

DOI 10.15589/jnn20150505
 УДК 621.431:621.57
 P93

PERSPECTIVES OF USING COLD IN THE MARINE ENERGY
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ХОЛОДА В СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Sergey S. Ryzhkov
 rektor@nuos.edu.ua
 ORCID: 0000-0001-9560-2765

Nikolay I. Radchenko
 andrad@mail.ru
 ORCID: 0000-0001-5796-5370

Sergey I. Serbin
 serhiy.serbin@nuos.edu.ua
 ORCID: 0000-0002-3423-2681

С. С. Рыжков
 д-р техн. наук, проф.

Н. И. Радченко
 д-р техн. наук, проф.

С. И. Сербин
 д-р техн. наук, проф.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, г. Николаев

Abstract. The tendencies of improving the waste heat recovery systems of exhaust gases and scavenge air in marine diesel plants have been analyzed and the reserves of increasing a fuel efficiency of them by diesel engine intake air cooling are revealed. The application of ejector chiller using a heat of exhaust gases and scavenge air with refrigerant as working fluid and Lithium-Bromide chiller using a heat of exhaust gases is discussed as waste heat recovery cooling machines. The schemes of marine diesel plants with intake air cooling by waste heat recovery ejector chiller and Lithium-Bromide chiller are presented. The efficiency of application of cooling air at the inlet of the main diesel engine on the rout line with account of changeable climatic conditions of performance is considered. It was shown that the application of low speed diesel engine intake air cooling provides reducing specific fuel consumption in 2,0...2,5 g/(kW·h).

Key words: main engine; cooling of air; waste heat recovery cooling machine.

Аннотация. Проанализированы тенденции совершенствования систем утилизации теплоты уходящих газов и наддувочного воздуха судовых дизельных установок и выявлены резервы повышения топливной эффективности установок путем охлаждения воздуха на входе. Показана эффективность применения охлаждения воздуха на входе главного двигателя на конкретной рейсовой линии с учетом переменных в течение рейса климатических условий эксплуатации.

Ключевые слова: главный двигатель; охлаждение воздуха; теплоиспользующая холодильная машина.

Анотація. Проаналізовано тенденції вдосконалення систем утилізації теплоти відхідних газів і наддувочного повітря судових дизельних установок і виявлено резерви підвищення паливної ефективності установок шляхом охолодження повітря на вході. Показано ефективність застосування охолодження повітря на вході головного двигуна на конкретній рейсовій лінії з урахуванням змінних упродовж рейсу кліматичних умов експлуатації.

Ключові слова: головний двигун; охолодження повітря; тепловикористовуюча холодильна машина.

REFERENCES

- [1] Influence of Ambient Temperature Conditions. Main engine operation of MAN B&W two-stroke engines : MAN Diesel & Turbo, Copenhagen, Denmark, 2010. 17 p.
- [2] Thermo Efficiency System (TES) for reduction of fuel consumption and CO₂ emission. Copenhagen, Denmark, MAN B&W Diesel A/S, 2005. 12 p.
- [3] MAN B&W ME/ME-C/ME-GI/ME-B-TII engines. Copenhagen, Denmark, MAN Diesel, 2010.
- [4] Radchenko R. N. *Ispolzovanie teploty ukhodyashchikh gazov dlya predvaritelnogo okhlazhdeniya vozdukha sudovykh DVS* [Using the heat of exhaust gases to pre-cool air of marine ICE]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya — Internal combustion engines*. Kharkov, NTU «KHPI», 2008, no 1, pp. 110–114.
- [5] Radchenko R. N., Andreev A. A. *Ispolzovanie teploty ukhodyashchikh gazov dlya okhlazhdeniya tsiklovogo vozdukha dizeley* [Using the heat of exhaust gas for cooling the cyclic air of the diesel]. *Elektronne vydannia*

- «*Visnyk natsionalnoho universytetu korablebuduvannia*» — *The electronic edition «Journal of national university of shipbuilding»*, 2010, no. 1, pp. 117–122.
- [6] Radchenko R. N. *Trigeneratsionnye tsirkulyatsionnye isparitelnye kontury nizkokipyashchikh rabochikh tel predvaritelnogo okhlazhdeniya vozdukha dizeley* [Trigeneration circulation evaporator circuits with low boiling working fluids pre-cooling diesel]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya — Aerospace technics and technology*. 2009, no. 7 (64), pp. 27–30.
- [7] Zimmer K. Thermodynamische Untersuchung uber die Anwendbarkeit der Turbokuhlung bei aufgeladenen vierfakt. Dieselmotoren, «MTZ», 1964, no. 5, pp. 188–195.
- [8] Timoshevskiy B. G., Moshentsev Yu. L., Vu Dyk Bao. *Povysheniye effektivnosti sudovogo dvigatelya vnutrennego sgoraniya putem sovershenstvovaniya sistemy vozdukhosnabzheniya* [Improving the efficiency of the ship internal combustion engine by improving the air supply system]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of scientific publications of NUS*, 2003, no. 2 (388), pp. 67–75.
- [9] Arai M., Sugimoto T., Miyaji H. Development of Future Marine Gas Turbine in Japan. Tokyo, SMGT, 2002. 9 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В судовой энергетике доминирующее положение занимают дизельные установки (ДУ). В большинстве случаев современные ДУ являются установками когенерационного типа, наряду с основным видом энергии (механической на привод гребного вала или электрической) производят еще и тепловую в виде пара или горячей воды. Когенерационные ДУ являются наиболее распространенным типом и отражают основное направление в утилизации вторичных энергоресурсов (ВЭР) ДУ, связанных с производством тепловой энергии. Однако при плавании в теплое время года и южных широтах, когда объемы потребления тепловой энергии сокращаются, эффект от применения когенерации резко сокращается.

В то же время топливная эффективность судовых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) существенно зависит от температуры воздуха на входе наддувочных турбокомпрессоров (ТК). Так, повышение температуры воздуха на входе ТК малооборотных дизелей (МОД) на 10 °С приводит к росту удельного расхода топлива на 0,6...0,8% [1–3]. При этом из-за повышенной температуры забортной воды система охлаждения наддувочного воздуха двигателей не обеспечивает демпфирование негативного влияния высоких температур воздуха на входе.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

С учетом вышесказанного целесообразно совместное производство тепла в УК (пара или горячей воды) и холода в теплоиспользующих холодильных машинах (ТХМ), которые это тепло потребляют, то есть тригенерация. Применение полученного холода для снижения температуры циклового воздуха на входе наддувочного турбокомпрессора МОД (внутрицикловая тригенерация) обеспечивает высокую топливную эффективность судовых двигателей при любых климатических условиях [4–6].

На судах охлаждение воздуха абсорбционными бромистолитиевыми (АБХМ) и пароводяными

эжекторными ТХМ нашло применение в системах комфортного и технического кондиционирования воздуха. Использование же машинного холода для охлаждения циклового воздуха судовых ДВС ограничивалось турбокомпрессорными (воздушными) холодильными машинами (ПХМ) для снижения температуры наддувочного воздуха [7, 8]. Известно о применении фирмой «Kawasaki Heavy Industries, LTD» АБХМ, работающих на паре от УК, для охлаждения воздуха на входе судовых когенерационных газотурбинных установок (ГТУ), что обеспечило повышение КПД установки с 51% до 58% и одновременный рост ее мощности от 2300 кВт до 2420 кВт благодаря снижению температуры воздуха на входе от 30 °С до 15 °С [9]. Такие ГТУ находят применение на скоростных круизных судах и судах береговой охраны Японии.

ЦЕЛЬЮ РАБОТЫ является анализ перспектив охлаждения циклового воздуха на входе ДУ транспортно-го судна с учетом климатических условий эксплуатации на конкретной рейсовой линии.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

При оценке перспектив применения охлаждения воздуха на входе судовых ДУ авторы исходили прежде всего из анализа результатов исследований эффективности использования ЭХМ на низкотемпературных рабочих телах (НРТ) для охлаждения воздуха на входе ТК дизелей, проведенных в Национальном университете кораблестроения им. адм. Макарова [4–6]. Термодинамическая эффективность трансформации сбросной теплоты в холод характеризуется тепловым коэффициентом $\zeta = Q_0 / Q_r$ — отношение произведенного холода Q_0 к потребленному теплу Q_r , отведенному от отходящих газов, наддувочного воздуха и др. Тепловые коэффициенты абсорбционных водомашинных холодильных машин (АХМ) $\zeta = 0,5...0,6$, а АБХМ $\zeta = 0,7...0,8$ и выше. Конструктивно наиболее простыми, следовательно, и надежными в эксплуатации являются ЭХМ на НРТ, в которых эжектор выполняет функцию компрессора. Их при-

менение не приводит к значительному усложнению системы утилизации тепла МОД, однако их тепловые коэффициенты почти вдвое меньше: $\zeta \approx 0,3$.

Схемы систем охлаждения воздуха на входе МОД в ЭХМ с использованием теплоты выпускных газов в испарительной секции генератора Γ_n и теплоты наддувочного воздуха — в экономайзерной секции Γ_3 , а также в АБХМ с использованием теплоты выпускных газов МОД приведены на рис. 1.

Поскольку в ЭХМ температура выпускных газов после генератора (рис. 1, а) ограничивается относительно высоким значением $t_{r2} = 160 \text{ }^\circ\text{C}$ (из условия предотвращения сернистой коррозии), то для нагрева жидкого НРТ в экономайзерной секции задействован наддувочный воздух, который допускает снижение температуры до величины, близкой температуре конденсации НРТ t_k . При этом экономайзерную секцию генератора Γ_3 подключают к контуру пресной воды высокотемпературной ступени ОНВ_{вТ} (с целью упрощения контур пресной воды и сам ОНВ_{вТ} не показаны, а экономайзерная секция условно показана подключенной к наддувочному воздуху).

В АБХМ горячий теплоноситель (или водяной пар) подается к генератору Γ (десорберу), где от него отводится теплота на испарение хладагента (воды) из водного раствора бромистого лития. Хладоноситель (вода или рассол), который используется для предварительного охлаждения воздуха на входе ТК ДВС в воздухоохладителе ВО, в свою очередь охлаждается в испарителе АБХМ.

Уменьшение удельного расхода топлива Δb_e в соответствии со снижением температуры Δt_b воздуха в охладителе ЭХМ на входе ТК МОД, удельная (отнесенная к единице расхода газов) теплота, отведенная от выпускных газов и наддувочного воздуха в генераторе ЭХМ (секциях $\text{Kn}-\Gamma_n$ и Γ_3), \bar{q}_r и холодопроизводительность ЭХМ \bar{q}_0 , коэффициент эжекции U и тепловой коэффициент в зависимости от температуры кипения R142b в генераторе t_r при коэффициентах влаговыведения $\xi = 1,0; 2,0; 2,5$ и $3,0$, температурах кипения R142b $t_0 = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ и конденсации $t_k = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ показаны на рис. 2.

Коэффициент эжекции $U = G_0 / G_r$, где G_0 и G_r — расходы НРТ через испаритель-воздухоохладитель И-ВО (всасываемого с И-ВО потока НРТ низкого давления) и генератор (силовой НРТ высокого давления). Коэффициент влаговыведения ξ представляет собой отношение общего количества теплоты, отведенной от влажного воздуха, к количеству явной теплоты, определяется разницей температур воздуха по сухому термометру. Величина $\xi = 1$ соответствует охлаждению без выпадения влаги. Как НРТ применен хладон R142b.

Как видно, при температуре кипения НРТ в генераторе ЭХМ $t_r = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ снижение температуры воздуха в охладителе на входе ТК двигателя за счет использования в ЭХМ теплоты выпускных газов и наддувочного воздуха составляет $\Delta t_b = 18...24 \text{ }^\circ\text{C}$, а соответствующее сокращение удельного расхода топлива двигателем $\Delta b_e = 2,0...2,8 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$ при коэффициентах влаговыведения $\xi = 3,0...2,0$.

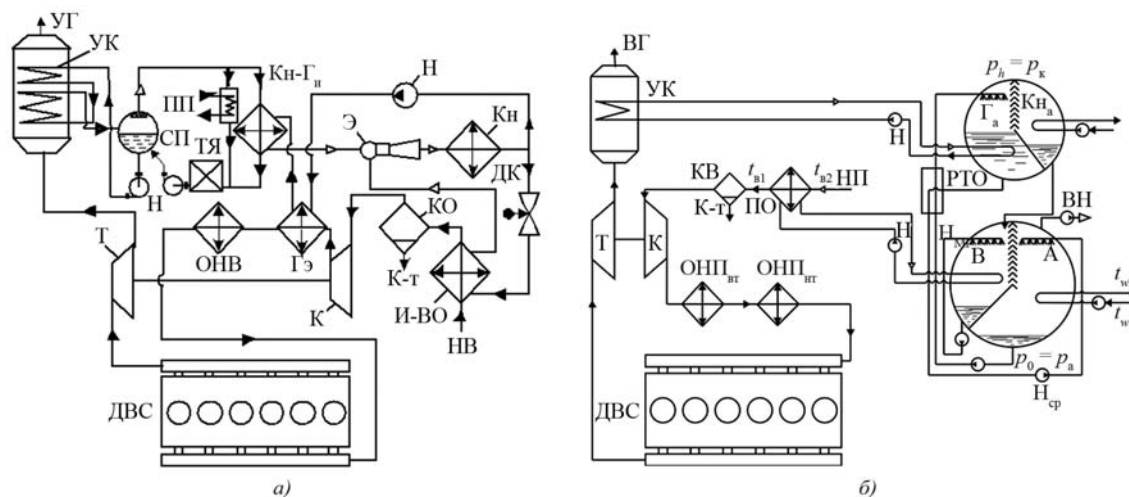


Рис. 1. Схемы систем охлаждения воздуха на входе ТК МОД в ЭХМ (а) и АБХМ (б):

$\text{Kn}-\Gamma_n$ — конденсатор водяного пара — испарительная секция генератора пара НРТ; Γ_3 — экономайзерная секция генератора; Э — эжектор; Kn — конденсатор НРТ; H — насос; ДК — дроссельный клапан; И-ВО — испаритель-воздухоохладитель; ОНВ — охладитель наддувочного воздуха водяной; УК — утилизационный котел; КО — каплеотделитель; К-г — конденсат; К — компрессор ТК; Т — турбина ТК; СП — сепаратор пара; ТЯ — теплый ящик; ПП — потребители пара; Γ_a и Kn_a — генератор и конденсатор АБХМ; $\text{H}_\text{сп}$ и $\text{H}_\text{кр}$ — насосы слабого и крепкого растворов; ВН — вакуум-насос; РТО — регенеративный теплообменник; И — испаритель АБХМ; А — абсорбер; ВО — воздухоохладитель водяной; ОНВ_{вТ} и ОНВ_{нТ} — охладители наддувочного воздуха высокотемпературный и низкотемпературный; НВ — воздух на входе ДВС (в машинном отделении); ВГ — выпускные газы

Тепловые коэффициенты АБХМ вдвое выше ЭХМ, благодаря чему соответственно больше и эффект от утилизации сбросной теплоты.

Около 30% общего объема морских перевозок приходится на балкеры — суда для перевозки насыпных и навалочных грузов. В качестве примера рассмотрена рейсовая линия Одесса – Йокогама – Одесса (Япония). Расчеты проводились исходя из параметров МОД 8S50ME-C7.1-ТП как главного двигателя балкера типа «Киев» при эксплуатационной мощности $N_e = 10$ МВт.

Климатические условия эксплуатации судовых главных двигателей отличаются значительным изменением тепловлажностных параметров наружного воздуха, соответственно, и воздуха в машинном отделении (МО) и на входе наддувочного ТК МОД. Данные по изменению температуры $t_{нв}$ и относительной влажности $\phi_{нв}$ наружного воздуха в течение рейса Одесса – Йокогама – Одесса (1.07.2009–24.08.2009) балкера «Киев» на рис. 3 фиксировались метеоцентром каждые 3:00.

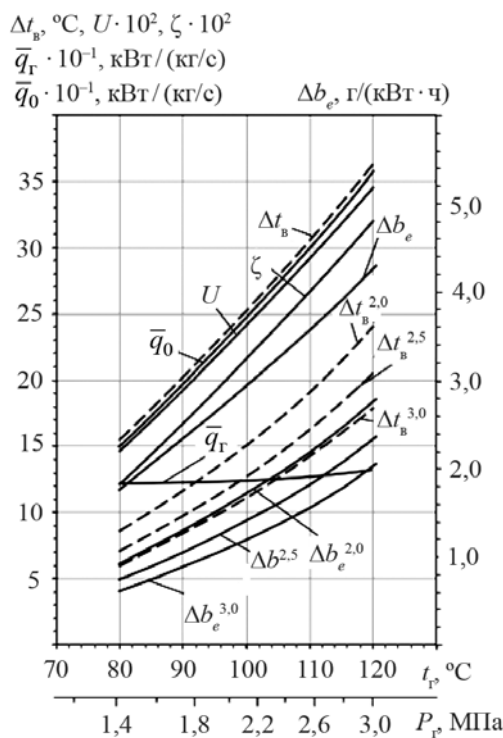


Рис. 2. Уменьшение удельного расхода топлива Δb_e в соответствии с понижением температуры Δt_b воздуха в охладителе ЭХМ на входе ТК МОД, удельные (отнесенные к единице расхода газов) теплота, отведенная от выпускных газов и наддувочного воздуха в генераторе ЭХМ \bar{q}_g и холодопроизводительность ЭХМ \bar{q}_0 , коэффициент эжекции U и тепловой коэффициент ζ в зависимости от температуры t_r и давления P_r кипения R142b в генераторе t_r при коэффициентах влаговываждения $\xi = 1,0; 2,0; 2,5$ и $3,0$, температурах кипения R142b в испарителе $t_0 = 5$ °C, конденсации $t_k = 35$ °C: $\Delta t_b \dots \Delta t_b^{3,0}$ — $\xi = 1,0 \dots 3,0$; - - - снижение температуры воздуха Δt_b в охладителе ЭХМ на входе ТК МОД

Как видно, в течение суток имеют место существенные колебания температуры $t_{нв}$ и относительной влажности $\phi_{нв}$ наружного воздуха, причем максимумам температур соответствуют минимумы влажности и наоборот. Наличие дневных и ночных противоположно направленных экстремумов $t_{нв}$ и $\phi_{нв}$ создает благоприятные условия для большего снижения температуры воздуха на входе МОД днем (благодаря меньшим относительной влажности $\phi_{нв}$ и соответственно затратам холода ТХМ на конденсацию водяного пара из влажного воздуха), когда имеет место значительное ухудшение топливной эффективности двигателей из-за повышения температур $t_{нв}$ на входе. В вечерние и ночные часы из-за большей влажности $\phi_{нв}$ растут расходы холода на конденсацию водяного пара из влажного воздуха, но при этом $t_{нв}$ ниже и соответственно меньше потребность в охлаждении воздуха на входе двигателей.

Снижение температуры воздуха Δt_b в охладителе на входе ТК МОД и температура воздуха на выходе из воздухоохладителя t_{b2} с изменением температуры окружающего воздуха $t_{нв}$ в течение рейса Одесса – Йокогама – Одесса (1.07.2009–24.08.2009) приведены на рис. 4.

Расчет удельного расхода топлива Δb_e в зависимости от снижения температуры воздуха на входе ТК МОД проводили по программе «Mandieselturbo» [3], согласно результатам вычислений снижение температуры воздуха на входе ТК МОД на величину $\Delta t_b = 10$ °C приводит к сокращению удельного расхода топлива Δb_e на $1,2$ г/(кВт·ч).

Уменьшение удельного расхода топлива Δb_e , расхода топлива в абсолютных ΔB_e и относительных ΔB_e величинах в течение рейса Одесса – Йокогама – Одесса (1.07.2009–24.08.2009) за счет охлаждения воздуха на входе МОД 8S50ME-C7.1-ТП балкера (эксплуатационная мощность $N_e = 10$ МВт) в ЭХМ, которая использует теплоту отходящих газов и наддувочного воздуха, или АБХМ, которая утилизирует теплоту отходящих газов, приведены на рис. 5.

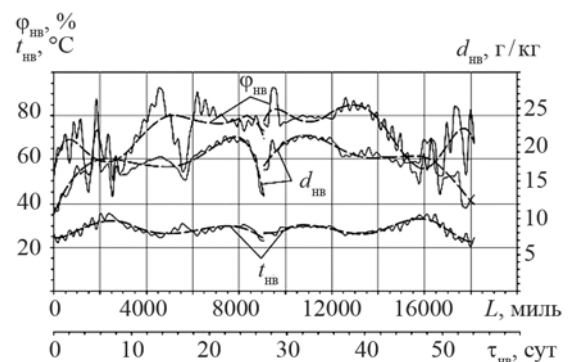


Рис. 3. Изменение температуры $t_{нв}$, относительной влажности $\phi_{нв}$ и влагосодержания $d_{нв}$ наружного воздуха в течение рейса Одесса – Йокогама – Одесса (1.07.2009...24.08.2009)

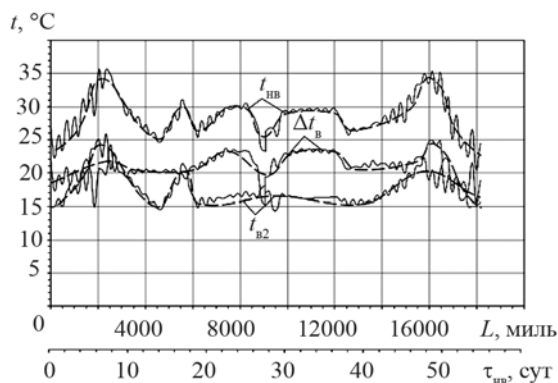


Рис. 4. Изменение температуры окружающего воздуха t_{amb} , снижение температуры воздуха Δt_B в охладителе на входе ТК и температура воздуха на выходе из охладителя t_{B2} с изменением температуры окружающего воздуха t в течение рейса Одесса – Йокогама – Одесса (1.07.2009 – 24.08.2009)

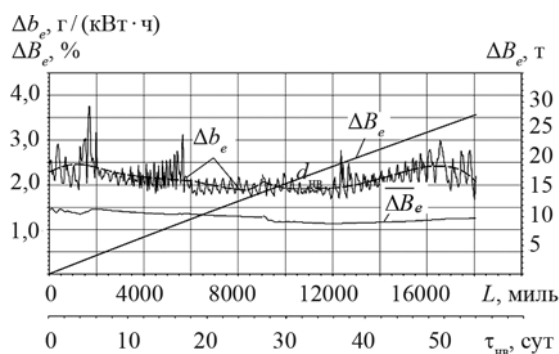


Рис. 5. Уменьшение удельного расхода топлива Δb_e , расход топлива в абсолютных ΔB_e и ΔB_e относительных величинах, за счет охлаждения воздуха на входе МОД 8S50ME-C7.1-ТII балкера (эксплуатационная мощность $N_e = 10$ МВт) в АБХМ с использованием теплоты отходящих газов или в ЭХМ, использующей теплоту отходящих газов и наддувочного воздуха, в течение рейса Одесса – Йокогама – Одесса

Из рис. 5 видно, что в течение рейса уменьшения удельного расхода топлива составляет $\Delta b_e = 2,0 \dots 2,5 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$, относительная экономия потребления топлива $\Delta B_e = 1,3 \dots 1,5 \%$, а абсолютная экономия потребления топлива за рейс для МОД мощностью 10 МВт составляет $\Delta B_e = 26 \dots 28 \text{ т}$.

ВЫВОДЫ. Проанализированы тенденции совершенствования систем утилизации теплоты уходящих газов и наддувочного воздуха судовых дизельных установок и выявлены резервы повышения эффективности установок путем охлаждения воздуха на входе. На примере транспортного судна — балкера на рейсовой линии Одесса – Йокогама – Одесса пока-

зано, что применение ЭХМ, которые используют теплоту отходящих газов и наддувочного воздуха, или АБХМ, которые утилизируют теплоту отходящих газов, для охлаждения циклового воздуха на входе МОД мощностью 10 МВт обеспечивает сокращение удельного расхода топлива на $2,0 \dots 2,5 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$ и относительную экономию потребления топлива на $1,3 \dots 1,5 \%$ в течение рейса. Дальнейшая экономия топлива возможна за счет более глубокого охлаждения воздуха на входе судового МОД с использованием дополнительных источников сбросной теплоты, в частности, горячей воды контура высокотемпературного охлаждения двигателя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Influence of Ambient Temperature Conditions. Main engine operation of MAN B&W two-stroke engines: MAN Diesel & Turbo. — Copenhagen, Denmark, 2010. — 17 p.
- [2] Thermo Efficiency System (TES) for reduction of fuel consumption and CO₂ emission. — Copenhagen, Denmark : MAN B&W Diesel A/S, 2005. — 12 p.
- [3] MAN B&W ME/ME-C/ME-GI/ME-B-ТII engines. — Copenhagen, Denmark : MAN Diesel, 2010.
- [4] Радченко, Р. Н. Использование теплоты уходящих газов для предварительного охлаждения воздуха судовых ДВС / Р. Н. Радченко // Двигатели внутреннего сгорания. — 2008. — № 1. — С. 110–114.
- [5] Радченко, Р. Н. Использование теплоты уходящих газов для охлаждения циклового воздуха дизелей / Р. Н. Радченко, А. А. Андреев // Электронне видання «Вісник національного університету кораблебудування». — 2010. — № 1. — С. 117–122.
- [6] Радченко, Р. Н. Тригенераційні циркуляційні іспарильні контури низькокипящих рабочих тел предварительного охлаждения воздуха дизелей / Р. Н. Радченко // Авиационно-космическая техника и технология. — 2009. — № 7(64). — С. 27–30.
- [7] Zinner, K. Thermodynamische Untersuchung über die Anwendbarkeit der Turbokühlung bei aufgeladenen vierfakt / K. Zinner, H. Reinloin // Dieselmotoren, «MTZ». — 1964. — no. 5. — Pp. 188–195.
- [8] Тимошевский, Б. Г. Повышение эффективности судового двигателя внутреннего сгорания путем совершенствования системы воздухообеспечения / Б. Г. Тимошевский, Ю. Л. Мошенцев, Ву Дык Бао // Зб. наук. праць УДМУТ. — 2003. — № 2 (388). — С. 67–75.
- [9] Arai, M. Development of Future Marine Gas Turbine in Japan / M. Arai, T. Sugimoto, H. Miyaji // SMGT, Tokyo, 2002. — 9 p.

© С. С. Рижков, М. І. Радченко, С. І. Сербін
Надійшла до редколегії 23.09.2015

Стаття рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. М. Р. Ткач