

УДК 629.5.03:621.436-71:621.576.5:551.581.24

doi: 10.32620/aktt.2020.2.03

Р. М. РАДЧЕНКО <sup>1</sup>, Д. В. КОНОВАЛОВ <sup>2</sup>, М. А. ПИРИСУНЬКО <sup>2</sup>,  
ЧЖАН ЦЯН <sup>3</sup>, ЛУО ЗЕВЕЙ <sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна

<sup>2</sup> Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Херсонська філія, Україна

<sup>3</sup> Цзяньсунський університет науки і технологій, КНР

## ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ ГОЛОВНОГО СУДНОВОГО ДВИГУНА АБСОРБЦІЙНОЮ БРОМИСТОЛІТІЄВОЮ ХОЛОДИЛЬНОЮ МАШИНОЮ В ТРОПІЧНИХ УМОВАХ

Проаналізовано ефективність охолодження повітря на вході головного малообертового двигуна транспортного судна при експлуатації в тропічних кліматичних умовах на рейсовій лінії Шанхай-Карачі-Шанхай. Особливістю тропічного клімату є висока відносна вологість повітря при водночас високих його температурах, а відтак і підвищені теплові навантаження на систему охолодження, що потребує ефективної трансформації скидної теплоти в холод у разі застосування тепловикористовуючих холодильних машин. Досліджено охолодження повітря на вході малообертового двигуна абсорбційними бромистолітєвими холодильними машинами, що відзначаються високою ефективністю трансформації скидної теплоти в холод – високими тепловими коефіцієнтами. Запропоновано та проаналізовано схемо-конструктивне рішення системи охолодження повітря на вході суднового головного двигуна з використанням теплоти випускних газів абсорбційною холодильною машиною. При цьому порівнювали потенціал охолодження повітря на вході двигуна від поточної температури зовнішнього повітря до 15 °С і відповідні витрати теплоти на роботу абсорбційної холодильної машини, з одного боку, та наявний потенціал теплоти випускних газів, з іншого боку. Ефект від використання теплоти випускних газів для охолодження повітря на вході двигуна проаналізовано з урахуванням змінних кліматичних умов упродовж рейсу судна. Поліпшення паливної економічності суднового двигуна за рахунок зниження температури повітря на вході оцінювали за поточними значеннями зменшення питомої і загальної витрат палива. Показано, що завдяки високій ефективності трансформації теплоти в абсорбційних холодильних машинах (високим тепловим коефіцієнтам 0,7...0,8) має місце значна величина надлишку теплоти випускних газів понад теплоту, необхідну для охолодження зовнішнього повітря на вході двигуна до 15 °С, який сягає майже половини наявної теплоти випускних газів упродовж рейсу "Шанхай-Карачі-Шанхай". Це відкриває можливості для додаткового охолодження ще й наддувного повітря з отриманням практично подвійної економії палива завдяки охолодженню всього циклового повітря малообертового двигуна включно з повітрям на вході.

**Ключові слова:** Охолодження; Повітря; Вхід; Двигун; Абсорбційна холодильна машина; Випускні гази.

### 1. Аналіз проблеми і постановка мети дослідження

На морських судах як головні застосовуються здебільшого малообертові дизелі (МОД). Умови експлуатації суднових МОД відзначаються значною зміною упродовж рейсу температури зовнішнього повітря  $t_{\text{зп}}$ , відповідно і повітря на вході в турбокомпресор. За даними фірм-розробників МОД "MAN" і "Wartsila" підвищення температури повітря на вході МОД на 10 °С спричиняє зростання питомої витрати палива  $b_e$  на 1,2 г/(кВт·год) [1, 2]. То ж при високих температурах повітря  $t_{\text{зп}}$  бажано його охолоджувати, для чого доцільно застосовувати тепло-

використовуючі холодильні машини (ТХМ), що утилізують скидну теплоту двигунів [3].

Особливістю тропічних умов експлуатації є високі як температура  $t_{\text{зп}}$ , так і відносна вологість  $\Phi_{\text{зп}}$  зовнішнього повітря, відповідно й теплові навантаження  $Q_0$  на систему охолодження. Це в свою чергу вимагає високої ефективності трансформації теплоти в холод в ТХМ – теплових коефіцієнтів  $\zeta = Q_0 / Q_h$ , де  $Q_h$  – витрати теплоти, для забезпечення високої холодопродуктивності ТХМ  $Q_0$ . Тому доцільно застосовувати високоефективні абсорбційні бромистолітєві ТХМ (АБХМ), для яких  $\zeta = 0,7...0,8$ .

**Мета** дослідження – оцінка теплового потенціалу охолодження повітря на вході суднового МОД

при використанні в АБХМ теплоти випускних газів і експлуатації в напружених тропічних умовах.

## 2. Результати дослідження

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

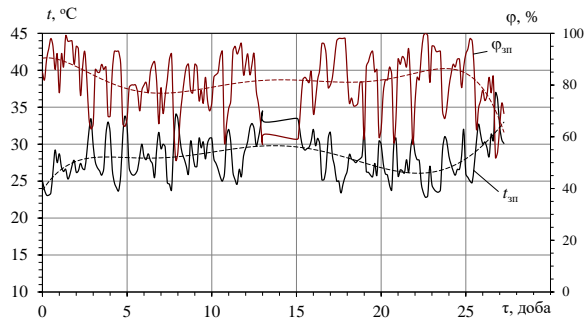


Рис. 1. Зміна температури  $t_{зп}$  і відносної вологості  $\phi_{зп}$  зовнішнього повітря упродовж рейсу судна "Шанхай-Карачі-Шанхай" (1.07.2019-28.07.2019)

Схема системи охолодження повітря на вході суднового МОД в АБХМ з використанням теплоти випускних газів показана на рис. 2.

Про співвідношення потенціалу охолодження повітря на вході МОД від поточної температури  $t_{зп}$  до  $t_2 = 15^\circ\text{C}$  і відповідних витрат теплоти в АБХМ з тепловим коефіцієнтом  $\zeta = 0,7$ , з одного боку, та наявного потенціалу теплоти випускних газів, з іншого боку, упродовж рейсу "Шанхай- Карачі-Шанхай" (1.07.2019-28.07.2019) можна судити по рис. 3 і 4.

Про поточні витрати теплоти  $Q_{h,вх15(0,7)}$ , необхідної для охолодження повітря на вході МОД до

$15^\circ\text{C}$  в АБХМ з тепловим коефіцієнтом  $\zeta = 0,7$  відповідно до зміни температури зовнішнього повітря  $t_{зп}$  (рис. 1), та наявної теплоти випускних газів  $Q_{h,вг}$  упродовж рейсу "Шанхай- Карачі-Шанхай" (1.07.2019-28.07.2019) можна судити по рис. 4.

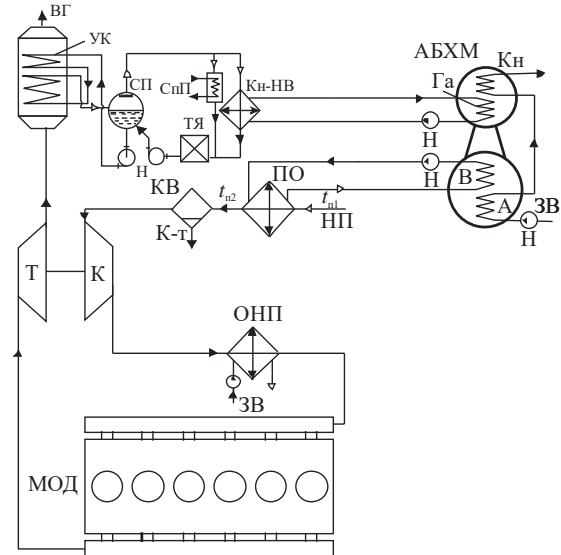


Рис. 2. Схема системи охолодження повітря на вході МОД в АБХМ: УК – утилізаційний котел; СП – сепаратор пари; СПП – споживачі пари; ТЯ – теплий ящик; Т – турбіна; К – компресор; ОНП – охолоджувач наддувного повітря; Кн-НВ – конденсатор водяної пари – нагрівник води; ПО – повітроохолоджувач; КВ – краплевідокремлювач; К-т – конденсат; Н – насос; ВГ – випускні газ; НП – на вході повітря; ЗВ – забортна вода; АБХМ: Га – генератор; Кн – конденсатор; В – випарник; А – абсорбер

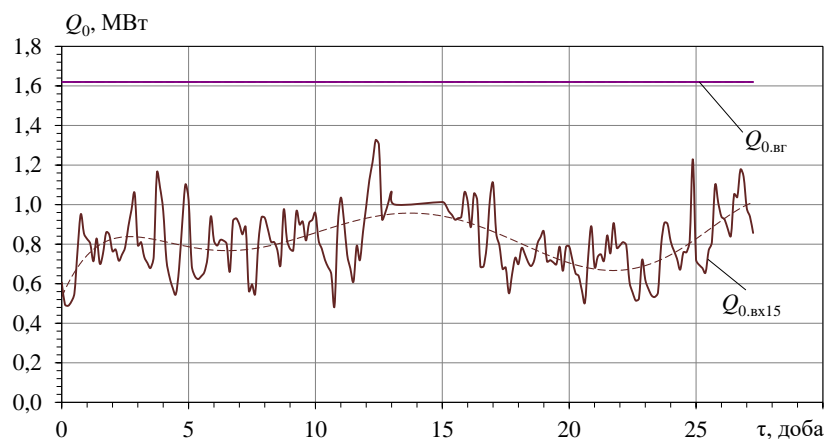


Рис. 3. Витрати холодопродуктивності  $Q_{0,вх15}$  на охолодження зовнішнього повітря на вході МОД від поточної температури  $t_{зп}$  до  $t_2 = 15^\circ\text{C}$  та наявної холодопродуктивності  $Q_{0,вг}$ , яку можна отримати в АБХМ з тепловим коефіцієнтом  $\zeta = 0,7$  за рахунок теплоти випускних газів упродовж рейсу судна "Шанхай-Карачі-Шанхай"

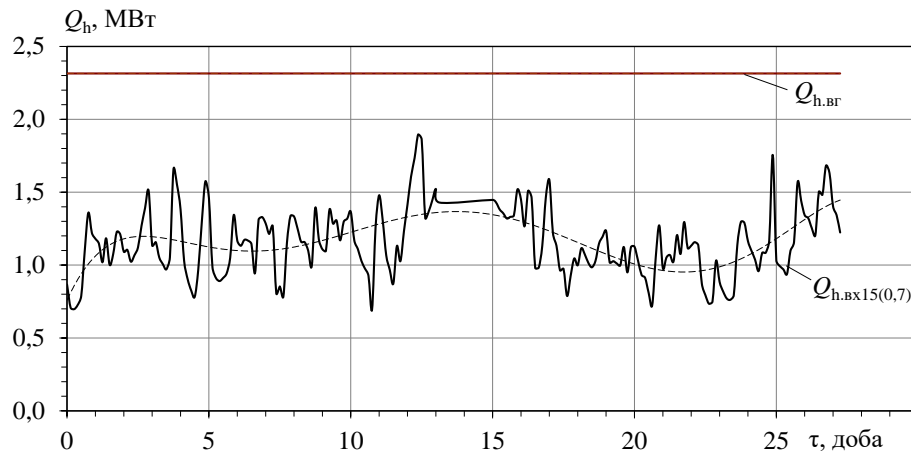


Рис. 4. Витрати теплоти  $Q_{h.BX15(0.7)}$ , необхідної для охолодження зовнішнього повітря на вході МОД в АБХМ з тепловим коефіцієнтом  $\zeta = 0,7$  від поточної температури  $t_{зп}$  до температури  $t_2 = 15^\circ\text{C}$ , та наявної теплоти випускних газів  $Q_{h.BG}$  упродовж рейсу судна "Шанхай-Карачі-Шанхай"

Про поліпшення паливної економічності суднового МОД за рахунок зниження температури повітря на вході на величину  $\Delta t_{BX15} = t_{зп} - t_2 = t_{зп} - 15^\circ\text{C}$  в АБХМ, що використовує лише частку теплоти випускних газів  $Q_{h.BX15(0.7)} < Q_{h.BG}$ , можна судити за поточними значеннями зменшення питомої  $\Delta b_{BX15}$  і годинної  $B_{BX15}$  витрат палива та скорочення загальної витрати палива за накопиченням  $\Sigma B_{BX15}$  для МОД MAN B&W 6G60ME-C9.2 потужністю 12800 кВт, питома витрата палива 176 г/(кВт год), упродовж рейсу "Шанхай-Карачі-Шанхай" (1.07.2019-28.07.2019) на рис. 5.

Як видно, за рахунок зниження температури зовнішнього повітря на вході МОД до  $t_2 = 15^\circ\text{C}$  на

величину  $\Delta t_{BX15} = 25 \dots 35^\circ\text{C}$  в АБХМ, що використовує лише частку теплоти випускних газів  $Q_{h.BX15(0.7)} < Q_{h.BG}$ , зменшуються витрати палива питомі на  $\Delta b_{BX(0.7)BG} = 3,5 \dots 4,0$  г/(кВт·год) та загальні на  $B_{BX(0.25)BG} = 35 \dots 45$  кг/год для MAN B&W 6G60ME-C9.2 упродовж рейсу (рис. 5).

Про величини надлишку теплоти випускних газів  $\Delta Q_{h.BX15(0.7)} = Q_{h.BG} - Q_{h.BX15(0.7)}$  понад теплоту  $Q_{h.BX15(0.7)}$  (рис. 4), необхідну для охолодження зовнішнього повітря на вході МОД до  $15^\circ\text{C}$  в АБХМ з тепловим коефіцієнтом  $\zeta = 0,7$  упродовж рейсу "Шанхай-Карачі-Шанхай" (1.07.2019-28.07.2019), можна судити по рис. 6.

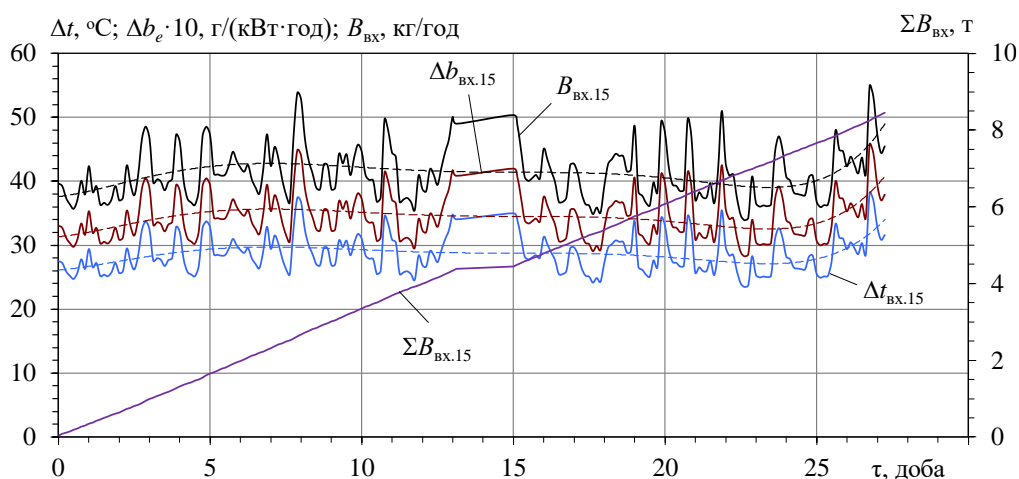


Рис. 5. Поточні зниження температури зовнішнього повітря на вході МОД  $\Delta t_{BX15}$  при його охолодженні до  $t_2 = 15^\circ\text{C}$  в АБХМ, що використовує лише частку теплоти випускних газів  $Q_{h.BX15(0.7)} < Q_{h.BG}$  ( $\zeta = 0,7$ ), та відповідні зменшення питомої  $\Delta b_{BX15}$  і годинної  $B_{BX15}$  витрат палива та скорочення загальної витрати палива за накопиченням  $\Sigma B_{BX15}$  для МОД MAN B&W 6G60ME-C9.2

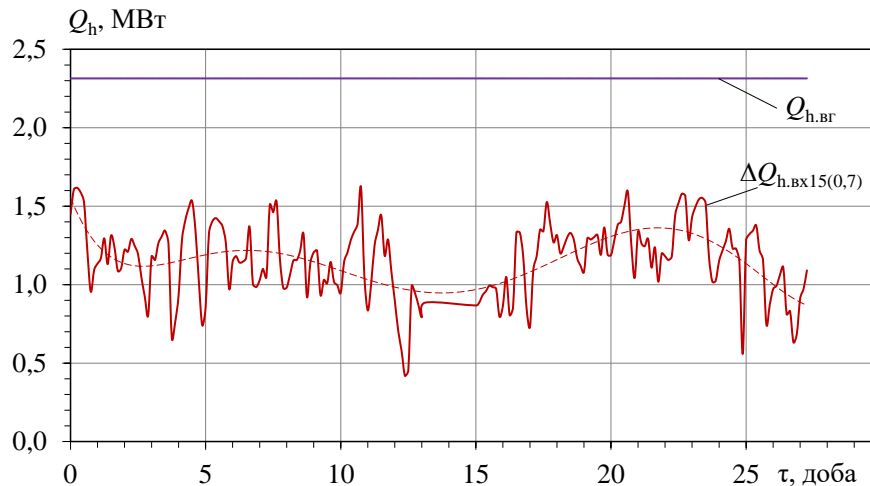


Рис. 6. Значення наявної теплоти випускних газів  $Q_{h,вг}$  та її надлишку  $\Delta Q_{h,вх15(0,7)}$  понад теплоту  $Q_{h,вх15(0,7)}$ , необхідну для охолодження зовнішнього повітря на вході МОД до 15 °С в АБХМ ( $\zeta = 0,7$ ) упродовж рейсу судна "Шанхай-Карачі-Шанхай"

Як видно з рис. 6, завдяки високій ефективності трансформації теплоти в АБХМ (високим  $\zeta = 0,7$ ) має місце значна величина надлишку теплоти випускних газів  $\Delta Q_{h,вх15(0,7)}$  понад теплоту  $Q_{h,вх15(0,7)}$  (рис. 4), необхідну для охолодження зовнішнього повітря на вході МОД до 15 °С, який сягає майже половини наявної теплоти випускних газів  $Q_{h,вх}$  упродовж рейсу "Шанхай-Карачі-Шанхай", що відкриває можливості для додаткового охолодження ще й наддувного повітря з отриманням практично подвійної економії палива завдяки охолодженню всього циклового повітря МОД включно з повітрям на вході.

## Висновки

За результатами аналізу паливної економічності суднового МОД з охолодженням повітря на його вході до 15 °С в АБХМ, що використовує теплоту випускних газів, на прикладі рейсу "Шанхай-Карачі-Шанхай" показано, що завдяки високій ефективності трансформації теплоти в АБХМ має місце значний надлишок теплоти випускних, який сягає майже половини теплоти випускних газів, що відкриває можливості для додаткового охолодження ще й наддувного повітря.

## Література

1. MAN Diesel Turbo, "CEAS Engine Calculations" [Online]. – Available at: <https://marine.man-es.com/two-stroke/ceas>. – 12.12.2019.

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>. – 12.12.2019.

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.

## References

1. MAN Diesel Turbo, "CEAS Engine Calculations". Available at: <https://marine.man-es.com/two-stroke/ceas> (accessed 12.12.2019).

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 12.12.2019).

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.

## ОХЛАЖДЕНИЕ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ ГЛАВНОГО СУДОВОГО ДВИГАТЕЛЯ АБСОРБЦИОННОЙ БРОМИСТОЛИТИЕВОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНОЙ В ТРОПИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

*Р. Н. Радченко, Д. В. Коновалов, М. А. Пирисунько,  
Чжан Цян, Луо Зевей*

Проанализировано эффективность охлаждения воздуха на входе главного малооборотного двигателя транспортного судна при эксплуатации в тропических климатических условиях на рейсовом линии Шанхай-Карачи-Шанхай. Особенностью тропического климата является высокая относительная влажность воздуха при одновременно высоких его температурах, а, следовательно, и повышенные тепловые нагрузки на систему охлаждения, что требует эффективной трансформации сбросной теплоты в холод в случае применения теплоиспользующих холодильных машин. Исследовано охлаждение воздуха на входе малооборотного двигателя абсорбционными бромистолитиевыми холодильными машинами, отличающимися высокой эффективностью трансформации сбросной теплоты в холод - высокими тепловыми коэффициентами. Предложено и проанализировано схемно-конструктивное решение системы охлаждения воздуха на входе судового главного двигателя с использованием теплоты выпускных газов абсорбционной холодильной машиной. При этом сравнивали потенциал охлаждения воздуха на входе двигателя от текущей температуры наружного воздуха до  $15^{\circ}\text{C}$  и соответствующие расходы теплоты на работу абсорбционной холодильной машины, с одной стороны, и располагаемый потенциал теплоты выпускных газов, с другой стороны. Эффект от использования теплоты выпускных газов для охлаждения воздуха на входе двигателя проанализировано с учетом меняющихся климатических условий в течение рейса судна. Улучшение топливной экономичности судового двигателя за счет снижения температуры воздуха на входе оценивали по текущим значениям уменьшения удельного и общего расхода топлива. Показано, что благодаря высокой эффективности трансформации теплоты в абсорбционных холодильных машинах (высоким тепловым коэффициентам 0,7...0,8) имеет место значительная величина избытка теплоты выпускных газов свыше теплоты, необходимой для охлаждения наружного воздуха на входе двигателя до  $15^{\circ}\text{C}$ , который достигает почти половины располагаемой теплоты выпускных газов на протяжении рейса "Шанхай-Карачи-Шанхай". Это открывает возможности для дополнительного охлаждения еще и наддувочного воздуха с получением практически двойной экономии топлива благодаря охлаждению всего циклового воздуха малооборотных двигателя, включая воздух на входе.

**Ключевые слова:** Охлаждение; Воздух; Вход; Двигатель; Абсорбционная холодильная машина; Выпускные газы.

## MAIN MARINE ENGINE INLET AIR COOLING BY ABSORPTION LITHIUM BROMIDE CHILLER IN TROPICAL CONDITIONS

*R. M. Radchenko, D. V. Kononov, M. A. Pyrysunko,  
Zhang Qiang, Luo Zewei*

The efficiency of air cooling at the inlet of the main low speed engine of a transport vessel during operation in tropical climatic conditions on the Shanghai-Karachi-Shanghai route was analyzed. The peculiarity of the tropical climate is the high relative humidity of the air at the same time its high temperatures, and hence the increased thermal load on the cooling system, which requires efficient transformation of the waste heat into the cold in the case of the use of waste heat recovery refrigeration machines. The cooling of the air at the inlet of the low speed engine by absorption lithium bromide chillers, which are characterized by high efficiency of transformation of waste heat into cold – by high coefficients of performance, is investigated. A schematic-construction solution of the air cooling system at the inlet of the ship's main engine using the heat of exhaust gases by an absorption chiller is proposed and analyzed. With this the cooling potential of the inlet air cooling from the current ambient air temperature to  $15^{\circ}\text{C}$  and the corresponding heat consumption for the operation of the adsorption chiller, on the one hand, was compared with the available exhaust gas heat potential, on the other hand. The effect of using the exhaust gas heat to cool the air at the inlet of the engine has been analyzed taking into account the changing climatic conditions during the voyage. Enhancement of fuel efficiency of the ship's engine by reducing the inlet air temperature were evaluated by current values of the reduction in specific and total fuel consumption. It is shown that due to the high efficiency of heat conversion in absorption chillers (high coefficients of performance 0.7...0.8), a

significant amount of excessive exhaust gas heat over the heat required to cool the ambient air at the inlet of the engine to 15 ° C, which reaches almost half of the available exhaust gas heat during the Shanghai-Karachi-Shanghai route. This reveals the possibility of additional cooling a scavenge air too with almost double fuel economy due to the cooling of all cycle air of the low speed engine, including the air at the inlet.

**Keywords:** Cooling; Air; Inlet; Engine; Absorption chiller; Exhaust gas.

**Радченко Роман Миколайович** – канд. техн. наук, доц. Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

**Коновалов Дмитро Вікторович** – канд. техн. наук, доц. Херсонської філії Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Херсон, Україна.

**Пирисунько Максим Андрійович** – викладач Херсонської філії Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Херсон, Україна.

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

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

**Radchenko Roman Mykolayovych** – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-8099-7327.

**Konovalev Dmytro Viktorovych** – lecturer of Kherson filial of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine, e-mail: dimitriyko79@gmail.com.

**Pyrysunko Maksym Andriyovych** – lecturer of Kherson filial of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine, e-mail: maximka1786@gmail.com.

**Zhang Qiang** – 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.