

УДК 621.436.13:621.57

А.А. АНДРЕЕВ¹, Н.И. РАДЧЕНКО¹, А.А. СИРОТА²¹ *Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина*² *Черноморский государственный университет им. П. Могилы, Украина*

ТЕПЛОИСПОЛЬЗУЮЩАЯ СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ НАДДУВОЧНОГО ВОЗДУХА СУДОВОГО МАЛООБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ

Проанализировано охлаждение наддувочного воздуха судового малооборотного дизеля теплоиспользующей установкой на низкокипящем рабочем теле, утилизирующей теплоту воздуха. Рассчитаны тепловые нагрузки утилизационной (высокотемпературной) и охлаждающей (низкотемпературной) секций теплоиспользующей установки охлаждения и соответствующие температуры наддувочного воздуха. Для главного дизеля транспортного судна и климатических условий конкретной рейсовой линии определены снижение температуры наддувочного воздуха и соответствующая экономия топлива по сравнению с традиционным охлаждением воздуха забортной водой.

Ключевые слова: *судовой малооборотный дизель, охлаждение, наддувочный воздух, теплоиспользующая установка, низкокипящее рабочее тело.*

1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

Термодинамическая эффективность судовых малооборотных дизелей (МОД) существенно зависит от температуры наддувочного воздуха. С повышением температуры наддувочного воздуха на 10 °С эффективный КПД МОД уменьшается примерно на 0,5 % и, соответственно, возрастает удельный расход топлива b_e [1–3].

Применяются, как правило, два типа систем охлаждения судового двигателя – одноконтурная система охлаждения забортной водой и двухконтурная, с промежуточным контуром пресной воды. В более совершенных системах охлаждения наддувочного воздуха с применением воздушной холодильной машины и контактного его охлаждения впрыском воды теплота наддувочного воздуха отводится за борт, и он не рассматривается в качестве источника теплоты для теплоиспользующих холодильных машин. В то же время такие теплоиспользующие системы охлаждения (ТСО) обеспечивали бы не только более полную утилизацию теплоты наддувочного воздуха, но его охлаждение ниже температуры забортной воды, что особенно актуально при плавании судна в летнее время и южных широтах при повышенных температурах забортной воды. В качестве рабочего тела ТСО применяют низкокипящие рабочие тела (НРТ), что обеспечивает достижение низких температур охлаждаемой во-

ды и, следовательно, наддувочного воздуха, а также исключает необходимость поддержания вакуума в системе НРТ.

В отличие от известных исследований в настоящей работе наддувочный воздух рассматривается как источник теплоты и как объект охлаждения одновременно. При этом генератор паров НРТ высокого давления подключают к высокотемпературному водяному контуру наддувочного воздуха (к ОНВВТ после ТК) перед традиционным водяным охладителем наддувочного воздуха (ОНВ), а испаритель НРТ низкого давления – после водяного ОНВ для более глубокого охлаждения наддувочного воздуха. В этом случае испаритель НРТ служит для охлаждения пресной воды, подаваемой в ОНВНТ, ниже температуры забортной воды.

Цель работы – оценка эффективности применения ТСО наддувочного воздуха МОД транспортного судна, утилизирующей теплоту наддувочного воздуха и обеспечивающей его охлаждение ниже температуры забортной воды при повышенных наружных температурах воздуха и воды.

2. Результаты исследования

Схема **трехконтурной** системы охлаждения наддувочного воздуха МОД на базе теплоиспользующей холодильной машины (ТХМ), утилизирующей теплоту самого же наддувочного воздуха, приведена на рис. 1.

Высокопотенциальная теплота наддувочного воздуха после ТК отводится высокотемпературным промежуточным водяным контуром к жидкому НРТ, кипящему в генераторе паров НРТ при высоком давлении, откуда пары НРТ поступают в конденсатор, охлаждаемый забортной водой, конденсируются и, после дросселирования, жидкий НРТ испаряется в испарителе при низком давлении, соответственно и температуре, отводя теплоту от наддувочного воздуха после водяного ОНВ (на входе во впускной ресивер ДВС) с помощью низкотемпературного промежуточного водяного контура. Таким образом, теплота наддувочного воздуха трансформируется в ТСО в холод, который используется для охлаждения пресной воды (холодильного – низкотемпературного промежуточного контура) до температуры, близкой 0 °С, служащей хладоносителем для ОНВ_{НТ}, в котором происходит окончательное глубокое охлаждение наддувочного воздуха.

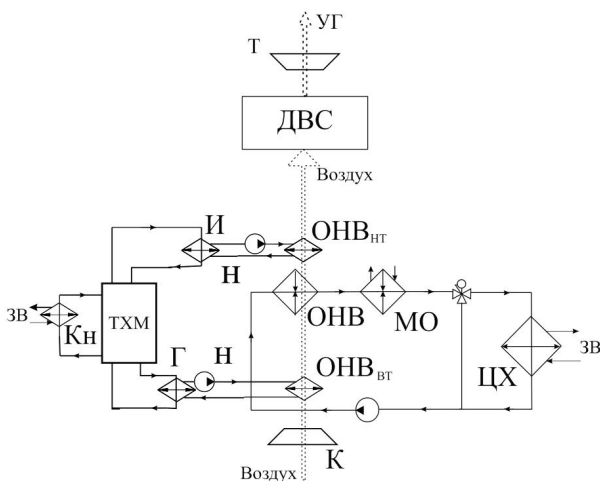


Рис. 1. Схема трехконтурной ТСО наддувочного воздуха МОД на базе ТХМ, использующей теплоту воздуха после ТК: ОНВ_{ВТ} и ОНВ_{НТ} – высоко- и низкотемпературная секции водяного охладителя наддувочного воздуха; ЦХ – центральный холодильник; МО – маслоохладитель; ТХМ: Г – генератор НРТ; Кн – конденсатор НРТ; И – испаритель НРТ – охладитель воды; Н – насос; ЗВ – забортная вода

Генерируемый в ТСО холод может быть использован также для глубокого снижения температуры наддувочного воздуха в штатном ОНВ путем дополнительного (к охлаждению забортной водой в центральном холодильнике) охлаждения пресной воды на входе в ОНВ (на рис. 1 не показано). В этом случае штатный ОНВ функционирует как ОНВ_{НТ}.

Предложенная ТСО (рис. 1) представляет собой трехконтурную систему охлаждения наддувочного воздуха с пресной водой – в первом, НРТ – во втором и забортной водой – в третьем, разомкнутом,

контурах охлаждения. Такая система обеспечивает охлаждение наддувочного воздуха ниже температуры забортной воды.

Поскольку в течение рейса меняются температура $t_{нв}$ и влажность $\phi_{нв}$ наружного воздуха, соответственно воздуха в машинном отделении (МО) – на входе ТК, а значит и наддувочного воздуха, а также температура $t_{зв}$ и, соответственно, пресной воды промежуточного контура охлаждения наддувочного воздуха (на 5 °С выше $t_{зв}$), то снижение температуры воздуха Δt_v в ОНВ_{НТ}, его температуру $t_{в2}$ после ОНВ_{НТ} (на входе в наддувочный ресивер) и соответствующее сокращение потребления топлива МОД определяют с учетом изменения $t_{нв}$, $\phi_{нв}$ и $t_{зв}$ для судна на конкретной рейсовой линии.

В качестве примера рассмотрен контейнеровоз с главным двигателем 6S50ME-C корпорации MAN [3] (номинальная мощность $N_n = 10680$ кВт, эксплуатационная $N_s = 10000$ кВт) на рейсовой линии Одесса-Гавана-Одесса. Изменение температуры $t_{нв}$, относительной влажности $\phi_{нв}$ и влагосодержания $d_{нв}$ наружного воздуха, температуры забортной воды $t_{зв}$ в рейсе Одесса-Гавана-Одесса (1.07...16.08.2009) дано на рис. 2.

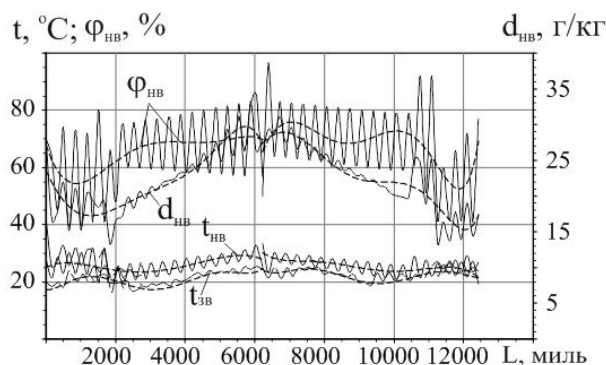


Рис. 2. Изменение температуры $t_{нв}$, относительной влажности $\phi_{нв}$ и влагосодержания $d_{нв}$ наружного воздуха, температуры забортной воды $t_{зв}$ в течение рейса Одесса-Гавана-Одесса (1.07...16.08.2009)

Как видно, на протяжении практически всего рейса температура наружного воздуха $t_{нв}$ составляет 25 °С и даже 30 °С. Относительная влажность воздуха $\phi_{нв}$ изменяется в основном в диапазоне 60...80 % (соответственно в дневное и ночное время). Имеют также место весьма существенные колебания температуры $t_{нв}$ и относительной влажности $\phi_{нв}$, а следовательно, и влагосодержания $d_{нв}$ наружного воздуха в течение суток, причем максимумам температур $t_{нв}$ соответствуют минимумы влажности $\phi_{нв}$ и, соответственно, влагосодержания $d_{нв}$. Наличие дневных и ночных, противоположно направленных экстремумов $t_{нв}$ (соответственно и температуры наддувочно-

го воздуха t_{r1} после ТК – на входе ОНВ_{ВТ}), и $\phi_{нв}$ (соответственно $d_{нв}$) создает благоприятные условия для большего снижения температуры наддувочного воздуха МОД днем (благодаря меньшим относительной влажности $\phi_{нв}$ и, соответственно, влагосодержанию $d_{нв}$), когда имеет место значительное ухудшение топливной эффективности МОД из-за повышенных температур $t_{нв}$, соответственно и t_{r1} (колебания $t_{зв}$ не столь значительные). В ночное время, когда $t_{нв}$ (соответственно и t_{r1}) ниже и меньше потребность в охлаждении наддувочного воздуха, снижение температуры воздуха также меньше из-за большей влажности ϕ (соответственно и $d_{нв}$).

Обычно в ТК двигателя подают воздух из МО, где его температура $t_{МО}$ на 10 °С выше, чем наружного воздуха $t_{нв}$. Температуру наддувочного воздуха после ТК t_{r1} (на входе ОНВ_{ВТ}) рассчитывали с помощью программы корпорации MAN, в зависимости от температуры воздуха на входе ТК $t_{МО}$ [1].

О температуре t_{r1} наддувочного воздуха после ТК (на входе ОНВ_{ВТ}), при меняющихся в течение рейса температуре $t_{нв}$ и влагосодержании $d_{нв}$ наружного воздуха, а также температуре забортной воды $t_{зв}$, можно судить по рис. 3.

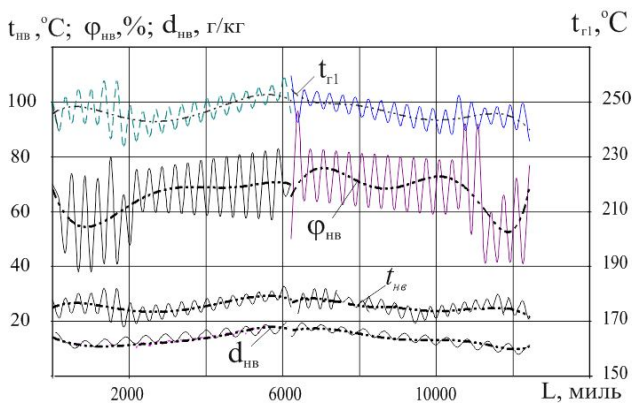


Рис. 3. Изменение температуры t_{r1} наддувочного воздуха после ТК (на входе ОНВ_{ВТ}), при меняющихся в течение рейса температуре $t_{нв}$ и влагосодержании $d_{нв}$ наружного воздуха, температуре забортной воды $t_{зв}$

Видно также, что при существенных колебаниях t_{r1} суточные изменения $t_{зв}$ не столь значительные. Температуры наддувочного воздуха на входе ОНВ_{ВТ} t_{r1} и на выходе ОНВ_{ВТ} t_{r2} , снижение температуры наддувочного воздуха Δt_r в ОНВ_{ВТ} и температура наддувочного воздуха на выходе ОНВ_{НТ} t_{b2} в течение рейса Одесса-Гавана-Одесса (1.07...16.08.2009) приведены на рис. 4.

Температура наддувочного воздуха t_{r2} на выходе ОНВ_{ВТ} (после ТК) ограничивается температурой конденсации НРТ в ТХМ, с которой жидкий НРТ поступает из конденсатора на вход в генератор ТХМ, и с учетом разностей температур между водой

промежуточного контура, выходящей из генератора ТХМ (охлажденной), и жидким НРТ, поступающим в генератор ТХМ из конденсатора ($\Delta t_{в/НРТ} = 4$ °С), а также между наддувочным воздухом t_{r2} на выходе из ОНВ_{ВТ} и водой промежуточного контура, охлажденной в генераторе ТХМ, которая поступает в ОНВ_{ВТ}.

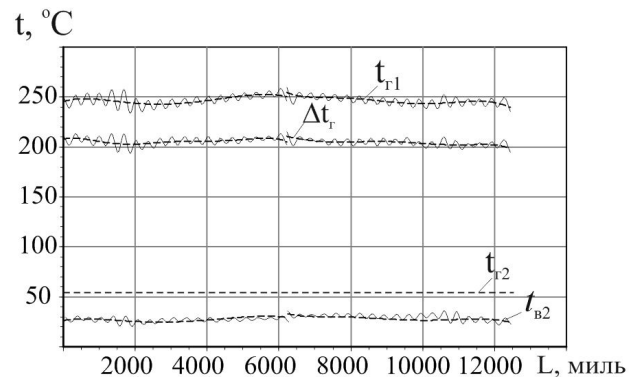


Рис. 4. Температуры наддувочного воздуха на входе ОНВ_{ВТ} t_{r1} и на выходе ОНВ_{ВТ} t_{r2} , снижение температуры наддувочного воздуха Δt_r в ОНВ_{ВТ}, температура наддувочного воздуха на выходе ОНВ_{НТ} t_{b2} в течение рейса Одесса-Гавана-Одесса (1.07...16.08.2009)

Располагаемое количество теплоты Q_r , отведенное от наддувочного воздуха в ОНВ_{ВТ}, определяют как $Q_r = G_b \cdot c_b (t_{r1} - t_{r2}) \xi_{ВТ}$, где $\xi_{ВТ}$ – коэффициент влаговываждения процесса охлаждения воздуха в ОНВ_{ВТ}. Коэффициент влаговываждения ξ – отношение полного количества теплоты (разности энтальпий воздуха на входе и выходе теплообменника), отведенной от воздуха соответственно в ОНВ_{ВТ} (тепловой нагрузки на генератор ТСО Q_r) или ОНВ_{НТ} (холодопроизводительности ТСО Q_0), к количеству явной теплоты, определяемому разностью температур по сухому термометру.

Располагаемую холодопроизводительность ТСО-ТХМ Q_0 определяют исходя из располагаемой теплоты Q_r , отведенной от наддувочного воздуха в ОНВ_{ВТ}, как $Q_0 = \zeta Q_r$, где ζ – тепловой коэффициент ТСО-ТХМ. Тепловой коэффициент ζ представляет собой $\zeta = Q_0/Q_r$, т.е. отношение полезной холодопроизводительности Q_0 (количества теплоты, отведенной от наддувочного воздуха в ОНВ_{НТ}), к количеству затраченной теплоты Q_r , подведенной к ТСО от наддувочного воздуха в ОНВ_{ВТ}.

Расход воздуха G_b через ТК рассчитывают с помощью программы корпорации MAN в зависимости от температуры воздуха на входе ТК $t_{МО}$ (в машинном отделении) [3].

В случае избытка располагаемой холодопроизводительности ТСО Q_0 снижение температуры наддувочного воздуха $\Delta t_b = t_{b1} - t_{b2}$, а с ним и

соответствующие затраты холодопроизводительности Q_0 ограничиваются температурой охлажденного наддувочного воздуха t_{b2} на выходе ОНВ_{НТ}, значение которой, в свою очередь, лимитируется температурой кипения НРТ в испарителе-охладителе воды, $t_0 \approx 2...7^\circ\text{C}$, разностью температур в испарителе-охладителе воды (принимаем эту разность температур равной $\Delta t_{\text{вн}} = 4^\circ\text{C}$) и водяном ОНВ_{НТ} ($\Delta t_{\text{в,НТ}} = 8...12^\circ\text{C}$).

Тепловые нагрузки на экономайзерную $Q_{Г3}$ и испарительную $Q_{Гн}$ секции генератора ТСО, всего генератора $Q_{Г}$ и охладителя ТСО-ОНВ_{НТ} (холодопроизводительность) Q_0 с учетом ограничения по температуре охлаждения наддувочного воздуха в ОНВ_{НТ} $t_{b2} = t_0 + \Delta t_{\text{вн}} + \Delta t_{\text{в,НТ}}$, где $\Delta t_{\text{вн}} = 4^\circ\text{C}$ – минимальная разность температур между теплоносителями в испарителе НРТ-охладителе воды; $\Delta t_{\text{в,НТ}} = 8...12^\circ\text{C}$ – разность температур в охладителе ТСО-ОНВ_{НТ}, для эжекторной ТСО ($\zeta = 0,33$) приведены на рис. 5.

Снижение температуры наддувочного воздуха $\Delta t_{\text{в}}$ в ОНВ_{НТ} ТСО и температура наддувочного воздуха после ОНВ_{НТ} ТСО t_{b2} при температурах заборной воды $t_{зв}$ в течение рейса Одесса-Гавана-Одесса (1.07...16.08.2009) приведено на рис. 6.

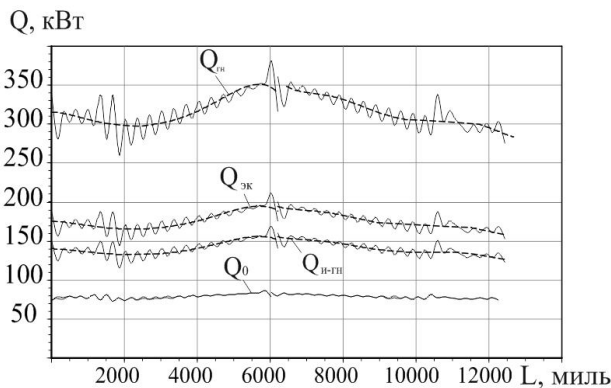


Рис. 5. Тепловые нагрузки на экономайзерную $Q_{Г3}$ и испарительную $Q_{Гн}$ секции генератора, всего генератора $Q_{Г}$ и охладителя (холодопроизводительность) Q_0 эжекторной ТСО

Как видно, применение ТСО обеспечивает охлаждение наддувочного воздуха ниже температуры заборной воды: $t_{b2} < t_{зв}$, и, следовательно, значительно ниже, чем температура воздуха $t_{\text{вв}2}$, до которой он может быть охлажден в традиционном водяном ОНВ.

Расход топлива V_e и удельный расход топлива b_e в зависимости от температуры охлажденного наддувочного воздуха, а также сокращение расхода топлива ΔV_e и удельного расхода топлива Δb_e за счет более глубокого охлаждения наддувочного воздуха в охладителе ТСО по сравнению с

температурой воздуха, охлажденного в традиционном водяном ОНВ, на величину $\Delta t_{\text{в}0} = t_{\text{вв}2} - t_{b2}$ рассчитывали с помощью программы [3] для МОД корпорации MAN при разных температурах воздуха $t_{\text{МО}}$ в МО (на входе ТК).

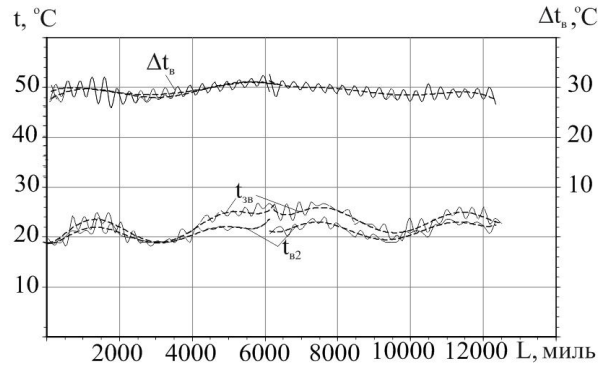


Рис. 6. Снижение температуры наддувочного воздуха $\Delta t_{\text{в}}$ в охладителе воздуха ТУО и температура наддувочного воздуха после охладителя t_{b2} при температурах заборной воды $t_{зв}$ в течение рейса Одесса-Гавана-Одесса (1.07...16.08.2009)

Значения снижения удельного расхода топлива Δb_e , полного расхода топлива МОД 6S50ME-C корпорации MAN [3] (номинальная мощность $N_n = 10680$ кВт и эксплуатационная $N_s = 10000$ кВт) в абсолютных ΔV_e и относительных $\overline{\Delta V_e}$ величинах в течение рейса Одесса-Гавана-Одесса (1.07...16.08.2009) приведены на рис. 7.

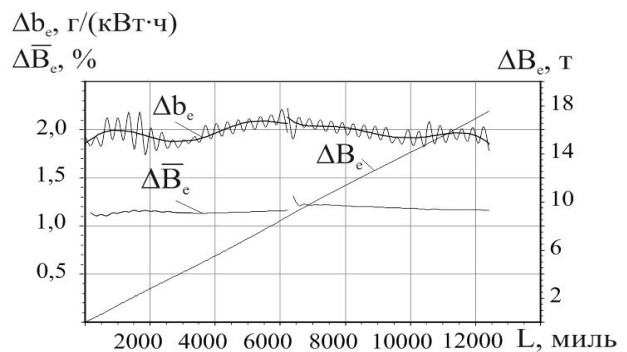


Рис. 7. Значения снижения удельного расхода топлива Δb_e , полного расхода топлива МОД в абсолютных ΔV_e и относительных $\overline{\Delta V_e}$ величинах в течение рейса Одесса-Гавана-Одесса (1.07...16.08.2009)

Как видно, практически на протяжении всего рейса уменьшение удельного расхода топлива составляет $\Delta b_e \approx 2,0$ г/(кВт·ч), относительная экономия потребления топлива $\overline{\Delta V_e} = 1,1...1,2\%$, а абсолютная экономия потребления топлива ΔV_e за рейс для МОД мощностью 10 МВт составляет около 18 т.

Выводы

Впервые предложена трехконтурная теплоиспользующая система охлаждения (ТСО) наддувочного воздуха судовых МОД, утилизирующая теплоту воздуха и обеспечивающая его охлаждение ниже температуры забортной воды. В отличие от традиционных двухконтурных систем охлаждения наддувочного воздуха МОД (с пресной водой в первом контуре охлаждения и забортной – во втором) трехконтурная ТСО включает теплоиспользующую холодильную машину охлаждения пресной воды в качестве дополнительного промежуточного контура.

На примере конкретного рейса показано, что в условиях судовой эксплуатации с меняющимися в течение рейса влажностью наружного воздуха, температурой воздуха и температурой забортной воды утилизация теплоты наддувочного воздуха МОД в

ТСО обеспечивает охлаждение наддувочного воздуха до температуры, близкой 20 °С, и сокращение удельного расхода топлива примерно на 2,0 г/(кВт·ч) по сравнению с традиционным охлаждением воздуха забортной водой.

Литература

1. *Influence of Ambient Temperature Conditions. Main engine operation of MAN B&W two-stroke engines [Text]: MAN Diesel & Turbo, Copenhagen, Denmark, 2010. – 17 p.*
2. *Thermo Efficiency System (TES) for reduction of fuel consumption and CO₂ emission [Text]: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2005. – 19 p.*
3. *MAN B&W ME/ME-C/ME-GI/ME-B-III engines [Text]. – Copenhagen, Denmark: MAN Diesel, 2010. – 18 p.*

Поступила в редакцию 17.10.2012, рассмотрена на редколлегии 14.11.2012

Рецензент: д-р техн. наук, профессор С.А. Ханмамедов, Одесская национальная морская академия

ТЕПЛОВИКРИСТОВУЮЧА СИСТЕМА ОХОЛОДЖЕННЯ НАДДУВНОГО ПОВІТРЯ СУДНОВОГО МАЛООБЕРТОВОГО ДИЗЕЛЯ

А.А. Андреев, М.І. Радченко, О.А. Сирота

Проаналізовано охолодження наддувочного повітря суднового малообертового дизеля тепловикористовуючою установкою на низькокиплячому робочому тілі, що утилізує теплоту повітря. Розраховані теплові навантаження утилізаційної (високотемпературної) й охолоджуючої (низькотемпературної) секцій тепловикористовуючої установки охолодження та відповідні температури наддувочного повітря. Для головного дизеля транспортного судна і кліматичних умов конкретної рейсової лінії визначені зниження температури наддувочного повітря та відповідна економія палива в порівнянні з традиційним охолодженням повітря забортною водою.

Ключові слова: судновий малообертовий дизель, охолодження, наддувне повітря, тепловикористовуюча установка, низькокипляче робоче тіло.

WASTE HEAT RECOVERY SCAVENGE AIR COOLING SYSTEM OF MARINE LOW SPEED DIESEL ENGINE

A.A. Andreev, N.I. Radchenko, A.A. Sirota

Cooling of scavenge air in marine low speed diesel engine by waste heat recovery cooling machine on low-boiling working fluid that utilizes the heat of air is analyzed. The heat load upon utilizing (high-temperature) and cooling (low temperature) sections of waste heat recovery cooling plant and corresponding scavenge air temperature are calculated. For the main engine of the transport ship and for climate conditions on the rout line the decrease in the scavenge air temperature and corresponding fuel saving compared with traditional air cooling by seawater are evaluated.

Key words: marine low speed diesel engine, cooling, scavenge air, waste heat recovery cooling plant, low boiling working fluid.

Андреев Артем Андреевич – ассистент, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.

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

Сирота Александр Архипович – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры экологической безопасности, Черноморский государственный университет им. П. Могилы, Николаев, Украина