

УДК 621.57

Р.Н. РАДЧЕНКО¹, А. СТАХЕЛЬ², Н.И. РАДЧЕНКО¹, А.А. СИРОТА³¹ *Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина*² *Западно-Померанский технологический университет, Щецин, Польша*³ *Черноморский государственный университет им. П. Могилы, Николаев, Украина*

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ МАЛООБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ ТРАНСПОРТНОГО СУДНА

Выполнена оценка потенциально возможного в климатических условиях эксплуатации судна на конкретной рейсовой линии снижения температуры воздуха на входе турбокомпрессора малооборотного дизеля и реально достижимого – исходя из располагаемой сбросной теплоты дизеля, трансформируемой в холод теплоиспользующей холодильной машиной. Определены значения снижения температуры воздуха на входе турбокомпрессора, соответствующего сокращения удельного и полного расхода топлива главного дизеля на рейсовой линии Одесса–Йокогама с учетом изменения температуры и влажности наружного воздуха.

Ключевые слова: *судовой малооборотный дизель, охлаждение воздуха, утилизация тепла, турбокомпрессор, эжекторная холодильная машина, низкокипящее рабочее тело.*

1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

В качестве главных двигателей на подавляющем большинстве транспортных судов применяются малооборотные дизели (МОД). Изменение в течение рейса температуры $t_{нв}$ и влажности ϕ наружного воздуха, следовательно, и воздуха в машинном отделении (МО) и на входе наддувочного турбокомпрессора (ТК) МОД, существенно влияет на топливную эффективность МОД. Так, повышение температуры воздуха на входе ТК МОД на 10 °С вызывает возрастание удельного расхода топлива b_e на 0,5...0,7 % [1–3]. При этом возрастают температура выпускных газов после турбины ТК и, следовательно, потери теплоты с ними. Поэтому представляется целесообразным использовать теплоту выпускных газов в холодильных машинах для охлаждения воздуха на входе ТК с целью повышения топливной экономичности МОД.

Наиболее простыми и надежными в эксплуатации являются теплоиспользующие эжекторные холодильные машины (ТЭХМ), в которых функцию компрессора выполняет струйный аппарат – эжектор. Применение в ТЭХМ низкокипящих рабочих тел (НРТ) позволяет охлаждать воздух на входе ТК МОД до сравнительно низких температур и за счет этого повышать топливную экономичность МОД.

Целью исследования является оценка снижения температуры воздуха на входе ТК МОД потенциально возможного в климатических условиях эксплуатации судна на конкретной рейсовой линии и

реально достижимого – исходя из располагаемой сбросной теплоты МОД, трансформируемой в холод теплоиспользующей холодильной машиной.

2. Результаты исследования

В качестве примера транспортного судна рассмотрен балкер типа "Киев" с главным двигателем МОД 6S60MC6.1-TI корпорации MAN [2]: номинальная мощность $N_n = 12240$ кВт, эксплуатационная $N_s = 9790$ кВт. Глубина охлаждения воздуха на входе ТК судового МОД с помощью ТХМ и, соответственно, получаемый эффект от его применения зависят от располагаемой теплоты выпускных газов МОД в виде генерируемого утилизационным котлом (УК) водяного пара, остающейся после покрытия потребностей судовой энергетической установки и всего судна в тепловой энергии, а также от эффективности ее преобразования в холод в ТХМ, т.е. теплового коэффициента ζ . Тепловой коэффициент ζ представляет собой отношение холодопроизводительности Q_0 (теплоты, отведенной от воздуха в воздухоохладителе (ВО) на входе МОД) к располагаемой теплоте выпускных газов Q_r : $\zeta = Q_0/Q_r$. Для ТЭХМ: $\zeta = 0,30...0,35$, водоаммиачных абсорбционных холодильных машин (ВАХМ): $\zeta = 0,50...0,60$, абсорбционных бромистолитиевых (АБХМ): $\zeta = 0,70...0,80$.

В теплое время объемы потребления пара на балкере типа "Киев" составляют около 25 % производительности УК [4], и 75 % теплоты производимого в УК пара может быть использовано в ТХМ для охлаждения воздуха на входе ТК МОД.

Кроме того, снижение температуры воздуха в ВО на входе ТК МОД $\Delta t_b = t_{b1} - t_{b2}$ зависит от исходных температуры $t_{b1} = t_{MO}$ и относительной влажности ϕ воздуха на входе ВО, т.е. воздуха в машинном отделении (МО), зависящих от параметров наружного воздуха $t_{нв}$ и $\phi_{нв}$, т.е. климатических условий плавания. Температура воздуха в МО t_{MO} в теплое время превышает наружную на 10°C [1, 3]. Температура t_{b2} , которая ограничивает глубину охлаждения воздуха в ВО на входе ТК, в свою очередь, зависит от температуры хладоносителя t_x . В случае применения ТЭХМ в качестве хладоносителя используется НРТ, например хладон R142b. Температуру кипения R142b в испарителе НРТ-охладителя воды (И-ОВ) промежуточного водяного контура охлаждения желательнo удерживать $t_0 = 2...5^\circ\text{C}$. Минимальную разность температур между водой, охлажденной в И-ОВ, т.е. промежуточным хладоносителем на выходе из И-ОВ (на входе ВО), и кипящим НРТ можно принимать $\Delta t_{И-ОВ} = t_{w1} - t_0 = 5^\circ\text{C}$, а между воздухом, охлажденным в ВО, и хладоносителем – $\Delta t_{ВО} = t_{b2} - t_{w1} = 8...10^\circ\text{C}$. С учетом этого глубина охлаждения воздуха в ВО ТЭХМ ограничивается минимальной температурой $t_{b2} = t_0 + \Delta t_{И-ОВ} + \Delta t_{ВО} = 15^\circ\text{C}$. В случае отсутствия промежуточного водяного контура и испарения НРТ непосредственно в И-ВО на входе ТК: $t_{b2} = t_0 + \Delta t_{И-ВО} = 10...15^\circ\text{C}$.

Таким образом, потенциально возможная величина снижения температуры воздуха на входе ТК МОД – до $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$ (для ТЭХМ и ВАХМ), составляет $\Delta t_{b15} = t_{MO} - 15^\circ\text{C}$ и она же соответственно определяет потенциальные (требуемые) холодопроизводительность ТХМ $Q_{0,15}$ и теплоту выпускных газов $Q_{г,15} : Q_{г,15} = Q_{0,15} / \xi$. При этом

$$Q_{0,15} = G_b \cdot \xi \cdot c_b \cdot \Delta t_{b15},$$

где G_b – расход воздуха через ВО на входе ТК МОД; c_b – теплоемкость влажного воздуха; ξ – коэффициент влаговываждения,

$$\xi = (I_{b1} - I_{b2}) / [c_{вл} \cdot (t_{b1} - t_{b2})],$$

где I_{b1} и I_{b2} – энтальпии влажного воздуха на входе и выходе из охладителя, т.е. отношение полного количества теплоты (разности энтальпий воздуха в охладителе), отведенной от влажного воздуха, к количеству явной теплоты, определяемому разностью температур по сухому термометру $\Delta t_b = t_{b1} - t_{b2}$.

Если потенциальную холодо - производительность ТХМ $Q_{0,15}$ находят исходя из потенциально возможного снижения температуры Δt_{b15} воздуха на входе ТК МОД (до $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$ для ТЭХМ и ВАХМ), то реальную (действительную) холодопроизводительность $Q_{0,p}$ – из располагаемой теплоты выпускных газов (и наддувочного воздуха) $Q_{г,p}$:

$Q_{0,p} = \zeta Q_{г,p}$, а уже из нее определяют реальную (действительную) величину снижения температуры воздуха в ВО на входе МОД: $\Delta t_b = Q_{0,p} / (G_b \cdot \xi \cdot c_b)$, и температуру охлажденного воздуха на входе ТК МОД $t_{b2} = t_{b1} - \Delta t_b = t_{MO} - Q_{0,p} / (G_b \cdot \xi \cdot c_b)$.

Рассмотрена рейсовая линия Одесса–Йокогама. Значения температуры t и относительной влажности ϕ наружного воздуха в течение рейса брали по данным метеоцентра, фиксируемым каждые 3 часа. Для каждого промежутка времени и соответствующих ему температуры $t_{нв}$ и относительной влажности $\phi_{нв}$ наружного воздуха рассчитывали процессы охлаждения воздуха в охладителе от температуры воздуха на входе охладителя: $t_{b1} = t_{MO} = t_{нв} + 10^\circ\text{C}$, до температуры t_{b2} и вычисляли значение коэффициента влаговываждения ξ . Расход воздуха G_b через ТК рассчитывали по программе корпорации MAN для конкретного двигателя в зависимости от температуры воздуха t_{b2} на входе ТК [2].

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, и соответствующие коэффициенты влаговываждения ξ , а также потенциально возможное снижение температуры воздуха Δt_{b15} при его охлаждении от t_{b1} до минимальной температуры $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$ (для ТЭХМ) течение рейса Одесса–Йокогама (1.07.2009...27.07.2009) приведены на рис. 1. При этом в ТЭХМ используется теплота выпускных газов МОД после ТК и наддувочного воздуха, а тепловой коэффициент ТЭХМ составляет $\zeta = 0,35$ при температуре кипения хладоне R142b в И-ВО $t_0 = 5^\circ\text{C}$.

Как видно, реальное снижение температуры воздуха Δt_b на входе МОД (трансформацией теплоты выпускных газов и наддувочного воздуха в ТЭХМ) меньше потенциально возможного Δt_{b15} , причем их различие больше при высоких $\xi = 3,0...3,5$ ($\phi \geq 80\%$, 20...25.07.2009).

На рис. 2 приведены значения снижения температуры воздуха в ВО Δt_b (реальные), удельные теплота, отведенная от выпускных газов и наддувочного воздуха в генераторе ТЭХМ \bar{q}_g , и холодопроизводительность ТЭХМ \bar{q}_0 , приходящиеся на единицу расхода газов (воздуха), коэффициент эжекции U и тепловой коэффициент ζ ТЭХМ в зависимости от температуры t_r и давления P_r кипения R142b в генераторе ТЭХМ при разных коэффициентах влаговываждения ξ , температуре кипения R142b в испарителе $t_0 = 5^\circ\text{C}$.

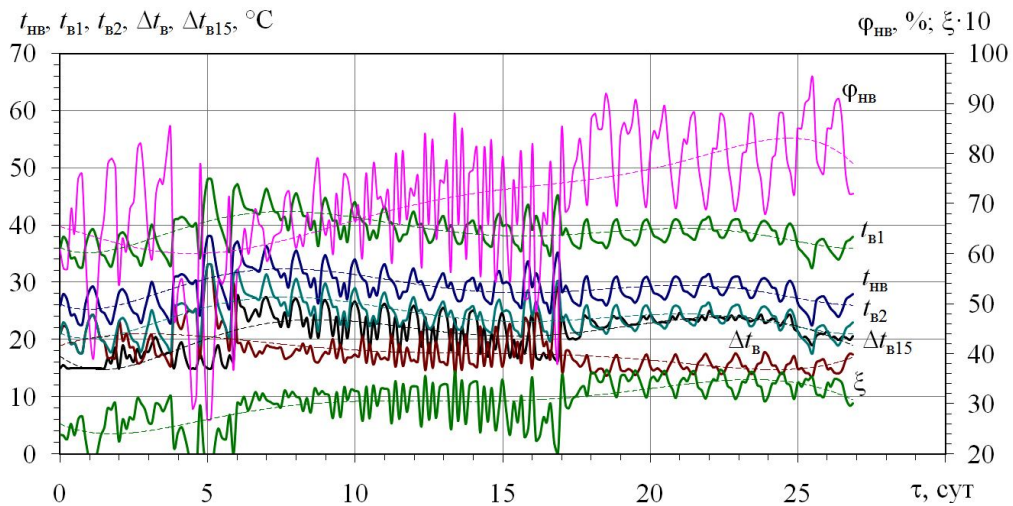


Рис. 1. Температура $t_{нв}$ и относительная влажность $\phi_{нв}$ наружного воздуха, температуры воздуха на входе $t_{в1}$ и выходе $t_{в2}$ воздухоохладителя ТЭХМ, снижение температуры воздуха $\Delta t_{в}$ (располагаемое) в воздухоохладителе на входе МОД, коэффициенты влаговывадения ξ , а также потенциально возможное снижение температуры воздуха $\Delta t_{в15}$ при его охлаждении от $t_{в1}$ до $t_{в2} = 15$ °C)

$$\Delta t_{в}, \text{ } ^\circ\text{C}, U \cdot 10^2, \zeta \cdot 10^2$$

$$\bar{q}_r \cdot 10^{-1}, \text{ кВт/(кг/с)}$$

$$\bar{q}_0, \text{ кВт/(кг/с)}$$

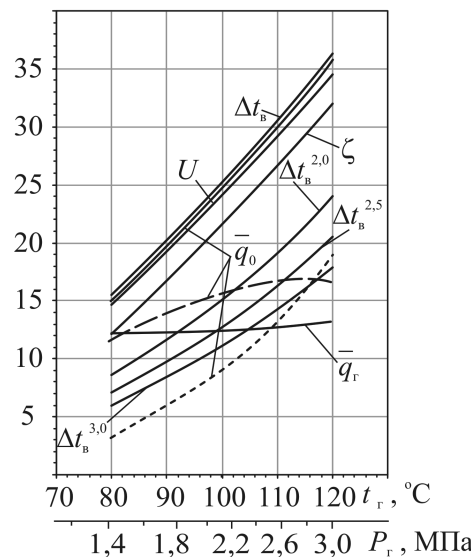


Рис. 2. Удельные теплота, отведенная от выпускных газов и наддувочного воздуха в генераторе ТЭХМ \bar{q}_r , и холодопроизводительность ТЭХМ \bar{q}_0 , коэффициент эжекции U и тепловой коэффициент ζ , снижение температуры воздуха $\Delta t_{в}$ в ВО на входе ТК в зависимости от температуры t_r и давления P_r кипения R142b в генераторе при разных ξ : $\Delta t_{в} \dots \Delta t_{в}^{2,5} - \xi = 1,0 \dots 2,5$; --- холодопроизводительность испарительной секции генератора (теплота выпускных газов); - - - - экономайзерной секции (наддувочный воздух); — генератора в целом

Как видно, при температуре кипения НРТ в генераторе $t_r = 120$ °C снижение температуры воздуха в охладителе ТЭХМ за счет утилизации располагаемой теплоты выпускных газов и наддувочного воздуха, составляет около $\Delta t_{в} = 20$ °C (при $\xi = 2,5$), что ниже ее значения $\Delta t_{в15} = 20 \dots 25$ °C, необходимого

для поддержания $t_{в2} = 15$ °C: $\Delta t_{в} < \Delta t_{в15}$ (рис. 1). О различии реальных $\Delta t_{в}$ (за счет утилизации в ТЭХМ располагаемой теплоты $Q_{г,р}$ выпускных газов и наддувочного воздуха) и потенциальных $\Delta t_{в15}$ значений снижения температуры воздуха на входе МОД, соответственно располагаемых Q_0 и требуемых (для

поддержания $t_{b2} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$) $Q_{0,15}$ холодопроизводительностей, обусловленных в свою очередь дефицитом располагаемой теплоты $Q_{г,р}$ выпускных газов и наддувочного воздуха МОД 6S60MC6.1-Т1 по сравнению с требуемой теплотой $Q_{г(0,35)}$ для ТЭХМ ($\zeta = 0,35$) можно судить по рис. 3 и 4. Расход воздуха G_b через ТК рассчитывали по программе MAN для МОД 6S60MC6.1-Т1 в зависимости от t_{b2} ($G_b \approx 32 \text{ кг/с}$ при $t_{b2} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$) [2].

Из рис. 4 видно, что для большей части рейса потенциально возможная глубина охлаждения до $t_{b2} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ составляет $\Delta t_{b,15} = 25 \dots 30 \text{ }^\circ\text{C}$, тогда как реальная, за счет утилизации располагаемой тепло-

ты выпускных газов и наддувочного воздуха в ТЭХМ ($\zeta = 0,35$) гораздо меньше: $\Delta t_b = 15 \dots 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Соответственно соотносятся и требуемая (потенциальная) $Q_{0,15}$ и располагаемая холодопроизводительность ТЭХМ ($\zeta = 0,35$) $Q_{0,р(0,35)}$.

В случае применения ТЭХМ ($\zeta = 0,35$) дефицит холодопроизводительности по сравнению с потенциально возможной ее величиной приводит к сокращению глубины охлаждения воздуха на входе МОД на $5 \dots 8 \text{ }^\circ\text{C}$ и может быть сокращен и даже устранен за счет использования дополнительных источников теплоты, например горячей воды контура высокотемпературного охлаждения цилиндров

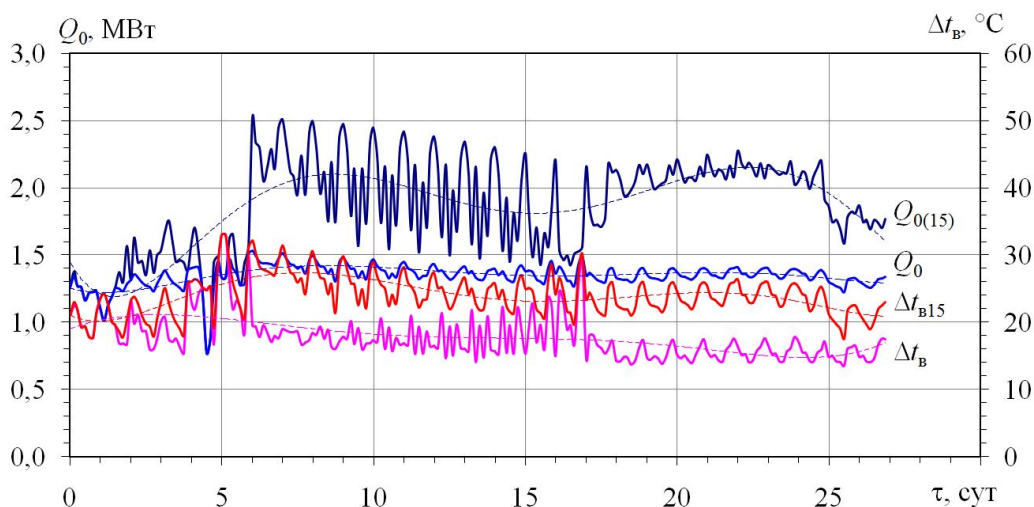


Рис. 3. Снижение температуры воздуха Δt_b (располагаемое) в воздухоохладителе на входе МОД 6S60MC6.1-Т1 и потенциально возможное $\Delta t_{b,15}$ (при его охлаждении до $t_{b2} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$), соответствующие располагаемые Q_0 и требуемые (для поддержания $t_{b2} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$) $Q_{0,15}$ холодопроизводительности

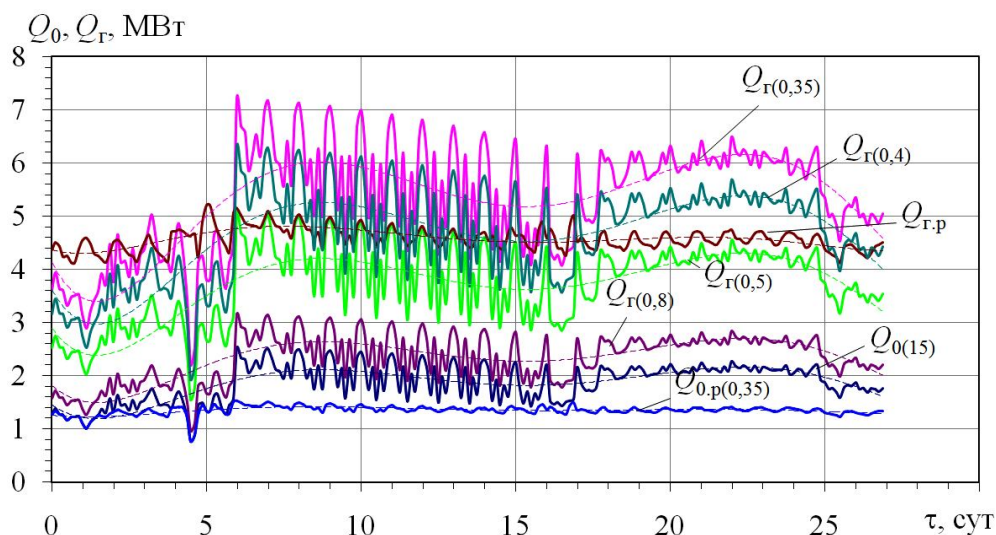


Рис. 4. Значения располагаемых теплоты выпускных газов и наддувочного воздуха $Q_{г,р}$ МОД 6S60MC6.1-Т1 и холодопроизводительности $Q_{0,р(0,35)}$, получаемой в ТЭХМ ($\zeta = 0,35$), а также потенциальной холодопроизводительности $Q_{0,15}$, необходимой для охлаждения воздуха до $t_{b2} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, и требуемой теплоты для охлаждения воздуха до $t_{b2} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ соответственно в ТЭХМ ($\zeta = 0,35$) – $Q_{г(0,35)}$, ВАХМ ($\zeta = 0,4$ и $0,5$) – $Q_{г(0,4)}$ и $Q_{г(0,5)}$, АБХМ ($\zeta = 0,8$) – $Q_{г(0,8)}$

двигателя, или же применением более эффективных ТХМ – с большим тепловым коэффициентом ζ , в частности АБХМ ($\zeta = 0,8$) или ВАХМ ($\zeta = 0,4 \dots 0,6$) вместо ТЭХМ ($\zeta = 0,35$). Во втором случае для получения потенциальной холодопроизводительности $Q_{0,15}$ потребуются меньшие затраты теплоты, чем для ТЭХМ: $Q_{T(0,8)} < Q_{T(0,5)} < Q_{T(0,4)} < Q_{T(0,35)}$ (рис. 4). Как видно из рис. 4, применение ТХМ с $\zeta = 0,5$ потребует даже меньше теплоты $Q_{T(0,5)}$, чем имеется в распоряжении $Q_{T,p}$, обеспечивая при этом максимальную глубину охлаждения воздуха на входе МОД до $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$.

Значения уменьшения удельного расхода топлива Δb_e и суммарной экономии топлива ΣB_T за счет охлаждения воздуха на входе МОД 6S60MC6.1-TI (эксплуатационной мощностью 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 $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$ в течение рейса Одесса–Йокогама (1.07.2009...27.07.2009) даны на рис. 5.

Расходы топлива абсолютный B_T и удельный b_e в соответствии с уменьшением температуры воздуха на входе ТК рассчитывали по программе корпорации MAN в зависимости от температуры воздуха t_{b2} на входе ТК, 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 на 1,2 г/(кВт·ч).

Как видно из рис. 5, если трансформация теплоты выпускных газов и наддувочного воздуха в ТЭХМ ($\zeta = 0,35$) обеспечивает уменьшение удельного расхода топлива $\Delta b_e = 1,5 \dots 2,5$ г/(кВт·ч), то при более глубоком охлаждении воздуха до $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$

$\Delta b_{15} = 2,5 \dots 3,5$ г/(кВт·ч). При этом потенциально возможная экономия топлива за рейс Одесса–Йокогама (1.07.2009...27.07.2009) для МОД 6S60MC6.1-TI (эксплуатационной мощностью 10 МВт) составляет примерно $B_{T15} = 19$ т (при охлаждении воздуха до $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$) против $B_T = 14$ т за счет трансформации теплоты выпускных газов и наддувочного воздуха в ТЭХМ ($\zeta = 0,35$). Использование дополнительных источников теплоты (горячей воды контура высокотемпературного охлаждения цилиндров двигателя) или применением более эффективных ТХМ – с большим тепловым коэффициентом ζ , в частности АБХМ ($\zeta = 0,8$) или ВАХМ ($\zeta = 0,4 \dots 0,6$) вместо ТЭХМ ($\zeta = 0,35$), обеспечит 30...40 % приращение экономии топлива по сравнению с ТЭХМ при эксплуатации судовых МОД в крайне неблагоприятных климатических условиях – при высокой температуре наружного воздуха.

Выводы

Выполнено сравнение снижения температуры воздуха на входе турбокомпрессора малооборотного дизеля потенциально возможного в климатических условиях эксплуатации судна на конкретной рейсовой линии и реально достижимого – исходя из располагаемой сбросной теплоты дизеля и эффективности ее трансформации в холод теплоиспользующей холодильной машиной. Рассчитаны значения снижения температуры воздуха на входе турбокомпрессора, соответствующего сокращения удельного и полного расхода топлива главного дизеля с учетом изменения температуры и влажности наружного воздуха на рейсовой линии Одесса–Йокогама.

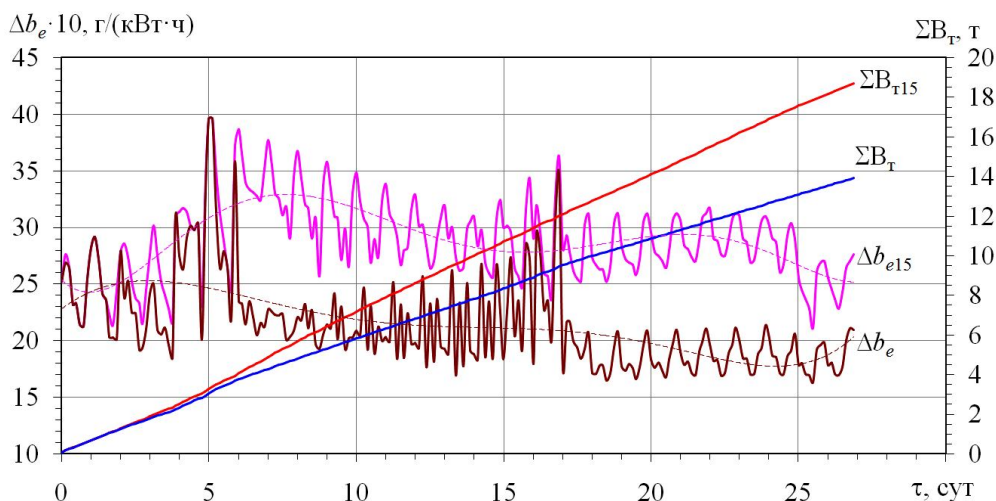


Рис. 5. Значения уменьшения удельного расхода топлива Δb_e и суммарной экономии топлива ΣB_T за счет охлаждения воздуха на входе МОД 6S60MC6.1-TI (эксплуатационной мощностью 10 МВт) трансформацией теплоты выпускных газов и наддувочного воздуха в ТЭХМ ($\zeta = 0,35$), а также потенциально возможных Δb_{e15} и ΣB_{T15} при охлаждении воздуха на входе МОД до температуры $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$ в течение рейса Одесса–Йокогама (1.07.2009...27.07.2009): Δb_e и ΣB_T – действительные в ТЭХМ ($\zeta = 0,35$); Δb_{e15} и ΣB_{T15} – потенциальные при $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$

Литература

1. *Influence of Ambient Temperature Conditions on Main Engine Operation [Text]*. – MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark. – 2005. – 15 p.
2. *MAN B&W ME/ME-C/ME-GI/ME-B-III engines [Text]*. – Copenhagen, Denmark: MAN Diesel. – 2010. – 389 p.

3. *Thermo Efficiency System (TES) for reduction of fuel consumption and CO₂ emission [Text]*. – MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark. – 2005. – 12 p.

4. *Проектная документация балкера типа "Киев": Спецификация 17006.360060.0026 [Текст]*. – Черноморсудопроект, 1993.

Поступила в редакцию 30.05.2013, рассмотрена на редколлегии 12.06.2013

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

ОЦІНКА ПОТЕНЦІАЛУ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ МАЛООБЕРТОВОГО ДИЗЕЛЯ ТРАНСПОРТНОГО СУДНА

Р.М. Радченко, А. Стахель, М.І. Радченко, О.А. Сирота

Виконана оцінка потенційно можливого в кліматичних умовах експлуатації судна на конкретній рейсовій лінії зниження температури повітря на вході турбокомпресора малообертового дизеля та реально досяжного – виходячи з наявної скидної теплоти дизеля, що трансформується в холод тепловикористовуючою холодильною машиною. Визначено значення зниження температури повітря на вході турбокомпресора, відповідного скорочення питомої та повної витрати палива головного дизеля на рейсовій лінії Одеса–Йокогама з урахуванням зміни температури та вологості зовнішнього повітря.

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

EVALUATION OF COOLING POTENTIAL OF AIR AT THE INLET OF LOW SPEED DIESEL ENGINE OF TRANSPORT SHIP

R.N. Radchenko, A. Stachel, N.I. Radchenko, A.A. Sirota

A potential in the air temperature drop at the inlet of low speed diesel engine turbocompressor that might be achieved according to climate conditions of the performance of ship on the rout line and a real potential achieved by recovering the waste heat of diesel engine in cooling machine is evaluated. The values of air temperature drop at the inlet of turbocompressor and corresponding decrease in specific fuel consumption and total fuel consumption of the main diesel engine at various temperature and humidity of the ambient air on the rout line Odessa–Yokogama are estimated.

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

Радченко Роман Николаевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.

Стахель Анджей – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой Западно-Померанского технологического университета, г. Щецин, Польша.

Радченко Николай Иванович – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой кондиционирования и рефрижерации Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.

Сирота Александр Архипович – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры экологической безопасности Черноморского государственного университета им. П. Могилы, г. Николаев, Украина.