

УДК 621.57

Р.Н. РАДЧЕНКО, Н.И. РАДЧЕНКО, С.А. ОХОТИН, В.Е. КАЗАНЦЕВА

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина

ЭКОЛОГОЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРЕСНОЙ ВОДЫ НА СУДАХ

Проанализировано возможность получения пресной воды в результате конденсации водяных паров из влажного воздуха в процессе его охлаждения в поверхностном теплообменнике на входе наддувочного турбокомпрессора судового дизеля. Для охлаждения воздуха применена теплоиспользующая холодильная машина, утилизирующая теплоту уходящих газов и наддувочного воздуха. Рассчитаны количество получаемого конденсата и снижение температуры воздуха на входе турбокомпрессора при температуре и влажности наружного воздуха, меняющихся в течение рейса, а также достигаемое при этом сокращение потребления дизелем топлива.

Ключевые слова: утилизация теплоты, охлаждение воздуха, конденсация водяного пара, теплоиспользующая холодильная машина, дизель.

Анализ проблемы и постановка цели исследования

На судах пресную воду получают обычно в испарительных установках вакуумного типа, используя теплоту горячей воды системы высокотемпературного охлаждения главного двигателя или же водяной пар от утилизационного либо вспомогательного котла путем сжигания в нем органического топлива. На привод вакуумнасосов расходуется электрическая энергия, вырабатываемая в свою очередь за счет использования опять-таки органического топлива. Сжигание топлива на эти цели сопровождается дополнительным загрязнением атмосферы, вызванным выбросами CO_2 , CO , NO_x и других газов.

В качестве главных двигателей на судах применяются, как правило, малооборотные дизели (МОД). Топливная эффективность МОД существенно зависит от температуры воздуха на входе наддувочного турбокомпрессора (ТК) и снижается с ее повышением. Так, с увеличением температуры воздуха на входе ТК МОД на 10°C удельный расход топлива b_e возрастает на $0,5...0,7\%$ [1, 2]. При этом возрастает температура уходящих газов после турбины ТК и наддувочного воздуха, а следовательно, и потери теплоты с газами и охлаждающей наддувочный воздух водой. В работах [3 – 5] показана целесообразность повышения топливной эффективности МОД путем охлаждения воздуха на входе ТК холодильными машинами, использующими теплоту уходящих газов и охлаждающей наддувочный воздух воды. Подаваемый на вход ТК судовых МОД воздух отличается повышенной влажностью, поэтому в процессе его охлаждения в поверхностном ох-

ладителе происходит конденсация водяных паров из влажного воздуха. В зависимости от расхода воздуха количество влаги, отводимой в воздухоохладителе на входе ТК, может быть весьма значительным и покрывать потребности судна в пресной воде после ее дополнительной обработки. Таким образом, в перспективе при наличии развитой системы утилизации теплоты вторичных энергоресурсов главного двигателя и охлаждении воздуха на входе ТК МОД станет возможным отказаться от традиционных опреснительных установок, а пресную воду получать как побочный продукт в процессе охлаждения воздуха в поверхностном охладителе на входе ТК. При этом теплоту горячей воды системы высокотемпературного охлаждения главного двигателя, расходуемую на работу опреснительных установок, можно использовать как в самих теплоиспользующих холодильных машинах, так и в когенерационных установках других типов.

Цель работы – исследование возможности получения пресной воды в процессе охлаждения воздуха на входе ТК судового МОД теплоиспользующей холодильной машиной.

Результаты исследования

В качестве холодильной машины рассмотрена теплоиспользующая эжекторная машина (ТЭХМ) как конструктивно наиболее простая и надежная в эксплуатации, в которой функцию компрессора выполняет эжектор. Применение в ТЭХМ низкокипящих рабочих тел (НРТ) позволяет охлаждать воздух на входе ТК МОД до сравнительно низких температур $15...20^\circ\text{C}$ с получением на выходе воздуха

практически в состоянии насыщения (при максимальном влаговывпадении) и избегать вакуума в испарителе НРТ-воздухоохладителя (И-ВО).

О конструктивных особенностях интегрирования ТЭХМ в существующую систему утилизации теплоты уходящих газов судового МОД можно судить по рис. 1. При этом теплота уходящих газов используется сначала для получения водяного пара в утилизационном котле (УК), а пар, остающийся после покрытия потребностей в нем судовых потребителей, расходуется на обеспечение работы ТЭХМ. На рис. 1 контур УК показан упрощенно. И-ВО с каплеотделителем (КО) представляют собой опрес-

нительную установку открытого типа, которая хорошо вписывается в проходные сечения ТК МОД между фильтром-глушителем и компрессором ТК.

ТЭХМ состоит из паросилового и холодильного контуров. Паросилового контур служит для получения 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 пара – в камере смешения и диффузоре).

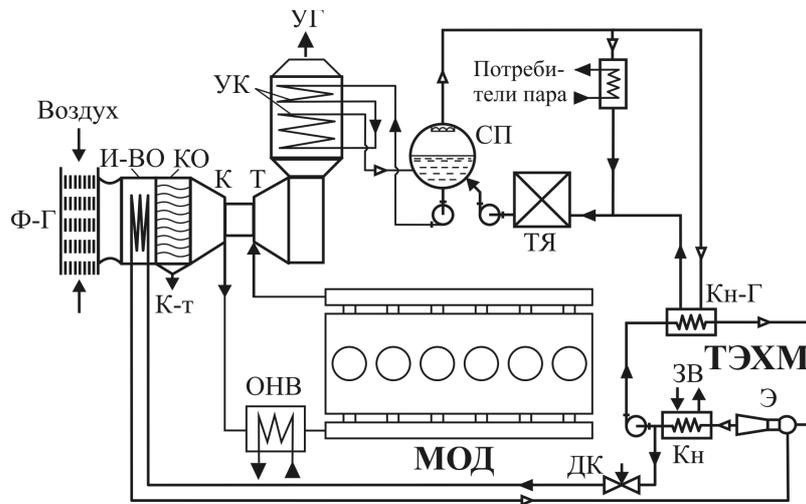


Рис. 1. Схема системы охлаждения воздуха на входе ТК судового МОД с утилизацией теплоты уходящих газов и получением конденсата из влажного воздуха:

- Ф-Г – фильтр-глушитель; К – компрессор наддувочного турбокомпрессора;
- Т – турбина турбокомпрессора; УК – утилизационный котел пароводяной; СП – сепаратор пара;
- ТЯ – теплый ящик; ОНВ – охладитель наддувочного воздуха; И-ВО – испаритель НРТ-воздухоохладитель;
- КО – каплеотделитель; К-г – конденсат; ТТЭ – термотрансформатор эжекторный; Э – эжектор;
- Кн-Г – конденсатор водяного пара-генератор пара НРТ; Н – насос; ДК – дрессельный клапан;
- УГ – уходящие газы; 3В – заборная вода

Помимо теплоты уходящих газов в ТЭХМ могут использоваться и другие источники сбросной теплоты, в частности, наддувочный воздух и охлаждающая двигатель вода.

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 Δt_b на входе ТК и количество получаемого при этом конденсата, а также сокращение потребления топлива МОД за счет снижения температуры воздуха на входе ТК 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 [6] (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 Одесса-Йокогама-Одесса.

Значения температуры $t_{нв}$ и относительной влажности $\phi_{нв}$ наружного воздуха в течение рейса брались по данным метецентра и по ним рассчитывалось его влагосодержание d (рис. 2).

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

Из теплового баланса охладителя воздуха ТЭХМ $Q_0 = G_b \cdot c_b (t_{b1} - t_{b2}) \xi$ определяют снижение температуры воздуха $\Delta t_b = t_{b1} - t_{b2}$ и температуру охлажденного воздуха t_{b2} на входе ТК при текущих в течение рейса температуре наружного воздуха $t_{нв}$ и относительной влажности $\phi_{нв}$ (соответственно t_{b1} и ϕ_{b1}).

Коэффициент влаговываждения ξ – отношение полного количества теплоты (разности энтальпий воздуха на входе и выходе из охладителя), отведенной от влажного воздуха в охладителе, т. е. холодопроизводительности ТЭХМ Q_0 , к количеству явной теплоты, определяемому разностью температур по сухому термометру: $\xi = Q_0 / [G_v \cdot c_v (t_{в1} - t_{в2})]$. Чем больше ξ , тем больше теплоты необходимо отвести от влажного воздуха для снижения его температуры на одну и ту же величину.

Расход воздуха G_v через ТК рассчитывали с помощью программы корпорации MAN [6]. В качестве НРТ применен озонобезопасный хладагент R142b. Температура кипения R142b в испарителе $t_0 = 5^\circ\text{C}$, а конденсации $t_k = 35^\circ\text{C}$.

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

Наряду с подачей на вход ТК воздуха из МО рассмотрен также вариант подачи наружного воздуха отдельным воздухопроводом [1, 2]. Во втором случае в результате нагрева в воздуховоде температура наружного воздуха повышается на 5°C , а относительная влажность снижается примерно на 20 % (рис. 3), а с нею сокращаются и затраты холода на конденсацию водяных паров из влажного воздуха в процессе его охлаждения. Благодаря этому температуру воздуха можно уменьшить на большую величину по сравнению с забором воздуха из МО.

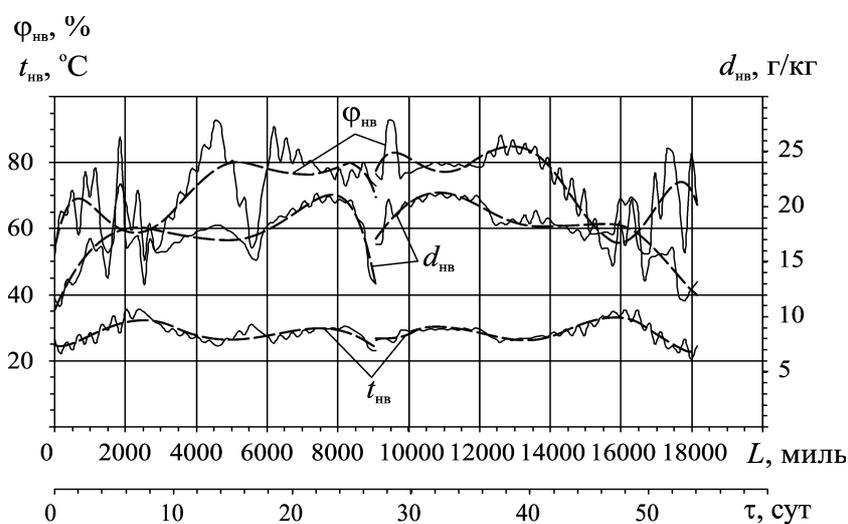


Рис. 2. Изменение температуры $t_{нв}$, относительной влажности $\varphi_{нв}$ и влагосодержания $d_{нв}$ наружного воздуха в течение рейса Одесса–Йокогама–Одесса (1.07.2009...24.08.2009)

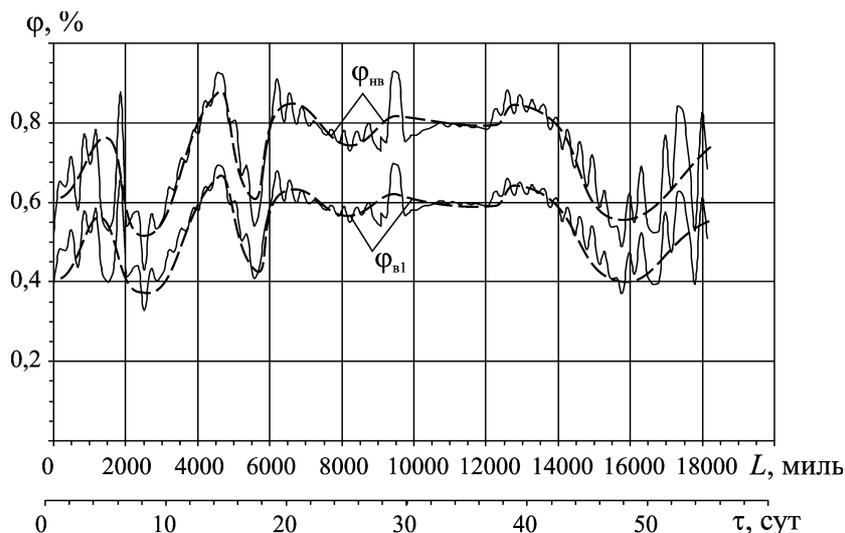


Рис. 3. Изменение относительной влажности наружного воздуха $\varphi_{нв}$ и воздуха на входе в охладитель $\varphi_{в1}$, подаваемого в него отдельным воздухопроводом

Значения снижения температуры воздуха Δt_v и уменьшения его влагосодержания Δd в процессе

охлаждения в охладителе ТЭХМ на входе ТК, а также коэффициента влаговываждения ξ при подаче

воздуха отдельным воздухопроводом и из МО и меняющейся в течение рейса температуре наружного воздуха $t_{нв}$ приведены на рис. 4.

Сравнение параметров процессов охлаждения воздуха при разных способах его подвода к охладителю показывает, что при подаче воздуха из МО величина снижения его температуры меньше, чем в случае его подвода отдельным воздухопроводом ($\Delta t_b'' < \Delta t_b'$ на рис. 4, а), тогда как уменьшение влагосодержания воздуха, наоборот, больше в первом варианте: $\Delta d'' > \Delta d'$ (рис. 4, б). Соответственно и процесс охлаждения влажного воздуха в первом случае

проходит с большим коэффициентом влаговываждения: $\xi'' > \xi'$ (рис. 4, б), а значит и большими затратами холода (холодопроизводительности Q_0) на снижение температуры воздуха на величину Δt_b . Если при подводе к ТК МОД наружного воздуха отдельным воздухопроводом имеет место избыток располагаемого холода по сравнению с его величиной, требуемой для охлаждения воздуха на входе ТК до $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$, то в случае забора воздуха из МО, наоборот, даже некоторый его дефицит. В результате температура воздуха на выходе из воздухоохладителя $t_{в2}$ оказывается выше 15°C (рис. 5, а).

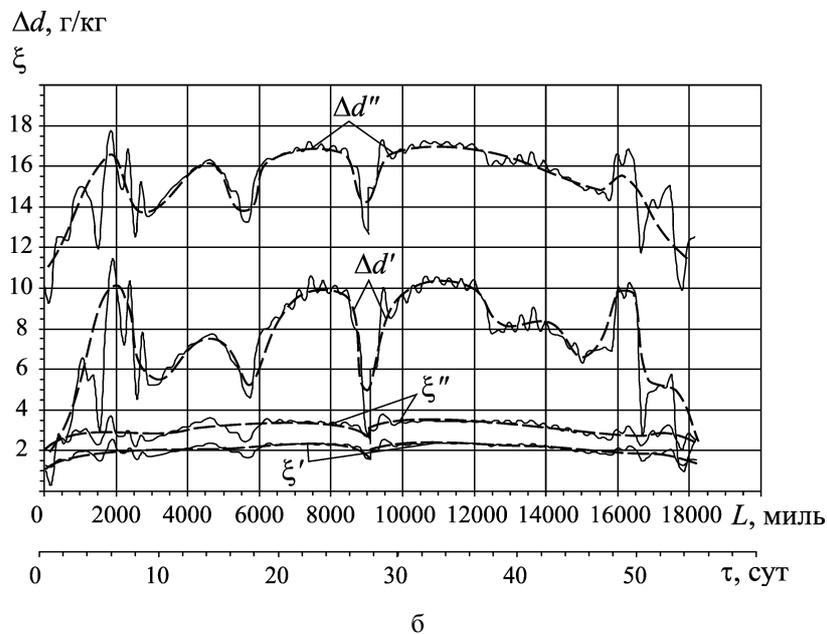
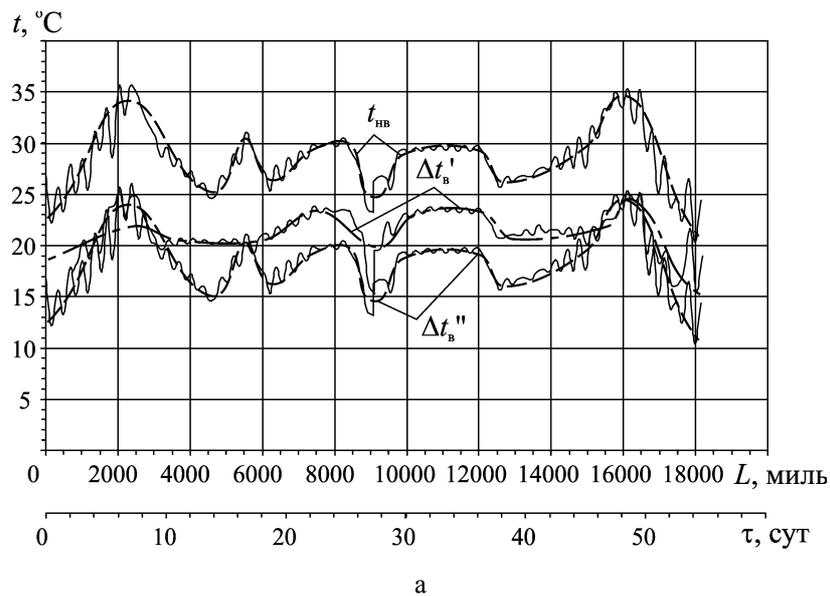
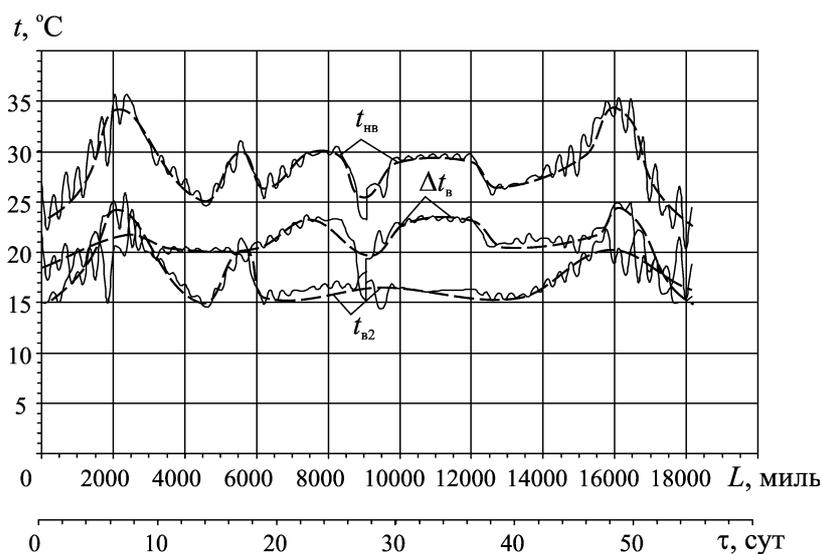
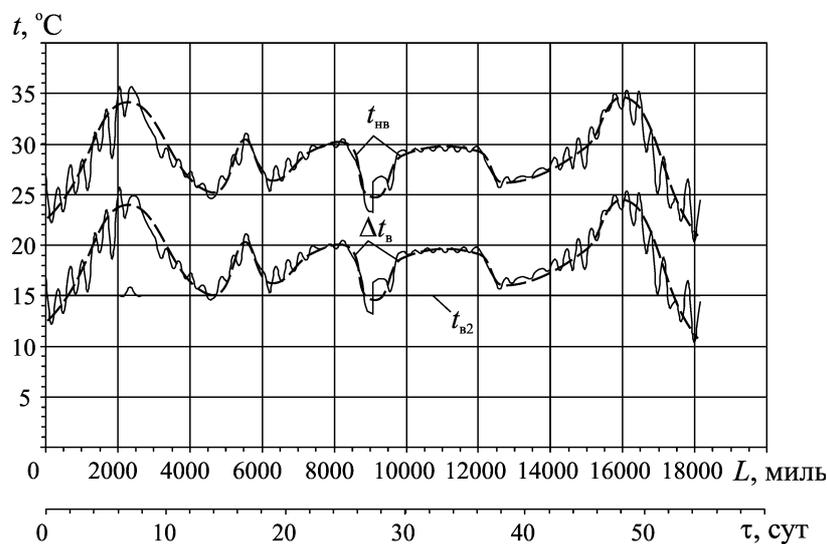


Рис. 4. Изменение температуры наружного воздуха $t_{нв}$ и снижение температуры воздуха Δt_b в охладителе на входе ТК (а), изменение коэффициента влаговываждения ξ и уменьшение влагосодержания воздуха Δd (б): $\Delta t_b', \Delta d'$ и ξ' – подача наружного воздуха воздухопроводом; $\Delta t_b'', \Delta d''$ и ξ'' – воздух из МО



а



б

Рис. 5. Изменение температуры наружного воздуха $t_{нв}$, снижение температуры воздуха $\Delta t_{в}$ в охладителе на входе ТК и температура воздуха на выходе из охладителя $t_{в2}$ в течение рейса: а – воздух из МО; б – воздух из воздуховода

Результаты расчетов показывают, что суточный расход влаги $G_{вл}$, отводимой в процессе охлаждения воздуха в охладителе на входе ТК на большей части рейса Одесса–Йокогама–Одесса, составляет 30...40 т/сут при заборе воздуха из МО (рис. 6, а).

Гораздо меньшее количество отводимого конденсата (около 10 т/сут, рис. 6, б) при подаче в охладитель наружного воздуха отдельным воздуховодом обусловлено более низкими его исходной температурой (примерно на 5 °С) и коэффициентом влаговыпадения ξ' процесса охлаждения (рис. 4,а) по сравнению с подачей воздуха из МО.

Расчет экономии топлива ΔB_e в зависимости от снижения температуры воздуха на входе ТК МОД производили с помощью фирменной программы для МОД корпорации MAN [6] в зависимости от температуры воздуха $t_{в2}$ на входе ТК, согласно результатам вычислений по которой снижение температуры воздуха на входе ТК МОД на величину $\Delta t_{в} = 10$ °С приводит к сокращению удельного расхода топлива b_e на 1,2 г/(кВт·ч). Уменьшение удельного расхода топлива Δb_e , сокращение расхода топлива в абсолютных ΔB_e и относительных $\overline{\Delta B_e}$ величинах в течение рейса Одесса–Йокогама (1.07.2009...24.08.2009) приведены на рис. 7.

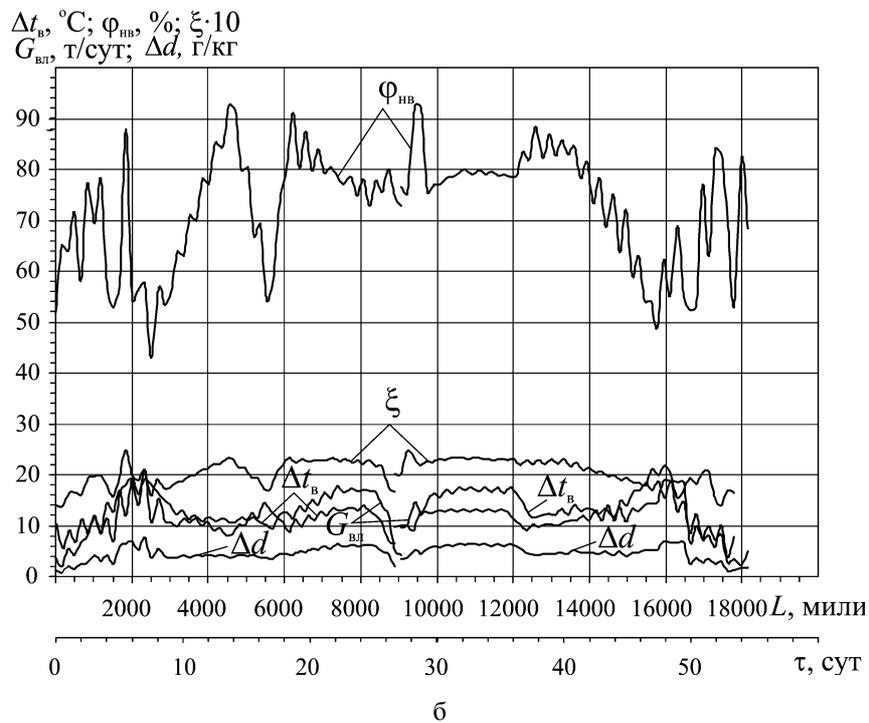
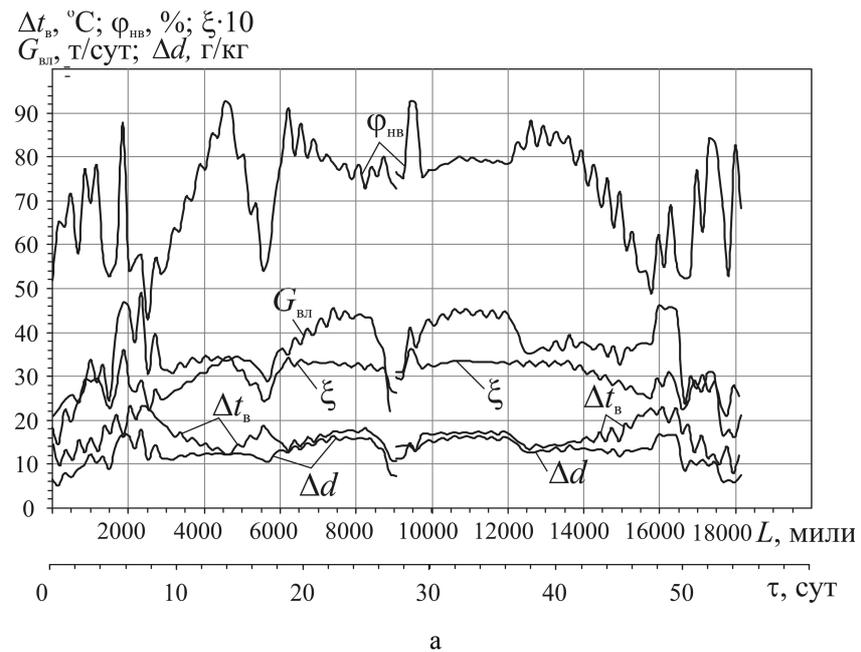


Рис. 6. Изменение относительной влажности $\phi_{нв}$ и коэффициента влаговыведения ξ наружного воздуха, уменьшение влагосодержания Δd и суточный расход влаги $G_{вл}$, отводимой в процессе охлаждения воздуха в охладителе на входе ТК в течение рейса: а – воздух из МО; б – воздух из воздуховода

Из рис. 7 видно, что практически на протяжении всего рейса уменьшение удельного расхода топлива составляет

$$\Delta b_e = 2,0 \dots 2,5 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)},$$

относительная экономия потребления топлива

$$\overline{\Delta B_e} = 1,3 \%,$$

а абсолютная экономия потребления топлива за рейс

для МОД мощностью 10 МВт составляет

$$\Delta B_e = 26 \dots 28 \text{ т.}$$

При этом несколько большие величины соответствуют подаче наружного воздуха на вход ТК отдельным воздуховодом, а меньшие – подаче воздуха из МО с более высокой температурой и влажностью.

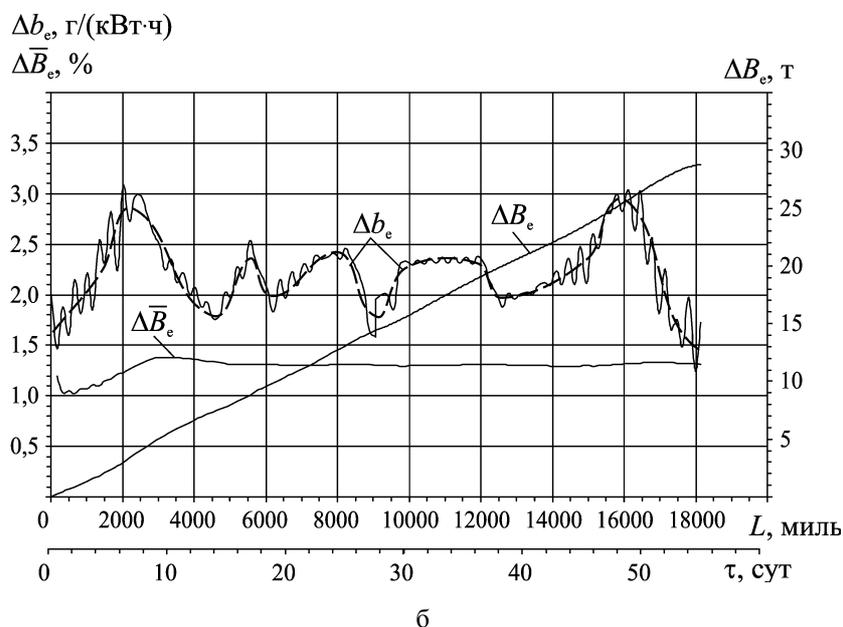
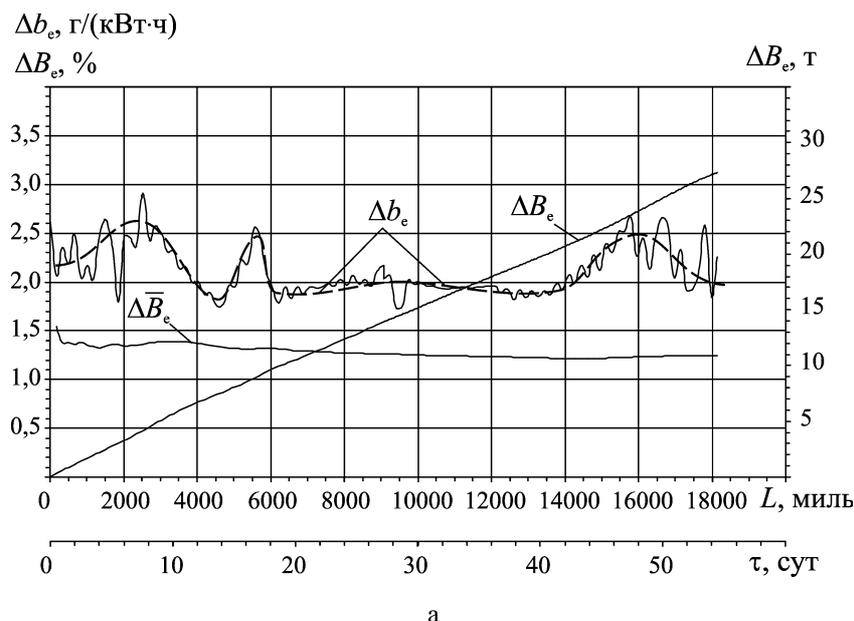


Рис. 7. Уменьшение удельного расхода топлива Δb_e , сокращение расхода топлива в абсолютных ΔB_e и относительных $\overline{\Delta B_e}$ величинах в течение рейса Одесса–Иокогама–Одесса (1.07.2009...24.08.2009): а – воздух из МО; б – воздух из воздуховода

Большие значения уменьшения удельного расхода топлива Δb_e и соответственно сокращения расхода топлива в абсолютных ΔB_e и относительных $\overline{\Delta B_e}$ величинах при подаче воздуха в ТК отдельным воздуховодом по сравнению с забором воздуха из МО в течение летнего рейса Одесса–Иокогама–Одесса (1.07.2009...24.08.2009) обусловлены меньшими величинами $\varphi_{в1}$, соответственно коэффициента влаговыпадения ξ и затратами холода, требуемыми для охлаждения воздуха на одну и ту же величину $\Delta t_{в}$.

Выводы

Использование теплоты уходящих газов и наддувочного воздуха для охлаждения воздуха на входе ТК судовых МОД эжекторными холодильными машинами обеспечивает сокращение удельного расхода топлива на 2,0...2,5 г/(кВт·ч) и сопровождается значительным выпадением конденсата (30...40 т/сут), что дает основания рассматривать воздухоохладитель ТЭХМ как экологоэнергоэффективную опреснитель-

ную установку, исключая энергетические затраты, свойственные традиционным опреснителям испарительного типа, и соответствующие им выбросы продуктов сгорания органического топлива.

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 CO₂ emission: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2005.*

3. Радченко Р.Н. Использование сбросного тепла малооборотных дизелей для охлаждения воздуха на входе турбокомпрессоров / Р.Н. Радченко, Н.Я. Хлопенко // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2010. – № 8 (75). – С.24–28.

4. Радченко Р.Н. Теплоиспользующие контуры непосредственного и промежуточного охлаждения воздуха на входе дизельных установок / Р.Н. Радченко, Т. Бес, А.А. Сирота // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2010. – № 10 (77). – С. 66 – 69.

5. Радченко Р.Н. Тригенерационные циркуляционные испарительные контуры низкокипящих рабочих тел предварительного охлаждения воздуха дизелей / Р.Н. Радченко // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2009. – № 7(64). – С. 27 – 30.

6. *MAN B&W ME/ME-C/ME-GI/ME-B-III engines.* – Copenhagen, Denmark: MAN Diesel. – 2010.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований по Гранту Президента Украины (проект № GP/F32/152).

Поступила в редакцию 30.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, профессор В.А. Голиков, Одесская национальная морская академия, Одесса, Украина.

ЕКОЛОГОЕНЕРГОЕФЕКТИВНА ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ ПРІСНОЇ ВОДИ НА СУДНАХ

Р.М. Радченко, М.І. Радченко, С.О. Охотін, В.Є. Казанцева

Проаналізована можливість отримання прісної води в результаті конденсації водяної пари з вологого повітря у процесі його охолодження в поверхневому теплообміннику на вході наддувного турбокомпресора суднового дизеля. Для охолодження повітря застосована тепловикористовуюча холодильна машина, що утилізує теплоту відхідних газів і наддувного повітря. Розраховані кількість отриманого конденсату та зниження температури повітря на вході турбокомпресора при температурі та вологості зовнішнього повітря, змінних упродовж рейсу, а також скорочення споживання дизелем палива, що досягається при цьому.

Ключові слова: утилізація теплоти, охолодження повітря, конденсація водяної пари, тепловикористовуюча холодильна машина, дизель.

ECOLOGY-ENERGY EFFICIENT TECHNOLOGY OF RECEIVING THE FRESH WATER ON THE SHIPS

R.N. Radchenko, N.I. Radchenko, S.A. Ohotin, V.E. Kazanceva

The possibility to receive fresh water by condensing the steam from a humid air during its cooling in the surface heat exchanger at the inlet of discharge turbocompressor of marine diesel engine has been analyzed. The waste heat recovery cooling machine utilizing the heat of exhaust gases and scavenge to cool the air was applied. The quantity of condensate received and temperature drop in the air at the inlet of turbocompressor at the temperature and humidity of ambient air changeable on the ship rout and reduction in fuel consumption of diesel engine were calculated.

Keywords: heat utilization, cooling of air, steam condensation, waste heat recovery cooling machine, diesel engine.

Радченко Роман Николаевич – канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.

Радченко Николай Иванович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. кондиционирования и рефрижерации Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.

Охотин Сергей Алексеевич – магистр Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru

Казанцева Варвара Евгеньевна – магистр Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.