

УДК 629.5.03:621.436-71:621.576.5:551.581.24

doi: 10.32620/aktt.2020.2.05

А. М. РАДЧЕНКО¹, Д. В. КОНОВАЛОВ², І. В. КАЛІНІЧЕНКО²,
ЧЕН НІНЬ³, ХАН БАОЧЕН^{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 АБСОРБЦІЙНОЮ БРОМИСТОЛІТІЄВОЮ 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 абсорбційною бромистолітєвою холодильною машиною шляхом трансформації в холод теплоти наддувного повітря. При цьому потенційно можливу мінімальну температуру охолодженого повітря визначали з урахуванням температури холодної води (холодоносія) від абсорбційної бромистолітєвої холодильної машини і температурних напорів в теплообмінниках проміжного водяного контуру охолодження. Абсорбційні бромистолітєві холодильні машини відзначаються високою ефективністю трансформації скидної теплоти в холод – високими тепловими коефіцієнтами. Запропоновано та проаналізовано схемно-конструктивне рішення тріступеневої системи охолодження наддувного повітря суднового головного двигуна – у високотемпературному (когенераційному) ступені з використанням відведеної теплоти наддувного повітря для отримання холоду абсорбційною холодильною машиною, традиційному ступені охолодження наддувного повітря забортною водою та низькотемпературному ступені охолодження абсорбційною 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 завдяки високій ефективності трансформації теплоти в абсорбційних холодильних машинах (високим тепловим коефіцієнтам 0,7...0,8) має місце значна величина надлишку теплоти наддувного повітря понад теплоту, необхідну для його охолодження до 22 °С, який сягає майже половини наявної теплоти наддувного повітря упродовж рейсу "Шанхай-Сінгапур-Шанхай". Це відкриває можливості для додаткового охолодження ще й повітря на вході турбокомпресора двигуна з отриманням практично подвійної економії палива завдяки охолодженню всього циклового повітря малообертового двигуна включно з повітрям на вході.

Ключові слова: Охолодження наддувного повітря; Теплота наддувного повітря; Абсорбційна бромистолітєва холодильна машина.

1. Аналіз проблеми і постановка мети дослідження

Як головні двигуни на морських суднах 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 °С спричиняє зростання питомої витрати палива b_e на

1,1...1,2 г/(кВт·год) [1, 2]. Тому при високих температурах $t_{\text{зп}}$ 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. Високою ефективністю трансформації теплоти в холод відзначаються абсорбційні бромистолітєві холодильні машини (АБХМ) [3, 4]: їх теплові коефіцієнти $\zeta = Q_0 / Q_h = 0,7...0,8$, де Q_0 – отримана холодопродуктивність; Q_h – витрати теплоти.

Мета дослідження – аналіз ефективності охолодження наддувного повітря суднового МОД в АБХМ з використанням його теплоти при експлуатації в тропічних екваторіальних широтах.

2. Результати дослідження

Аналіз ефективності охолодження наддувного повітря МОД проведено для рейсової лінії "Шанхай-Сінгапур-Шанхай", 20.07.2019-9.08.2019 (рис. 1).

Схема системи охолодження наддувного повітря суднового МОД в АБХМ 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_{BT}: $Q_{h,нп} = G_{п} c_{п} (t_{BT1} - t_{BT2})$, де t_{BT1} – температура повітря після ТК на вході в ОНП_{BT}, $G_{п}$ – витрата повітря. Розрахунки показали, що в діапазоні температур $t_{BT2} = 110...140$ °C габарити триступеневого ОНП, включно з додатковим низькотемпературним ступенем ОНП_{HT} охолодження повітря в АБХМ, доволі близькі до їхніх величин для двоступеневого ОНП з відведенням теплоти наддувного повітря в ОНП_{BT} на нагрів питної води УК.

Мінімальну температуру охолодженого повітря на виході з ОНП_{HT} визначали з урахуванням температури холодної води (холодоносія) від АБХМ і температурного напору в ОНП_{HT} $\Delta t_{ОНПHT} = 12$ °C як $t_{нп2} = t_{х} + \Delta t_{ОНПHT} = 22$ °C. По величині зниження температури $\Delta t_{нп}$ повітря, охолодженого в ОНП_{HT} за допомогою АБХМ ($\zeta = 0,7$) до температури $t_{нп2(0,7)}$ порівняно з температурою повітря $t_{нп.зв}$, охолодженого в ОНП_{зв} заборотною водою: $\Delta t_{нп} = t_{нп.зв} - t_{нп2(0,7)}$, можна судити про ефективність охолодження наддувного повітря в АБХМ порівняно з його тради-

ційним охолодженням заборотною водою в ПО_{зв} до $t_{нп.зв}$.

Значення холодопродуктивності $Q_{0,нп22}$, необхідної для охолодження наддувного повітря до температури $t_{нп2} = 22$ °C на величину $\Delta t_{нп22}$, та наявної холодопродуктивності $Q_{0,нп(0,7)}$, виходячи з теплоти наддувного повітря та її трансформації в холод в АБХМ ($\zeta = 0,7$) при температурі наддувного повітря на виході з ОНП_{BT} $t_{BT2} = 110$ °C упродовж рейсу "Шанхай-Сінгапур-Шанхай" (20.07.2019-9.08.2019) наведені на рис. 3.

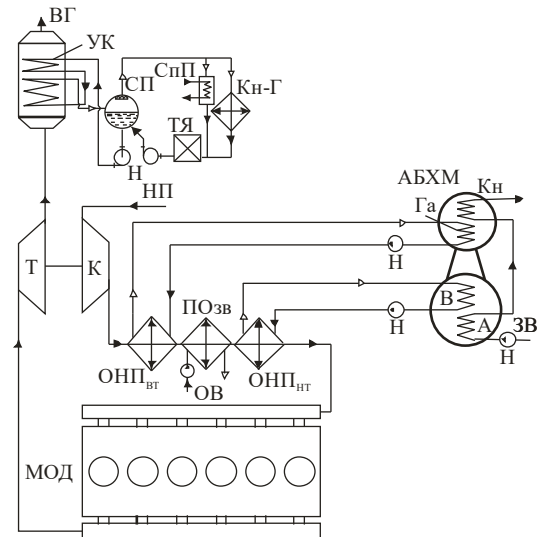


Рис. 2. Схема системи охолодження наддувного повітря МОД в АБХМ: Т – турбіна; К – компресор; ОНП_{BT} і ОНП_{HT} та ПО_{зв} – охолоджувачі наддувного повітря високо-і низькотемпературні та проміжний заборотною водою; УК – утилізаційний котел; СП – сепаратор пари; СПП – споживачі пари; ТЯ – теплий ящик; АБХМ: Га – генератор; Кн – конденсатор; В – випарник; А – абсорбер; Н – насос; ВГ – випускні газы; ЗВ – охолоджувальна забортна вода; НП – повітря на вході ТК

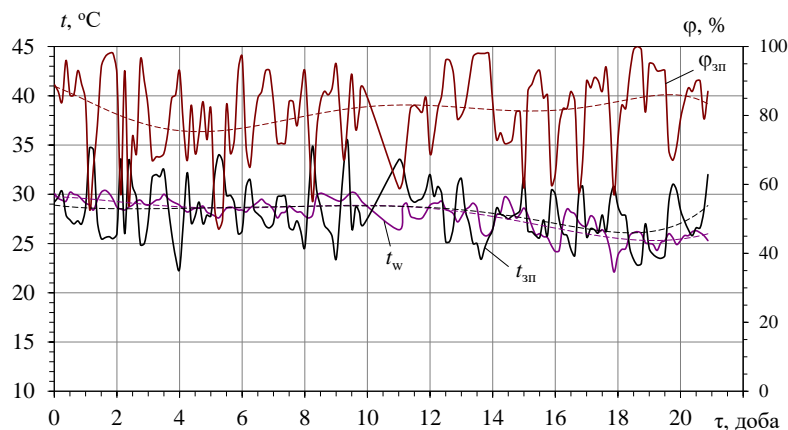


Рис. 1. Зміна температури $t_{зп}$ і відносної вологості $\phi_{зп}$ зовнішнього повітря та заборотної води t_w упродовж рейсу судна "Шанхай-Сінгапур-Шанхай" (20.07.2019-9.08.2019)

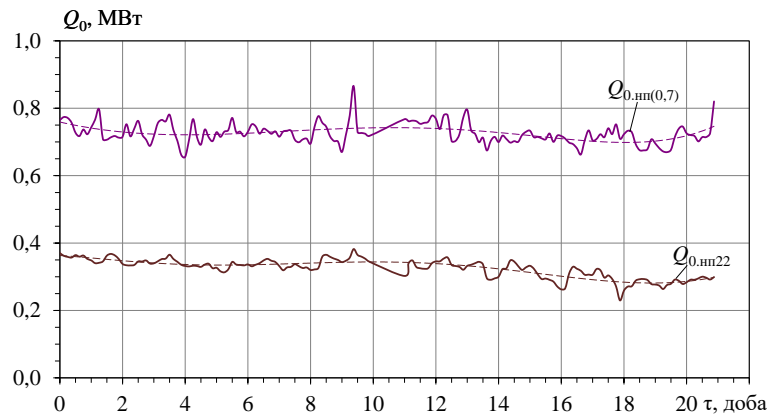


Рис. 3. Витрати холодопродуктивності $Q_{0, np22}$, необхідної для охолодження наддувного повітря МОД від поточної температури наддувного повітря, охолодженого заборотною водою, $t_{np, зв}$ до $t_{np2} = 22^\circ \text{C}$ та наявної холодопродуктивності $Q_{0, np(0,7)}$, яку можна отримати в АБХМ з тепловим коефіцієнтом $\zeta = 0,7$ за рахунок теплоти наддувного повітря упродовж рейсу судна "Шанхай-Сінгапур-Шанхай"

Про поточні витрати теплоти $Q_{h, np22(0,7)}$, необхідної для охолодження наддувного повітря МОД до 22°C в АБХМ ($\zeta = 0,7$) відповідно до зміни температури заборотної води $t_{зв}$ (рис. 1), та наявної теплоти наддувного повітря $Q_{h, np}$ (при $t_{BT2} = 110^\circ \text{C}$) упродовж рейсу "Шанхай-Сінгапур-Шанхай" (20.07.2019-9.08.2019) можна судити по рис. 4.

Про поліпшення паливної економічності суднового МОД за рахунок зниження температури наддувного повітря на величину $\Delta t_{np(0,7)} = t_{np, зв} - t_{np(0,7)}$ в АБХМ, що використовує теплоту наддувного повітря $Q_{h, np}$, можна судити за поточними значеннями зменшення питомої $\Delta b_{np(0,7)}$ і годинної $B_{np(0,7)}$ витрат палива та скорочення загальної витрати палива за накопиченням $\sum B_{np(0,7)}$ для МОД 10L32/44CR потужністю 5970 кВт, питомої витрати палива 176 г/(кВт год), упродовж рейсу "Шанхай-Сінгапур-Шанхай" (20.07.2019-9.08.2019) на рис. 5.

При цьому має місце значна величина надлишку теплоти наддувного повітря $\Delta Q_{h, np22(0,7)}$ понад теплоту $Q_{h, np22(0,7)}$ (рис. 4), необхідну для охолодження наддувного повітря МОД до 22°C в АБХМ з тепловим коефіцієнтом $\zeta = 0,7$ упродовж рейсу "Шанхай-Сінгапур-Шанхай" (20.07.2019-9.08.2019) (рис. 6).

Як видно з рис. 6, завдяки високій ефективності трансформації теплоти в АБХМ (високим $\zeta = 0,7$) має місце значна величина надлишку теплоти наддувного повітря $\Delta Q_{h, np22(0,7)}$ понад теплоту $Q_{h, np22(0,7)}$ (рис. 4), необхідну для охолодження наддувного повітря МОД до 22°C , який сягає майже половини наявної теплоти наддувного повітря $Q_{h, np}$ упродовж рейсу "Шанхай-Сінгапур-Шанхай", що відкриває можливість для додаткового охолодження ще й повітря на вході з отриманням практично подвійної економії палива завдяки охолодженню всього циклового повітря МОД включно з наддувним повітрям.



Рис. 4. Витрати теплоти $Q_{h, np22(0,7)}$, необхідної для охолодження наддувного повітря МОД в АБХМ з тепловим коефіцієнтом $\zeta = 0,7$ від поточної температури охолодженого заборотною водою наддувного повітря $t_{np, зв}$ до температури $t_{np22} = 22^\circ \text{C}$, та наявної теплоти наддувного повітря $Q_{h, np}$ упродовж рейсу судна "Шанхай-Сінгапур-Шанхай"

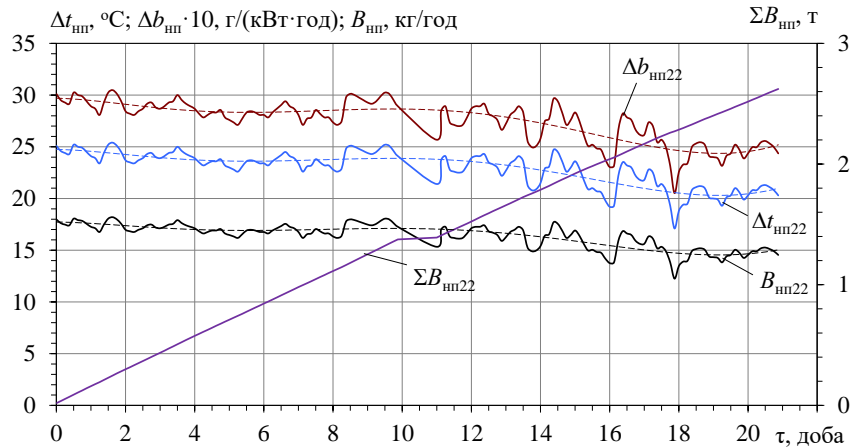


Рис. 5. Поточні зниження температури зовнішнього повітря на вході МОД $\Delta t_{\text{нп}22}$ при його охолодженні до мінімальної температури $t_2 = 22^\circ\text{C}$ в АБХМ, що використовує лише частку теплоти наддувного повітря $Q_{\text{h,нп}22(0.7)} < Q_{\text{h,над}}$ (рис. 4), та відповідні зменшення питомої $\Delta b_{\text{нп}22}$ і годинної $B_{\text{нп}22}$ витрат палива та скорочення загальної витрати палива за накопиченням $\Sigma B_{\text{нп}22}$ для МОД 10L32/44CR потужністю 5970 кВт

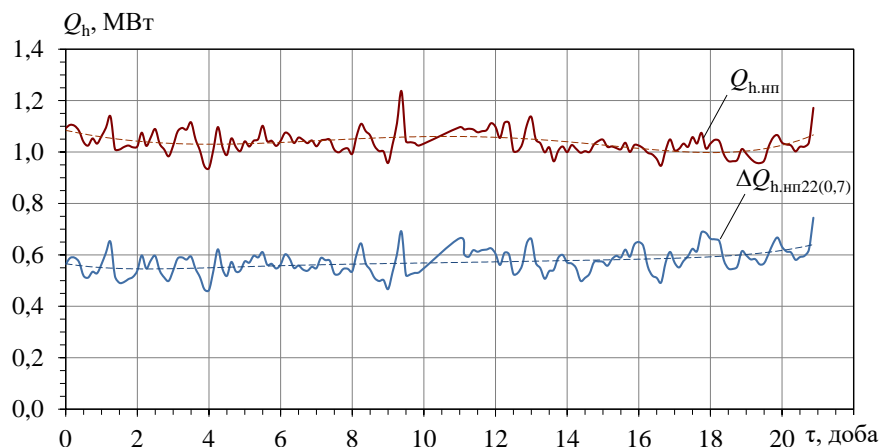


Рис. 6. Значення наявної теплоти наддувного повітря $Q_{\text{h,нп}}$ та її надлишку $\Delta Q_{\text{h,нп}22(0.7)}$ понад теплоту $Q_{\text{h,нп}22(0.7)}$ (рис. 4), необхідну для охолодження наддувного повітря до 22°C в АБХМ ($\zeta = 0.7$), упродовж рейсу судна "Шанхай-Сінгапур-Шанхай"

Висновки

За результатами аналізу паливної економічності суднового МОД з охолодженням наддувного повітря до 22°C в АБХМ, що використовує їхню теплоту, на прикладі рейсу "Шанхай-Сінгапур-Шанхай" показано, що завдяки високій ефективності трансформації теплоти в АБХМ має місце значний надлишок теплоти випускних, який сягає майже половини теплоти наддувного повітря, що відкриває можливості для додаткового охолодження ще й повітря на вході турбокомпресора МОД.

Література

1. MAN Diesel Turbo, "CEAS Engine Calculations" [Online]. – Available at: <https://marine.man-es.com/two-stroke/ceas>. – 11.03.2020.
2. Bent, N. 8500 TEU Container Ship Green Ship of the Future Concept study, Odense Steel Shipyard Ltd, [Online]. – Available at: <https://www.dendanskemaritimedfonden.dk/wp-content/uploads/2016/04/Green-Ship-Report-Containership-4Dec09.pdf>. – 11.03.2020.
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 (JMERD)*. – 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 11.03.2020).

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 11.03.2020).

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 (JMERD)*, 2019, vol. 42, iss. 5, pp. 21-27.

Поступила в редакцию 25.03.2020, рассмотрена на редколлегии 15.04.2020

ОХЛАЖДЕНИЕ НАДДУВНОГО ВОЗДУХА ГЛАВНОГО СУДОВОГО ДВИГАТЕЛЯ АБСОРБЦИОННОЙ БРОМИСТОЛИТИЕВОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНОЙ В ЭКВАТОРИАЛЬНЫХ ШИРОТАХ

А. Н. Радченко, Д. В. Коновалов, И. В. Калинин,
Чен Нинь, Хан Баочен

Проанализирована 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 заборной воды. Исследовано охлаждение наддувочного воздуха абсорбционной бромистолитиевой холодильной машиной путем трансформации в холод теплоты наддувочного воздуха. При этом потенциально возможную минимальную температуру охлажденного воздуха определяли с учетом температуры холодной воды (хладоносителя) от абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины и температурных напоров в теплообменниках промежуточного водяного контура охлаждения. Абсорбционные бромистолитиевые холодильные машины отличаются высокой эффективностью трансформации сбросной теплоты в холод - высокими тепловыми коэффициентами. 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 абсорбционной холодильной машиной, традиционной ступени охлаждения наддувочного воздуха заборной водой и низкотемпературной ступени охлаждения абсорбционной холодильной машиной. Эффект от более глубокого охлаждения наддувочного воздуха определяли по сравнению с охлаждением наддувочного воздуха заборной водой с учетом переменных климатических условий в течение рейса судна. Показано, что благодаря высокой эффективности трансформации теплоты в абсорбционных холодильных машинах (высоким тепловым коэффициентам 0,7...0,8) имеет место значительная величина избытка теплоты наддувочного воздуха сверх теплоты, необходимой для его охлаждения до 22 °С, который достигает почти половины имеющейся теплоты наддувочного воздуха в течение рейса "Шанхай-Сингапур-Шанхай". Это открывает возможности для дополнительного охлаждения еще и воздуха на входе турбокомпрессора двигателя с получением практически двойной экономии топлива благодаря охлаждению всего циклового воздуха малооборотного двигателя, включая воздух на входе.

Ключевые слова: Охлаждение наддувочного воздуха; Теплота наддувочного воздуха; Абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина.

COOLING SCAVENGE AIR OF MAIN MARINE ENGINE BY ABSORPTION LITHIUM BROMIDE CHILLER IN EQUATORIAL LATITUDES

A. M. Radchenko, D. V. Kononov, I. V. Kalinichenko,
Chen Ning, Han Baochen

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 an absorption lithium bromide chiller by transforming the scavenge air heat into the cold was investigated. With this, the potentially possible minimum temperature of the cooled air was determined considering the temperature of the cold water (coolant) from the absorption lithium bromide chiller and the temperature differences in the heat exchangers of the intermediate water circuit of cooling. Absorption lithium bromide chillers are characterized by high efficiency of transformation of waste heat into cold - high coefficients of performance. 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 absorption chiller and traditional stage for cooling scavenge air by seawater and low-temperature cooling stage by absorption 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 due to the high efficiency of heat transformation in absorption chillers (high coefficients of performance 0.7...0.8), there is a significant amount of excess heat of scavenging air over the heat required to cool it to 22 °C, which reaches almost half of the available scavenge air heat on the Shanghai-Singapore-Shanghai route. This reveals the possibility of additional cooling the inlet of the turbocharger of the engine with the achieving almost double fuel economy due to the cooling of all cycle air of the low-speed engine, including the air at the inlet.

Keywords: Scavenge air cooling; Scavenge air heat; Absorption lithium bromide chiller.

Радченко Андрій Миколайович – канд. техн. наук, доц., Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

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

Калініченко Іван Володимирович – канд. техн. наук, доц., Херсонська філія Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Херсон, Україна.

Нінг Чен – Ph.D., доцент, Цзяньсунський університет науки і технології, Цзеньцзянь, КНР.

Баочен Хан – магістрант, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, Цзяньсунський університет науки і технології, Цзеньцзянь, КНР.

Radchenko Andrii Mykolayovych – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-8735-9205.

Kononov Dmytro Viktorovych – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Kherson filial of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine, dimitriyko79@gmail.com.

Kalinichenko Ivan Volodymyrovych – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Kherson filial of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine, e-mail: kiv26@ukr.net.

Ning Chen – Ph.D., associated Professor, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, China, e-mail: nirad50@gmail.com.

Baochen Han – 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.