

УДК 621.57

Р.Н. РАДЧЕНКО<sup>1</sup>, Н.И. РАДЧЕНКО<sup>1</sup>, Т. БЕС<sup>2</sup>, А.А. СИРОТА<sup>3</sup><sup>1</sup>Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина<sup>2</sup>Западно-Померанский технологический университет, Щецин, Польша<sup>3</sup>Черноморский государственный университет им. П. Могилы, Николаев, Украина

## УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛА УХОДЯЩИХ ГАЗОВ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ ГЛАВНОГО ДВИГАТЕЛЯ ТРАНСПОРТНОГО СУДНА

*Проанализировано использование теплоты уходящих газов судового малооборотного дизеля для охлаждения воздуха на входе турбокомпрессора эжекторной теплоиспользующей холодильной машиной. Рассчитаны величины снижения температуры воздуха на входе турбокомпрессора и соответствующего сокращения удельного расхода топлива судового дизеля, достижимые исходя из располагаемой теплоты уходящих газов при разных температуре и влажности воздуха на входе на конкретной рейсовой линии. Показано изменение эффективности использования теплоты уходящих газов для охлаждения воздуха на входе судового дизеля на разных участках рейсовой линии.*

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

### 1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

В качестве главных двигателей (ГД) на транспортных судах применяются в основном малооборотные дизели (МОД). В течение рейса температура  $t_{\text{нв}}$  и влажность  $\phi$  наружного воздуха, соответственно воздуха в машинном отделении (МО) и на входе наддувочного турбокомпрессора (ТК) МОД существенно меняются, что влияет на топливную эффективность МОД. Так, удельный расход топлива  $b_e$  увеличивается на 0,5...0,7% с повышением температуры воздуха на входе ТК МОД на 10 °С [1, 2]. При этом возрастают температура уходящих газов после турбины ТК и, следовательно, потери теплоты с ними. Поэтому представляется целесообразным использовать теплоту уходящих газов в холодильных машинах для охлаждения воздуха на входе ТК, повышая таким образом топливную эффективность МОД.

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 исключить необходимость поддержания вакуума в испарителе – охладителе воздуха.

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

### 2. Результаты исследования

Схема системы утилизации теплоты уходящих газов после турбины ТК для охлаждения воздуха на входе МОД в ТЭХМ представлена на рис. 1 (контур утилизационного котла показан упрощенно).

В ТЭХМ теплота уходящих газов трансформируется в холод, соответственно она состоит из паросилового и холодильного контуров. В паросиловом контуре образуются пары 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 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. Таким образом, эжектор совмещает функции детандера паросилового контура (расширение пара происходит в сопле) и компрессора холодильного контура (повышение давления пара – в камере смешения и диффузоре).

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  $\zeta$ , ко-

торый 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:  $\zeta = Q_0/Q_r$ .

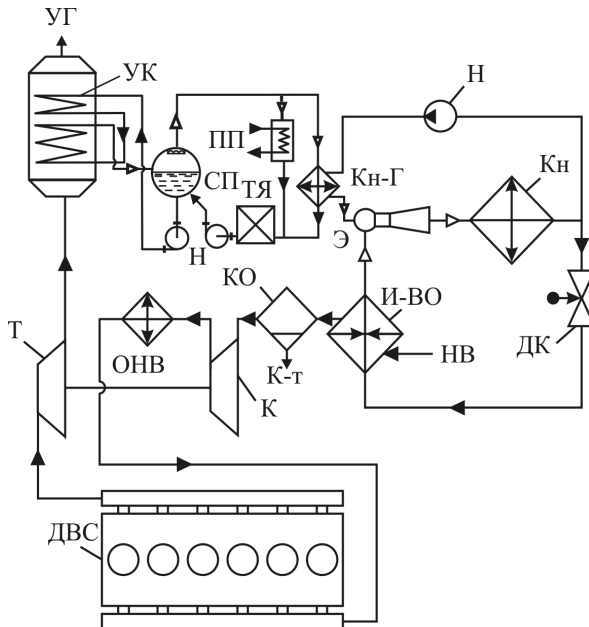


Рис. 1. Схема системы утилизации теплоты выпускных газов с охлаждением воздуха на входе ТК:  
 ДВС – двигатель внутреннего сгорания;  
 Кн-Г – конденсатор водяного пара-генератор паров НРТ; Э – эжектор; Кн – конденсатор НРТ;  
 Н – насос; И-ВО – испаритель-воздухоохладитель;  
 ДК – дроссельный клапан; ОНВ – охладитель наддувочного воздуха водяной;  
 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

В общем случае генератор паров НРТ 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  $t_r$ .

Значения удельных, приходящихся на единицу расхода газов (воздуха) теплоты, отведенной от уходящих газов в генераторе ТЭХМ  $\bar{q}_r$ , и холодопроизводительности ТЭХМ  $\bar{q}_0$ , коэффициента эжекции  $U$  и теплового коэффициента  $\zeta$ , снижения температуры  $\Delta t_b$  воздуха в охладителе 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.

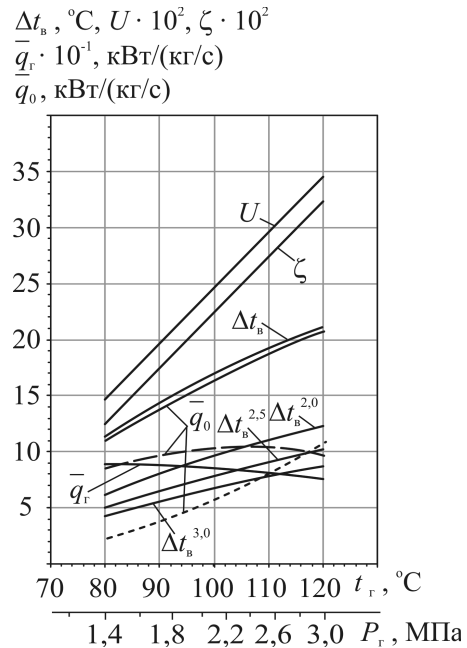


Рис. 2. Удельные теплота, отведенная от выпускных газов и наддувочного воздуха в генераторе ТЭХМ  $\bar{q}_r$ , и холодопроизводительность ТЭХМ  $\bar{q}_0$ , коэффициент эжекции  $U$  и тепловой коэффициент  $\zeta$ , снижения температуры  $\Delta t_b$  воздуха в охладителе на входе ТК в зависимости от температуры  $t_r$  и давления  $P_r$  кипения R142b в генераторе при разных коэффициентах влаговывадения  $\xi$ :  
 $\Delta t_b \dots \Delta t_b^{3,0} - \xi = 1,0 \dots 3,0$ ;  
 - - - - 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  $\Delta t_b = 8 \dots 12^\circ\text{C}$  при коэффициентах влаговывадения соответственно  $\xi = 3,0 \dots 2,0$ .

Коэффициент влаговывадения  $\xi$  – отношение полного количества теплоты, отведенной от влажного воздуха в охладителе, к явному, определяемому разностью температур по сухому термометру.  $\xi = (I_{в1} - I_{в2}) / [c_{вл} \cdot (t_{в1} - t_{в2})]$ , где  $c_{вл}$  – теплоемкость влажного воздуха  $c_{вл} = 1,01 + 1,89d$ ;  $d$  – влагосодержание, кг/кг;  $t_{в1}$  и  $t_{в2}$  – температуры воздуха на входе и выходе из охладителя по сухому термометру;  $I_{в1}$  и  $I_{в2}$  – энтальпии влажного воздуха на входе и выходе из охладителя,  $I_v = c_{вл} \cdot t_v + 1,89d$ , кДж/кг. 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.

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  $\Delta t_v$  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 Мариуполь-Амстердам-Мариуполь.

Анализ статей расходов пара на балкере типа "Киев" 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.

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. 3.

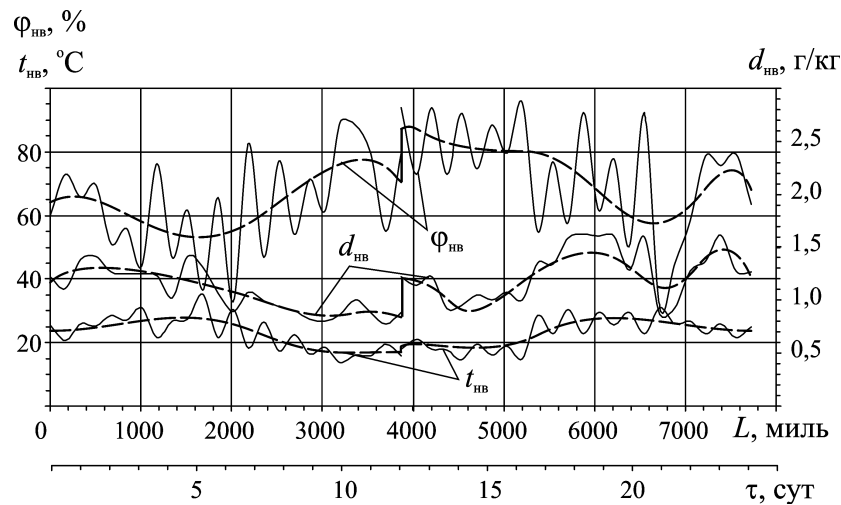


Рис. 3. Изменение температуры  $t_{нв}$ , относительной влажности  $\phi_{нв}$  и влагосодержания  $d_{нв}$  наружного воздуха в течение рейса Мариуполь-Амстердам-Мариуполь (1.07...26.07.2009)

Снижение температуры воздуха  $\Delta t_v = t_{в1} - t_{в2}$  и температуру охлажденного воздуха  $t_{в2}$  на входе ТК определяли из теплового баланса охладителя воздуха ТЭХМ  $Q_0 = G_v \cdot c_v (t_{в1} - t_{в2}) \xi$  при текущих в течение рейса температуре наружного воздуха  $t_{нв}$  и относительной влажности  $\phi_{нв}$  (соответственно  $t_{в1}$  и  $\phi_{в1}$ ). Расход воздуха  $G_v$  через ТК рассчитывали с помощью фирменной программы корпорации MAN в зависимости от температуры воздуха  $t_{в2}$  на входе ТК [3].

В качестве НРТ в ТЭХМ применен хладон R142b. Температура кипения R142b в И-ВО  $t_0 = 5$  °C. С учетом минимальной разности температур между охлажденным воздухом и кипящим R142b,  $t_{в2} - t_0 = 10$  °C, глубина охлаждения воздуха в И-ВО ограничивается температурой  $t_{в2} = 15$  °C.

Наряду с подачей на вход ТК воздуха из МО рассматривался также вариант подачи наружного воздуха отдельным воздухопроводом [1, 2]. В результате нагрева в воздуховоде (второй вариант) температура наружного воздуха повышается примерно на 5 °C, 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.

Снижение температуры воздуха  $\Delta t_v$  в охладителе ТЭХМ на входе ТК при подаче воздуха в ТК отдельным воздухопроводом и из МО с изменением температуры наружного воздуха  $t_{нв}$  в течение летнего рейса Мариуполь-Амстердам-Мариуполь приведены на рис. 4.

Значения холодопроизводительности ТЭХМ  $Q_0$ , расходуемой на охлаждение воздуха в охладителе на величину  $\Delta t_v$ , даны на рис. 5, а ее доли  $\Delta Q_0$  в располагаемой холодопроизводительности (получаемой в ТЭХМ за счет утилизируемой теплоты) 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. 6. Величина  $\Delta Q_0 \leq 100$  % соответствует наличию избытка холода, а  $\Delta Q_0 \geq 100$  % — его дефициту при охлаждении воздуха до минимальной температуры  $t_{в2} = 15$  °C. В последнем случае  $\Delta Q_0$  — это доля располагаемой холодопроизводительности в ее величине, требуемой для охлаждения до 15 °C.

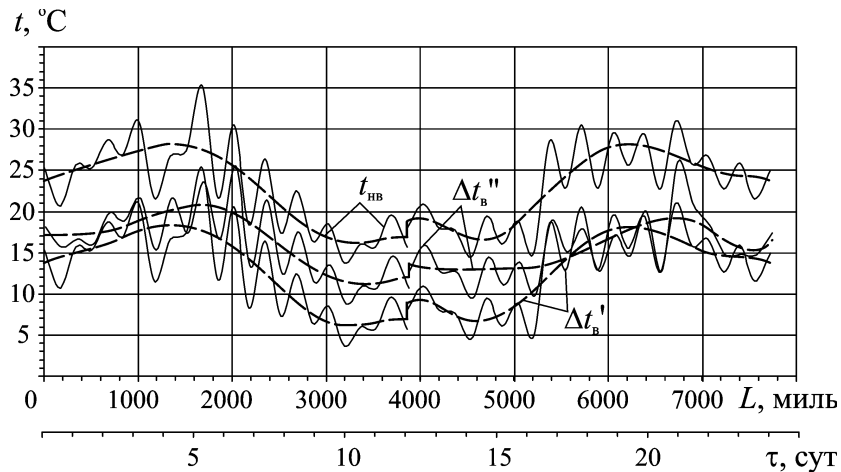


Рис. 4. Изменение температуры наружного воздуха  $t_{\text{нв}}$  и снижение температуры воздуха  $\Delta t_{\text{в}}$  в охладителе на входе ТК в течение рейса:  $\Delta t_{\text{в}}'$  – подача воздуха в охладитель отдельным воздуховодом;  $\Delta t_{\text{в}}''$  – воздух из МО

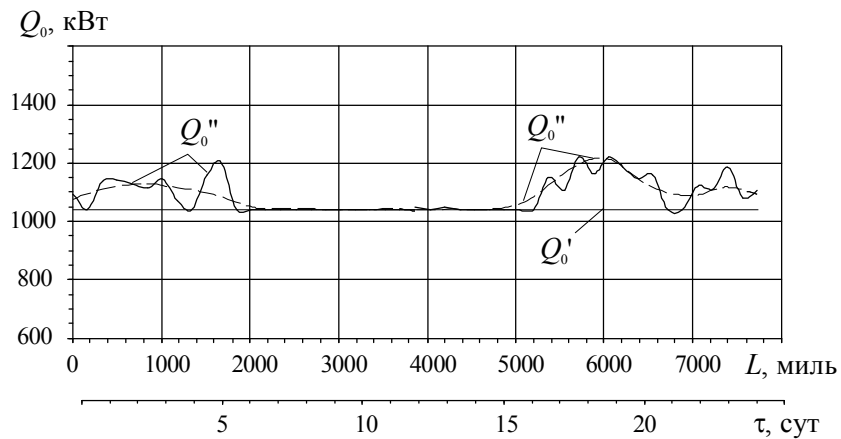


Рис. 5. Холодопроизводительность ТЭХМ  $Q_0$ , расходуемая на охлаждение воздуха в охладителе на входе ТК на величину  $\Delta t_{\text{в}}$  при подаче воздуха отдельным воздуховодом  $Q_0'$  и из МО  $Q_0''$

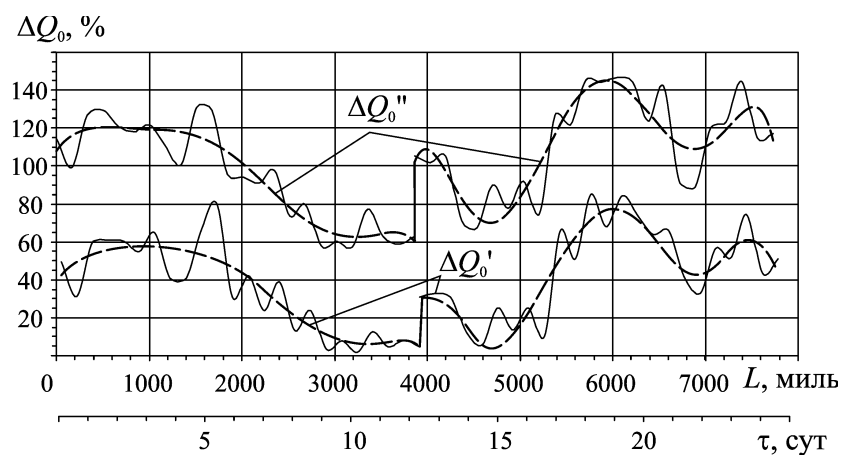


Рис. 6. Доля холодопроизводительности ТЭХМ  $Q_0$ , расходуемая на охлаждение воздуха в охладителе на входе ТК на величину  $\Delta t_{\text{в}}$  при подаче воздуха отдельным воздуховодом  $Q_0'$  и из МО  $Q_0''$

Как видно, в случае подачи на вход охладителя наружного воздуха отдельным воздуховодом на его охлаждение расходуется около половины распола-

гаемой холодопроизводительности ТЭХМ. При подаче воздуха в охладитель из МО имеет место некоторый дефицит холода:  $\Delta Q_0'' > 100 \%$ , и на некото-

рых участках рейса (при повышенных  $t_{нв}$  и  $\phi_{нв}$ ) для охлаждения воздуха в охладителе на входе ТК до  $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$  требуется большая его величина по сравнению с располагаемой. В результате температура воздуха на выходе из воздухоохладителя  $t_{в2}$  оказывается выше  $15^\circ\text{C}$  (рис. 7).

Расход топлива  $B_e$  в зависимости от снижения температуры воздуха на входе ТК рассчитывали с помощью фирменной программы [3] для МОД корпорации MAN в зависимости от температуры возду-

ха  $t_{в2}$  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  $b_e$  примерно на  $1,2 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ .

Снижение удельного расхода топлива  $\Delta b_e$ , полного расхода топлива на ГД в абсолютных  $\Delta B_e$  и относительных  $\overline{\Delta B_e}$  величинах в течение рейса Мариуполь–Амстердам–Мариуполь (1.07...13.07.2009) приведены на рис. 8.

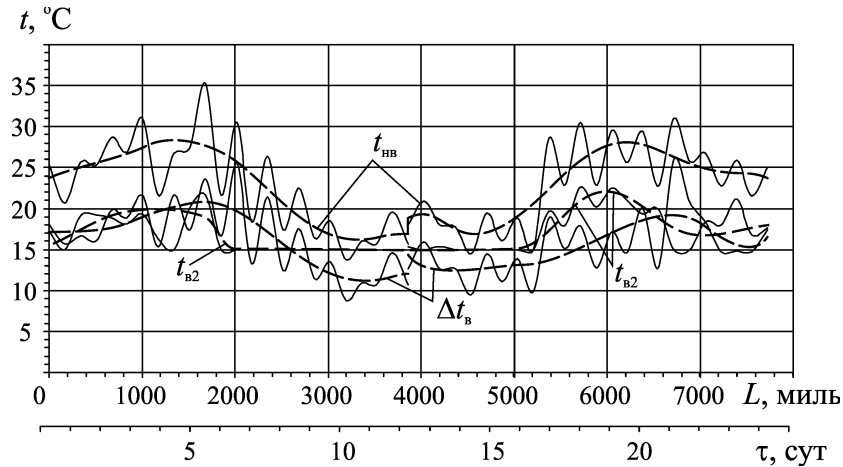


Рис. 7. Изменение температуры наружного воздуха  $t_{нв}$ , снижение температуры воздуха  $\Delta t_b$  в охладителе на входе ТК и температура воздуха на выходе из охладителя  $t_{в2}$  при подаче в охладитель на входе ТК МОД воздуха из МО

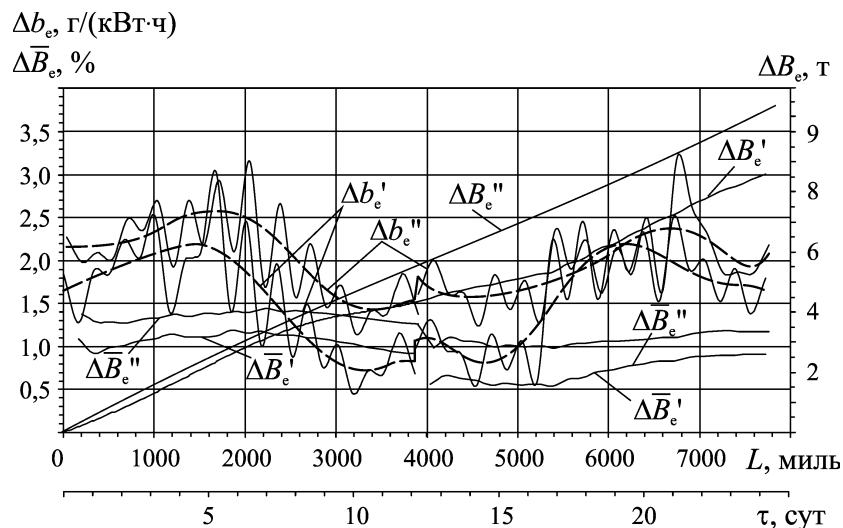


Рис. 8. Уменьшение удельного расхода топлива  $\Delta b_e$ , сокращение расхода топлива в абсолютных  $\Delta B_e$  и относительных  $\overline{\Delta B_e}$  величинах в течение рейса Мариуполь–Амстердам–Мариуполь (1.07...13.07.2009):

$\Delta b_e'$ ,  $\Delta B_e'$  и  $\overline{\Delta B_e}'$  – подача воздуха отдельным воздуховодом;

$\Delta b_e''$ ,  $\Delta B_e''$  и  $\overline{\Delta B_e}''$  – воздух из МО

Из рис. 8 видно, что на протяжении рейса имеют место значительные колебания снижения удельного расхода топлива: от  $\Delta b_e = 1,5 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$  на уча-

стке рейса вдоль Северной Европы до  $2,5 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$  в Средиземном море. Соответственно меняется и относительная экономия потребления топлива:

$\overline{\Delta B_e} = 1,0 \dots 1,4\%$ , а абсолютная экономия потребления топлива за один летний рейс для МОД мощностью 10 МВт составляет  $\Delta B_e = 9 \dots 10$  т (большая величина соответствует подаче в охладитель на входе ТК воздуха из МО с повышенной на 5 °С температурой по сравнению с забором наружного воздуха отдельным воздухопроводом).

### Выводы

Использование теплоты уходящих газов для охлаждения воздуха на входе ТК судового МОД эжекторной холодильной машиной обеспечивает

сокращение удельного расхода топлива в летние месяцы на разных участках рейсовой линии Мариуполь–Амстердам–Мариуполь на 1,5...2,5 г/(кВт·ч).

### 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 CO<sub>2</sub> emission: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2005.*
3. *MAN B&W ME/ME-C/ME-GI/ME-B-TII engines. – Copenhagen, Denmark: MAN Diesel. – 2010.*

Поступила в редакцию 19.05.2011

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

## УТИЛІЗАЦІЯ ТЕПЛА ГАЗІВ, ЩО ЙДУТЬ, ДЛЯ ОХОЛОДЖУВАННЯ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ ГОЛОВНОГО ДВИГУНА ТРАНСПОРТНОГО СУДНА

*Р.М. Радченко, М.І. Радченко, Т. Бес, О.А. Сирота*

Проаналізовано використання теплоти газів судового малооборотного дизеля, що йдуть, для охолодження повітря на вході турбокомпресора ежекторної тепловикористовуючої холодильної машини. Розраховані величини зниження температури повітря на вході турбокомпресора і відповідного скорочення питомої витрати палива судового дизеля, досяжні виходячи з теплоти газів, що йдуть, що розташовується, при різних температурі і вологості повітря на вході на конкретній рейсовій лінії. Показана зміна ефективності використання теплоти газів, що йдуть, для охолодження повітря на вході судового дизеля на різних ділянках рейсової лінії.

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

## UTILIZATION OF HEAT OF LEAVINGS GASES FOR COOLING OF AIR ON ENTRANCE OF MAIN ENGINE OF A TRANSPORT SHIP

*R.N. Radchenko, N.I. Radchenko, T. Bes, A.A. Sirota*

The use of warmth of leavings gases of ship littlecirculating diesel is analysed for cooling of air on the entrance of turbocompressor of ejector heating-exploit by a refrigeration machine. The sizes of decline of temperature of air are expected on the entrance of turbocompressor and proper reduction of specific expense fuels of ship diesel, attainable coming from the disposed warmth of leavings gases at разных to the temperature and humidity of air on an entrance on a concrete trip line. A change efficiency of the use of warmth of leavings gases is shown for cooling of air on the entrance of ship diesel on the different areas of trip line.

**Keywords:** utilization of warmth, cooling of air, heating-exploit ejector refrigeration machine, littlecirculating diesel, low-boil working body.

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

**Радченко Николай Иванович** – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.

**Бес Тадеуш** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры теплотехники, Западно-Померанский университет технологии, Щецин, Польша, e-mail: andrad69@mail.ru.

**Сирота Александр Архипович** – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой техногенной безопасности Черноморского государственного университета им. Петра Могилы, Николаев, Украина.