

УДК 621.57

Р. Н. РАДЧЕНКО

Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Украина

АНАЛИЗ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВАРИАНТОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ЦИКЛОВОГО ВОЗДУХА МАЛООБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ ТРАНСПОРТНОГО СУДНА

Выполнено сравнение эффективности вариантов охлаждения циклового воздуха малооборотного дизеля (МОД): на входе турбокомпрессора и наддувочного воздуха на входе в цилиндры МОД, теплоиспользующей холодильной машины на примере климатических условий эксплуатации судна на рейсовой линии Одесса–Йокогама. Для охлаждения воздуха на входе турбокомпрессора использовали теплоту наддувочного воздуха и выпускных газов, а в случае охлаждения наддувочного воздуха – только его теплоту. Определены значения снижения температуры циклового воздуха и соответствующего сокращения удельного и полного расходов топлива дизеля с учетом изменения температуры и влажности наружного воздуха и забортной воды в течение рейса.

Ключевые слова: *судовой малооборотный дизель, охлаждение, воздух на входе турбокомпрессора, наддувочный воздух, утилизация тепла, эжекторная холодильная машина, низкокипящее рабочее тело.*

1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

На большинстве транспортных судов в качестве главных двигателей применяются малооборотные дизели (МОД). Повышение в течение рейса температуры $t_{нв}$ наружного воздуха, соответственно, воздуха в машинном отделении (МО) $t_{МО}$ (в теплое время $t_{МО} = t_{нв} + 10^\circ\text{C}$ [1]) и на входе наддувочного турбокомпрессора (ТК) МОД $t_{в1} = t_{МО}$, а также забортной воды $t_{зв}$, охлаждающей наддувочный воздух, ухудшает топливную эффективность МОД [1, 2]. При этом возрастают потери теплоты с выпускными газами и наддувочным воздухом. С целью повышения топливной экономичности МОД целесообразно использовать их теплоту для охлаждения циклового воздуха МОД: на входе ТК и наддувочного воздуха [3, 4]. Наиболее простыми и надежными являются теплоиспользующие эжекторные холодильные машины (ТЭХМ). Применение в ТЭХМ низкокипящих рабочих тел (НРТ) позволяет охлаждать воздух до сравнительно низких температур.

Цель работы – сравнение эффективности вариантов охлаждения воздуха на входе МОД и наддувочного воздуха при эксплуатации судна на конкретной рейсовой линии.

2. Результаты исследования

В качестве примера транспортного судна рассмотрен балкер типа "Киев" с главным двигателем МОД 6S60MC6.1-TI фирмы MAN [2]: номинальная мощность $N_n = 12,24$ МВт, эксплуатационная $N_3 = 10$ МВт. Глубина

охлаждения воздуха на входе ТК МОД или наддувочного воздуха на входе в цилиндры МОД и, соответственно, получаемый эффект зависят от располагаемой сбросной теплоты МОД (выпускных газов, наддувочного воздуха и др.) и эффективности ее преобразования в холод в ТХМ, т.е. теплового коэффициента ζ , который представляет собой отношение холодопроизводительности Q_0 (расхода холода на охлаждение воздуха на входе МОД или наддувочного воздуха) к располагаемой теплоте Q_r выпускных газов, наддувочного воздуха и др.: $\zeta = Q_0/Q_r$. Значение ζ зависит от типа холодильной машины: эжекторная (ТЭХМ), водоаммиачная абсорбционная (ВАХМ) или абсорбционная бромистолитиевая (АБХМ), и температур цикла ТХМ: кипения НРТ в испарителе t_0 , генераторе t_r и конденсации t_k . Так, $\zeta = 0,2 \dots 0,35$ для ТЭХМ на хладоне R142b при $t_0 = 2 \dots 5^\circ\text{C}$; $\zeta = 0,5 \dots 0,6$ для ВАХМ и $\zeta = 0,7 \dots 0,8$ для АБХМ.

Эффект от охлаждения наддувочного воздуха оценивают по снижению температуры воздуха в ТХМ по сравнению с его охлаждением забортной водой: $\Delta t_v = t_{вв2} - t_{в2}$, где $t_{вв2}$ – температура наддувочного воздуха при охлаждении забортной водой.

При избытке располагаемого тепла и с учетом разности температур между воздухом и хладагентом ($t_0 \approx 5^\circ\text{C}$) в воздухоохладителе (ВО) на входе ТК за минимальную температуру охлажденного воздуха можно принять $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$. Тогда потенциально возможное снижение температуры воздуха на входе ТК: $\Delta t_{в15} = t_{в1} - 15^\circ\text{C}$, где $t_{в1} = t_{МО} = t_{нв} + 10^\circ\text{C}$.

Для наддувочного воздуха потенциально возможное охлаждение воздуха (по сравнению с его охлаждением забортной водой до $t_{вв2}$): $\Delta t_{в15} = t_{вв2} - 15^\circ\text{C}$ (до $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$), а реальное

$\Delta t_{b2} = t_{bb2} - t_{b2}$ (исходя из теплоты наддувочного воздуха и теплового коэффициента $\zeta = 0,2$ для ТЭХМ при температуре кипения R142b $t_0 = 2^\circ\text{C}$).

Температура $t_{нв}$ и относительная влажность $\phi_{нв}$ наружного воздуха, температуры воздуха на входе t_{b1} и выходе t_{b2} охладителя ТЭХМ, снижение температуры воздуха Δt_b в охладителе ТЭХМ на входе МОД, рассчитанные исходя из располагаемой сбросной теплоты ($\zeta = 0,35$ для ТЭХМ при $t_0 \approx 5^\circ\text{C}$), а также потенциально возможное снижение температуры воздуха Δt_{b15} при его охлаждении от текущей t_{b1} до минимальной температуры $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$ в течение рейса Одесса–Йокогама (1.07.2009 ... 27.07.2009) приведены на рис. 1, а. При этом в ТЭХМ используется теплота выпускных газов МОД и наддувочного воздуха, а $\zeta = 0,35$ для ТЭХМ на хладоне R142b при $t_0 = 5^\circ\text{C}$.

Соответствующие температуры для варианта охлаждения наддувочного воздуха (при трансформации теплоты только наддувочного воздуха в ТЭХМ с тепловым коэффициентом $\zeta = 0,2$) приведены на рис. 1, б.

О реальном Δt_b (за счет утилизации в ТЭХМ располагаемой теплоты $Q_{г.р}$ выпускных газов и наддувочного воздуха) и потенциальном Δt_{b15} (при $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$) снижении температуры воздуха на входе МОД, соответственно располагаемой Q_0 и требуемой (при $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$) $Q_{0.15}$ холодопроизводительностях можно судить по рис. 2, а. Для варианта охлаждения наддувочного воздуха значения располагаемой холодопроизводительности $Q_{0p(0,2)}$, $Q_{0p(0,6)}$ и $Q_{0p(0,7)}$, получаемой трансформацией теплоты наддувочного воздуха в холод при разных тепловых коэффициентах: $\zeta = 0,2$

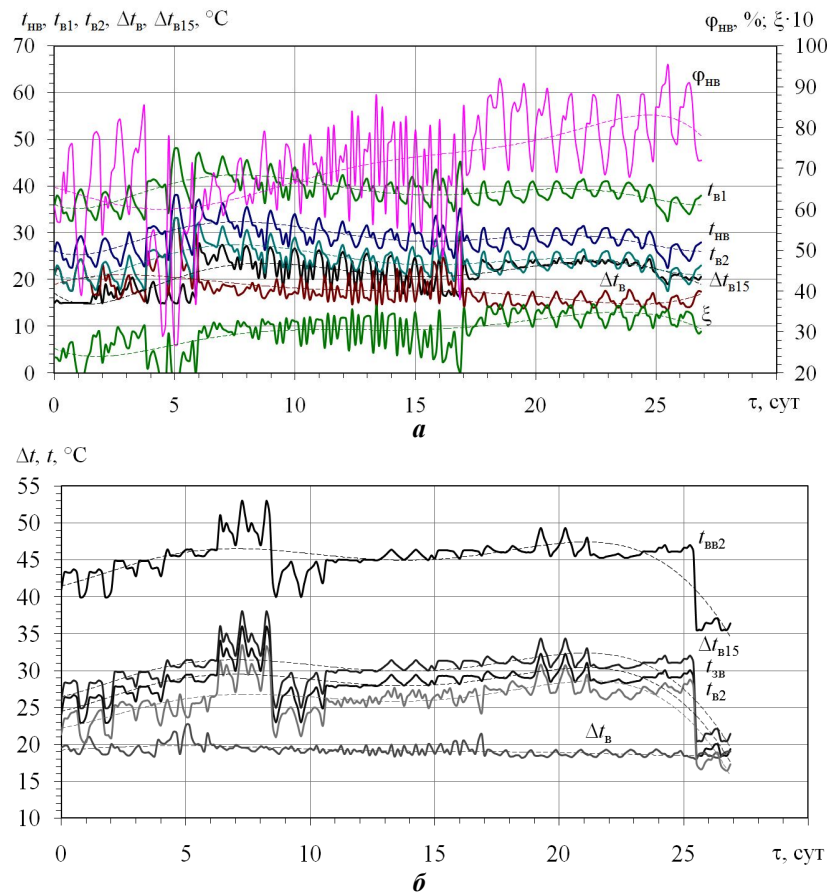


Рис. 1. Температура $t_{нв}$ и относительная влажность $\phi_{нв}$ наружного воздуха, температуры воздуха на входе t_{b1} и выходе t_{b2} воздухоохладителя ТЭХМ, снижение температуры воздуха Δt_b (располагаемое) в воздухоохладителе на входе МОД, коэффициенты влаговываждения ζ , а также потенциально возможное снижение температуры воздуха Δt_{b15} при его охлаждении от t_{b1} до $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$ для охлаждения воздуха на входе МОД при трансформации теплоты выпускных газов и наддувочного воздуха (а), температуры наддувочного воздуха, охлажденного ТЭХМ t_{b2} и водяном ОНВ традиционной системы охлаждения t_{bb2} , потенциально возможное снижение температуры наддувочного воздуха $\Delta t_{b15} = t_{bb2} - 15^\circ\text{C}$ (до $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$) и реальное ее снижение в ТЭХМ $\Delta t_b = t_{bb2} - t_{b2}$ (исходя из располагаемой сбросной теплоты наддувочного воздуха и $\zeta = 0,2$ для ТЭХМ на R142b при $t_0 = 2^\circ\text{C}$) при температуре заборной воды $t_{3в}$ (б) в течение рейса Одесса–Йокогама (1.07...27.07.2009)

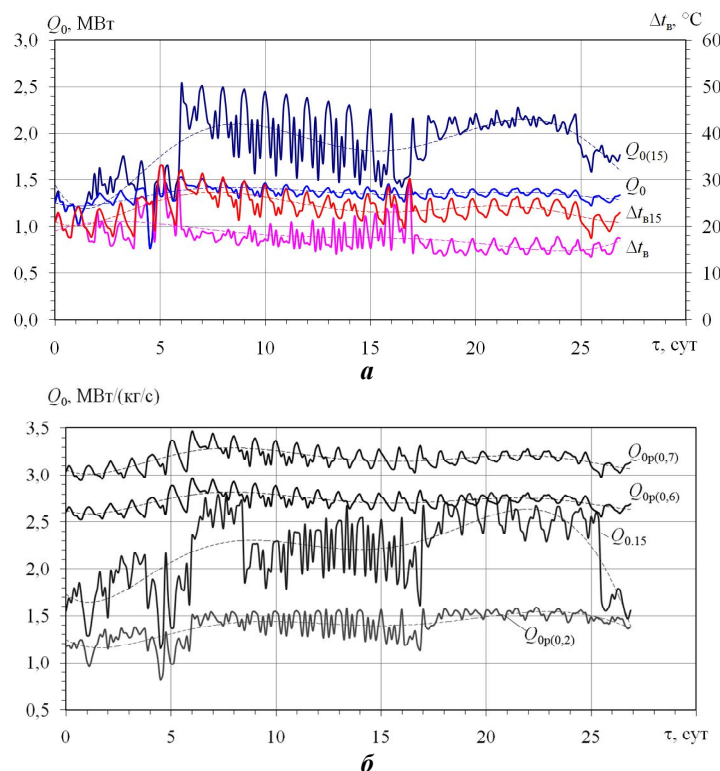


Рис. 2. Снижение температуры воздуха Δt_B (располагаемое) в ТЭХМ на входе МОД 6S60MC6.1-TI и потенциально возможное Δt_{B15} (при его охлаждении до $t_{B2} = 15^\circ\text{C}$), соответствующие располагаемые Q_0 и требуемые (для поддержания $t_{B2} = 15^\circ\text{C}$) $Q_{0.15}$ холодопроизводительности для охлаждения воздуха на входе МОД при трансформации теплоты выпускных газов и наддувочного воздуха (а), а также значения холодопроизводительности $Q_{0.15}$, необходимой для охлаждения наддувочного воздуха до температуры $t_{B2} = 15^\circ\text{C}$, располагаемой холодопроизводительности $Q_{0p(0,2)}$, $Q_{0p(0,6)}$ и $Q_{0p(0,7)}$, исходя из теплоты наддувочного воздуха и ее трансформации в холод при разных тепловых коэффициентах: $\zeta = 0,2$ (ТЭХМ), $0,6$ (ВАХМ) и $0,7$ (АБХМ) в течение рейса Одесса–Йокогама (1.07...27.07.2009)

(ТЭХМ при $t_0 = 2^\circ\text{C}$), $\zeta = 0,6$ (ВАХМ) и $\zeta = 0,7$ (АБХМ) приведены на рис. 2, б.

Из рис. 1, а и 2, а видно, что потенциально возможное снижение температуры воздуха на входе МОД до $t_{B2} = 15^\circ\text{C}$ составляет $\Delta t_{B15} = 25...30^\circ\text{C}$, тогда как реальное, за счет утилизации располагаемой теплоты выпускных газов и наддувочного воздуха в ТЭХМ ($\zeta = 0,35$), гораздо меньше: $\Delta t_B = 15...20^\circ\text{C}$. Соответственно соотносятся требуемая (потенциальная) $Q_{0.15}$ и располагаемая холодопроизводительности ТЭХМ $Q_{0p(0,35)}$ при $\zeta = 0,35$ (рис. 2, а).

Для варианта охлаждения наддувочного воздуха (рис. 2, б) при трансформации теплоты только наддувочного воздуха в ТЭХМ ($\zeta = 0,2$) располагаемая холодопроизводительность $Q_{0p(0,2)}$ в 1,5 раза меньше ее величины $Q_{0.15}$, необходимой для охлаждения наддувочного воздуха до $t_{B2} = 15^\circ\text{C}$, тогда как применение более эффективных ВАХМ с $\zeta = 0,6$ или АБХМ с $\zeta = 0,7$ позволяет получать холодопроизводительности $Q_{0p(0,6)}$ и $Q_{0p(0,7)}$, достаточные для покрытия требуемых затрат холода $Q_{0.15}$, причем за счет теплоты только наддувочного воздуха. Такого

же эффекта можно достигать, используя для ТЭХМ дополнительные источники тепла (выпускные газы, горячую воду контура высокотемпературного охлаждения двигателя и др.).

Несмотря на то, что в рассмотренных вариантах для охлаждения наддувочного воздуха в ТЭХМ (при $\zeta = 0,2$) используют только его теплоту, тогда как для воздуха на входе ТК – еще и теплоту выпускных газов (при $\zeta = 0,35$), снижение температуры наддувочного воздуха (по сравнению с его охлаждением заборной водой до t_{B2}) как реальное $\Delta t_{B2} = t_{B2} - t_{B2}$, так и потенциальное $\Delta t_{B15} = t_{B1} - 15^\circ\text{C}$ (до $t_{B2} = 15^\circ\text{C}$), больше, чем величины $\Delta t_B = t_{B1} - t_{B2}$ и $\Delta t_{B15} = t_{B1} - 15^\circ\text{C}$ при охлаждении воздуха на входе ТК, поскольку температура наддувочного воздуха, охлажденного заборной водой t_{B2} , больше исходной температуры воздуха на входе ТК $t_{B1} = t_{M0}$ (рис. 1).

Расходы топлива абсолютный B_T и удельный b_e в соответствии с уменьшением температуры воздуха на входе ТК и наддувочного воздуха рассчитывали по программе фирмы MAN, согласно которой снижение температуры воздуха на входе ТК МОД на

величину $\Delta t_b = 10^\circ\text{C}$ приводит к уменьшению удельного расхода топлива b_e примерно на $1,2 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$, а для наддувочного воздуха – $1,0 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$ [2].

Как видно из рис. 3,а, если использование теплоты выпускных газов и наддувочного воздуха в ТЭХМ ($\zeta = 0,35$) для охлаждения воздуха на входе обеспечивает уменьшение удельного расхода топлива $\Delta b_e = 1,5 \dots 2,5 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$, то при глубоком охлаждении воздуха на входе (до $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$) $\Delta b_{e15} = 2,5 \dots 3,5 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$. При этом потенциально возможная экономия топлива за рейс Одесса–Йокогама (1.07.2009...27.07.2009) для МОД 6S60MC6.1-Т1 (10 МВт) составляет примерно $B_{T15} = 19 \text{ т}$ (при охлаждении воздуха на входе до $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$) против $B_T = 14 \text{ т}$ за счет трансформации теплоты выпускных газов и наддувочного воздуха в ТЭХМ ($\zeta = 0,35$). Использование дополнительных источников теплоты (горячей воды контура высокотемпературного охлаждения двигателя) или применением более эффективных ТХМ – с большим тепловым коэффициентом

ζ (АБХМ или ВАХМ) обеспечит $30 \dots 40 \%$ приращение экономии топлива по сравнению с ТЭХМ.

Для варианта охлаждения наддувочного воздуха использование только его теплоты в ТЭХМ ($\zeta = 0,2$) обеспечивает уменьшение удельного расхода топлива $\Delta b_e = 2,0 \dots 2,5 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$, тогда как при глубоком охлаждении наддувочного воздуха (до $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$) $\Delta b_{e15} = 3,0 \dots 4,0 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$. При этом потенциально возможная экономия топлива за рейс составляет примерно $B_{T15} = 23 \text{ т}$ (при охлаждении наддувочного воздуха до $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$) против $B_T = 15 \text{ т}$ за счет трансформации теплоты только наддувочного воздуха в ТЭХМ ($\zeta = 0,2$). Использование дополнительных источников теплоты (выпускных газов, горячей воды контура высокотемпературного охлаждения двигателя) или применение более эффективных ТХМ – с большим тепловым коэффициентом ζ : АБХМ ($\zeta = 0,7 \dots 0,8$) или ВАХМ ($\zeta = 0,4 \dots 0,6$) вместо ТЭХМ обеспечит приращение экономии топлива в 1,5 раза.

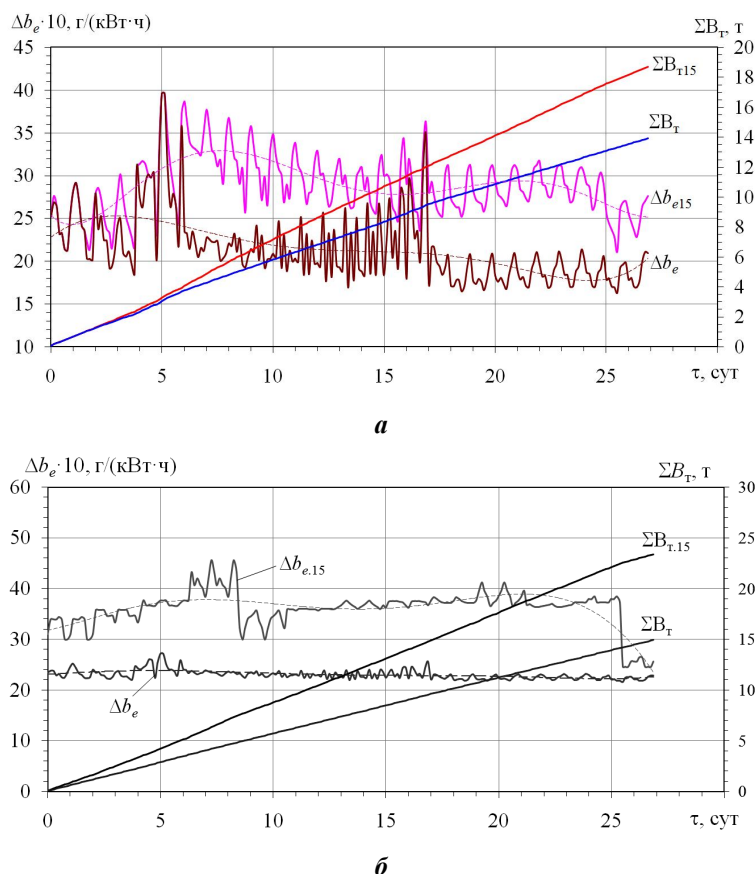


Рис. 3. Значения уменьшения удельного расхода топлива Δb_e и суммарной экономии топлива ΣB_T за счет охлаждения воздуха на входе МОД 6S60MC6.1-Т1 (10 МВт) трансформацией теплоты выпускных газов и наддувочного воздуха в ТЭХМ ($\zeta = 0,35$), а также потенциально возможных Δb_{e15} и ΣB_{T15} при охлаждении воздуха на входе МОД до температуры $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$ (а), а также Δb_e и ΣB_T при охлаждении наддувочного воздуха трансформацией теплоты наддувочного воздуха в ТЭХМ ($\zeta = 0,2$) и потенциально возможных Δb_{e15} и ΣB_{T15} при охлаждении наддувочного воздуха до температуры $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$ в течение рейса Одесса–Йокогама (1.07.2009...27.07.2009): Δb_e и ΣB_T – действительные в ТЭХМ; Δb_{e15} и ΣB_{T15} – потенциальные при $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$

Выводы

Выполнено сравнение эффективности вариантов охлаждения воздуха на входе ТК МОД и наддувочного воздуха в ТЭХМ для климатических условий эксплуатации судна на рейсовой линии Одесса–Йокогама. Определены значения снижения температуры циклового воздуха и соответствующего сокращения удельного и полного расходов топлива дизеля. Показано, что использование дополнительных источников теплоты или применение более эффективных АБХМ или ВАХМ обеспечит 30...50 % приращение экономии топлива по сравнению с ТЭХМ.

Литература

1. *Influence of Ambient Temperature Conditions on Main Engine Operation [Text]*. – MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark. – 2010. – 15 p.
2. *MAN B&W ME/ME-C/ME-GI/ME-B-TII engines [Text]*. – Copenhagen, Denmark: MAN Diesel. – 2010. – 389 p.
3. *Оценка потенциала охлаждения воздуха на входе малооборотного дизеля транспортного судна [Текст] / Р. Н. Радченко, А. А. Стахель, Н. И. Радченко, А. А. Сирота // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 7 (104). – С. 127–132.*
4. *Потенциал охлаждения наддувочного воздуха малооборотного дизеля транспортного судна [Текст] / Н. И. Радченко, А. А. Сирота, Р. Н. Радченко, Д. В. Коновалов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 8 (105). – С. 67–72.*

Поступила в редакцию 14.08.2014, рассмотрена на редколлегии 10.09.2014

Рецензент: д-р техн. наук, профессор В. А. Голиков, Одесская национальная морская академия.

АНАЛІЗ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ВАРІАНТІВ ОХОЛОДЖЕННЯ ЦИКЛОВОГО ПОВІТРЯ МАЛООБОРТОВОГО ДИЗЕЛЯ ТРАНСПОРТНОГО СУДНА

Р. М. Радченко

Виконано порівняння ефективності варіантів охолодження циклового повітря малооборотного дизеля (МОД): на вході турбокомпресора і наддувочного повітря на вході в циліндри МОД, тепловикористовуючої холодильної машини на прикладі кліматичних умов експлуатації судна на рейсовій лінії Одеса–Йокогама. Для охолодження повітря на вході турбокомпресора використовували теплоту наддувочного повітря і випускних газів, а у випадку охолодження наддувочного повітря – тільки його теплоту. Визначено значення зниження температури циклового повітря і відповідного скорочення питомої і повної витрат палива дизеля з урахуванням зміни температури і вологості зовнішнього повітря і забортної води протягом рейсу.

Ключові слова: судновий малооборотний дизель, охолодження, повітря, утилізація теплоти, турбокомпресор, ежекторна холодильна машина, низькокипляче робоче тіло.

ANALYSIS OF ALTERNATIVE VARIANTS FOR COOLING OF CYCLIC AIR OF LOW SPEED DIESEL ENGINE OF TRANSPORT SHIP

R. N. Radchenko

Comparing of efficiency of variants for cooling of cyclic air of marine low speed diesel engine (LDE): at the inlet of turbocompressor and scavenge air at the inlet of LDE cylinders by waste heat recovery cooling machine at the climate conditions of ship performance on the rout line Odessa–Yokogama as an example has been made. To cool turbocompressor intake air the heat of scavenge air and exhaust gas was used and in the case of scavenge air cooling – only the heat of itself. The values of cyclic air temperature drop and corresponding decrease in specific and full fuel consumption of diesel engine according to changing temperature and relative humidity of ambient air temperature and sea water temperature on the rout line were determined.

Key words: marine low speed diesel engine, cooling, turbocompressor intake air, scavenge air, utilizing of heat, ejector cooling machine, low boiling working fluid.

Радченко Роман Николаевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.