Р. М. РАДЧЕНКО¹, М. А. ПИРИСУНЬКО², ЧЕН НІН³, ХАН БАОЧЕН¹¹ Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна² Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Херсонська філія, Україна³ Цзяньсунський університет науки і технологій, КНР

ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ МАЛООБЕРТОВОГО ДВИГУНА ЕЖЕКТОРНОЮ ХОЛОДИЛЬНОЮ МАШИНОЮ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНА В ТРОПІЧНИХ УМОВАХ

Проаналізовано ефективність охолодження повітря на вході турбокомпресора головного малообертового двигуна транспортного судна при експлуатації в тропічних кліматичних умовах на рейсовій лінії Шанхай-Сінгапур-Шанхай. Особливістю тропічного клімату є висока відносна вологість повітря, відповідно, її вологовміст при водночас високих його температурах. Досліджено охолодження повітря на вході малообертового двигуна ежекторною холодильною машиною шляхом трансформації в холод скидної теплоти випускних газів. Ежекторну холодильну машину застосовано як конструктивно найбільш просту і надійну в експлуатації. Проте ефективність трансформації теплоти в холод ежекторними холодильними машинами невисока – невисокі теплові коефіцієнти. Запропоновано та проаналізовано схемо-конструктивне рішення системи охолодження повітря на вході суднового головного двигуна з використанням теплоти випускних газів ежекторною холодильною машиною. Ефект від використання теплоти випускних газів для охолодження повітря на вході двигуна проаналізовано з урахуванням змінних кліматичних умов упродовж рейсу судна. Показано, що через недостатньо високу ефективність трансформації скидної теплоти випускних газів ежекторною холодильною машиною (невисокі теплові коефіцієнти) отриманої холодопродуктивності недостатньо для охолодження повітря на вході турбокомпресора при експлуатації суднового двигуна в тропічних кліматичних умовах. Тому розглянута можливість додаткового використання ежекторною холодильною машиною ще і теплоти наддувного повітря, що відводиться охолоджувальною водою. Показано, що використання для охолодження повітря на вході двигуна в ежекторній холодильній машині сумісно теплоти випускних газів і наддувного повітря дозволяє практично вдвічі знизити температуру повітря на вході головного двигуна на 20–30°C при експлуатації судна в тропічних кліматичних умовах на рейсовій лінії Шанхай-Сінгапур-Шанхай. Це в свою чергу забезпечує майже подвійне зменшення витрати палива порівняно з її зменшенням у разі використання ежекторною холодильною машиною тільки теплоти випускних газів.

Ключові слова: охолодження; повітря; ежекторна холодильна машина; випускні гази.

1. Аналіз проблеми і постановка мети дослідження

Умови експлуатації суднових малообертових дизелів (МОД) відзначаються значною зміною упродовж рейсу температури зовнішнього повітря, відповідно повітря на вході в турбокомпресор (ТК). За даними фірм-розробників суднових МОД "MAN" і "Wartsila" підвищення температури повітря на вході МОД на 10 °C викликає зростання питомої витрати палива b_e на 1,2 г/(кВт·год) [1, 2].

Особливо гостро питання охолодження циклового повітря двигунів стоїть при експлуатації в тропічних умовах. Для цього доцільно застосовувати тепловикористовуючі холодильні машини (ТХМ), що утилізують скидну теплоту двигунів [3]. Конс-

труктивно найбільш простою і надійною в експлуатації є ежекторна холодильна машина (ЕХМ). Проте ефективність трансформації теплоти в холод в ЕХМ невисока: теплові коефіцієнти $\zeta = 0,2 \dots 0,3$ (відношення отриманої холодопродуктивності Q_0 до витрат теплоти Q_h).

Мета дослідження – аналіз ефективності охолодження повітря на вході суднового МОД в ЕХМ з використанням теплоти випускних газів при експлуатації на рейсовій лінії в тропічних умовах.

2. Результати дослідження

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

Рис. 1. Зміна температури t_a , відносної вологості ϕ_a і вологовмісту d_a зовнішнього повітря упродовж рейсу судна "Шанхай-Сінгапур-Шанхай"

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

Про поточні витрати теплоти $Q_{h, \text{вх}15(0,25)}$, необхідної для охолодження повітря на вході МОД до 15°C в ЕХМ з тепловим коефіцієнтом $\zeta = 0,25$ відповідно до зміни зовнішньої температури t_a , наявної теплоти випускних газів $Q_{h, \text{вг}}$ та її дефіциту $Q_{h, \text{вх}15(0,25)\text{д}} = Q_{h, \text{вх}15(0,25)} - Q_{h, \text{вг}}$ для охолодження повітря на вході МОД до 15°C упродовж рейсу "Шанхай-Сінгапур-Шанхай" можна судити по рис. 3.

Рис. 2. Схема системи охолодження повітря на вході МОД: УК – утилізаційний котел; СП – сепаратор пари; СПП – споживачі пари; ТЯ – теплий ящик; Т – турбіна; К – компресор; ОНП – охолоджувач наддувного повітря; ЕХМ: КН-Г – конденсатор-генератор пари хладону; Е – ежектор; ДК – дросельний клапан; В-ПО – випарник-повітроохолоджувач; КВ – краплевідокремлювач; К-Т – конденсат; Н – насос; ВГ – випускні гази

Рис. 3. Зміна витрат теплоти $Q_{h, \text{вх}15(0,25)}$, необхідної для охолодження зовнішнього повітря на вході МОД в ЕХМ з тепловим коефіцієнтом $\zeta = 0,25$ від поточної температури t_a до температури $t_{a2} = 15^\circ\text{C}$, наявної теплоти випускних газів $Q_{h, \text{вг}}$ та її дефіциту $Q_{h, \text{вх}15(0,25)\text{д}} = Q_{h, \text{вх}15(0,25)} - Q_{h, \text{вг}}$ для охолодження повітря на вході МОД в ЕХМ з тепловим коефіцієнтом $\zeta = 0,25$ до температури $t_{a2} = 15^\circ\text{C}$ упродовж рейсу судна "Шанхай-Сінгапур-Шанхай"

Про поліпшення паливної економічності суднового МОД за рахунок зниження температури повітря на вході на величину $\Delta t_{\text{вх}(0,25)\text{вг}}$ в ЕХМ ($\zeta = 0,25$), що використовує теплоту випускних газів $Q_{\text{h.вг}}$, можна судити за поточними значеннями зменшення годинної витрати палива $B_{\text{вх}(0,25)\text{вг}}$ для МОД 10L32/44CR потужністю 5970 кВт, питома витрата палива 176 г/(кВт год), упродовж рейсу "Шанхай-Сінгапур-Шанхай" (рис. 4).

Як видно, за рахунок зниження температури повітря на вході МОД на величину $\Delta t_{\text{вх}(0,25)\text{вг}} = 10 \dots 17^\circ\text{C}$ в ЕХМ, що використовує теплоту випускних газів $Q_{\text{h.вг}}$, витрати палива зменшуються на величину $B_{\text{вх}(0,25)\text{вг}} = 15 \dots 25$ кг/год для 10L32/44CR упродовж рейсу (рис. 4).

При цьому температура охолодженого повітря на вході МОД істотно вище $t_{a2} = 15^\circ\text{C}$, що спричинене значним дефіцитом $Q_{\text{h.вх}15(0,25)\text{д}}$ наявної теплоти випускних газів $Q_{\text{h.вг}}$ порівняно з необхідною $Q_{\text{h.вх}15(0,25)}$ для охолодження повітря до 15°C в ЕХМ ($\zeta = 0,25$): $Q_{\text{h.вх}15(0,25)\text{д}} = Q_{\text{h.вх}15(0,25)} - Q_{\text{h.вг}}$ (рис. 3).

Додаткове використання в ЕХМ теплоти наддувного повітря $Q_{\text{h.надув}}$ (рис. 4) практично забезпечує її потреби $Q_{\text{h.вх}15(0,25)} \approx 4$ МВт для охолодження повітря до $t_{a2} = 15^\circ\text{C}$ (рис. 3), про що свідчить їх сумарна кількість $Q_{\text{h.вг}+\text{надув}} = Q_{\text{h.вг}} + Q_{\text{h.надув}}$ (рис. 5).

В результаті охолодження повітря на вході МОД до $t_{a2} = 15^\circ\text{C}$ на величину $\Delta t_{\text{вх}(0,25)\text{вг}} = 15 \dots 20^\circ\text{C}$ за рахунок використання в ЕХМ теплоти випускних газів і наддувного повітря отримують значно більше зменшення погодинної витрати палива $B_{\text{вх}15} = 23 \dots 30$ кг/год (рис. 6).

Рис. 5. Значення теплоти випускних газів $Q_{\text{h.вг}}$, наддувного повітря $Q_{\text{h.надув}}$ та їх сума $Q_{\text{h.вг}+\text{надув}}$

Висновки

На прикладі рейсу "Шанхай-Сінгапур-Шанхай" показано, що через невисоку ефективність трансформації скидної теплоти випускних газів суднового МОД в ЕХМ отриманої холодопродуктивності недостатньо для охолодження повітря на вході до 15°C при експлуатації в тропічних умовах. Додаткове використання в ЕХМ ще й теплоти наддувного повітря дозволяє знизити температуру повітря на вході до 15°C і забезпечує практично вдвічі більше зменшення поточної витрати палива порівняно з використанням тільки теплоти випускних газів.

Рис. 4. Поточні значення зниження температури зовнішнього повітря на вході МОД $\Delta t_{\text{вх}(0,25)\text{вг}}$ при його охолодженні в ЕХМ, що використовує теплоту випускних газів $Q_{\text{h.вг}}$ ($\zeta = 0,25$), та відповідного зменшення годинної витрати палива $B_{\text{вх}(0,25)\text{вг}}$ для МОД 10L32/44CR упродовж рейсу "Шанхай-Сінгапур-Шанхай"

Рис. 6. Зниження температури повітря на вході МОД $\Delta t_{\text{вх}}$ при охолодженні до 15°C в ЕХМ, що використовує теплоту випускних газів і наддувального повітря $Q_{\text{н.надув}}$, та зменшення годинної витрати палива $B_{\text{вх}(0,25)\text{вг}}$

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.

Поступила в редакцію 14.12.2019, рассмотрена на редколлегии 20.01.2020

ОХЛАЖДЕНИЕ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ МАЛООБОРОТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ЭЖЕКТОРНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНОЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДНА В ТРОПИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Р. Н. Радченко, М. А. Пирисунько, Чен Нин, Хан Баочен

Проанализирована эффективность охлаждения воздуха на входе турбокомпрессора главного малооборотного двигателя транспортного судна при эксплуатации в тропических климатических условиях на рейсовой линии Шанхай-Сингапур-Шанхай. Особенностью тропического климата является высокая относительная влажность воздуха, соответственно, и влагосодержание при одновременно высоких его температурах. Исследовано охлаждение воздуха на входе малооборотного двигателя эжекторной холодильной машиной путем трансформации в холод сбросной теплоты выпускных газов. Эжекторную холодильную машину применено как конструктивно наиболее простую и надежную в эксплуатации. Однако эффективность трансформации теплоты в холод эжекторными холодильными машинами невысока - невысокие тепловые коэффициенты. Предложено и проанализировано схемно-конструктивное решение системы охлаждения воздуха на входе судового главного двигателя с использованием теплоты выпускных газов эжекторной холодильной машиной. Эффект от использования теплоты выпускных газов для охлаждения воздуха на входе двигателя проанализированы с учетом переменных климатических условий в течение рейса судна. Показано, что из-за недостаточно высокой эффективности трансформации сбросной теплоты выпускных газов эжекторной хо-

лодильной машиной (невысокие тепловые коэффициенты) полученной холодопроизводительности недостаточно для охлаждения воздуха на входе турбокомпрессора при эксплуатации судового двигателя в тропических климатических условиях. Поэтому рассмотрена возможность дополнительного использования эжекторной холодильной машиной еще и теплоты наддувочного воздуха, которая отводится охлаждающей водой. Показано, что использование для охлаждения воздуха на входе двигателя в эжекторной холодильной машине совместно теплоты выпускных газов и наддувочного воздуха позволяет практически вдвое снизить температуру воздуха на входе главного двигателя на 20-30 °C при эксплуатации судна в тропических климатических условиях на рейсовом линии Шанхай-Сингапур-Шанхай. Это в свою очередь обеспечивает почти двойное уменьшение расхода топлива по сравнению с его уменьшением в случае использования эжекторной холодильной машиной только теплоты выпускных газов.

Ключевые слова: охлаждение; воздух; эжекторная холодильная машина; выпускные газы.

LOW-SPEED ENGINE INLET AIR COOLING BY EJECTOR CHILLER WHEN OPERATING THE SHIP IN TROPICAL CONDITIONS

R. M. Radchenko, M. A. Pyrysunko, Chen Ning, Han Baochen

The efficiency of air cooling at the inlet of the main low-speed engine turbocharger of a transport vessel during operation in tropical climatic conditions on the Shanghai-Singapore-Shanghai route was analyzed. A feature of the tropical climate is the high relative humidity, respectively, moisture content at its simultaneously high temperatures. The cooling of the air at the inlet of a low-speed engine with an ejector chiller by transforming the waste heat of exhaust gases into cold was studied. The ejector chiller is used as the most simple and reliable in operation. However, the efficiency of the transformation of heat into cold by ejector chillers is low - low thermal coefficients. A design solution of the system for cooling air at the inlet of the ship's main engine using the heat of the exhaust gases by an ejector chiller is proposed and analyzed. The effect of using the heat of the exhaust gases to cool the air at the engine inlet is analyzed taking into account the variable climatic conditions during the voyage of the vessel. It is shown that because of the insufficiently high efficiency of transforming the waste heat of the exhaust gases by an ejector chiller (low thermal coefficients), the obtained cooling capacity is not sufficient for cooling the air at the inlet of the turbocompressor during operation of a marine engine in tropical climatic conditions. Therefore, the possibility of use in the ejector chiller of additional heat of charge air, which is removed by cooling water, is also considered. It is shown that the use of the heat of exhaust gases and charge air for cooling the air at the engine inlet in an ejector chiller makes it possible to double decrease the air temperature at the inlet of the main engine by 20-30 °C when the vessel operates in tropical climatic conditions on a voyage lines Shanghai-Singapore-Shanghai. This, in turn, provides an almost twice fuel consumption reduction in compared with its reduction in the case when the ejector chiller uses only the heat of the exhaust gases.

Keywords: cooling; air; ejector chiller; exhaust gas.

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

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

Чен Нін – доцент, Цзяньсунський університет науки і технології, Цзеньцзянь, КНР.

Хан Баочен – магістрант Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

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.

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

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

Han Baochen – magister of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com.