

*Р.Н. Радченко, Н.С. Богданов, Н.И. Радченко, А.А. Андреев*

## РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОФИКАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА СУДОВОГО МАЛОБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ АБСОРБЦИОННЫМ ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРОМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЦИКЛОВОГО ВОЗДУХА

*Проанализирован тепловой потенциал горячей воды, получаемой за счет теплоты выпускных газов и наддувочного воздуха судового малооборотного дизеля, и расходуемой на теплофикационные нужды в прохладные периоды эксплуатации судна. Исследовано его использование абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины для охлаждения циклового воздуха дизеля – воздуха на входе турбокомпрессора и наддувочного воздуха во впускном ресивере. Показано, что высокая эффективность трансформации теплоты горячей воды в холод абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины обеспечивает за счет глубокого охлаждения циклового воздуха дизеля сокращение потребления топлива, максимально возможное для климатических условий эксплуатации судна на конкретной рейсовой линии.*

### Анализ проблемы и постановка цели исследования

В качестве главных двигателей на большинстве транспортных судов применяются малооборотные дизели (МОД). При высоких температурах циклового воздуха топливная эффективность судовых МОД снижается. Так, с повышением на 10 °С температуры воздуха на входе турбокомпрессора (ТК) удельный расход топлива увеличивается на 1,1...1,2 г/(кВт·ч), а температура наддувочного воздуха на входе в цилиндры двигателя – на 1,0...1,1 г/(кВт·ч) [1, 2]. В современных судовых дизельных установках теплота наддувочного воздуха используется для нагрева питательной воды утилизационного котла (УК). В ряде работ исследовано охлаждение циклового воздуха МОД хладоновыми эжекторными холодильными машинами (ЭХМ), использующими теплоту пара, получаемого в УК [3, 4]. Однако эффективность трансформации сбросной теплоты в холод в ЭХМ невысокая: их тепловой коэффициент  $\zeta = 0,25...0,35$  [3, 4], где  $\zeta = Q_0/Q_T$ ,  $Q_0$  – холодопроизводительность,  $Q_T$  – затраченная теплота выпускных газов наддувочного воздуха. Поэтому при использовании вместо пара в качестве источника теплоты горячей воды (температура около 90 °С), расходуемой в прохладные периоды эксплуатации на теплофикационные нужды, из-за низкой эффективности ее трансформации в холод в ЭХМ ( $\zeta \approx 0,2$ ) эффект в виде сокращения потребления топлива, получаемый за счет охлаждения воздуха, почти вдвое меньше его потенциально возможной величины для климатических условий эксплуатации [5]. Сделан вывод о возможности применения более эффективных абсорбционных бромистолитиевых холодильных машин (АБХМ).

**Цель исследования** – оценка топливной эффективности охлаждения циклового воздуха судового МОД в АБХМ путем трансформации в холод его теплофикационного потенциала в виде горячей воды, получаемой за счет теплоты выпускных газов и наддувочного воздуха в соответствии с климати-

ческими условиями эксплуатации судна на рейсовой линии.

### Анализ полученных результатов

Схема системы охлаждения воздуха на входе ТК и наддувочного воздуха МОД в АБХМ, использующей горячую воду с температурой 90...95 °С, получаемую за счет теплоты выпускных газов и наддувочного воздуха, приведена на рис. 1.

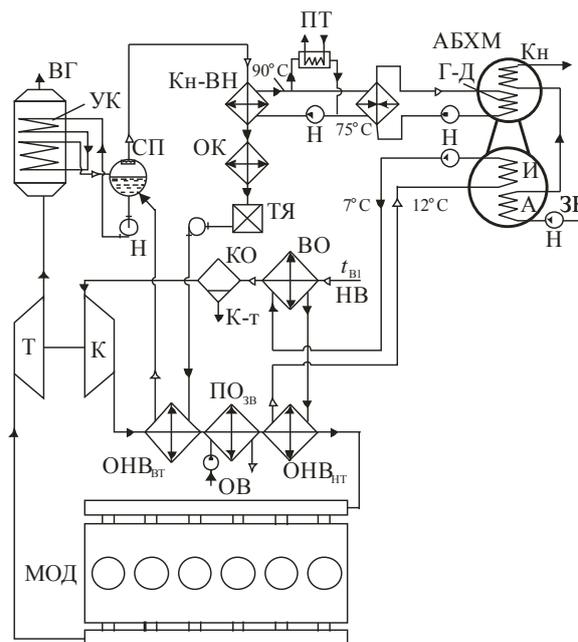


Рис. 1. Схема системы охлаждения воздуха на входе ТК и наддувочного воздуха МОД в АБХМ: К и Т – компрессор и турбина ТК; ОНВ<sub>ВТ</sub> – высокотемпературная (когенерационная) ступень ОНВ; ПОЗВ – промежуточный охладитель забортной водой; ОНВ<sub>НТ</sub> – низкотемпературная ступень ОНВ; СП – сепаратор пара; Кн-ВН – конденсатор-водонагреватель; ПТ – потребитель тепла; КО – конденсатоотводчик; ТЯ – теплый ящик; Н – насос; ВГ – выпускные газы; НВ – наружный воздух; К-т – конденсат; ОВ – охлаждающая вода; АБХМ: Г-Д – генератор-десорбер; И – испаритель-охладитель воды; А – абсорбер; Кн – конденсатор

Из теплого ящика ТЯ конденсат поступает в высокотемпературную (когенерационную) ступень охладителя наддувочного воздуха (ОНВ<sub>ВТ</sub>), где он нагревается до температуры примерно 90 °С за счет теплоты наддувочного воздуха, после чего – в сепаратор пара УК.

Расчеты тепловых нагрузок на систему охлаждения выполнены для контейнеровоза с главным двигателем 6S60MC6.1-TI MAN B&W [2] (мощность  $N_e = 12,4$  МВт) и климатических условий в течение рейса Одесса-Йокогама (1.07...27.07.2009) [5].

Исходя из температурных напоров в теплообменниках за потенциально возможную принимают глубину охлаждения воздуха на входе МОД до температуры  $t_{b2} = 15$  °С и наддувочного воздуха до температуры  $t_{b2} = 22$  °С.

При изменении в течение рейса климатических условий меняется тепловая нагрузка системы охлаждения, т.е. требуемая для охлаждения воздуха холодопроизводительность  $Q_0$  (рис. 2), а также соответствующие затраты теплоты  $Q_r$ , трансформируемой в холод:  $Q_r = Q_0 / \zeta$  (рис. 4).

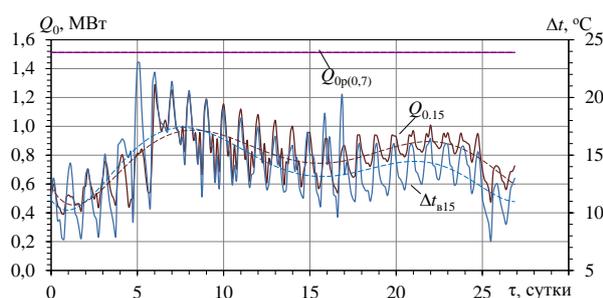


Рис. 2. Холодопроизводительности, требуемая  $Q_{0,15}$  для охлаждения воздуха на входе до  $t_{b2} = 15$  °С на величину  $\Delta t_{b15}$  и располагаемая  $Q_{0p(0,7)}$  ( $\zeta = 0,7$ ) исходя из теплоты выпускных газов

Значения холодопроизводительности  $Q_{0,15}$ , требуемой для охлаждения воздуха на входе МОД (рис. 3), рассчитывали, исходя из снижения его температуры от текущей температуры в машинном отделении  $t_{b1}$  ( $t_{b1} = t_{нв} + 10$  °С) до  $t_{b2} = 15$  °С на величину  $\Delta t_{b15}$ , располагаемой холодопроизводительности  $Q_{0p(0,7)}$  – с учетом трансформации располагаемой теплоты выпускных газов  $Q_{r,p}$  в холод в АБХМ ( $Q_0 = Q_{r,p} \cdot \zeta$  при  $\zeta = 0,7$ ), а требуемые затраты теплоты  $Q_{r,15(0,7)}$  для охлаждения воздуха на входе МОД до температуры  $t_{b2} = 15$  °С в АБХМ – как  $Q_{r,15(0,7)} = Q_{0,15} / \zeta$  (рис. 3).

Из рис. 2 и 3 видно, что на протяжении всего рейса располагаемая холодопроизводительность  $Q_{0p(0,7)}$  значительно превышает ее величину  $Q_{0,15}$ , необходимую для охлаждения воздуха на входе

МОД до температуры  $t_{b2} = 15$  °С (рис. 2), поскольку теплота выпускных газов  $Q_{r,p}$  намного больше ее требуемых затрат  $Q_{r,15(0,7)}$  на охлаждение воздуха на входе МОД до  $t_{b2} = 15$  °С (рис. 3).

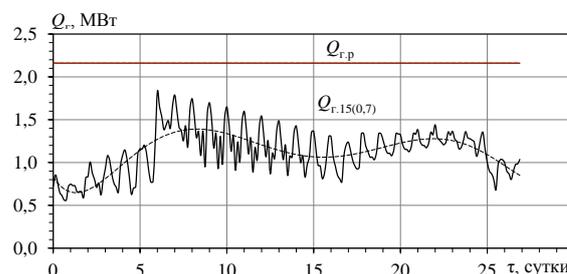


Рис. 3. Значения располагаемой теплоты выпускных газов  $Q_{r,p}$ , а также теплоты, необходимой для охлаждения воздуха на входе МОД до температуры  $t_{b2} = 15$  °С в АБХМ  $Q_{r,15(0,7)}$

В свою очередь, это стало возможным благодаря высокой эффективности трансформации теплоты выпускных газов в холод в АБХМ, тепловой коэффициент которой  $\zeta = 7$  значительно превышает его величину, требуемую для получения холодопроизводительности  $Q_{0,15}$  за счет теплоты выпускных газов  $Q_r$ :  $\zeta = Q_{0,15} / Q_r$  [5].

Охлаждение воздуха на входе ТК до  $t_{b2} = 15$  °С, т.е. на потенциально возможную величину  $\Delta t_{b15}$ , обеспечивает сокращение удельного расхода топлива МОД 6S60MC6.1-TI на величину  $\Delta b_{e15} = 1,5 \dots 2,5$  г/(кВт·ч) и часового расхода  $B_{r15} = 17 \dots 30$  кг/ч для климатических условий рейса Одесса-Йокогама (1.07...27.07.2009) (рис. 4).

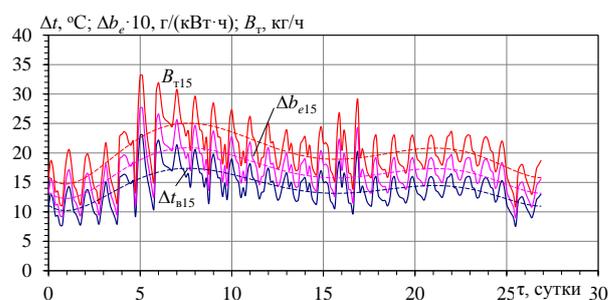


Рис. 4. Текущие значения сокращения удельного  $\Delta b_{e15}$  и часового  $B_{r15}$  расходов топлива МОД 6S60MC6.1-TI MAN в результате охлаждения воздуха на входе ТК в АБХМ до  $t_{b2} = 15$  °С на величину  $\Delta t_{b15}$  за счет теплоты выпускных газов

Значения холодопроизводительности  $Q_{0,22}$ , требуемой для охлаждения наддувочного воздуха до температуры  $t_{b2} = 22$  °С на величину  $\Delta t_{b22}$ , располагаемой холодопроизводительности АБХМ  $Q_{0p(0,7)}$  (при  $\zeta = 0,7$ ) при трансформации в холод теплоты наддувочного воздуха  $Q_{r,p}$  и его температуре на выходе из ОНВ<sub>ВТ</sub>  $t_{r2} = 110$  °С в

течение рейса Одесса-Йокогама (1.07...27.07.2009) приведены на рис. 5, а теплоты  $Q_{г.22(0,7)}$ , требуемой для охлаждения воздуха до  $t_{в2} = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$  – на рис. 6.

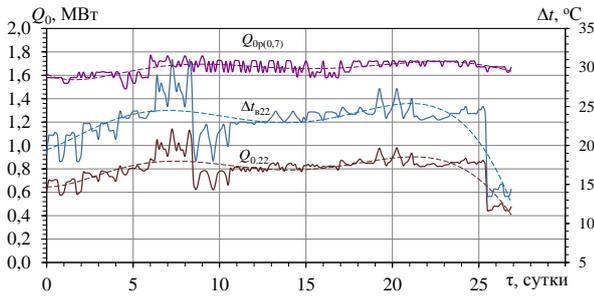


Рис. 5. Значения холодопроизводительности  $Q_{0,22}$ , требуемой для охлаждения наддувочного воздуха до  $t_{в2} = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$  на величину  $\Delta t_{22}$ , располагаемой холодопроизводительности АБХМ (при  $\zeta = 0,7$ )  $Q_{0p(0,7)}$  исходя из теплоты наддувочного воздуха после ТК при его температуре на выходе из ОНВ<sub>ВТ</sub>  $t_{22} = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$

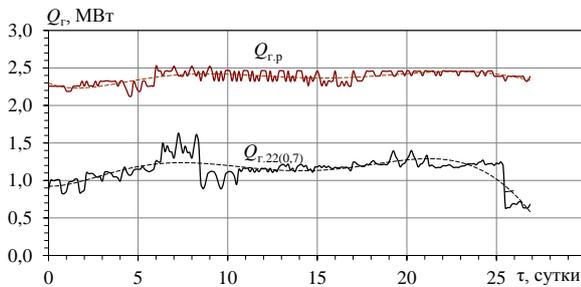


Рис. 6. Значения располагаемой теплоты наддувочного воздуха  $Q_{г.р}$ , а также теплоты, необходимой для охлаждения наддувочного воздуха до температуры  $t_{в2} = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$   $Q_{г.22(0,7)}$  в АБХМ

При этом требуемая эффективность трансформации теплоты наддувочного воздуха после ТК для его охлаждения до температуры  $t_{в2} = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$   $\zeta = 0,35...0,45$ , что намного меньше теплового коэффициента АБХМ [5].

О сокращении удельного  $\Delta b_e$  и часового  $B_t$  расходов топлива МОД 6S60MC6.1-Т1 для климатических условий рейса Одесса-Йокогама (1.07...27.07.2009) за счет охлаждения наддувочного воздуха до  $t_{в2} = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$  на величину  $\Delta t_{в12}$  можно судить по рис. 7.

Как видно, охлаждение наддувочного воздуха до температуры  $t_{в2} = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$  обеспечивает сокращение удельного расхода топлива МОД 6S60MC6.1-Т1 на величину  $\Delta b_e = 2,5...3,0\text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$  для климатических условий рейса Одесса-Йокогама (1.07...27.07.2009).

О суммарном эффекте от охлаждения воздуха на входе ТК до температуры  $t_{в2} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$  и наддувочного воздуха до  $t_{в2} = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$  в АБХМ можно судить по сокращению удельного  $\Delta b_{e22}$  и часового

$B_{т22}$  расходов топлива МОД 6S60MC6.1-Т1 для климатических условий рейса Одесса-Йокогама (1.07...27.07.2009) на рис. 8.

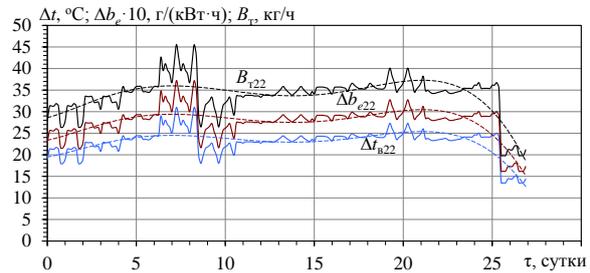


Рис. 7. Сокращение удельного  $\Delta b_{e22}$  и часового  $B_{т22}$  расходов топлива МОД 6S60MC6.1-Т1 в результате охлаждения наддувочного воздуха в АБХМ на величину  $\Delta t_{22}$  до  $t_{в2} = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$  за счет теплоты наддувочного воздуха после ТК

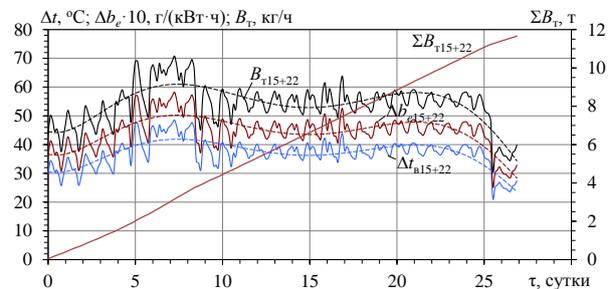


Рис. 8. Текущие значения сокращения удельного  $\Delta b_{e,p(0,2)}$  и часового  $B_{т,p(0,2)}$  расходов топлива за счет охлаждения воздуха на входе до  $t_{в2} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$  и наддувочного воздуха до  $t_{в2} = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$  с суммарным снижением температуры циклового воздуха на величину  $\Delta t_{15+22}$  трансформацией теплоты выпускных газов и наддувочного воздуха (при температуре наддувочного воздуха на выходе из ОНВ<sub>ВТ</sub>  $t_{22} = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) в АБХМ ( $\zeta = 0,7$ ) для МОД 6S60MC6.1-Т1 в течение рейса Одесса-Йокогама (1.07...27.07.2009)

Как видно, высокая эффективность трансформации теплоты выпускных газов и наддувочного воздуха в холод в АБХМ ( $\zeta = 0,7$ ) обеспечивает глубокое охлаждение воздуха на входе ТК до  $t_{в2} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$  и наддувочного воздуха до  $t_{в2} = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$  и, как следствие, сокращение удельного расхода топлива МОД 6S60MC6.1-Т1 на величину  $\Delta b_e = 4,0...4,5\text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$  в течение рейса Одесса-Йокогама (1.07...27.07.2009).

### Заключение

Выполнено сравнение теплового потенциала горячей воды, получаемой за счет теплоты выпускных газов и наддувочного воздуха судового малооборотного дизеля, с одной стороны, и теплоты, требуемой для охлаждения его циклового воздуха (воздуха на входе турбокомпрессора и наддувочно-

го воздуха на входе в цилиндры) абсорбционной бромистолитиевой холодильной машиной, с другой стороны.

Показано, что применение высокоэффективных абсорбционных термотрансформаторов с тепловым коэффициентом  $\zeta = 0,7$  обеспечивает глубокое охлаждение циклового воздуха (воздуха на входе ТК до 15 °С и наддувочного воздуха до 22 °С) и, как следствие, сокращение удельного расхода топлива для МОД 6S60MC6.1-TI на 4,0...4,5 г/(кВт·ч) для климатических условий эксплуатации судна в течение рейса Одесса–Йокогама (1.07...27.07.2009).

#### Список литературы:

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. MAN B&W ME/ME-C/ME-GI/ME-B-TII engines [Electronic resource]. – Copenhagen, Denmark : MAN Diesel. – 2010. – 357 p. – Access mode: [http://www.mandieselturbo.com/download/project\\_guides\\_tier2/printed/s90mcc8.pdf](http://www.mandieselturbo.com/download/project_guides_tier2/printed/s90mcc8.pdf). 3. 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. 4. Радченко, Р.Н. Эффективность трансформации теплоты в трехступенчатой системе охлаждения наддувочного воздуха судового малооборотного дизеля [Текст] /

Р.Н. Радченко, Н.С. Богданов // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2016. – № 1. – С. 10–13. 5. Радченко, Р.Н. Использование теплофикационного потенциала судового малооборотного дизеля для охлаждения циклового воздуха эжекторным термотрансформатором [Текст] / Р.Н. Радченко, Н.С. Богданов, Н.И. Радченко, А.А. Андреев // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2017. – № 1. – С. 8–12.

#### Bibliography (transliterated):

1. Influence of Ambient Temperature Conditions. Main engine operation of MAN B&W two-stroke engines (2010), MAN Diesel & Turbo, Copenhagen, Denmark, 17 p. 2. MAN B&W ME/ME-C/ME-GI/ME-B-TII engines (2010), Copenhagen, Denmark: MAN Diesel, 357 p. – Access mode: [http://www.mandieselturbo.com/download/project\\_guides\\_tier2/printed/s90mcc8.pdf](http://www.mandieselturbo.com/download/project_guides_tier2/printed/s90mcc8.pdf). 3. Radchenko, R.N. (2014), "Analysis of alternative variants of low speed diesel cyclic air chilling on transport ship", *Aerospace Technic and Technology* ["Analiz alternativnykh variantov ohlazhdeniya cikloвого vozduha malooborotного dizelya transportного судна", *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*], № 5/112, pp. 104–108. 4. Radchenko, R.N., Bogdanov, N.S. (2016), "Efficiency of heat transformation in three stage scavenge air cooling system of marine low speed diesel", *Internal Combustion Engines*, ["Effektivnost transformacii teploty v tryohstupenчатой системе ohlazhdeniya nadduvochnого vozduha sudового malooborotного dizelya", *Dvigately vnutrenнего sgoraniya*], № 1, pp. 10–13. doi: 10.20998/0419-8719.2016.1/02. 5. Radchenko, R.N., Bogdanov, N.S., Radchenko, N.I., Andreev, A.A. (2017), "The use of heat supply potential of marine low speed diesel by ejector thermotransformer for cooling of cyclic air on rout line", *Internal Combustion Engines*, ["Ispolzovanie teplofikacionного potentsiala sudового malooborotного dizelya dlja ohlazhdeniya cikloвого vozduha ezhektornym termotransformatorom", *Dvigately vnutrenнего sgoraniya*], № 1, pp. 8–12. doi: 10.20998/0419-8719.2017.1.02.

Поступила в редакцию 02.06.2017 г.

**Радченко Роман Николаевич** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. кафедры кондиционирования и рефрижерации Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: nirad50@gmail.com.

**Николай Семенович Богданов** – аспирант Национального университета "Одесская морская академия"

**Радченко Николай Иванович** – доктор техн. наук, проф., зав. кафедрой кондиционирования и рефрижерации Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: nirad50@gmail.com.

**Андреев Андрей Адольфович** – канд. техн. наук, доцент Херсонского филиала Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Херсон, Украина.

### **РЕАЛІЗАЦІЯ ТЕПЛОФІКАЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ СУДОВОГО МАЛООБЕРТОВОГО ДИЗЕЛЯ АБСОРБЦІЙНИМ ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРОМ ОХОЛОДЖЕННЯ ЦИКЛОВОГО ПОВІТРЯ**

*Р.М. Радченко, М.С. Богданов, М.І. Радченко, А.А. Андреев*

Проаналізований тепловий потенціал гарячої води, яку отримують за рахунок теплоти випускних газів і наддувочного повітря судового малооборотного дизеля і яка витрачається на теплофікаційні потреби у прохолодні періоди експлуатації судна. Досліджено його використання абсорбційною бромистолітєвою холодильною машиною для охолодження циклового повітря – повітря на вході турбокомпресора та наддувочного повітря у впускному ресивері дизеля. Показано, що висока ефективність трансформації теплоти гарячої води в холод абсорбційною бромистолітєвою холодильною машиною забезпечує за рахунок глибокого охолодження циклового повітря дизеля скорочення споживання палива максимально можливе для кліматичних умов експлуатації судна на конкретній рейсовій лінії.

### **REALIZATION OF HEAT SUPPLY POTENTIAL OF MARINE LOW SPEED DIESEL BY ABSORPTION LITUMBROMIDE THERMOTRANSFORMER FOR COOLING OF CYCLIC AIR**

*R.N. Radchenko, N.S. Bohdanov, N.I. Radchenko, A.A. Andreev*

The heat potential of hot water produced by the heat of exhaust gas and scavenge air of marine low speed diesel and expended for heating demands during cool periods of the ship performance has been analyzed. Its use by absorption of litumbromide chiller for diesel engine of cyclic air (a turbocharger intake air and a scavenge air in the inlet receiver cooling) has been investigated. It has been shown that due to a high efficiency of hot water heat transformation by absorption litumbromide chiller a maximal fuel saving potentially possible for climatic conditions of chip performance on rout line is provided as a result of diesel cyclic air deep cooling.