

УДК 621.436.13:621.57

А.А. АНДРЕЕВ<sup>1</sup>, Н.И. РАДЧЕНКО<sup>1</sup>, А.А. СИРОТА<sup>2</sup><sup>1</sup> *Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина*<sup>2</sup> *Черноморский государственный университет им. П. Могила, Украина*

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ОХЛАЖДЕНИЯ НАДДУВОЧНОГО ВОЗДУХА ГЛАВНОГО СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ С УТИЛИЗАЦИЕЙ ЕГО ТЕПЛОТЫ ЗАБОРТНОЙ ВОДОЙ

*Проанализирована эффективность охлаждения наддувочного воздуха судового малооборотного дизеля забортной водой и эжекторной теплоиспользующей системой охлаждения на низкокипящем рабочем теле, утилизирующей теплоту воздуха. Расчеты выполнены для контейнеровоза на рейсовой линии Одесса–Гавана–Одесса с учетом изменения температуры и влажности наружного воздуха и температуры забортной воды. Для климатических условий конкретной рейсовой линии определены снижение температуры наддувочного воздуха и соответствующее сокращение расхода топлива малооборотного дизеля по сравнению с традиционным охлаждением наддувочного воздуха забортной водой.*

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

### 1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

В качестве главных двигателей на подавляющем большинстве морских судов применяются малооборотные дизели (МОД). Термодинамическая эффективность судовых МОД существенно зависит от температуры наддувочного воздуха: с повышением его температуры на 10 °С эффективный КПД уменьшается примерно на 0,5 % и, соответственно, возрастает удельный расход топлива  $b_e$  [1–3].

Условия эксплуатации судовых МОД отличаются значительным изменением в течение рейса температуры наружного воздуха, а значит и воздуха в машинном отделении, откуда он забирается наддувочным турбокомпрессором (ТК) и, соответственно, наддувочного воздуха (после ТК). При высоких температурах забортной воды  $t_{зв}$ , отводящей от него теплоту, охладители наддувочного воздуха (ОНВ) не обеспечивают достаточного глубокого охлаждения наддувочного воздуха на входе во впускной ресивер, который мог бы нивелировать повышение температуры воздуха на входе наддувочного ТК, что приводит к значительному перерасходу топлива. Проблема снижения топливной экономичности при повышенных температурах наружного воздуха и забортной воды особенно остро стоит в высоконаддувных малооборотных дизелях (МОД), компрессоры которых обеспечивают высокие степени повышения давления воздуха  $\pi_k = 3...4,5$ , а в перспективе и  $\pi_k = 5$  [4, 5].

Известны результаты исследований по охлаждению наддувочного воздуха дизелей воздушными, пароконденсаторными и турбокомпрессорными холодильными машинами; утилизации теплоты наддувочного воздуха в абсорбционных теплоиспользующих системах охлаждения (ТСО) для охлаждения в технологических целях [6, 7]. В отличие от известных исследований в настоящей работе наддувочный воздух рассматривается как источник теплоты и как объект охлаждения одновременно.

Наиболее простыми и надежными в эксплуатации являются теплоиспользующие эжекторные холодильные машины (ЭХМ), в которых функцию компрессора выполняет струйный аппарат – эжектор. Применение в ЭХМ низкокипящих рабочих тел (НРТ) позволяет охлаждать воздух до сравнительно низких температур и за счет этого повышать топливную экономичность МОД. Поскольку использование даже таких простых ТХМ, как эжекторные, все же требует применения дополнительных теплообменников: генератора паров НРТ высокого давления и испарителя НРТ низкого давления, а также конденсатора НРТ, приводящих к усложнению судовой энергетической установки, то представляется вполне логичным сравнить эффективность охлаждения наддувочного воздуха с помощью ЭХМ и в традиционных ОНВ забортной водой. Ранее сравнительный анализ машинного и безмашинного способов охлаждения наддувочного воздуха судовых МОД не проводился, а соответствующие данные отсутствуют в известных публикациях.

**Цель работы** – сравнительная оценка эффективности охлаждения наддувочного воздуха МОД транспортного судна в ЭХМ, утилизирующей теплоту наддувочного воздуха, и традиционном ОНВ заборной водой с учетом меняющихся в течение рейса тепловлажностных параметров наружного воздуха и температуры заборной воды.

## 2. Результаты исследования

Теплоиспользующая система охлаждения (ТСО) эжекторного типа (ЭТСО) конструктивно наиболее простая и надежная в эксплуатации, благодаря чему ее интеграция в штатную систему турбонаддува судовых МОД не приводит к заметному усложнению последней. Выбор эжекторных ТСО обусловлен еще и тем, что если при невысокой их термодинамической эффективности (тепловых коэффициентах) по сравнению с более сложными и громоздкими, а значит менее надежными в эксплуатации и требующими существенных схемно-конструктивных изменений системами охлаждения, например абсорбционными, паро- или турбокомпрессорными, применение эжекторных ТСО окажется целесообразным, то для термодинамических более эффективных систем охлаждения эффект будет еще большим.

Применение в ТСО низкокипящих рабочих тел (НРТ) позволяет охлаждать воду промежуточного контура охлаждения наддувочного воздуха до низких, практически близких 0 °С, температур, причем

без необходимости поддержания вакуума в испарителе НРТ-охладителя воды (И-ОВ). Схема системы охлаждения наддувочного воздуха МОД на базе эжекторной ТСО, использующей теплоту самого же наддувочного воздуха, приведена на рис. 1. Эжекторная ТСО состоит из паросилового и холодильного контуров. Паросиловой контур служит для получения в генераторе паров НРТ высокого давления, энергия которых используется в эжекторе для поджатия паров НРТ низкого давления, всасываемых из испарителя-охладителя воды (И-ОВ) 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 после ТК высокотемпературным промежуточным водяным контуром, а второй – дросселируется в дроссельном клапане и направляется в испаритель, где испаряется при низком давлении и соответственно температуре, отводя теплоту от наддувочного воздуха после водяного ОНВ (на входе во впускной ресивер ДВС) с помощью низкотемпературного промежуточного водяного контура.

Эжектор совмещает функции детандера паросилового контура (расширение пара происходит в его сопле) и компрессора холодильного контура (повышение давления пара, всасываемого из испарителя И-ОВ, происходит в камере смешения и диффузоре).

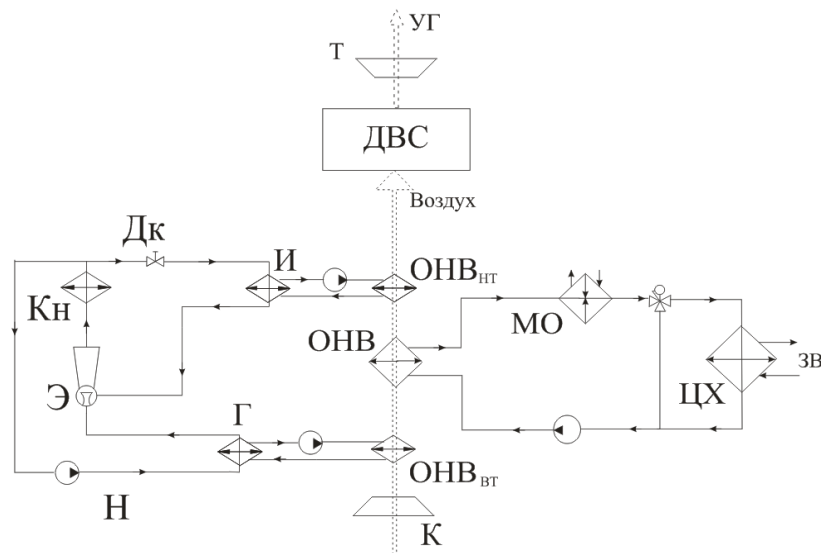


Рис. 1. Схема эжекторной ТСО МОД: ОНВ – водяной охладитель наддувочного воздуха (традиционный); ОНВ<sub>ВТ</sub> и ОНВ<sub>НТ</sub> – высоко- и низкотемпературная ступени водяного охладителя наддувочного воздуха ТСО; К и Т – компрессор и турбина ТК; ЦХ – центральный холодильник; МО – маслоохладитель; ЗВ – заборная вода; Г – генератор ТХМ; Кн – конденсатор ТХМ; И – испаритель ТХМ; Н – насос

Теплота наддувочного воздуха используется для нагрева пресной воды высокотемпературного промежуточного водяного контура до температуры выше температуры кипения НРТ в генераторе  $t_r = 100 \dots 120 \text{ }^\circ\text{C}$  в ОНВ<sub>ВТ</sub> (во избежание вскипания давление воды повышенное). В свою очередь теплота воды используется для нагрева и испарения НРТ при высокой температуре кипения  $t_r = 100 \dots 120 \text{ }^\circ\text{C}$ . Энергия паров НРТ высокого давления используется в эжекторе для всасывания паров НРТ низкого давления из испарителя-охладителя воды (И-ОВ) холодильного – низкотемпературного – промежуточного контура). Вода, охлажденная в И-ВО до температуры, близкой  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , служит хладоносителем для ОНВ<sub>НТ</sub>, в котором происходит окончательное глубокое охлаждение наддувочного воздуха.

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<sub>НТ</sub>.

Термодинамическая эффективность ТСО характеризуется тепловым коэффициентом  $\zeta$ , который представляет собой отношение  $\zeta = Q_0/Q_r$ , т.е. отношение полезной холодопроизводительности  $Q_0$  (количества теплоты, отведенной от наддувочного воздуха в ОНВ<sub>НТ</sub>), к количеству затраченной теплоты  $Q_r$ , подведенной к ТСО от наддувочного воздуха в ОНВ<sub>ВТ</sub>. Тепловой коэффициент  $\zeta$  зависит от температуры кипения НРТ в генераторе  $t_r$ , которая в свою очередь зависит от температуры воды, нагретой в ОНВ<sub>ВТ</sub> и температуры кипения НРТ в испарителе  $t_0$ , близкой  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , от которой зависит глубина охлаждения наддувочного воздуха в ОНВ<sub>НТ</sub>, возрастая с повышением температур кипения НРТ в генераторе  $t_r$  и испарителе  $t_0$  и снижаясь с увеличением температуры конденсации НРТ  $t_k$  (температуры забортной воды, охлаждающей конденсатор ТСО). Значения  $\zeta$  могут существенно колебаться и для хладона R142b составляют  $\zeta = 0,20 \dots 0,35$  (соответственно при  $t_0 = 2 \dots 7 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Исходя из располагаемой теплоты  $Q_r$ , отведенной от наддувочного воздуха в ОНВ<sub>ВТ</sub>, вычисляют холодопроизводительность ТСО:  $Q_0 = \zeta Q_r$ , расходуемую на охлаждение наддувочного воздуха в ОНВ<sub>НТ</sub>.

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  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  выше  $t_{зв}$ ) в штатном ОНВ, служащем второй, промежуточной, ступенью трехступенчатой ТСО, то снижение температуры наддувочного воздуха  $\Delta t_b$  в ОНВ<sub>НТ</sub>, его температуру  $t_{б2}$  после ОНВ<sub>НТ</sub> (на входе в наддувочный ресивер) и соответствующее сокращение потребления топлива МОД определяют с учетом изменения  $t_{нв}$ ,  $\phi_{нв}$  и  $t_{зв}$  на конкретной рейсовой линии.

В качестве примера рассмотрен контейнеровоз с главным двигателем 6S50ME-C корпорации MAN [3] (номинальная мощность  $N_n = 10680 \text{ кВт}$  и эксплуатационная  $N_s = 10000 \text{ кВт}$ ) 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 течение летнего рейса Одесса-Гавана-Одесса (1.07...16.08.2009) представлено на рис. 2.

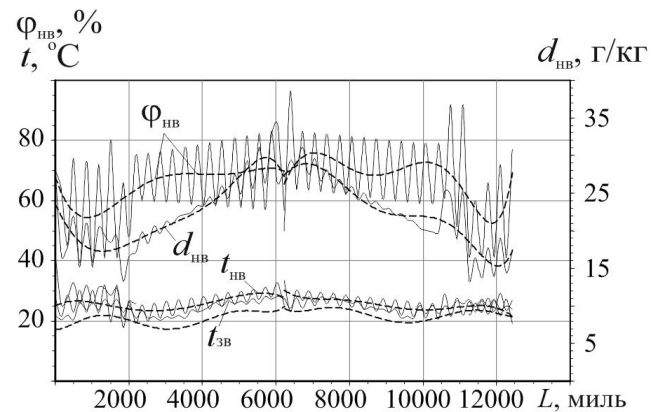


Рис. 2. Изменение температуры  $t_{нв}$ , относительной влажности  $\phi_{нв}$  и влагосодержания  $d_{нв}$  наружного воздуха, температуры забортной воды  $t_{зв}$  в течение рейса Одесса-Гавана-Одесса (1.07...16.08.2009)

Как видно, на протяжении практически всего рейса температура наружного воздуха  $t_{нв}$  составляет  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  и даже  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  (Куба). Относительная влажность воздуха  $\phi_{нв}$  изменяется в основном в диапазоне  $60 \dots 80 \%$ .

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  $d_{нв}$ . Поскольку процессы охлаждения влажного воздуха сопровождаются конденсацией водяных паров, то отвод теплоты конденсации связан с дополнительными (по сравнению с охлаждением сухого воздуха) затратами холодопроизводительности, вследствие чего снижение температуры воздуха при его повышенной влажности  $\phi_{нв}$  и влагосодержании  $d_{нв}$  может оказаться незначительным.

В то же время наличие дневных и ночных противоположно направленных экстремумов  $t_{нв}$  (соответственно и температуры наддувочного воздуха  $t_{ндв}$  после ТК) и  $\phi_{нв}$  (соответственно  $d_{нв}$ ), существование которых проявляется только при локальных во времени измерениях  $t_{нв}$  и  $\phi$ , 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  $t_{ндв}$ . В ночное время, когда  $t_{нв}$  (соответственно и  $t_{ндв}$ ) ниже и меньше потребность в охлаждении наддувочного воздуха, снижение температуры воздуха также меньше из-за большей влажности  $\phi$  (соответственно и  $d_{нв}$ ). Таким образом, при оценке эффективности охлаждения наддувочного воздуха МОД необходимо учитывать изменение температуры  $t_{нв}$ , соответственно и  $t_{ндв}$ , влажности  $\phi$  (влагосодержания  $d_{нв}$ ) наружного (соответственно и наддувочного) воздуха и температуры забортной воды в течение суток. Видно также, что при существенных колебаниях  $t_{нв}$  суточные изменения  $t_{зв}$  не столь значительные.

Обычно в ТК двигателя подают воздух из МО, где его температура  $t_{МО}$  на  $10^\circ\text{C}$  выше, чем наружного воздуха  $t_{нв}$ . Температуру наддувочного воздуха после ТК  $t_k$  (на входе ОНВ<sub>НТ</sub> –  $t_{Г1}$ ):  $t_{Г1} = t_k$  рассчитывали с помощью программы корпорации MAN в зависимости от температуры воздуха на входе ТК  $t_{МО}$  [3].

Температуры наддувочного воздуха, охлажденного в ОНВ<sub>НТ</sub> ТСО  $t_{в2}$  и водяном ОНВ традиционной системы охлаждения  $t_{вв2}$ , при температуре забортной воды  $t_{зв}$ , меняющейся в течение рейса Одесса–Гавана–Одесса (1.07...16.08.2009), приведены на рис. 3.

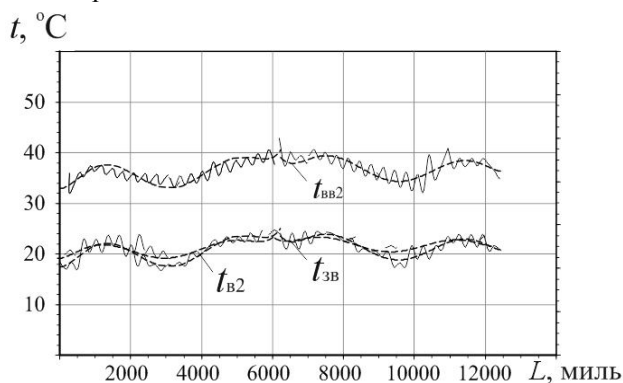


Рис. 3. Температуры наддувочного воздуха, охлажденного в охладителе ОНВ<sub>НТ</sub> ТСО  $t_{в2}$  и водяном ОНВ  $t_{вв2}$  и забортной воды  $t_{зв}$

Как видно, применение ТСО обеспечивает охлаждение наддувочного воздуха до температуры

$t_{в2} = 17...25^\circ\text{C}$ , которая ниже температуры забортной воды:  $t_{в2} < t_{зв}$ , тогда как температура наддувочного воздуха  $t_{вв2}$ , охлажденного в водяном ОНВ традиционной системы охлаждения, значительно выше:

$$t_{вв2} = t_{зв} + \Delta t_{в1} + \Delta t_{в2},$$

где  $\Delta t_{в1} = 5^\circ\text{C}$  – разность температур между охлажденной пресной водой промежуточного контура охлаждения и забортной водой в центральном холодильнике;

$\Delta t_{в2} = 12^\circ\text{C}$  – разность температур между охлажденным наддувочным воздухом и пресной водой.

Охлаждение наддувочного воздуха в ТСО до температуры  $t_{в2}$ , т.е. ниже температуры воздуха  $t_{вв2}$ , охлаждаемого в традиционном водяном ОНВ, на величину  $\Delta t_{во} = t_{вв2} - t_{в2}$ , обеспечивает сокращение удельного  $b_e$  и общего  $V_e$  расходов топлива.

Результаты расчетов снижения удельного расхода топлива  $\Delta b_e$ , полного расхода топлива МОД 6S50ME-C по фирменной программе [3] при меняющихся в течение рейса параметрах наружного воздуха и температуре забортной воды  $t_{зв}$  показали, что практически на протяжении всего рейса уменьшение удельного расхода топлива составляет  $\Delta b_e \approx 2,0 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ . При этом относительная экономия потребления топлива за отдельные рейсы  $\Delta V_e = 1,0...1,2\%$ , а абсолютная экономия топлива за отдельные рейсы для МОД мощностью 10 МВт составляет  $\Delta V_e = 14...18 \text{ т}$  и суммарная за 9 рейсов 144 т.

## Выводы

Использование теплоты наддувочного воздуха судового МОД в эжекторной теплоиспользующей системе охлаждения обеспечивает снижение температуры воздуха до  $15...25^\circ\text{C}$  и сокращение удельного расхода топлива примерно на  $2 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$  в летние месяцы на рейсовой линии Одесса–Гавана–Одесса по сравнению с его охлаждением забортной водой.

На примере конкретной рейсовой линии Одесса–Гавана–Одесса показано, что в условиях судовой эксплуатации, с меняющимися в течение рейса влажностью наружного воздуха, температурой воздуха и забортной воды, утилизация теплоты наддувочного воздуха главного МОД в эжекторной теплоиспользующей системе охлаждения обеспечивает снижение температуры наддувочного воздуха до температуры, близкой  $20^\circ\text{C}$ , и сокращение удельного расхода топлива примерно на  $2,0 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$  по сравнению с традиционным охлаждением воздуха забортной воды.

## 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 CO<sub>2</sub> emission [Text]: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2005. - 20 p.*
3. *MAN B&W ME/ME-C/ME-GI/ME-B-TII engines [Text]. – Copenhagen, Denmark: MAN Diesel. – 2010.- 7 p.*
4. Heim, K. *Existing and Future Demands on the turbocharging of Modern Large Two-stroke Diesel Engines [Text] / K. Heim // 8-th Supercharging Conference, Dresden, 1-2 October, 2002. – P. 41-46.*
5. Fuminory, I. *Development of TPL and TPS Series Marine Turbocharger [Text] / I. Fuminory, K. Mitsubory // IHI Engineering Review. – 2004. - Vol. 37, No. 1. – P. 35–39.*
6. Баренбойм, А.Б. *Искусственное охлаждение наддувочного воздуха [Текст] / А.Б. Баренбойм, Б.А. Минкус // Тр. ОТХП, 1961. – Т.10. – С. 10–16.*
7. Мошенцев, Ю.Л. *Охлаждение наддувочного воздуха с использованием воздушной холодильной машины [Текст] / Ю.Л. Мошенцев, Б.Г. Тимошевский, Ву Дык Бао // Авиационно-космическая техника и технология. –2001. – №8 (23). – С. 90–92.*

Поступила в редакцию 18.10.2012, рассмотрена на редколлегии 13.03.2013

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

## ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ОХОЛОДЖЕННЯ НАДДУВНОГО ПОВІТРЯ ГОЛОВНОГО СУДНОВОГО ДИЗЕЛЯ З УТИЛІЗАЦІЄЮ ЙОГО ТЕПЛОТИ ЗАБОРТНОЮ ВОДОЮ

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

Проаналізовано ефективність охолодження наддувочного повітря суднового малооборотного дизеля забортною водою і ежекторною тепловикористовуючою системою охолодження на низькокиплячому робочому тілі, що утилізує теплоту повітря. Розрахунки виконано для контейнеровоза на рейсовий лінії Одеса-Гавана-Одеса з урахуванням зміни температури і вологості зовнішнього повітря і температури забортної води. Для кліматичних умов конкретної рейсової лінії визначено зниження температури наддувочного повітря і відповідне скорочення витрати палива малооборотного дизеля в порівнянні з традиційним охолодженням наддувочного повітря забортною водою.

**Ключові слова:** судновий малооборотний дизель, охолодження, наддувне повітря, тепловикористовуюча установка, низькокипляче робоче тіло

## COMPARISON SCAVENGE AIR COOLING OF MAIN MARINE DIESEL WITH UTILIZATION HIS WARMTH BY SEAWATER

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

Analyzing the effectiveness of scavenge-air cooling vessel of low-speed diesel by seawater and ejector heat-cooling system at low boiling working fluid which recycles heat air. The calculations are made for the shuttle container line Odessa-Odessa-Havana with the changes in temperature and humidity of outside air temperature and sea water. For the climatic conditions specific voyage line defined scavenge air temperature reduction and a corresponding reduction in fuel consumption of low-speed diesel compared to conventional scavenge air seawater cooling.

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

**Андреев Артем Андреевич** – ассистент, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина

**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