

УДК 621.57

Р. Н. РАДЧЕНКО<sup>1</sup>, И. В. КАЛИНИЧЕНКО<sup>1</sup>, Ю. Г. ЩЕРБАК<sup>2</sup><sup>1</sup> *Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина*<sup>2</sup> *Черноморский государственный университет им. П. Могилы, Николаев, Украина*

## ТРАНСФОРМАЦИЯ СБРОСНОЙ ТЕПЛОТЫ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ С ОХЛАЖДЕНИЕМ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ РЕЙСОВОЙ ЛИНИИ

*Проанализировано охлаждение воздуха на входе турбокомпрессора судового дизеля теплоиспользующей эжекторной холодильной машиной, утилизирующей теплоту уходящих газов. На примере рейсовой линии "Мариуполь-Амстердам-Мариуполь" показана необходимость учета эксплуатации системы утилизации сбросной теплоты дизеля в двух вариантах трансформации теплоты – с получением "энергетического" холода для охлаждения воздуха на входе турбокомпрессора теплоиспользующей холодильной машиной и использованием сбросной теплоты на теплофикационные нужды. Рассмотрены особенности и пути реализации обоих вариантов трансформации теплоты.*

**Ключевые слова:** трансформация сбросной теплоты, дизель, охлаждение воздуха, теплоиспользующая холодильная машина, рейсовая линия.

### 1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

Значительные изменения в течение рейса температуры наружного воздуха, соответственно и воздуха на входе турбокомпрессора (ТК) судового дизеля, остро ставят проблему охлаждения циклового воздуха с целью поддержания его высокой топливной эффективности. Известно, что с увеличением на 10 °С температуры воздуха на входе ТК малооборотных дизелей (МОД), применяющихся в качестве главных двигателей, удельный расход топлива  $b_e$  возрастает на 0,5...0,7 % [1, 2]. Возрастание при этом температуры уходящих газов и соответствующих потерь теплоты делает целесообразным ее трансформацию в холод теплоиспользующей холодильной машиной (ТХМ) и охлаждением воздуха на входе ТК [3, 4]. Однако эксплуатация судна в течение одного рейса в разных климатических зонах ставит остро вопросы трансформации сбросной теплоты не только в режиме производства холода, но и в традиционном теплофикационном режиме.

**Цель работы** – анализ эффективности трансформации сбросной теплоты судового дизеля с получением "энергетического" холода для охлаждения воздуха на входе ТК в ТХМ и использованием сбросной теплоты на теплофикационные нужды, определение путей их совместной реализации.

### 2. Результаты исследования

В качестве ТХМ рассмотрена конструктивно наиболее простая и надежная в эксплуатации эжек-

торная холодильная машина (ЭХМ), в которой функцию компрессора выполняет эжектор. Применение в ЭХМ низкокипящих рабочих тел (НРТ) позволяет охлаждать воздух на входе ТК МОД до сравнительно низких температур 15...20 °С и при этом избегать необходимости поддержания вакуума в испарителе НРТ-воздухоохладителе (И-ВО).

ЭХМ состоит из паросилового и холодильного контуров (рис. 1, а). Паросиловой контур служит для получения в генераторе паров НРТ высокого давления, энергия которых используется в эжекторе для поджатия паров НРТ низкого давления, всасываемых из И-ВО холодильного контура, до давления в конденсаторе. Эжектор совмещает функции детандера паросилового контура (расширение пара происходит в сопле) и компрессора холодильного контура (повышение давления – в камере смешения и диффузоре). Теплота уходящих газов используется в пароводяном утилизационном котле (УК), а водяного пара – на покрытие судовых нужд (20...30 % в теплое время) и в ЭХМ (80...70 %) для получения холода.

На рис. 1, б приведены удельные, приходящиеся на единицу расхода уходящих газов (воздуха), теплота, отведенная от уходящих газов в генераторе ЭХМ  $\bar{q}_Г$ , и холодопроизводительность ЭХМ  $\bar{q}_0$ , снижение температуры  $\Delta t_v$  воздуха в охладителе на входе ТК в зависимости от температуры  $t_r$  кипения НРТ в генераторе при разных коэффициентах влаговыпадения  $\xi$ . В качестве НРТ применен озонобезопасный хладон R142b. Температура кипения R142b в испарителе  $t_0 = 5$  °С, а конденсации  $t_k = 35$  °С.

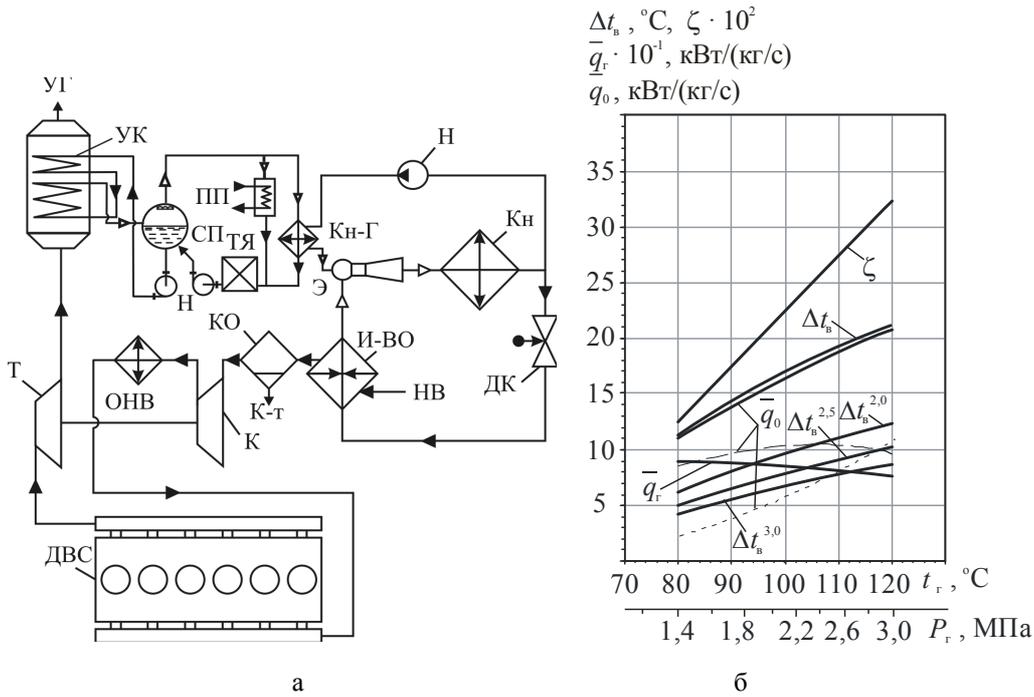


Рис. 1. Схема системы охлаждения воздуха на входе ТК, использующей теплоту уходящих газов после турбины ТК (а), удельная теплота, отведенная от уходящих газов в генераторе ЭХМ  $\bar{q}_r$ , холодопроизводительность ЭХМ  $\bar{q}_0$  и снижение температуры  $\Delta t_b$  воздуха в охладителе на входе ТК, тепловой коэффициент  $\zeta$  в зависимости от температуры  $t_r$  кипения хладагента R142b в генераторе при разных коэффициентах влаговывадения  $\xi$ :  $\Delta t_b \dots \Delta t_b^{3,0} - \xi = 1,0 \dots 3,0$ ; - - - испарительная секция генератора,  $\bar{q}_0$ ; ···· — экономайзерная секция,  $\bar{q}_0$ ; — — генератор в целом,  $\bar{q}_0$ ,  $\bar{q}_r$ ,  $\Delta t_b$ ; Кн-Г — конденсатор водяного пара-генератор паров НРТ; Э — эжектор; Кн — конденсатор НРТ; Н — насос; ДК — дроссельный клапан; И-ВО — испаритель-воздухоохладитель; ОНВ — охладитель наддувочного воздуха водяной; УК — утилизационный котел; КО — каплеотделитель; К-т — конденсат; К — компрессор ТК; Т — турбина ТК; СП — сепаратор пара; ТЯ — теплый ящик; ПП — потребители пара; НВ — наружный воздух; УГ — уходящие газы

Из рис. 1, б видно, что при температуре кипения НРТ в генераторе  $t_r = 120$  °С снижение температуры воздуха в охладителе составляет  $\Delta t_b = 11 \dots 17$  °С при коэффициентах влаговывадения соответственно  $\xi = 3,0 \dots 2,0$ . Коэффициент влаговывадения  $\xi$  — отношение полного количества теплоты (разности энтальпий воздуха на входе и выходе из охладителя), отведенной от влажного воздуха в охладителе, т. е. холодопроизводительности ЭХМ  $Q_0$ , к количеству явной теплоты, определяемому разностью температур по сухому термометру:  $\xi = Q_0 / [G_b \cdot c_b (t_{b1} - t_{b2})]$ . Чем больше  $\xi$ , 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 влаговывадения.

В качестве примера рассмотрен балкер типа "Киев" с главным двигателем 8S50ME-C7.1-III 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 Мариуполь-Амстердам-Мариуполь.

Изменение температуры  $t_{нв}$ , относительной влажности  $\phi_{нв}$  и влагосодержания  $d_{нв}$  наружного воздуха в течение летнего рейса Мариуполь-Амстердам-Мариуполь (1.07...26.07.2009) представлено на рис. 2.

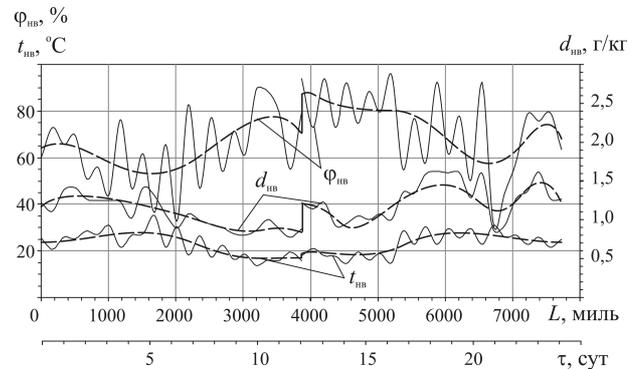


Рис. 2. Изменение температуры  $t_{нв}$ , относительной влажности  $\phi_{нв}$  и влагосодержания  $d_{нв}$  наружного воздуха в течение рейса Мариуполь-Амстердам-Мариуполь (1.07...26.07.2009)

Как видно, в течение суток имеют место существенные колебания температуры  $t_{нв}$  и относительной влажности  $\phi$  наружного воздуха, причем максимумам температур соответствуют минимумы влажности. Наличие дневных и ночных противоположно направленных экстремумов  $t_{нв}$  и  $\phi$  создает благоприятные условия для большего снижения температуры воздуха на входе ТК МОД днем (благодаря меньшей относительной влажности  $\phi$  и соответственно затрат холодопроизводительности на конденсацию водяных паров), когда имеет место значительное ухудшение топливной эффективности МОД из-за повышенных  $t_{нв}$ .

В случае подачи в ТК двигателя воздуха из МО его температуру  $t_{в1}$  на входе ВО принимают на  $10^\circ\text{C}$  выше, чем наружного воздуха, а отдельным воздухопроводом – на  $5^\circ\text{C}$  выше чем  $t_{нв}$  [1, 2]. Соответственно и затраты холодопроизводительности ЭХМ  $Q_0$  при охлаждении воздуха до одной и той же температуры  $t_{в2}$  в первом случае больше, чем во втором.

Холодопроизводительность ЭХМ  $Q_0$  определяют исходя из располагаемой теплоты уходящих газов  $Q_r$  как  $Q_0 = \zeta Q_r$ , где  $\zeta$  – тепловой коэффициент ЭХМ,  $\zeta = 0,30 \dots 0,35$ .

Снижение температуры воздуха  $\Delta t_b = t_{в1} - t_{в2}$  и температуру охлажденного воздуха  $t_{в2}$  на входе ТК определяют из теплового баланса ВО ЭХМ  $Q_0 = G_b \cdot c_b (t_{в1} - t_{в2}) \zeta$  при текущих в течение рейса температуре наружного воздуха  $t_{нв}$  и относительной влажности  $\phi_{нв}$  (соответственно  $t_{в1}$  и  $\phi_{в1}$ ). Расход воздуха  $G_b$  через ТК рассчитывают по программе корпорации MAN в зависимости от температуры воздуха  $t_{в2}$  на входе ТК [5].

С учетом разности температур между охлажденным воздухом и кипящим R142b,  $t_{в2} - t_0 = 10^\circ\text{C}$ , глубина охлаждения воздуха в И-ВО ограничивается температурой  $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$  (при  $t_0 = 5^\circ\text{C}$ ).

Снижение температуры воздуха  $\Delta t_b$  в охладителе ЭХМ на входе ТК и температура воздуха на выходе из воздухоохладителя  $t_{в2}$  при подаче воздуха в ТК из МО в течение летнего рейса Мариуполь–Амстердам–Мариуполь приведены на рис. 3.

Как видно, снижение температуры воздуха  $\Delta t_b$  в охладителе ЭХМ на входе ТК при его подаче из МО больше по сравнению с его подводом отдельным воздухопроводом:  $\Delta t_b'' > \Delta t_b'$ , что обусловлено более высокой (примерно на  $5^\circ\text{C}$ ) температурой воздуха в МО по сравнению с его температурой в воздуховоде. С учетом еще и повышенной влажности воздуха в МО затраты холода на его охлаждение значительно больше, чем при подаче наружного воздуха воздухопроводом. В результате температура воздуха на выходе из воздухоохладителя  $t_{в2}$  оказывается выше  $15^\circ\text{C}$  (рис. 3).

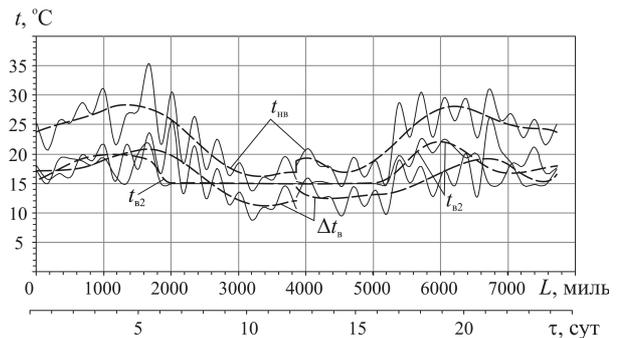


Рис. 3. Изменение температуры наружного воздуха  $t_{нв}$ , снижение температуры воздуха  $\Delta t_b$  в охладителе на входе ТК и температура воздуха на выходе из охладителя  $t_{в2}$  при подаче в охладитель на входе ТК МОД воздуха из МО

Значения холодопроизводительности ЭХМ  $Q_0$ , расходуемой на охлаждение воздуха в охладителе на величину  $\Delta t_b$ , даны на рис. 4, а ее доля  $\Delta Q_0$  от располагаемой холодопроизводительности (получаемой в ЭХМ за счет утилизации теплоты уходящих газов) в течение летнего рейса Мариуполь–Амстердам–Мариуполь при подаче воздуха в охладитель отдельным воздухопроводом  $\Delta Q_0'$  и из МО  $\Delta Q_0''$  – на рис. 5.

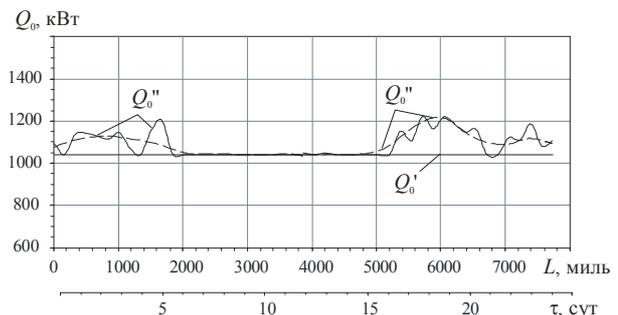


Рис. 4. Текущие значения холодопроизводительности ЭХМ  $Q_0$ , расходуемой на охлаждение воздуха на входе МОД на величину  $\Delta t_b$  до  $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$  при подаче воздуха в охладитель отдельным воздухопроводом  $Q_0'$  и из МО  $Q_0''$

Как видно, в случае подачи на вход охладителя наружного воздуха отдельным воздухопроводом на его охлаждение расходуется около половины располагаемой холодопроизводительности ЭХМ (исходя из располагаемой теплоты уходящих газов). При подаче воздуха в охладитель из МО на участке протяженностью примерно 2000...2500 км прямого и обратного рейсов (Одесса–Порто и Порто–Одесса) при повышенных температурах  $t_{нв}$  имеет место 20...30 % дефицит холода:  $\Delta Q_0'' > 100\%$ . В результате температура воздуха на выходе из воздухоохладителя  $t_{в2}$  оказывается выше  $15^\circ\text{C}$  (рис. 4). Поэтому для охлаждения воздуха в охладителе на входе ТК до  $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$  необходимо использовать либо дополни-

тельные источники сбросной теплоты, например наддувочного воздуха для нагрева конденсата НРТ в экономайзерной секции генератора, за счет чего можно практически удвоить выработку холода ( $\bar{q}_0 \approx \bar{q}_0''$  при  $t_r = 110...120^\circ\text{C}$  согласно рис. 1,б), либо применять термодинамически более эффективные ТХМ, например, абсорбционные бромистолитиевые холодильные машины (АБХМ).

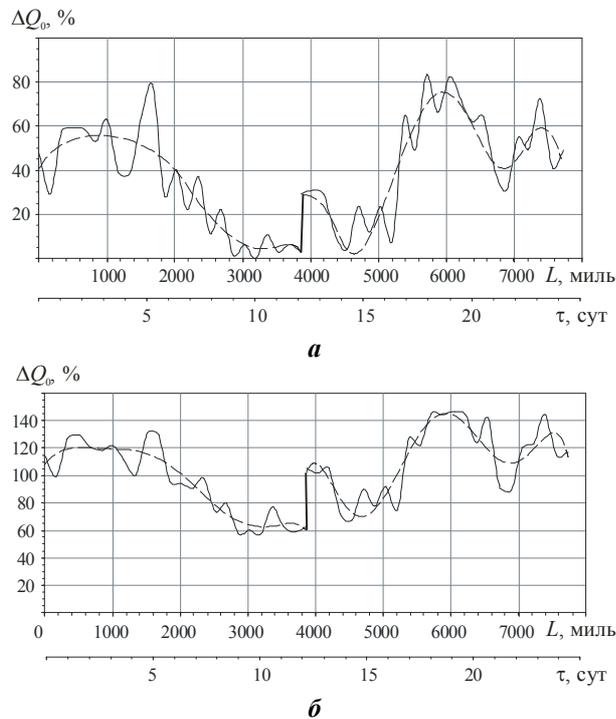


Рис. 5. Доля холодопроизводительности ТЭХМ  $\Delta Q_0$ , расходуемая на охлаждение воздуха в охладителе на входе ТК до  $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$  на величину  $\Delta t_v$  от ее располагаемой величины, получаемой за счет теплоты уходящих газов, при подаче воздуха отдельным воздуховодом  $\Delta Q_0'$  (а) и из МО  $\Delta Q_0''$  (б)

Как видно, по климатическим условиям и, следовательно, потребности в охлаждении циклового воздуха судовых дизелей рейсы из Украины в Западную Европу можно разбить на две части, причем сопоставимые по продолжительности эксплуатации энергоустановки: участок рейса, на котором необходимо получение холода с помощью ТХМ, и участок с повышенными затратами теплоты на теплофикационные нужды. Следует отметить, что при расчетах располагаемой холодопроизводительности ЭХМ исходили из потребления 80 % теплопроизводительности УК по водяному пару, т.е. за вычетом его затрат на судовые нужды.

Таким образом, если на участке рейса с потребностью в "энергетическом" холоде стоит задача эффективной трансформации сбросной теплоты в

холод с помощью ТХМ, то на "теплофикационном" участке рейса, наоборот, актуально эффективное функционирование теплогенерирующей (когенерационной) энергоустановки. Поскольку в обоих вариантах задействованы штатные УК, методики проектирования которых достаточно отработаны и апробированы, то актуальными являются вопросы рационального проектирования дополнительных теплообменников, встраиваемых в воздушный тракт МОД: воздухоохлаждателей на входе ТК и теплоиспользующей (когенерационной) высокотемпературной ступени охладителя наддувочного воздуха (ОНВ<sub>ВТ</sub>) для отвода теплоты от наддувочного воздуха на ТХМ или на теплофикационные нужды.

Поскольку во втором случае необходимость в работе ТХМ отпадает в силу отсутствия потребности в охлаждении циклового воздуха МОД, т.е. уменьшается коэффициент использования ТХМ в течение рейса, то с точки зрения капитальных затрат наиболее приемлемым является применение конструктивно простых и самых дешевых ЭХМ. Их интегрирование в энергоустановку МОД сводится к монтажу на входе ТК испарителя НРТ-воздухоохлаждателя. При этом генератор паров НРТ подключают к пароконденсатной системе УК, а в случае использования теплоты наддувочного воздуха – к ОНВ<sub>ВТ</sub> посредством промежуточного водяного контура.

Следует отметить, что с точки зрения механической прочности цилиндропоршневой группы ДВС недопустимо чрезмерное повышение давления в рабочих цилиндрах, которое имеет место, наоборот, при пониженных температурах воздуха на входе ТК и, соответственно, повышенных его расходах. Во избежание этого прибегают к снижению мощности ТК с соответствующим уменьшением его производительности и напора путем частичного байпасирования турбины наддувочного ТК и подачи части выпускных газов, минуя ТК, в утилизационный турбогенератор (УТГ) для дополнительной выработки электроэнергии либо напрямую в УК для получения дополнительного количества пара, в частности, на теплофикационные нужды. Таким образом, охлаждение воздуха на входе ТК можно рассматривать как эффективный способ комплексного решения проблемы повышения топливной экономичности МОД и повышения теплопроизводительности (при глубоком охлаждении воздуха).

### Выводы

В зависимости от климатических условий эксплуатации на отдельных участках рейса на примере рейсовой линии "Мариуполь-Амстердам-Мариуполь" показана потребность в трансформации

сбросной теплоты дизеля как с получением "энергетического" холода для охлаждения воздуха на входе турбокомпрессора теплоиспользующей холодильной машиной, так и использованием сбросной теплоты на теплофикационные нужды. Определены некоторые пути реализации обоих вариантов трансформации теплоты, включая и совместную.

### Литература

1. *Influence of Ambient Temperature Conditions on Main Engine Operation [Electronic resource]. – MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2005. – Access mode: [http://www.mandiesel.com/files/news/files/762/5510-0005.00pr\\_low.pdf](http://www.mandiesel.com/files/news/files/762/5510-0005.00pr_low.pdf). – 12.03.2015.*

2. *Thermo Efficiency System (TES) for reduction of fuel consumption and CO<sub>2</sub> emission [Electronic re-*

*source]. – MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2005. – Access mode: <http://www.mandiesel.com/files/news/files/5055/P3339161.pdf>. – 12.03.2015.*

3. *Радченко, Р. Н. Повышение топливной эффективности малооборотного дизеля транспортного судна охлаждением воздуха на входе эжекторной холодильной машиной [Текст] / Р. Н. Радченко // Зб. наук. праць НУК. – 2011. – Вип. № 2 (437). – С. 71–76.*

4. *Радченко, Р. Н. Анализ альтернативных вариантов охлаждения циклового воздуха малооборотного дизеля транспортного судна [Текст] / Р. Н. Радченко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – № 5 (112). – С. 104–108.*

5. *MAN B&W ME/ME-C/ME-GI/ME-B-TII engines [Text]. – Copenhagen, Denmark: MAN Diesel. – 2010. – 7 p.*

*Поступила в редакцию 16.04.2015, рассмотрена на редколлегии 17.06.2015*

### ТРАНСФОРМАЦІЯ СКИДНОЇ ТЕПЛОТИ СУДНОВОГО ДИЗЕЛЯ З ОХОЛОДЖЕННЯМ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ В КЛІМАТИЧНИХ УМОВАХ РЕЙСОВОЇ ЛІНІЇ

*Р. М. Радченко, І. В. Калініченко, Ю. Г. Щербак*

Проаналізовано охолодження повітря на вході турбокомпресора суднового дизеля тепловикористовуючою холодильною машиною, що утилізує теплоту відхідних газів. На прикладі рейсової лінії "Маріуполь-Амстердам-Маріуполь" показана необхідність врахування експлуатації системи утилізації скидної теплоты дизеля у двох варіантах трансформації теплоты – з отриманням "енергетичного" холоду для охолодження повітря на вході турбокомпресора тепловикористовуючою холодильною машиною та використанням скидної теплоты на теплофікаційні потреби. Розглянуто особливості та шляхи реалізації обох варіантів трансформації теплоты.

**Ключові слова:** трансформація скидної теплоты, дизель, охолодження повітря, тепловикористовуюча холодильна машина, рейсова лінія.

### TRANSFORMING THE WASTE HEAT OF MARINE DIESEL ENGINE WITH INTAKE AIR COOLING IN CLIMATICAL CONDITIONS OF ROUT LINE

*R. N. Radchenko, I. V. Kalinichenko, Y. G. Scherbuk*

Cooling of the air at the inlet of turbocompressor of marine diesel engine by waste heat recovery ejector chiller utilizing the heat of exhaust gases has been analyzed. For the rout line "Mariupol-Amsterdam-Mariupol" as an example the necessity of consideration of diesel engine waste heat recovery system performance in two variants of transformation of heat – with generating the "energetic" cold for cooling of the air at the inlet of turbocompressor by waste heat recovery chiller and with the use of waste heat for heating needs was shown. The features and the ways of both approaches for realization of heat transformation are discussed.

**Key words:** waste heat transforming, diesel engine, air cooling, waste heat recovery chiller, rout line.

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

**Калиниченко Иван Владимирович** – ассистент кафедры теплотехники, Херсонский филиал Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина.

**Щербак Юрий Георгиевич** – канд. техн. наук, доцент, Черноморский государственный университет им. П. Могилы, Николаев, Украина.