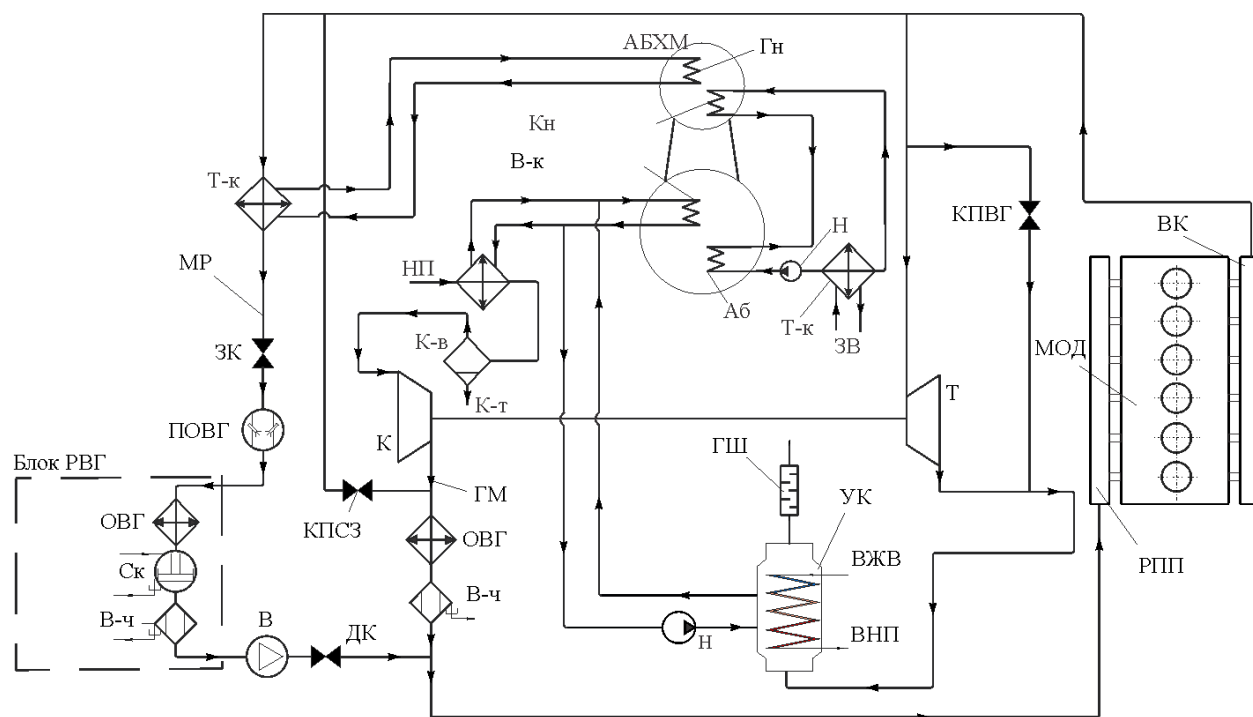


Рис. 18. Схема розробленої системи охолодження повітря на вході суднового двигуна утилізацією теплоти рециркуляційних і випускних газів в ЕХМ

Питома витрата палива при використанні схеми на рис. 18 становить $\Delta g_{e,рг+вг(0,7)} = 163,9 \dots 167,6$ г/(кВт·год) (рис. 19).

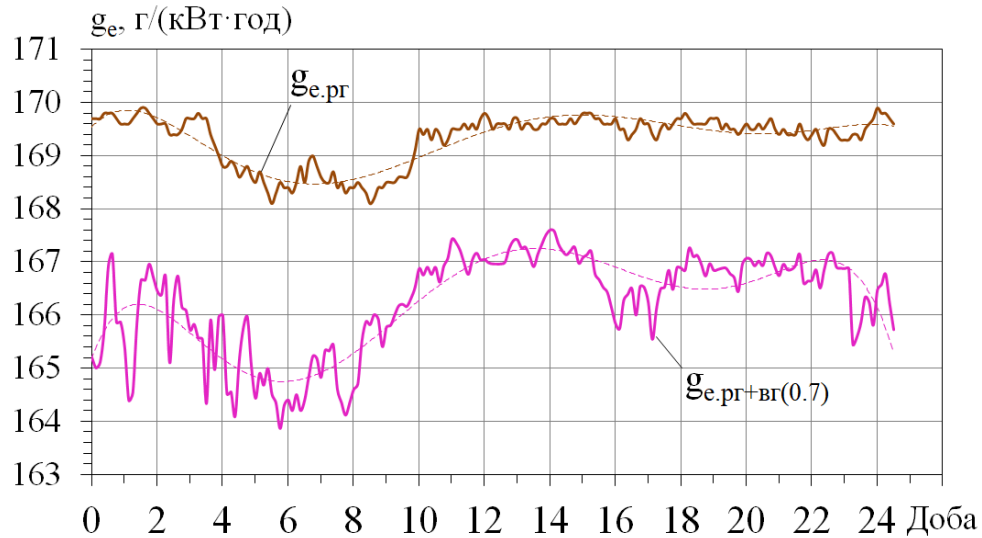


Рис. 19. Поточні значення питомої витрати палива базового двигуна з рециркуляцією газів $g_{e,pg}$, питомої витрати палива двигуна $g_{e,pg+вг(0,7)}$ з охолодженням повітря на вході в АБХМ ($\zeta = 0,7$) на протязі рейсу судна

Економія палива за рейс становить (рис. 20): $\Sigma B_{п,pg+вг(0,7)} = 17,3$ т. ($\zeta = 0,7$).

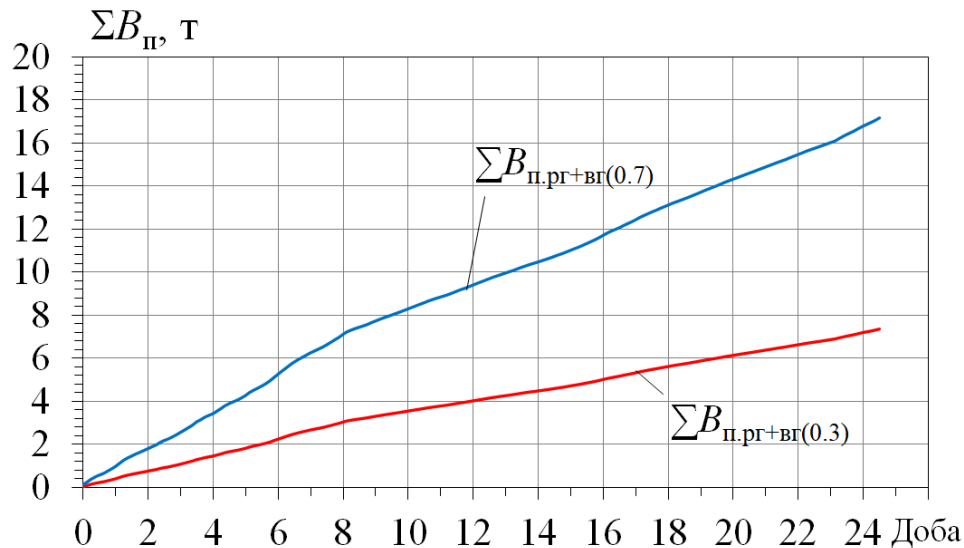


Рис. 20. Загальна за рейс економія палива $\Sigma B_{п,pg+вг(0,3)}$ і $\Sigma B_{п,pg+вг(0,7)}$ завдяки охолодженню повітря на вході двигуна в ЕХМ ($\zeta = 0,3$) та АБХМ ($\zeta = 0,7$) з використанням теплоти рециркуляційних і випускних газів на протязі рейсу судна

Зниження викидів за рахунок зниження температури повітря на вході при використанні теплоти рециркуляційних (екологічних) газів складає (рис. 21): $\Delta g_{NOx} = 10,2 \dots 10,6$ г/(кВт год); $\Delta g_{SOx} = 2,2 \dots 2,4$ г/(кВт год). При цьому коефіцієнт рециркуляції відпрацьованих газів становить $K_f = 30\%$.

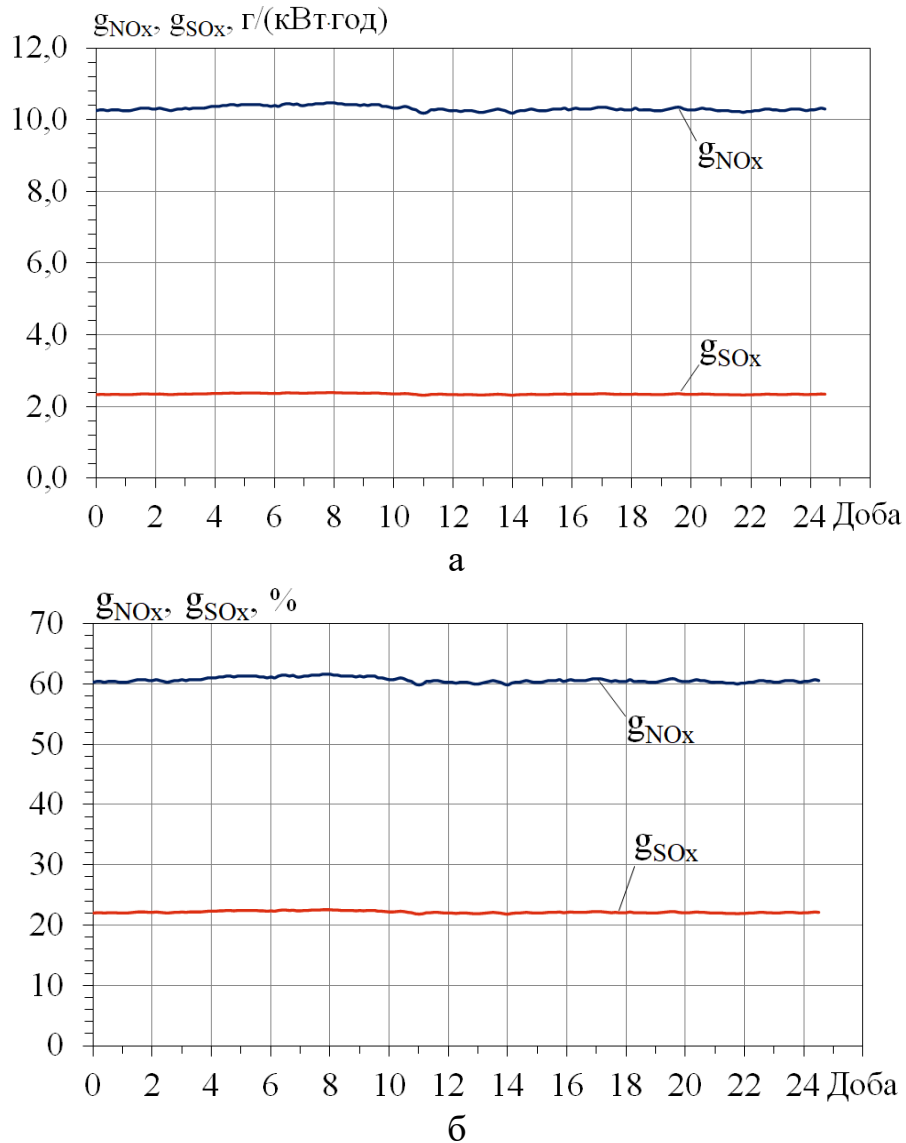


Рис. 21. Абсолютні (а) та у відсотках (б) значення зменшення викидів NO_x і SO_x при охолодженні повітря в ТХМ на протязі рейсу судна

Таким чином, енергетично найбільш ефективна система охолодження повітря на вході в ТК шляхом утилізації теплоти рециркуляційних і вихлопних газів в АБХМ з тепловим коефіцієнтом $\zeta = 0,7$, яка забезпечує зниження питомої витрати палива двигунів типу 6G50ME-C9.6-TIII до $g_{e,pg+vg(0.7)} = 163,0 \dots 167,3$ г/(кВт·год) порівняно з $g_{e,pg} = 168 \dots 170$ г/(кВт·год) для двигуна з рециркуляцією випускних екологічних газів. При цьому економія палива за рейс "Одеса-Шанхай" складає $\Sigma V_{п,pg+vg(0.7)} = 17$ т. Системи охолодження циклового повітря судових малооборотних двигунів типу 6G50ME-C9.6-TIII в ТХМ абсорбційного та ежекторного типу дозволяють знизити кількість викидів на величину: $\Delta g_{NO_x} = 10,2 \dots 10,6$ г/(кВт год); $\Delta g_{SO_x} = 2,2 \dots 2,4$ г/(кВт год).

Слід зазначити, що розроблені схемні рішення систем реалізують переваги ТХМ різного типу: проста конструкція і можливість поелементного розміщення ЕХМ в машинному відділенні (теплообмінників на бортах та платформі) при невисоких теплових коефіцієнтах близько 0,3, і в той же час висока ефективність трансформації теплоти (теплові коефіцієнти понад 0,7) в моноблочних АБХМ, які потребують окремих приміщень.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну задачу розробки систем охолодження повітря на вході турбокомпресора двигуна суднової енергоустановки холодильними машинами, що утилізують теплоту випускних і рециркуляційних (екологічних) газів за змінних кліматичних умов і показників екологоенергетичної ефективності суднової енергоустановки протягом рейсу.

1. Виявлено особливості процесів охолодження повітря двигунів суднових енергоустановок шляхом утилізації теплоти випускних і рециркуляційних (екологічних) газів, які полягають у зменшенні наявного потенціалу скидної теплоти для трансформації в холод зі збільшенням частки рециркуляційних газів, що вимагає сумісного застосування ТХМ різного типу (з різними тепловими коефіцієнтами).

2. Розроблено математичну модель для розрахунку холодопродуктивності АБХМ і ЕХМ, що утилізують теплоту випускних і рециркуляційних газів, теплових навантажень системи охолодження повітря двигунів з урахуванням змінних протягом рейсової лінії параметрів заборотної води і зовнішнього повітря та показників екологічної та паливної ефективності двигунів, яка дає можливість визначати поточні витрати холоду та наявну холодопродуктивність ТХМ і виходячи з їх співставлення розробляти способи раціональної організації процесів тепловикористання різними ТХМ.

3. Розроблено способи раціональної організації процесів охолодження повітря на вході двигунів за різної ефективності трансформації скидної теплоти в холод та схемні рішення систем з використанням переваг ТХМ різного типу: проста конструкція і можливість поелементного розміщення ЕХМ в машинному відділенні (теплообмінників на бортах та платформі) при невисоких теплових коефіцієнтах близько 0,3, висока ефективність трансформації теплоти (теплові коефіцієнти 0,7-0,8) в моноблочних АБХМ, які потребують окремих приміщень.

4. Показано, що енергетично найбільш ефективною є система охолодження повітря на вході двигунів за рахунок утилізації теплоти рециркуляційних і вихлопних газів в АБХМ, яка має тепловий коефіцієнт $\zeta = 0,7$. Система дозволяє знизити питому витрату палива двигуна типу 6G50ME-C9.6-ТШ до $g_{e,pr+br(0.7)} = 163,0 \dots 167,3$ г/(кВт·год) порівняно з $g_{e,pr} =$

168...170 г/(кВт·год) для двигуна з рециркуляцією випускних екологічних газів. Економія палива за рейс "Одеса-Шанхай" складає $\Sigma B_{п,рг+вг(0.7)} = 17$ т.

5. Розроблені схемні рішення систем охолодження повітря суднових двигунів в ТХМ абсорбційного та ежекторного типів дозволяють реалізувати способи раціональної організації процесів охолодження та утилізації теплоти за змінних протягом рейсу параметрів повітря та заборотної води. Це забезпечує зменшення викидів на величину: $\Delta g_{NO_x} = 10,2...10,6$ г/(кВт год); $\Delta g_{SO_x} = 2,2...2,4$ г/(кВт год).

6. Обґрунтовано напрям підвищення ефективності екологізації суднових енергоустановок шляхом охолодження повітря на вході двигунів утилізацією скидної теплоти випускних і рециркуляційних (екологічних) газів, що забезпечує компенсацію витрат палива, зумовлених рециркуляцією та очищенням екологічних газів зі скиданням їх теплоти заборотною водою, та додаткове скорочення споживання палива на 2-3% і, відповідно, викидів NO_x і SO_x . Реалізація напряму з використанням розроблених науково-технічних рішень особливо актуальна для експлуатації суден у прибережних акваторіях України за умов жорстких обмежень по шкідливим викидам.

7. Застосування систем охолодження повітря двигунів в ТХМ абсорбційного та ежекторного типів дозволяють скоротити витрату палива, що підтверджено відповідними актами впровадження, а результати роботи використані в практиці проектування систем охолодження та утилізації на наступних виробничих підприємствах: ТОВ «ХІТ ЕНЕРДЖІ ГРУП» (м. Херсон), ТОВ «МЕГАІМПЕКС» (м. Херсон).

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ АВТОРА З ТЕМИ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Андреев А. А., **Пирисулько М. А.** Рециркуляция відпрацьованих газів як засіб поліпшення екологічних показників суднових ДВЗ. *Водний транспорт.* – 2015. – №. 1. – С. 33-38. *Особистий внесок: розглянуті перспективи використання системи рециркуляції відпрацьованих газів ДВЗ. Наукове фахове видання України.*

2. Андреев А. А., **Пирисулько М. А.**, Свиридов В. И. Применение рециркуляции отработавших газов для улучшения тепловых и экологических параметров двигателей внутреннего сгорания. *Проблеми інформаційних технологій.* – 2015. – №. 1. – С. 126-131. *Особистий внесок: аналіз можливих схем реалізації методу рециркуляції відпрацьованих газів двигунів внутрішнього згорання з метою поліпшення їх екологічних показників. Наукове фахове видання України.*

3. Радченко Р. М., **Пирисунько М. А.** Зменшення викидів оксидів азоту з відпрацьованими газами суднових дизелів. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. - 2018. - № 5. - С. 36–41. *Особистий внесок: оцінка зменшення викидів оксидів азоту за різних схемних рішень системи рециркуляції відпрацьованих газів суднових дизелів. Наукове фахове видання України.*
4. Радченко Р. М., **Пирисунько М. А.** Метод рециркуляції відпрацьованих газів суднових дизелів для зменшення їх токсичності. *Холодильна техніка та технологія*. – 2018. – №. 54, №. 4. – С. 11-16. *Особистий внесок: проаналізовано зниження шкідливих викидів судовими дизелями за рахунок методу рециркуляції відпрацьованих газів. Наукове фахове видання України.*
5. **Пирисунько М. А.** Аналіз способів зменшення шкідливих викидів суднових двигунів рециркуляцією відпрацьованих газів. *Холодильна техніка та технологія*. – 2018. – Т. 54. – №. 6. – С. 39-44. *Особистий внесок: проаналізовано можливість зменшення кількості шкідливих викидів судовими ДВЗ за рахунок системи рециркуляції відпрацьованих газів. Наукове фахове видання України.*
6. **Пирисунько М. А.,** Радченко Р. М., Андреев А. А., Корнієнко, В.С. Зменшення викидів судового дизеля утилізацією теплоти рециркуляційних газів ежекторною холодильною машиною. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. - 2019. - № 4. - С. 20–24. *Особистий внесок: оцінка ефективності попереднього охолодження повітря судового головного двигуна ежекторною холодильною машиною. Наукове фахове видання України.*
7. Radchenko, R., Konovalov, D., **Pyrysunko, M.,** Radchenko, M. Using the heat of recirculation gases of the ship main engine by an ejector refrigeration machine for intake air cooling. *Refrigeration Engineering and Technology*. – 2019. – Т. 55. – №. 1. – Р. 4-9. *Особистий внесок: формулювання висновків, узагальнення результатів. Наукове фахове видання України.*
8. Radchenko, R., **Pyrysunko, M.,** Bogdanov, M., & Shcherbak, Y. A new approach to increasing the efficiency of the ship main engine air waste heat recovery cooling system. *Refrigeration Engineering and Technology*. – 2019. – Т. 55. – №. 1. – Р. 22-27. *Особистий внесок: аналіз літературних джерел, узагальнення результатів. Наукове фахове видання України.*
9. Radchenko, R., **Pyrysunko, M.,** Radchenko, A., Andreev, A., Kornienko, V. Ship engine intake air cooling by ejector chiller using recirculation gas heat. In: *Tonkonogyi V. et al. (eds.) Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner-2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – Springer, Cham, 2020. – Р. 734-743. *Особистий внесок: аналіз використання рециркуляції відпрацьованих газів в енергетичній установці, формулювання висновків. Наукометрична база Scopus.*

10. Радченко, Р. М., **Пирисунько, М. А.**, Чен, Н., Хан, Б. Охолодження повітря на вході малообертового двигуна ежекторною холодильною машиною при експлуатації судна в тропічних умовах. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2020. – №. 1. – С. 17-21. *Особистий внесок: проаналізовано ефективність охолодження повітря на вході головного двигуна транспортного судна при експлуатації в тропічних кліматичних умовах. Наукове фахове видання України.*

11. Радченко, Р. М., Дмитро, В. К., **Пирисунько, М. А.**, Цян, Ч., Зевей, Л. Охолодження повітря на вході головного суднового двигуна абсорбційною бромистолітєвою холодильною машиною в тропічних умовах. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2020. – №. 2. – С. 18-23. *Особистий внесок: проаналізовано ефективність охолодження повітря на вході суднового МОД в ЕХМ з використанням теплоти випускних газів при експлуатації на рейсовій лінії в тропічних умовах. Наукове фахове видання України.*

12. Radchenko, R., Kornienko, V., **Pyrysunko, M.**, Bogdanov, M., Andreev, A. Enhancing the efficiency of marine diesel engine by deep waste heat recovery on the base of its simulation along the route line. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering*. – Springer, Cham, 2020. – P. 337-350. *Розробка методики розрахунку та аналіз кліматичних параметрів впродовж рейсової лінії. Наукометрична база Scopus.*

13. Radchenko, R., **Pyrysunko, M.**, Kornienko, V., Konovalov, D., Girzheva, O. Enhancing Energy Efficiency of Ship Diesel Engine with Gas Ecological Recirculation. In: Ivanov V., Pavlenko I., Liaposhchenko O., Machado J., Edl M. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – Springer, Cham, 2021. – P. 391-400. *Особистий внесок: аналіз літературних джерел, узагальнення результатів. Наукометрична база Scopus.*

14. Radchenko, R., **Pyrysunko, M.**, Kornienko, V., Scurtu, I. C., Patyk, R. Improving the ecological and energy efficiency of internal combustion engines by ejector chiller using recirculation gas heat. *Conference on Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering–Synergetic Engineering*. – Springer, Cham, 2020. – P. 531-541. *Особистий внесок: розробка методики розрахунків енергетичних показників двигуна, формулювання висновків. Наукометрична база Scopus.*

15. Radchenko, M., Radchenko, R., Kornienko, V., **Pyrysunko, M.** Semi-empirical correlations of pollution processes on the condensation surfaces of exhaust gas boilers with water-fuel emulsion combustion / // In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – Springer, Cham, 2019. – Pp. 853-862. *Особистий*

внесок: аналіз існуючих схем розрахунку теплоутилізаційних контурів з допалюванням палива. *Наукометрична база Scopus, WebofScience.*

16. Kornienko, V., Radchenko, R., Stachel, A., Andreev, A., **Pyrysunko, M.** Correlations for pollution on condensing surfaces of exhaust gas boilers with water-fuel emulsion combustion. In: Tonkonogyi V. et al. (eds.) Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes. InterPartner-2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Springer, Cham, 2019. – Pp. 530-539. *Особистий внесок: Аналіз використання водопаливних емульсій в енергетиці. Наукометрична база Scopus, WebofScience.*

17. Kornienko, V., Radchenko, R., Konovalov, D., Andreev, A., **Pyrysunko, M.** Characteristics of the Rotary Cup Atomizer Used as Afterburning Installation in Exhaust Gas Boiler Flue. In: Ivanov V., et al. (eds.) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III (DSMIE 2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering.* – Springer, Cham, 2020. – Pp. 302-311. *Особистий внесок: літературний аналіз низькотемпературної сірчаноокислої корозії. Наукометрична база Scopus, WebofScience.*

18. Kornienko, V., Radchenko, R., Mikielwicz, D., **Pyrysunko, M.**, Andreev, A. Improvement of characteristics of water-fuel rotary cup atomizer in a boiler. In: Tonkonogyi V. et al. (eds.) *Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner-2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering.* – Springer, Cham, 2020. – Pp. 664-674. *Особистий внесок: участь у проведенні експерименту. Наукометрична база Scopus.*

19. Kornienko, V., Radchenko, M., Radchenko, R., Konovalov, D., Andreev, A., **Pyrysunko, M.** Improving the efficiency of heat recovery circuits of cogeneration plants with combustion of water-fuel emulsions. *Thermal Science.* – 2021. – Т. 25. – №. 1 Part B. – Pp. 791-800. *Особистий внесок: розроблення методології досліджень, узагальнення результатів. Особистий внесок: аналіз можливостей застосування конденсаційних поверхонь нагріву в системах очищення відпрацьованих газів. Наукометрична база Scopus.*

20. Konovalov, D., Kobalava, H., Radchenko, R., Andreev, A., **Pyrysunko, M.**, Dzhurynska, A.: Research of the aerothermopressor cooling system of cyclic air of marine internal combustion engine under variable climatic conditions of operation. In: M. Kruzel, W. Kuczyski (eds.) *Contemporary Issues of Heat and Mass Transfer. Monography of the Faculty of Mechanical Engineering University of Technology Koszalin.* Koszalin, 2019. P. 327-344. (Розділ в колективній зарубіжній монографії). *Особистий внесок: аналіз розрахунку, формулювання висновків.*

Основні публікації, що засвідчують апробацію наукових результатів дослідження:

21. Пирисунько М.А., Шалапко Д.О., Труба С.М., Фесенко І.М. Аналіз заходів та технологій зниження токсичності дизельної електростанції. *Моделювання та інформаційні технології в науці, техніці та освіті: Збірник наукових праць Міжнародної науково-практичної Internet-конференції.* – Харків: ХНАДУ - 2018. - С. 178-181. *Особистий внесок: Аналіз існуючих заходів зниження токсичності дизельної енергетичної установки.*

22. Пирисунько М.А., Радченко М.І. Охолодження повітря суднового двигуна ежекторною холодильною машиною за рахунок теплоти рециркуляційних газів. *Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів та студентів «стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології».* - Одеса: ОНАХТ. - 2019. - С. 100–102. *Особистий внесок: Оцінка охолодження повітря суднового двигуна ежекторною холодильною машиною за рахунок теплоти рециркуляційних газів.*

23. Пирисунько М.А., Радченко Р.М. Підвищення екологічності та економічності суднової енергоустановки шляхом охолодження повітря тепловикористовуючими холодильними машинами. *XII Міжнародна науково-технічна конференція «сучасні проблеми холодильної техніки та технології».* - Одеса: ОНАХТ. - 2019. *Особистий внесок: Аналіз підвищення екологічності та економічності суднової енергоустановки шляхом охолодження повітря тепловикористовуючими холодильними машинами.*

24. Пирисунько М.А. Охолодження циклового повітря суднового двигуна ежекторною холодильною машиною з рециркуляцією газів для підвищення екологоенергоефективності. *XII Міжнародна науково-технічна конференція «сучасні проблеми холодильної техніки та технології».* - Одеса: ОНАХТ. - 2019. *Аналіз охолодження циклового повітря суднового двигуна ежекторною холодильною машиною з рециркуляцією газів для підвищення екологоенергоефективності.*

25. Пирисунько М.А., Радченко Р.М. Утилізація теплоти рециркуляційних газів суднового двигуна ежекторною холодильною машиною з охолодженням повітря на вході. *XII Всеукраїнська науково-технічна конференція «сучасні проблеми холодильної техніки та технології».* - Одеса: ОНАХТ. - 2019. С. 10-13. *Особистий внесок: Оцінка можливості утилізації теплоти рециркуляційних газів суднового ДВЗ ежекторною холодильною машиною з охолодженням повітря на вході, тези, усна доповідь.*

26. Пирисунько М.А., Андреев А.А. Зниження токсичності відпрацьованих газів суднових дизелів. *XII Всеукраїнська науково-технічна конференція «сучасні проблеми холодильної техніки та технології».* - Одеса:

ОНАХТ. - 2019. С. 14-16. *Особистий внесок: Аналіз існуючих методів зниження токсичності відпрацьованих газів суднових ДВЗ, усна доповідь.*

27. Пирисунько М.А., Радченко Р.М. Охолодження повітря суднового двигуна ежекторною холодильною машиною за рахунок теплоти рециркуляційних газів. *Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів та студентів «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології».* - Одеса: ОНАХТ. - 2019. С. 100-103. *Особистий внесок: Аналіз охолодження повітря суднового двигуна за рахунок теплоти рециркуляційних газів ежекторною холодильною машиною.*

28. Шалапко Д.О., Пирисунько М.А., Топчий Р.В., Фаллер Є.В. Альтернативний спосіб утилізації теплоти отходящих газів транспортних ДВС. *Міжнародна науково-технічна конференція (заочна) «Транспорт: Механічна інженерія, експлуатація, матеріалознавство».* - Херсон: ХДМА. - 2017. С. 102-103. *Особистий внесок: Аналіз альтернативних способів утилізації теплоти відпрацьованих газів суднових ДВЗ.*

29. Пирисунько М.А., Шевчук І.Ю., Проценко В.В., Філіпов С.В. Аналіз зменшення токсичних викидів у відпрацьованих газах суднових дизелів. *IX Міжнародна науково-технічна конференція «Суднова енергетика: стан та проблеми».* - Миколаїв: НУК. - 2019. *Особистий внесок: Оцінка сучасних способів зменшення кількості оксидів сірки та оксидів азоту в відпрацьованих газах суднових ДВЗ.*

Журнали, в яких опубліковані статті, включені до міжнародної наукометричної бази даних Google Scholar. Журнали, в яких опубліковані статті [9, 10, 12,], включені до міжнародної наукометричної бази даних WebofScience. Журнали, в яких опубліковані статті [9, 10, 11, 12, 13, 16, 17, 18], включені до міжнародної наукометричної бази даних Scopus.

АНОТАЦІЯ

Пирисунько М. А. Підвищення екологоенергетичної ефективності суднової енергоустановки охолодженням циклового повітря холодильними машинами. - 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, 2021.

Дисертація присвячена розробці системи охолодження повітря на вході турбокомпресора двигуна суднової енергоустановки холодильними машинами, що утилізують теплоту випускних газів, включно з рециркуляційними (екологічними) газами, з урахуванням зміни кліматичних умов і показників

екологоенергетичної ефективності суднової енергоустановки протягом рейсу. Розроблена математична модель для розрахунку характеристик (холодопродуктивності, скидної теплоти рециркуляційних – екологічних газів) і параметрів процесів охолодження циклового повітря двигунів суднових енергоустановок в АБХМ і ЕХМ, що утилізують теплоту випускних і рециркуляційних (екологічних) газів, з урахуванням змінних протягом рейсу параметрів зовнішнього повітря і забортної води та показників паливної та екологічної ефективності суднової енергоустановки. Розроблено способи раціональної організації процесів охолодження циклового повітря суднових енергоустановок шляхом утилізації теплоти випускних (екологічних) газів в ТХМ різного типу (АБХМ і ЕХМ) та системи охолодження, що їх реалізують.

Ключові слова: тепловикористовуюча холодильна машина, рециркуляція відпрацьованих газів, відпрацьовані гази, судновий двигун, шкідливі викиди, екологія, витрата палива.

ABSTRACT

Pyrysunko M. A. Improving Environmental and Energy efficiency of the ship plant by cooling cycle air with refrigeration machines. - 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, 2021.

The dissertation is devoted to the development of air cooling system at the inlet of the turbocharger of the ship 's engine and inflatable air by refrigeration machines that utilize the heat of exhaust gases, including recirculation (environmental) gases taking into account changes in climatic conditions and energy efficiency. The mathematical model has been developed to calculate the characteristics (refrigeration capacity, waste heat of recirculation - environmental gases) and parameters of cyclic air cooling processes of engines of ship power plants in absorption and ejector chiller, utilizing the heat of exhaust gases, including recirculating (environmental), taking into account the variable during the voyage parameters of outdoor air and seawater and indicators of fuel and environmental efficiency of the ship's power plant. The methods of rational organization of cyclic air cooling processes of ship power plants by utilization of heat of exhaust (ecological) gases in by waste heat using chillers of different type (ACh and ECh) and cooling systems that implement these methods.

Key words: waste heat recovery chiller, exhaust gas recirculation, exhaust gas, ship engine, harmful emission, ecology, fuel consumption.