

УДК 621.57

Р.Н. РАДЧЕНКО¹, Т. БОХДАЛЬ², Н.И. РАДЧЕНКО¹¹Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина²Кошалинский технический университет, Польша

ОХЛАЖДЕНИЕ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ МАЛООБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ ТРАНСПОРТНОГО СУДНА ТЕПЛОИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ ЭЖЕКТОРНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНОЙ

Проанализировано использование теплоты уходящих газов и наддувочного воздуха судовых малооборотных дизелей для охлаждения воздуха на входе турбокомпрессоров теплоиспользующими холодильными машинами. Рассчитаны величины снижения температуры воздуха, достижимые исходя из предполагаемой сбросной теплоты дизелей при разных тепловлажностных условиях на входе турбокомпрессоров. Определены границы эффективного применения комплексной утилизации теплоты уходящих газов и наддувочного воздуха малооборотных дизелей для охлаждения воздуха на входе турбокомпрессоров.

Ключевые слова: теплоиспользующая эжекторная холодильная машина, малооборотный дизель, утилизация теплоты, охлаждение воздуха, низкокипящее рабочее тело.

Анализ проблемы и постановка цели исследования

На транспортных судах в качестве главных двигателей применяются, как правило, малооборотные дизели (МОД). Эксплуатация судовых МОД отличается значительным изменением в течение рейса температуры $t_{нв}$ и влажности ϕ наружного воздуха, соответственно воздуха в машинном отделении (МО) и на входе наддувочного турбокомпрессора (ТК) МОД, что влияет на топливную эффективность МОД. Так, с повышением температуры воздуха на входе ТК МОД на 10 °С удельный расход топлива b_e увеличивается на 0,5...0,7% [1, 2]. При этом возрастает температура уходящих газов после турбины ТК и наддувочного воздуха, а следовательно, и потери теплоты с газами и охлаждающей наддувочный воздух водой. Поэтому представляется целесообразным повышение топливной эффективности МОД путем охлаждения воздуха на входе ТК холодильными машинами, использующими теплоту уходящих газов и охлаждающей наддувочный воздух воды.

Конструктивно наиболее простыми и надежными в эксплуатации являются теплоиспользующие эжекторные холодильные машины (ТЭХМ), в которых функцию компрессора выполняет эжектор. Применение в ТЭХМ низкокипящих рабочих тел (НРТ) позволяет охлаждать воздух на входе ТК МОД до 15...20 °С и избежать необходимости поддержания вакуума в испарителе – охладителе воздуха.

Цель работы – анализ эффективности охлаждения воздуха на входе МОД транспортного судна эжекторной холодильной машиной, использующей теплоту уходящих газов и наддувочного воздуха.

Результаты исследования

Схема системы охлаждения воздуха на входе МОД в ТЭХМ, использующей теплоту уходящих газов после турбины ТК и наддувочного воздуха, остающуюся после покрытия потребностей судна, представлена на рис. 1 (контур утилизационного котла показан упрощенно).

ТЭХМ состоит из паросилового и холодильного контуров. Паросиловой контур служит для получения паров НРТ высокого давления, энергия которых используется в эжекторе для поджатия паров НРТ низкого давления, всасываемых из испарителя-воздухоохладителя (И-ВО) холодильного контура, до давления в конденсаторе. Жидкий НРТ после конденсатора делится на два потока: первый – подается насосом в генератор, где он нагревается и испаряется при высоком давлении за счет теплоты, отводимой от наддувочного воздуха и уходящих газов МОД, а второй – дросселируется и направляется в И-ВО, где испаряется при низком давлении и соответственно температуре, отводя теплоту от воздуха на входе ТК. Эжектор совмещает функции детандера паросилового контура (расширение пара происходит в сопле) и компрессора холодильного контура (повышение давления пара – в камере смешения и диффузоре). Генератор состоит из экономайзерной

секции, в которой происходит нагрев жидкого НРТ от температуры конденсации t_k до температуры кипения t_r , и испарительной с кипением НРТ при температуре t_r . Экономайзерную секцию генератора Γ_3 подключают к контуру пресной воды высокотемпературной секции охладителя наддувочного воздуха ОНВ_{вт} (контур пресной воды не указан, а экономайзерная секция условно показана на линии наддувочного воздуха).

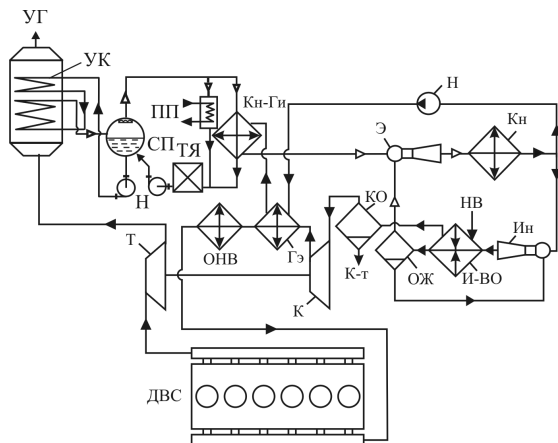


Рис. 1. Схема системы утилизации теплоты выпускных газов и наддувочного воздуха с охлаждением воздуха на входе ТК:

ДВС – двигатель внутреннего сгорания; Кн-Гн – конденсатор водяного пара-испарительная секция генератора паров НРТ; Γ_3 – экономайзерная секция генератора паров НРТ; Э – эжектор; Кн – конденсатор НРТ; Н – насос; ДК – дроссельный клапан; И-ВО – испаритель-воздухоохладитель; КО – капледелитель; К-т – конденсат; К – компрессор ТК; Т – турбина ТК; СП – сепаратор пара; ТЯ – теплый ящик; ПП – потребители пара; НВ – наружный воздух; УГ – уходящие газы

Эффективность эжектора характеризуется коэффициентом эжекции $U = G_0/G_r$, где G_0 и G_r – расходы НРТ через И-ВО (эжектируемый НРТ низкого давления) и генератор (силовой НРТ высокого давления), а ТЭХМ – тепловым коэффициентом ζ , который представляет собой отношение холодопроизводительности Q_0 (теплоты, отведенной от воздуха на входе дизеля к НРТ, кипящему в И-ВО) к теплоте Q_r , подведенной в генераторе к кипящему НРТ высокого давления от уходящих газов и наддувочного воздуха: $\zeta = Q_0/Q_r$.

Значения удельных, приходящихся на единицу расхода газов (воздуха) теплоты, отведенной от уходящих газов и наддувочного воздуха в генераторе ТЭХМ \bar{q}_r , и холодопроизводительности ТЭХМ \bar{q}_0 , коэффициента эжекции U и теплового коэффициента ζ , снижения температуры Δt_b воздуха в охла-

дителя на входе ТК МОД в зависимости от температуры t_r и давления P_r кипения НРТ (хладон R142b) в генераторе при коэффициентах влаговывадения $\xi = 1,0; 2,0; 2,5$ и $3,0$ и температуре кипения R142b в испарителе $t_0 = 5^\circ\text{C}$ приведены на рис. 2.

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

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

$$\bar{q}_0, \text{кВт}/(\text{кг}/\text{с})$$

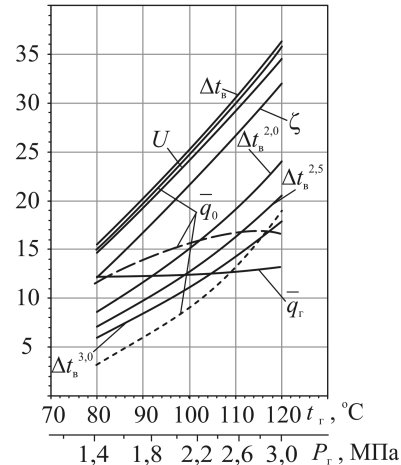


Рис. 2. Удельные теплота, отведенная от выпускных газов и наддувочного воздуха в генераторе ТЭХМ \bar{q}_r , и холодо-производительность ТЭХМ \bar{q}_0 , коэффициент эжекции U и тепловой коэффициент ζ , снижение температуры Δt_b воздуха в охладителе на входе ТК в зависимости от температуры t_r и давления P_r кипения R142b в генераторе при разных коэффициентах влаговывадения ξ : $\Delta t_b \dots \Delta t_b^{3,0} - \xi = 1,0 \dots 3,0$; - - - - испарительная секция генератора, \bar{q}_0 ; ····- экономайзерная секция генератора, \bar{q}_0 ; — — генератор в целом, \bar{q}_0

Как видно, при температуре кипения НРТ в генераторе $t_r = 120^\circ\text{C}$ снижения температуры воздуха в охладителе составляют $\Delta t_b = 18 \dots 24^\circ\text{C}$ при коэффициентах влаговывадения соответственно $\xi = 3,0 \dots 2,0$.

Коэффициент влаговывадения ξ представляет собой отношение полного количества теплоты, отведенной от влажного воздуха в охладителе, к явному, определяемому разностью температур по сухому термометру. $\xi = (I_{b1} - I_{b2}) / [c_{вл} \cdot (t_{b1} - t_{b2})]$, где $c_{вл}$ – теплоемкость влажного воздуха $c_{вл} = 1,01 + 1,89d$; d – влагосодержание, кг/кг; t_{b1} и t_{b2} – температуры воздуха на входе и выходе из охладителя по сухому термометру; I_{b1} и I_{b2} – энтальпии влажного воздуха на входе и выходе из охладителя, $I_b = c_{вл} \cdot t_b + 1,89d$, кДж/кг. Чем больше ξ , тем большее количество теплоты необходимо отвести от влажного воздуха для снижения его температуры на одну и ту же величину.

Величина $\xi = 1$ соответствует охлаждению без влаговыпадения.

Поскольку в течение рейса меняются температура $t_{нв}$ и влажность $\phi_{нв}$ наружного воздуха, соответственно воздуха в машинном отделении (МО) и на входе охладителя воздуха, то снижение температуры воздуха в охладителе Δt_b на входе ТК и соответствующее сокращение потребления топлива МОД следует определять с учетом изменения $t_{нв}$ и $\phi_{нв}$ для судна на конкретной рейсовой линии.

В качестве примера рассмотрен балкер типа "Киев" с главным двигателем 8S50ME-C7.1-ТII корпорации MAN [3] (номинальные мощность $N_n = 12640$ кВт и число оборотов $n_n = 127$ об/мин, эксплуатационные $N_s = 10580$ кВт и $n_s = 120$ об/мин) и рейсовая линия Одесса–Йокогама–Одесса.

Анализ статей расходов пара на балкере типа "Киев" [4] показал, что в теплое время объемы потребления пара составляют примерно 25% производительности утилизационного котла (УК). Соответственно располагаемая доля пара, который можно использовать в ТЭХМ для охлаждения воздуха на входе ТК МОД, составляет 75% паропроизводительности УК. Если помимо теплоты уходящих газов, глубина утилизации теплоты которых ограничивается температурой 150...160 °С, использовать в ТЭХМ еще и теплоту наддувочного воздуха, отводимую в водяном охладителе наддувочного воздуха, то количество утилизируемой теплоты и, соответственно, вырабатываемого холода практически удваивается: $\bar{q}_0' \approx \bar{q}_0''$ (рис. 2).

Значения температуры $t_{нв}$ и относительной влажности $\phi_{нв}$ наружного воздуха в течение рейса брались по данным метеоцентра. Исходя из них рассчитывалось его влагосодержание d (рис. 3).

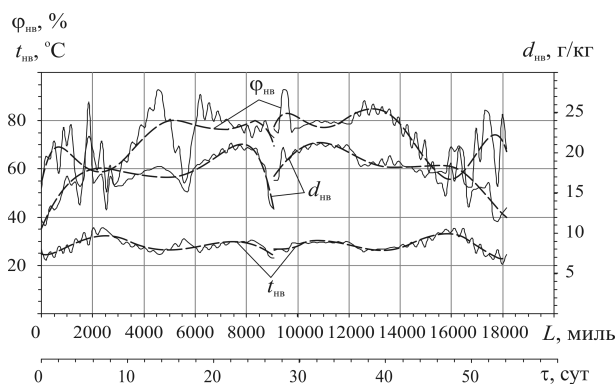


Рис. 3. Изменение температуры $t_{нв}$, относительной влажности $\phi_{нв}$ и влагосодержания $d_{нв}$ наружного воздуха в течение рейса Одесса–Йокогама–Одесса (1.07.2009...24.08.2009)

Из теплового баланса охладителя воздуха ТЭХМ $Q_0 = G_b \cdot c_b (t_{b1} - t_{b2}) \xi$ определяют снижение

температуры воздуха $\Delta t_b = t_{b1} - t_{b2}$ и температуру охлажденного воздуха t_{b2} на входе ТК при текущих в течение рейса температуре наружного воздуха $t_{нв}$ и относительной влажности $\phi_{нв}$ (соответственно t_{b1} и ϕ_{b1}). Расход воздуха G_b через ТК рассчитывали с помощью фирменной программы корпорации MAN в зависимости от температуры воздуха t_{b2} на входе ТК [3]. В качестве НРТ применен хладон R142b. Температура кипения R142b в И-ВО $t_0 = 5$ °С. С учетом минимальной разности температур между охлажденным воздухом и кипящим R142b, $t_{b2} - t_0 = 10$ °С, глубина охлаждения воздуха в И-ВО ограничивается температурой $t_{b2} = 15$ °С.

Наряду с подачей на вход ТК воздуха из МО рассматривался также вариант подачи наружного воздуха отдельным воздухопроводом [1, 2]. Во втором случае в результате нагрева в воздуховоде температура наружного воздуха повышается примерно на 5 °С, а относительная влажность снижается примерно на 20%, а с нею сокращаются и непроизводительные затраты холода на конденсацию водяных паров из влажного воздуха в процессе его охлаждения. Благодаря этому температуру воздуха можно уменьшить на большую величину по сравнению с забором воздуха из МО.

Значения снижения температуры воздуха Δt_b в охладителе ТЭХМ на входе ТК при подаче воздуха отдельным воздухопроводом и из МО и меняющейся в течение рейса температуре наружного воздуха $t_{нв}$ приведены на рис. 4, а холодопроизводительности Q_0 , расходуемой на охлаждение воздуха в охладителе ТЭХМ на входе ТК на величину Δt_b , – на рис. 5.

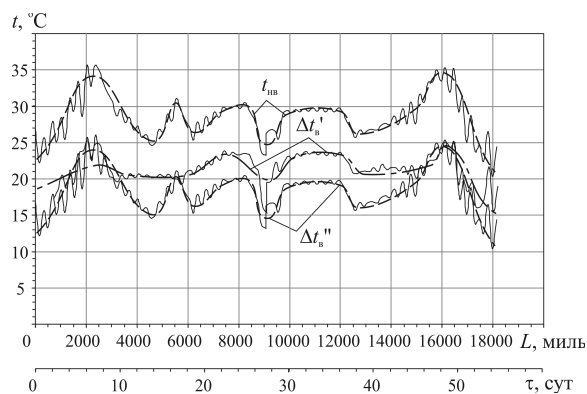


Рис. 4. Изменение температуры наружного воздуха $t_{нв}$ и снижение температуры воздуха Δt_b в охладителе на входе ТК в течение рейса Одесса–Йокогама–Одесса: $\Delta t_b'$ – подача воздуха в охладитель отдельным воздухопроводом; $\Delta t_b''$ – воздух из МО

Из рис. 4 и 5 видно, что при подаче воздуха из МО величина снижения температуры воздуха меньше ($\Delta t_b''$ на рис. 4), а затраты холода (Q_0'' на рис. 5), наоборот, больше по сравнению с подачей

наружного воздуха отдельным воздухопроводом ($\Delta t_b'$ и Q_0'). Во втором варианте имеет место избыток располагаемого холода по сравнению с его величиной, требуемой для охлаждения воздуха на входе ТК до $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$, о чем свидетельствует постоянство Q_0' (рис. 5), тогда как в первом случае (воздух из МО), наоборот, некоторый его дефицит, из-за чего температура воздуха на выходе из воздухоохладителя t_{b2} оказывается выше 15°C (рис. 6).

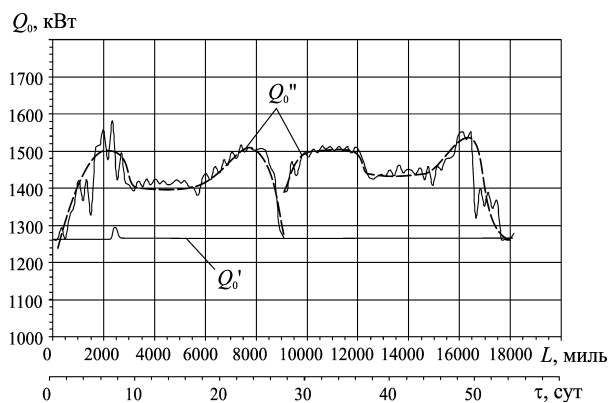


Рис. 5. Холодопроизводительность ТЭХМ Q_0 , расходуемая на охлаждение воздуха в охладителе на входе ТК на величину Δt_b при подаче воздуха отдельным воздухопроводом Q_0' и из МО Q_0''

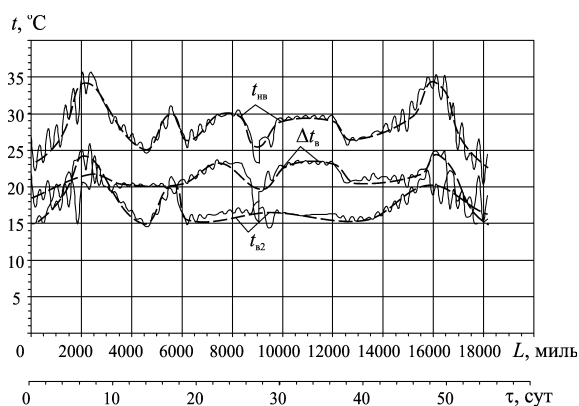


Рис. 6. Изменение температуры наружного воздуха t_{nb} , снижение температуры воздуха Δt_b в охладителе на входе ТК и температура воздуха на выходе из охладителя t_{b2} при подаче в охладитель на входе ТК МОД воздуха из МО

Расчет удельного расхода топлива Δb_c в зависимости от снижения температуры воздуха на входе ТК МОД производили с помощью фирменной программы [3] для МОД корпорации MAN в зависимости от температуры воздуха t_{b2} на входе ТК, согласно результатам вычислений по которой снижение температуры воздуха на входе ТК МОД на величину $\Delta t_b = 10^\circ\text{C}$ приводит к сокращению удельного расхода топлива b_c на $1,2 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$ (рис. 7).

Уменьшение удельного расхода топлива Δb_c , сокращение расхода топлива в абсолютных ΔB_c и

относительных $\overline{\Delta B_c}$ величинах в течение рейса Одесса–Иокогама (1.07.2009...24.08.2009) приведены на рис. 8.

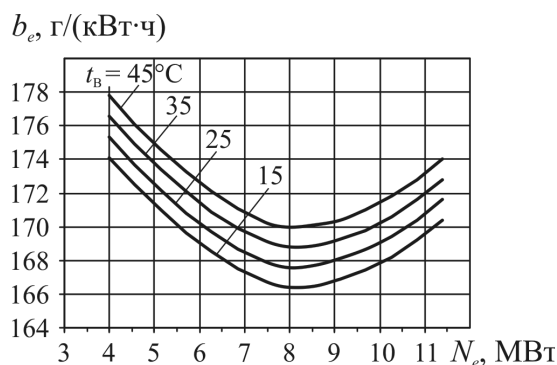


Рис. 7. Зависимости удельного расхода топлива b_c от нагрузки N двигателя 8S50ME-C7.1-TH при температурах воздуха на входе ТК $t_{nb} = 15, 25, 35$ и 45°C

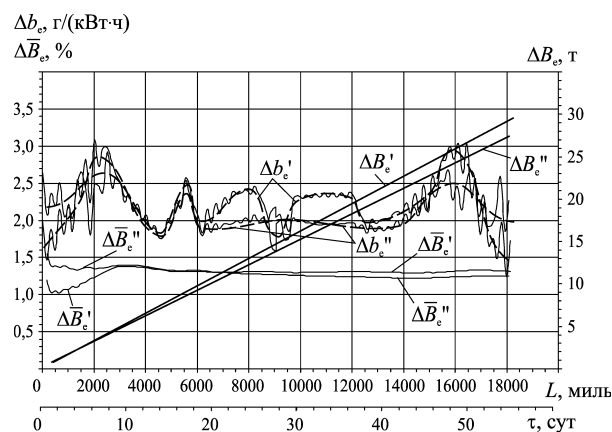


Рис. 8. Уменьшение удельного расхода топлива Δb_c , сокращение расхода топлива в абсолютных ΔB_c и относительных $\overline{\Delta B_c}$ величинах в течение рейса Одесса–Иокогама (1.07.2009...24.08.2009): $\Delta b_c', \Delta B_c'$ и $\overline{\Delta B_c}'$ – подача воздуха отдельным воздухопроводом; $\Delta b_c'', \Delta B_c''$ и $\overline{\Delta B_c}''$ – воздух из МО

Из рис. 8 видно, что практически на протяжении всего рейса уменьшение удельного расхода топлива составляет $\Delta b_c = 2,0 \dots 2,5 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$, относительная экономия потребления топлива $\overline{\Delta B_c} = 1,3\%$, а абсолютная экономия потребления топлива за рейс для МОД мощностью 10 МВт составляет $\Delta B_c = 26 \dots 28 \text{ т}$. При этом большие величины соответствуют подаче наружного воздуха на вход ТК отдельным воздухопроводом, а меньшие – подаче воздуха из МО с более высокой температурой.

Несколько большие значения уменьшения удельного расхода топлива Δb_c и соответственно сокращения расхода топлива в абсолютных ΔB_c и относительных $\overline{\Delta B_c}$ величинах при подаче воздуха в ТК отдельным воздухопроводом по сравнению с забо-

ром воздуха из МО в течение летнего рейса Одесса–Иокогама (1.07.2009...24.08.2009) обусловлены меньшими величинами $\varphi_{в1}$, соответственно коэффициента влаговываждения ξ и затратами холода, требуемыми для охлаждения воздуха на одну и ту же величину $\Delta t_{в}$.

Выводы

Использование теплоты уходящих газов и наддувочного воздуха для охлаждения воздуха на входе ТК судовых МОД эжекторными холодильными машинами обеспечивает сокращение удельного расхода топлива на 2,0...2,5 г/(кВт·ч), причем большая экономия достигается при подаче на вход ТК наружного воздуха отдельным воздухопроводом по сравнению с забором воздуха из машинного отделения.

Литература

1. *Influence of Ambient Temperature Conditions on Main Engine Operation: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2005.*
2. *Thermo Efficiency System (TES) for reduction of fuel consumption and CO₂ emission: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2005.*
3. *MAN B&W ME/ME-C/ME-GI/ME-B-III engines. – Copenhagen, Denmark: MAN Diesel. – 2010.*
4. *Проектная документация балкера типа "Киев": Спецификация 17006.360060.0026: Черноморсудопроект, 1993.*

Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований по Гранту Президента Украины (проект № GP/F32/152).

Поступила в редакцию 27.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.И. Живица, Одесская национальная морская академия, Одесса, Украина.

ОХОЛОЖДЕННЯ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ МАЛООБЕРТОВОГО ДИЗЕЛЯ ТРАНСПОРТНОГО СУДНА ТЕПЛОВИКОРИСТОВУЮЧОЮ ЕЖЕКТОРНОЮ ХОЛОДИЛЬНОЮ МАШИНОЮ

Р.М. Радченко, Т. Бохдаль, М.І. Радченко

Проаналізовано використання теплоти відхідних газів і наддувочного повітря судових малооборотних дизелів для охолодження повітря на вході турбокомпресорів тепловикористовуючими холодильними машинами. Розраховані величини зниження температури повітря, які досягаються виходячи з наявної скидної теплоти дизелів при різних тепловологісних умовах на вході турбокомпресорів. Визначені межі ефективного застосування комплексної утилізації теплоти відхідних газів і наддувочного повітря малооборотних дизелів для охолодження повітря на вході турбокомпресорів.

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

COOLING THE AIR AT THE INLET OF LOW SPEED DIESEL OF TRANSPORT SHIP BY WASTE HEAT RECOVERY EJECTOR COOLING MACHINE

R.N. Radchenko, T. Bohdal, N.I. Radchenko

Utilizing the heat of exhaust gases and scavenge air in ship low speed diesels to cool the air at the inlet of turbocompressors by waste heat recovery cooling machines. The values of air temperature drop due to the available waste heat of diesels at various heat-humidity conditions at the inlet of turbocompressors. The conditions of efficient application of complex recovery of the heat of exhaust gases and scavenge air in low speed diesels for cooling of the air at the inlet of turbocompressors.

Key words: waste heat recovery ejector cooling machine, low speed diesel, heat utilization, cooling of air, low boiling working fluid.

Радченко Роман Николаевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина.

Бохдаль Тадеуш – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой тепло- и хладотехники, Кошалинский технический университет, Польша.

Радченко Николай Иванович – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина.