

УДК 629.5.03:621.436-71:621.527:551.581.24

doi: 10.32620/aktt.2020.2.04

М. І. РАДЧЕНКО¹, Д. В. КОНОВАЛОВ², ЧЖАН ЦЯН³, ЛЮ ШАОЦЗЮНЬ³,
ЛЮО ЗЕВЕЙ^{1,3}, ДЖІ РАН^{1,3}

¹ Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна

² Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Херсонська філія, Україна

³ Цзяньсунський університет науки і технологій, КНР

ОХОЛОДЖЕННЯ НАДДУВНОГО ПОВІТРЯ ГОЛОВНОГО СУДНОВОГО ДВИГУНА ЕЖЕКТОРНОЮ ХОЛОДИЛЬНОЮ МАШИНОЮ В ЕКВАТОРІАЛЬНИХ ШИРОТАХ

Проаналізовано ефективність охолодження наддувного повітря головного малообертового двигуна транспортного судна при експлуатації в екваторіальних тропічних широтах. Особливістю тропічного клімату є висока відносна вологість повітря при водночас високих його температурах та температурах забортної води. Досліджено охолодження наддувного повітря хладоною ежекторною холодильною машиною шляхом трансформації в холод теплоти наддувного повітря. При цьому потенційно можливу мінімальну температуру охолодженого повітря визначали з урахуванням температури кипіння хладону і температурних напорів в теплообмінниках проміжного водяного контуру охолодження. Хладонову ежекторну холодильну машину застосовано як конструктивно найбільш просту і надійну в експлуатації. Проте ефективність трансформації теплоти в холод ежекторними холодильними машинами невисока: їхні теплові коефіцієнти становлять приблизно 0,3. Запропоновано та проаналізовано схемно-конструктивне рішення триступеневої системи охолодження наддувного повітря суднового головного двигуна – у високотемпературному (когенераційному) ступені з використанням відведеної теплоти наддувного повітря для отримання холоду ежекторною холодильною машиною, традиційному ступені охолодження наддувного повітря забортною водою та низькотемпературному ступені охолодження хладоною ежекторною холодильною машиною. Ефект від більш глибокого охолодження наддувного повітря визначали порівняно з охолодженням наддувного повітря забортною водою з урахуванням змінних кліматичних умов упродовж рейсу судна. Показано, що через недостатньо високу ефективність трансформації скидної теплоти наддувного повітря ежекторною холодильною машиною (невисокі теплові коефіцієнти) отриманої холодопродуктивності недостатньо для охолодження наддувного повітря до потенційно можливої мінімальної температури 22°C при експлуатації суднового двигуна в тропічних кліматичних умовах. Проте дефіцит теплоти відносно незначний і може бути компенсований за рахунок використання додатково теплоти випускних газів.

Ключові слова: Охолодження наддувного повітря; Теплота наддувного повітря; Ежекторна холодильна машина.

1. Аналіз проблеми і постановка мети дослідження

Як головні двигуни на морських судах застосовуються здебільшого малообертові двигуни (МОД). Умови експлуатації суднових МОД відзначаються значною зміною температур зовнішнього повітря $t_{\text{зп}}$, відповідно і повітря на вході в турбокомпресор (ТК), та забортної води t_w , охолоджуючої наддувне повітря. За даними фірм-розробників МОД "MAN" і "Wartsila" підвищення температури наддувного повітря МОД на 10 °C спричиняє зростання питомої витрати палива b_e на 1,1...1,2 г/(кВт·год) [1, 2]. Тому при високих темпе-

ратурах $t_{\text{зп}}$ і t_w , коли система охолодження наддувного повітря забортною водою не здатна компенсувати негативний вплив високих температур повітря на вході МОД бажано додаткове охолодження наддувного повітря МОД після його охолодження забортною водою. Для цього доцільно застосовувати тепловикористовуючі холодильні машини (ТХМ), що утилізують скидну теплоту двигунів. Найбільш простою і надійною в експлуатації є ежекторна холодильна машина (ЕХМ) [3, 4]. Проте ефективність трансформації теплоти в холод в ЕХМ невисока, і їх теплові коефіцієнти $\zeta = Q_0 / Q_h \approx 0,3$, де Q_0 – отримана холодопродуктивність; Q_h – витрати теплоти.

Мета дослідження – аналіз ефективності охолодження наддувного повітря суднового МОД в

ЕХМ з використанням його теплоти при експлуатації в тропічних екваторіальних широтах.

2. Результати дослідження

Аналіз ефективності охолодження наддувного повітря МОД проведено для рейсової лінії "Шанхай (КНР)-Карачі (Пакистан)-Шанхай", 1.07.2019-28.07.2019 (рис. 1).

Схема системи охолодження наддувного повітря суднового МОД в ЕХМ з використанням теплоти наддувного повітря показана на рис. 2.

Кількість наявної теплоти наддувного повітря залежить від глибини її утилізації, яка визначається температурою повітря t_{BT2} на виході з високотемпературного-тепловикористовуючого ступеня охолодження ОНП_{ВТ}: $Q_{h,нп} = G_{п} c_{п} (t_{BT1} - t_{BT2})$, де t_{BT1} – температура повітря після ТК на вході в ОНП_{ВТ}, $G_{п}$ – витрата повітря. Розрахунки показали, що в діапазоні температур $t_{BT2} = 110...140$ °С габарити триступеневого ОНП, включно з додатковим низькотемпературним ступенем ОНП_{НТ} охолодження повітря в ЕХМ, доволі близькі до їхніх величин для двоступеневого ОНП з відведенням теплоти наддувного повітря в ОНП_{ВТ} на нагрів питної води УК.

Мінімальна температура охолодженого повітря на виході з ОНП_{НТ} (при температурі кипіння хладоноу у випарнику-охолоджувачі води (В-ОВ) $t_0 = 5$ °С) визначається з урахуванням t_0 і температурних напорів в теплообмінниках (В-ОВ) $\Delta t_{В-ОВ} = 5$ °С і ОНП_{НТ} $\Delta t_{ОНПНТ} = 12$ °С як $t_{нп22} = t_0 + \Delta t_{В-ОВ} + \Delta t_{ОНПНТ} = 22$ °С. По величині зниження температури $\Delta t_{нп}$ повітря, охолодженого в ОНП_{НТ} за допомогою ЕХМ ($\zeta = 0,3$ при $t_0 = 5$ °С) до температури $t_{нп2(0,3)}$ порівняно з температурою повітря $t_{нп.зв}$, охолодженого в ОНП_{ЗВ} заборотною водою: $\Delta t_{нп} = t_{нп.зв} - t_{нп2(0,3)}$, можна судити про ефективність охолодження наддувного повітря в ЕХМ порівняно з його традиційним охолодженням заборотною водою в ПО (ОНП_{ЗВ}) до

$t_{нп.зв}$. ((Відповідно, по величині максимального зниження температури $\Delta t_{нп22}$ повітря до мінімальної температури $t_{нп22}$ порівняно з температурою повітря $t_{нп.зв}$, охолодженого в ОНП_{ЗВ} заборотною водою: $\Delta t_{нп22} = t_{нп.зв} - t_{нп22}$, можна судити про ефективність потенційно можливого охолодження наддувного повітря до мінімальної температури $t_{нп22} = 22$ °С порівняно з його традиційним охолодженням заборотною водою в ОНП_{ЗВ} до $t_{нп.зв}$).

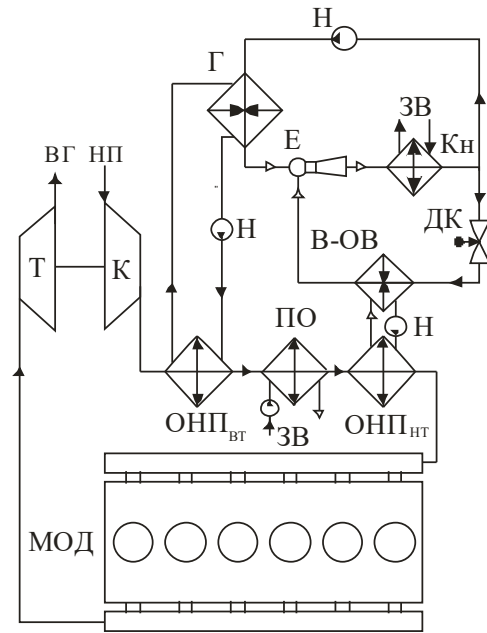


Рис. 2. Схема системи охолодження наддувного повітря МОД в ЕХМ: Т – турбіна; К – компресор; ОНП_{ВТ} і ОНП_{НТ} та ОНП_{ЗВ} – охолоджувачі наддувного повітря високо-і низькотемпературні та проміжний заборотною водою; ЕХМ: Г – генератор хладонової пари високого тиску; Кн – конденсатор; Е – ежектор; ДК – дросельний клапан; В-ОВ – випарник-охолоджувач води проміжного контуру; Н – насос; ВГ – випускні газ; ЗВ – забортна вода; НП – повітря на вході ТК

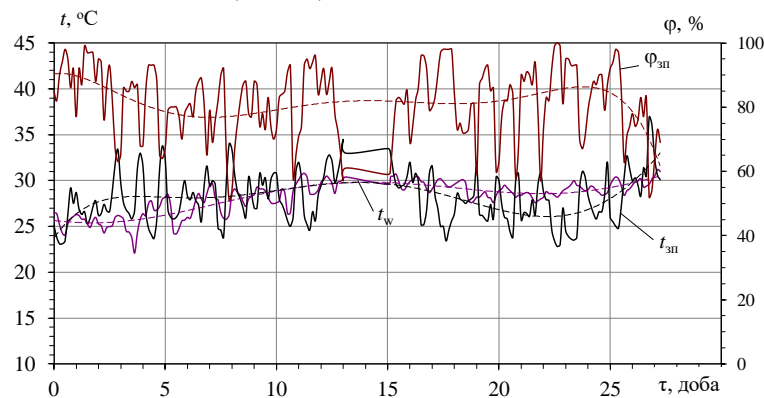


Рис. 1. Зміна температури $t_{зп}$ і відносної вологості $\phi_{зп}$ зовнішнього повітря та заборотної води t_w упродовж рейсу судна "Шанхай-Карачі-Шанхай" (1.07.2019-28.07.2019)

Значення холодопродуктивності $Q_{0, \text{нп}22}$, необхідної для охолодження наддувного повітря до температури $t_{\text{нп}22} = 22^\circ\text{C}$ на величину $\Delta t_{\text{нп}22}$, та наявної холодопродуктивності $Q_{0, \text{нп}(0,3)}$, виходячи з теплоти наддувного повітря та її трансформації в холод в ЕХМ ($\zeta = 0,3$ при $t_0 = 5^\circ\text{C}$) при температурі наддувного повітря на виході з ОНПВТ $t_{\text{ВТ}2} = 110^\circ\text{C}$ упродовж рейсу "Шанхай (КНР)-Карачі (Пакистан)-Шанхай" (1.07.2019-28.07.2019) наведені на рис. 3.

Про поточні витрати теплоти $Q_{\text{h, нп}22(0,3)}$, необхідної для охолодження наддувного повітря МОД до 22°C в ЕХМ ($\zeta = 0,3$) відповідно до зміни температури забортної води $t_{\text{зв}}$ (див. рис. 1), та наявної теплоти наддувного повітря $Q_{\text{h, нп}}$ (при $t_{\text{ВТ}2} = 110^\circ\text{C}$) упродовж рейсу "Шанхай- Карачі-Шанхай" (1.07.2019-28.07.2019) можна судити по рис. 4.

Про поліпшення паливної економічності суднового МОД за рахунок зниження температури наддувного повітря на величину $\Delta t_{\text{нп}(0,3)} = t_{\text{нп.зв}} - t_{\text{нп}(0,3)}$ в ЕХМ, що використовує теплоту наддувного повітря

$Q_{\text{h, нп}}$, можна судити за поточними значеннями зменшення питомої $\Delta b_{\text{нп}(0,3)}$ і годинної $V_{\text{нп}(0,3)}$ витрат палива та скорочення загальної витрати палива за накопиченням $\sum V_{\text{нп}(0,3)}$ для МОД MAN B&W 6G60ME-C9.2 потужністю 12800 кВт, питомою витратою палива 176 г/(кВт год) , упродовж рейсу "Шанхай-Карачі-Шанхай" (1.07.2019-28.07.2019) на рис. 5. (Відповідні показники паливної економічності МОД при максимально можливому зниженні температури наддувного повітря до мінімальної його температури $t_{\text{нп}22} = 22^\circ\text{C}$ на величину $\Delta t_{\text{нп}22} = t_{\text{нп.зв}} - t_{\text{нп}22} = t_{\text{нп.зв}} - 22^\circ\text{C}$ будуть: $\Delta b_{\text{нп}22}$, $V_{\text{нп}22}$ і $\sum V_{\text{нп.22}}$ (рис. 5, б)).

Як видно, за рахунок зниження температури наддувного повітря МОД на величину $\Delta t_{\text{нп}(0,3)} = 23 \dots 55^\circ\text{C}$ в ЕХМ, що використовує його теплоту, зменшуються витрати палива питомі на $\Delta b_{\text{нп}(0,3)} = 2,7 \dots 2,8 \text{ г/(кВт·год)}$ та загальні на $V_{\text{нп}(0,3)} = 33 \dots 37 \text{ кг/год}$ для MAN B&W 6G60ME-C9.2 упродовж рейсу (див. рис. 5).

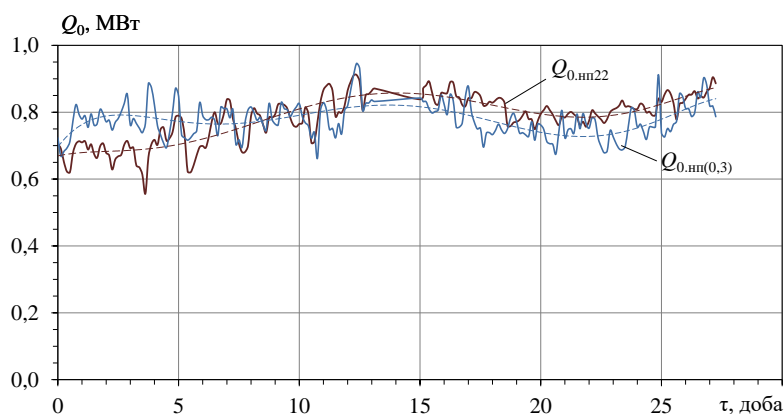


Рис. 3. Витрати холодопродуктивності $Q_{0, \text{нп}22}$, необхідної для охолодження наддувного повітря МОД від поточної наддувної температури повітря, охолодженого забортною водою, $t_{\text{нп.зв}}$ до $t_{\text{нп}22} = 22^\circ\text{C}$ та наявної холодопродуктивності $Q_{0, \text{нп}(0,3)}$, яку можна отримати в ЕХМ з тепловим коефіцієнтом $\zeta = 0,3$ за рахунок теплоти наддувного повітря упродовж рейсу судна "Шанхай-Карачі-Шанхай"

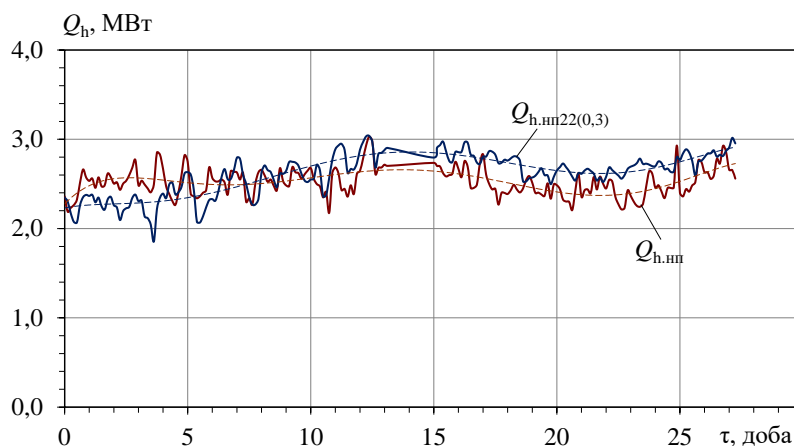


Рис. 4. Витрати теплоти $Q_{\text{h, нп}22(0,3)}$, необхідної для охолодження наддувного повітря МОД в ЕХМ з тепловим коефіцієнтом $\zeta = 0,3$ від поточної температури охолодженого забортною водою наддувного повітря $t_{\text{нп.зв}}$ до температури $t_{\text{нп}22} = 22^\circ\text{C}$, та наявної теплоти наддувного повітря $Q_{\text{h, нп}}$ упродовж рейсу судна "Шанхай-Карачі-Шанхай"

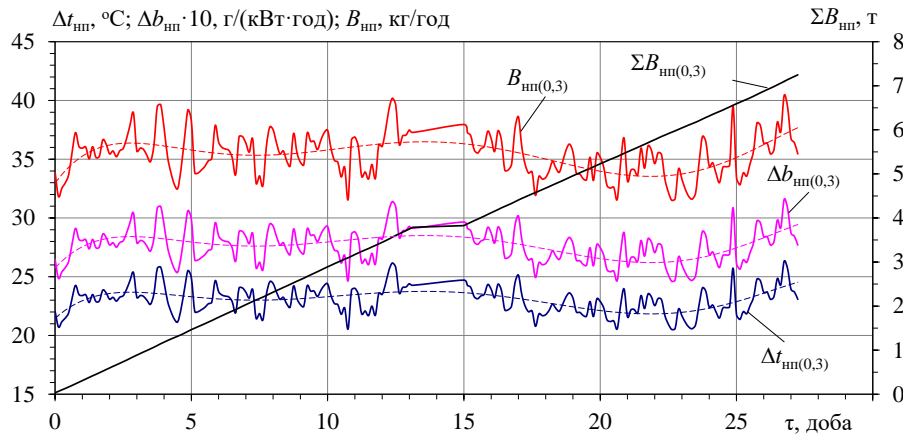


Рис. 5. Поточні зниження температури наддувного повітря $\Delta t_{\text{нп}(0,3)}$ при його охолодженні в ЕХМ, що використовує теплоту наддувного повітря $Q_{\text{нп}}$ ($\zeta = 0,3$), та відповідні зменшення питомої $\Delta b_{\text{нп}(0,3)}$ і годинної $B_{\text{нп}(0,3)}$ витрат палива та скорочення загальної витрати палива за накопиченням $\Sigma B_{\text{нп}(0,3)}$ для МОД MAN B&W 6G60ME-C9.2

При цьому має місце відносно незначний дефіцит теплоти наддувного повітря $\Delta Q_{\text{нп}(0,3)\text{д}} = Q_{\text{нп}22(0,3)} - Q_{\text{нп}}$ порівняно з теплою $Q_{\text{нп}22(0,3)}$ (див. рис. 4), необхідною для охолодження наддувного повітря МОД до 22 °С в ЕХМ з тепловим коефіцієнтом $\zeta = 0,3$ упродовж рейсу "Шанхай-Карачі-Шанхай" (1.07.2019-28.07.2019) (рис. 6).

Як видно з рис. 6, дефіцит теплоти наддувного повітря $\Delta Q_{\text{нп}22(0,3)\text{д}} = Q_{\text{нп}} - Q_{\text{нп}22(0,3)}$ для охолодження наддувного повітря МОД до 22 °С в ЕХМ з тепловим коефіцієнтом $\zeta = 0,3$ упродовж рейсу "Шанхай-Карачі-Шанхай" (1.07.2019-28.07.2019) становить $\Delta Q_{\text{нп}22(0,3)} = 0,2 \dots 0,4$ МВт. Цей дефіцит може бути компенсований за рахунок використання додатково теплоти випускних газів.

Висновки

За результатами аналізу паливної економічності суднового МОД з охолодженням наддувного повітря до 22 °С в ЕХМ, що використовує їхню теплоту, на прикладі рейсу "Шанхай-Карачі-Шанхай" показано, що має місце відносно незначний дефіцит теплоти, який може бути компенсований за рахунок використання додатково теплоти випускних газів.

Література

1. MAN Diesel Turbo, "CEAS Engine Calculations" [Online]. – Available at: <https://marine.mannes.com/two-stroke/ceas>. – 12.02.2020.

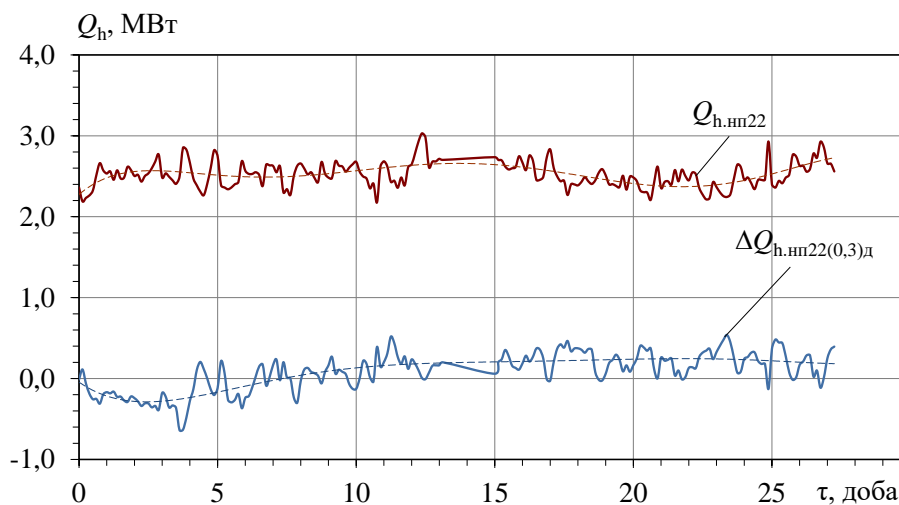


Рис. 6. Значення наявної теплоти наддувного повітря $Q_{\text{нп}}$ та її дефіциту $\Delta Q_{\text{нп}22(0,3)\text{д}}$ порівняно з теплою $Q_{\text{нп}22(0,3)}$ (див. рис. 4), необхідною для охолодження наддувного повітря до 22 °С в ЕХМ ($\zeta = 0,3$), упродовж рейсу судна "Шанхай-Карачі-Шанхай"

2. Bent, N. 8500 TEU Container Ship Green Ship of the Future Concept study, Odense Steel Shipyard Ltd, [Online]. – Available at: <https://www.dendanskemari-timefond.dk/wp-content/uploads/2016/04/Green-Ship-Report-Containership-4Dec09.pdf>. – 12.02.2020.

3. Enhancing the Efficiency of Marine Diesel Engine by Deep Waste Heat Recovery on the Base of Its Simulation Along the Route Line [Text] / R. Radchenko, V. Kornienko, M. Pyrysunko, M. Bogdanov, A. Andreev // *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. Advances in Intelligent Systems and Computing*. – Springer, Cham, 2020. – Vol. 1113. – P. 337-350.

4. Pham, V. V. Advanced technology solutions for treatment and control noxious emission of large marine diesel engines [Text] / V. V. Pham // *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments (JMERE)*. – 2019. – Vol. 42, Iss. 5. – P. 21-27.

References

1. MAN Diesel Turbo, "CEAS Engine Calculations". Available at: <https://marine.man-es.com/two-stroke/ceas> (accessed 12.02.2020).

2. Bent, N. 8500 TEU Container Ship Green Ship of the Future Concept study, Odense Steel Shipyard Ltd. Available at: <https://www.dendanskemari-timefond.dk/wp-content/uploads/2016/04/Green-Ship-Report-Containership-4Dec09.pdf> (accessed 12.02.2020).

3. 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. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1113, Springer, Cham, 2020, pp. 337-350.

4. Pham, V. V. Advanced technology solutions for treatment and control noxious emission of large marine diesel engines. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments (JMERE)*, 2019, vol. 42, iss. 5, pp. 21-27.

Поступила в редакцию 5.03.2020, рассмотрена на редколлегии 15.04.2020

ОХЛАЖДЕНИЕ НАДДУВОЧНОГО ВОЗДУХА ГЛАВНОГО СУДОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ЭЖЕКТОРНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНОЙ В ЭКВАТОРИАЛЬНЫХ ШИРОТАХ

Н. И. Радченко, Д. В. Коновалов,

Чжан Цян, Лю Шаоцзюнь, Луо Зевей, Джи Ран

Проанализировано эффективность охлаждения наддувочного воздуха главного малооборотного двигателя транспортного судна при эксплуатации в экваториальных тропических широтах. Особенностью тропического климата является высокая относительная влажность воздуха при одновременно высоких его температурах и температурах забортной воды. Исследовано охлаждение наддувочного воздуха хладоновой эжекторной холодильной машиной путем трансформации в холод теплоты наддувочного воздуха. При этом потенциально возможную минимальную температуру охлажденного воздуха определяли с учетом температуры кипения хладона и температурных напоров в теплообменниках промежуточного водяного контура охлаждения. Хладоновую эжекторную холодильную машину применено как конструктивно наиболее простую и надежную в эксплуатации. Однако эффективность трансформации теплоты в холод эжекторными холодильными машинами невысокая: их тепловые коэффициенты составляют примерно 0,3. Предложено и проанализировано схемно-конструктивное решение трехступенчатой системы охлаждения наддувочного воздуха судового главного двигателя - в высокотемпературной (когенерационной) ступени с использованием отведенной теплоты наддувочного воздуха для получения холода эжекторной холодильной машиной, традиционной ступени охлаждения наддувочного воздуха забортной водой и низкотемпературной ступени охлаждения хладоновой эжекторной холодильной машиной. Эффект от более глубокого охлаждения наддувочного воздуха определяли путем сравнения с охлаждением наддувочного воздуха забортной водой с учетом переменных климатических условий в течение рейса судна. Показано, что из-за недостаточно высокой эффективности трансформации теплоты наддувочного воздуха эжекторной холодильной машиной (невысоких тепловых коэффициентов) полученной холодопроизводительности недостаточно для охлаждения наддувочного воздуха до потенциально возможной минимальной температуры 22 °С при эксплуатации судового двигателя в тропических климатических условиях. Однако дефицит теплоты относительно незначительный и может быть компенсирован за счет использования дополнительно теплоты выпускных газов.

Ключевые слова: Охлаждение наддувочного воздуха; Теплота наддувочного воздуха; Эжекторная холодильная машина.

**COOLING SCAVENGE AIR OF MAIN MARINE LOW-SPEED ENGINE
BY EJECTOR CHILLER IN EQUATORIAL LATITUDES**

*M. I. Radchenko, D. V. Kononov,
Zhang Qiang, Liu Shaojun, Luo Zewei, Ji Ran*

The efficiency of cooling the scavenge air of the main low-speed engine of the transport vessel during operation in the equatorial tropical latitudes is analyzed. The peculiarity of the tropical climate is the high relative humidity of the air at the same time its high temperatures and temperatures of seawater. The cooling of the scavenge air with a refrigerant ejector chiller was investigated by transforming the scavenge air heat into the cold. With this, the potentially possible minimum temperature of the cooled air was determined considering the boiling temperature of the refrigerant and the temperature differences in the heat exchangers of the intermediate water cooling circuit. Refrigerant ejector chiller is used as the most simple and reliable in design. However, the efficiency of converting the heat to cold by ejector chillers is low: their coefficients of performance are approximately 0.3. Circuit-design solution of three-stage cooling system of scavenging air of ship's main engine - in high-temperature (cogeneration) stage using the extracted heat of scavenging air to get cold with ejector chiller and traditional stage for cooling scavenge air by seawater and low-temperature cooling stage by ejector chiller. The effect of deeper cooling of the scavenge air was determined in comparison with the cooling of the scavenge air with seawater, taking into account the changing climatic conditions during the route of the vessel. It is shown that because of the insufficiently high efficiency of transformation of the scavenge air heat by the ejector chiller (low coefficients of performance) the obtained cooling capacity is not sufficient to cool the scavenge air to a potentially possible minimum temperature of 22 °C when operating the ship engine in tropical climates. However, the heat deficit is relatively small and can be covered by the use of additional exhaust gas heat.

Keywords: Scavenge air cooling; Scavenge air heat; Ejector chiller.

Радченко Микола Іванович – д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри кондиціювання і рефрижерації, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Кононов Дмитро Вікторович – канд. техн. наук, доц., Херсонська філія Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Херсон, Україна.

Чжан Цян – доцент, Цзяньсунський університет науки і технології, Цзеньцзянь, КНР.

Лю Шаоцзюнь – доцент, Цзяньсунський університет науки і технології, Цзеньцзянь, КНР.

Луо Зевей – магістрант, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна; Цзяньсунський університет науки і технології, Цзеньцзянь, КНР.

Джі Ран – магістрант, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна; Цзяньсунський університет науки і технології, Цзеньцзянь, КНР.

Radchenko Mykola Ivanovych – Doctor of Technical Science, Professor, a head Conditioning and Refrigeration Dept., Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0001-5796-5370.

Kononov Dmytro Viktorovych – lecturer of Kherson filial of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine, dimitriyko79@gmail.com.

Zhang Qiang – associated professor, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, China, e-mail: nirad50@gmail.com.

Liu Shaojun – associated professor, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, China, e-mail: nirad50@gmail.com.

Luo Zewei – magister of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine; magister of Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, China, e-mail: nirad50@gmail.com.

Ji Ran – magister of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine; magister of Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, China, e-mail: nirad50@gmail.com.