

УДК 621.57

А.Н. РАДЧЕНКО, Д.В. КОНОВАЛОВ

Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕПЛОИСПОЛЬЗУЮЩАЯ УСТАНОВКА КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ ДИЗЕЛЯ ТРАНСПОРТНОГО СУДНА

Проанализировано охлаждение и осушение воздуха на входе турбокомпрессора судового дизеля теплоиспользующей установкой кондиционирования воздуха, утилизирующей теплоту уходящих газов. Показана возможность получения пресной воды путем конденсации водяных паров из влажного воздуха в процессе его охлаждения в поверхностном теплообменнике на входе наддувочного турбокомпрессора. Определены 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: *охлаждение, осушение воздуха, конденсация водяного пара, утилизация теплоты, теплоиспользующая установка кондиционирования воздуха, дизель.*

1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

Условия эксплуатации судовых ДВС отличаются значительным изменением в течение рейса температуры воздуха на входе наддувочного турбокомпрессора (ТК), обычно подаваемого из машинного отделения (МО), которая в свою очередь зависит от температуры $t_{\text{нв}}$ наружного воздуха. Температура воздуха на входе ТК существенно влияет на топливную эффективность ДВС. Так, с увеличением на 10 °С температуры воздуха на входе ТК малооборотных дизелей (МОД), применяющихся на судах в качестве главных двигателей, удельный расход топлива b_e возрастает на 0,5...0,7% [1, 2]. При этом возрастает температура уходящих газов после ТК и, следовательно, потери теплоты с ними. В работах [3 – 5] показана целесообразность повышения топливной эффективности МОД путем охлаждения воздуха на входе ТК установками кондиционирования, использующими теплоту уходящих газов.

Охлаждение воздуха в поверхностном охладителе сопровождается уменьшением его влагосодержания в результате конденсации присутствующих в нем водяных паров. В зависимости от температуры, влажности и расхода воздуха через ТК количество влаги, отводимой от воздуха в охладителе на входе ТК, может быть довольно большим и покрывать потребности судна в пресной воде (после соответствующей обработки). Поэтому такой воздухоохладитель (он же осушитель воздуха), в котором пресная вода в виде конденсата водяного пара представляет собой побочный продукт процесса кондициониро-

вания воздуха на входе ДВС, вполне можно рассматривать как альтернативу традиционным судовым вакуумным опреснительным установкам испарительного типа. В последних испарение морской воды происходит по вакуумом за счет теплоты горячей воды высокотемпературного контура охлаждения двигателя.

Цель работы – оценка эффективности кондиционирования воздуха на входе ТК судового дизеля теплоиспользующей установкой.

2. Результаты исследования

Как конструктивно наиболее простой и надежный в эксплуатации рассмотрен теплоиспользующий кондиционер эжекторного типа (ТЭК), в котором функцию компрессора выполняет эжектор. Применение в ТЭК низкокипящих рабочих тел (НРТ) позволяет охлаждать воздух на входе ТК МОД до сравнительно низких температур 15...20 °С с получением на выходе воздуха практически в состоянии насыщения (соответственно с максимальным влаговыпадением) и при этом избегать необходимости поддержания вакуума в испарителе НРТ-воздухоохладителя (И-ВО).

ТЭК состоит из паросилового и холодильного контуров (рис. 1, а). Паросилового контур служит для получения в генераторе паров 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. Эжектор совмещает функции детандера паросило-

вого контура (расширение пара происходит в сопле) и компрессора холодильного контура (повышение давления пара – в камере смешения и диффузоре).

При этом теплота уходящих газов утилизируется сначала в утилизационном котле (УК), а теплота водяного пара, оставшегося после покрытия потребностей в нем судовых потребителей, используется в ТЭК для получения в его генераторе паров НРТ высокого давления.

На рис. 1, б приведены удельные, приходящиеся на единицу расхода уходящих газов (воздуха),

теплота, отведенная от уходящих газов в генераторе ТЭК \bar{q}_r , и холодопроизводительность ТЭК \bar{q}_0 , снижение температуры Δt_b воздуха в охладителе на входе ТК и удельный, приходящийся на единицу расхода воздуха, расход выпавшей влаги $\bar{g}_{вл}$ в зависимости от температуры t_r кипения НРТ в генераторе при разных коэффициентах влаговывадения ξ . В качестве НРТ применен озонобезопасный хладон R142b. Температура кипения R142b в испарителе $t_0 = 5^\circ\text{C}$, а конденсации $t_k = 35^\circ\text{C}$.

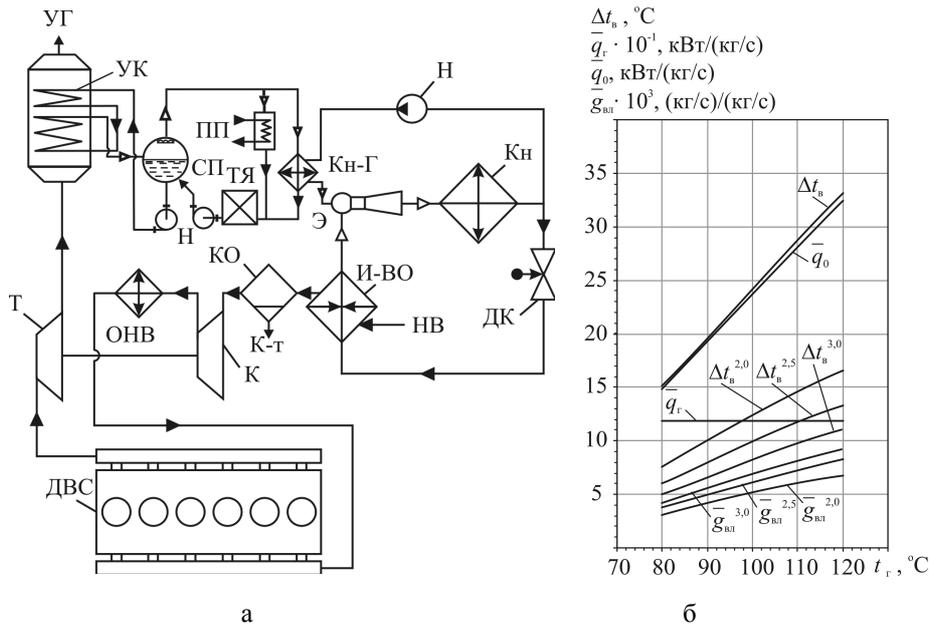


Рис. 1. Схема системы охлаждения воздуха на входе ТК, использующей теплоту уходящих газов после турбины ТК (а) и ее показатели в виде удельной теплоты, отведенной от уходящих газов в генераторе ТЭК \bar{q}_r , холодопроизводительности ТЭК \bar{q}_0 , снижения температуры Δt_b воздуха в охладителе на входе ТК и удельного расхода выпавшей влаги $\bar{g}_{вл}$ в зависимости от температуры t_r кипения хладона R142b в генераторе при разных коэффициентах влаговывадения ξ : $\Delta t_b \dots \Delta t_b^{3.0}$ и $\bar{g}_{вл}^2 \dots \bar{g}_{вл}^3 - \xi = 1,0 \dots 3,0$; Кн-Г – конденсатор водяного пара-генератор паров НРТ; Э – эжектор; Кн – конденсатор НРТ; Н – насос; ДК – дроссельный клапан; И-ВО – испаритель-воздухоохладитель; ОНВ – охладитель наддувочного воздуха водяной; УК – утилизационный котел; 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

Как видно, при температуре кипения НРТ в генераторе $t_r = 120^\circ\text{C}$ снижение температуры воздуха в охладителе составляет $\Delta t_b = 11 \dots 17^\circ\text{C}$ при коэффициентах влаговывадения соответственно $\xi = 3,0 \dots 2,0$. Коэффициент влаговывадения ξ – отношение полного количества теплоты (разности энтальпий воздуха на входе и выходе из охладителя), отведенной от влажного воздуха в охладителе, т. е. холодопроизводительности ТЭК Q_0 , к количеству явной теплоты, определяемому разностью температур по сухому термометру: $\xi = Q_0 / [G_b \cdot c_b (t_{в1} -$

$t_{в2})]$. Чем больше ξ , 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.

Охлаждение воздуха сопровождается конденсацией из него водяных паров. При этом удельный расход выпавшей влаги $\bar{g}_{вл} = 7 \dots 9$ г/кг сухого воздуха при единичном расходе воздуха через охладитель $G_b = 1$ кг/с (рис. 1, б).

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 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-III корпорации MAN [3] (номинальные мощность $N_n = 12640$ кВт и число оборотов $n_n = 127$ об/мин, эксплуатационные $N_3 = 10580$ кВт и $n_3 = 120$ об/мин)

и рейсовая линия Мариуполь-Амстердам-Мариуполь. Анализ статей расходования 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 ТЭК 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. 2.

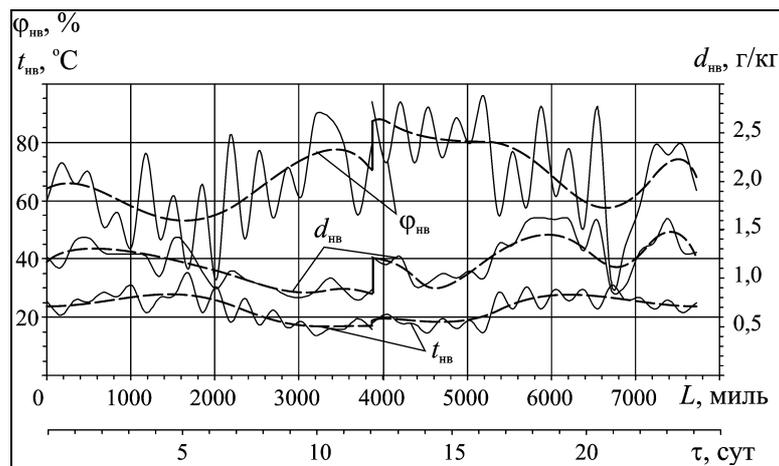


Рис. 2. Изменение температуры $t_{нв}$, относительной влажности $\phi_{нв}$ и влагосодержания $d_{нв}$ наружного воздуха в течение рейса Мариуполь-Амстердам-Мариуполь (1.07...26.07.2009)

Как видно, в течение суток имеют место весьма существенные колебания температуры $t_{нв}$ и относительной влажности ϕ наружного воздуха, причем максимумам температур соответствуют минимумы влажности. 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 может оказаться незначительным. В то же время наличие дневных и ночных противоположно направленных экстремумов $t_{нв}$ и ϕ , существование которых проявляется только при локальных во времени измерениях $t_{нв}$ и ϕ , создает благоприятные условия для большего снижения температуры воздуха на входе ТК МОД днем (благодаря меньшей относительной влажности ϕ), когда имеет место значительное ухудшение топливной эффективности МОД из-за повышенных температур $t_{нв}$. В ночное время, когда $t_{нв}$ ниже и меньше потребность в охлаждении воздуха на входе ТК, снижение температуры воздуха также меньше из-за большей влажности ϕ . Таким образом, о целе-

сообразности охлаждения воздуха на входе ТК можно судить с учетом изменения его температуры и влажности в течение суток.

В случае подачи в ТК двигателя воздуха из МО его температура $t_{в1}$ на входе ТК будет на 10 °C выше, чем наружного воздуха, а отдельным воздухопроводом – на 5 °C ниже, чем в МО. В первом случае – при влажности ϕ , близкой влажности наружного воздуха, во втором – примерно на 20 % меньшей из-за нагрева в воздуховоде.

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

Снижение температуры воздуха $\Delta t_b = t_{в1} - t_{в2}$ и температуру охлажденного воздуха $t_{в2}$ на входе ТК определяли из теплового баланса охладителя воздуха ТЭК $Q_0 = G_b \cdot c_b (t_{в1} - t_{в2}) \zeta$ при текущих в течение рейса температуре наружного воздуха $t_{нв}$ и относительной влажности $\phi_{нв}$ (соответственно $t_{в1}$ и $\phi_{в1}$).

Расход воздуха G_b через ТК рассчитывали с помощью фирменной программы корпорации MAN в зависимости от температуры воздуха $t_{в2}$ на входе ТК [6].

С учетом минимальной разности температур между охлажденным воздухом и кипящим R142b, $t_{b2} - t_0 = 10^\circ\text{C}$, глубина охлаждения воздуха в И-ВО ограничивается температурой $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$.

Снижение температуры воздуха Δt_b в охлади-

теле ТЭК 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. 3.

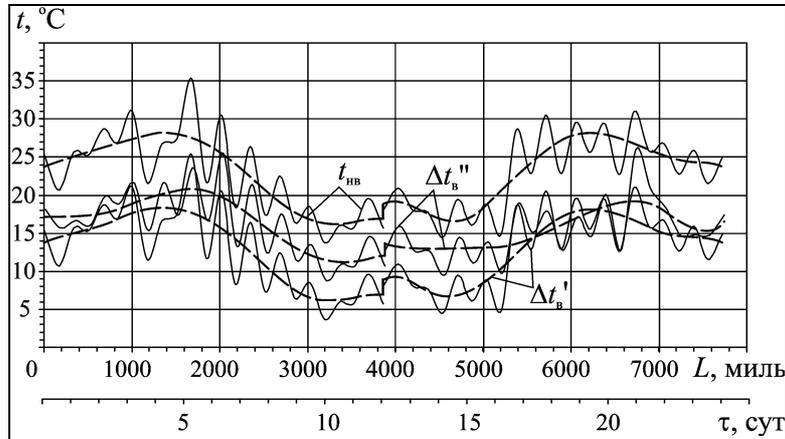


Рис. 3. Изменение температуры наружного воздуха $t_{нв}$ и снижение температуры воздуха Δt_b в охладителе на входе ТК в течение рейса: $\Delta t_b'$ — подача воздуха в охладитель отдельным воздухопроводом; $\Delta t_b''$ — воздух из МО

Как видно, снижение температуры воздуха Δt_b в охладителе ТЭК на входе ТК при его подаче из МО больше по сравнению с его подводом отдельным воздухопроводом: $\Delta t_b'' > \Delta t_b'$, что обусловлено более высокой (примерно на 5°C) температурой воздуха в МО по сравнению с его температурой в воздуховоде.

С учетом еще и повышенной влажности воздуха в МО затраты холода на его охлаждение значительно больше, чем при подаче наружного воздуха воздухопроводом. В результате, на участке рейса при повышенных температурах наружного воздуха $t_{нв}$ на рис. 2 (в районе Средиземноморья) для охлаждения воздуха до минимально возможной температуры $t_{b2} = 15^\circ\text{C}$ в случае его забора из МО требуется хо-

лодопроизводительность Q_0'' больше, чем можно получить, если использовать в ТЭК только теплоту уходящих газов (доля требуемой холодопроизводительности в ее располагаемой величине, получаемой в ТЭК за счет утилизируемой теплоты: $\Delta Q_0'' > 100\%$ на рис. 4). В результате температура воздуха на выходе из воздухоохладителя t_{b2} оказывается выше 15°C (рис. 5). Дефицит холода можно покрыть, используя теплоту дополнительного источника, например надувочного воздуха.

При подаче в охладитель наружного воздуха из отдельного воздуховода, где его температура и влажность ниже, чем в МО, наоборот, существует почти 50 %-й избыток холодопроизводительности: $\Delta Q_0' < 100\%$ (рис. 4).

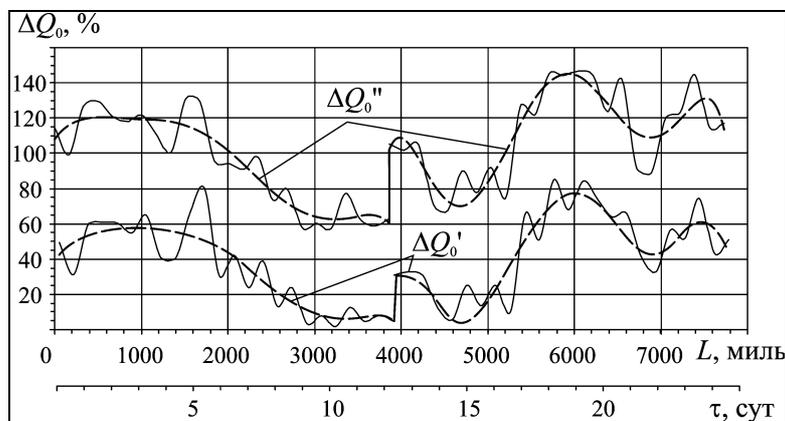


Рис. 4. Доля холодопроизводительности ТЭК ΔQ_0 , необходимая на охлаждение воздуха в охладителе на входе ТК на величину Δt_b при подаче воздуха отдельным воздухопроводом $\Delta Q_0'$ и из МО $\Delta Q_0''$

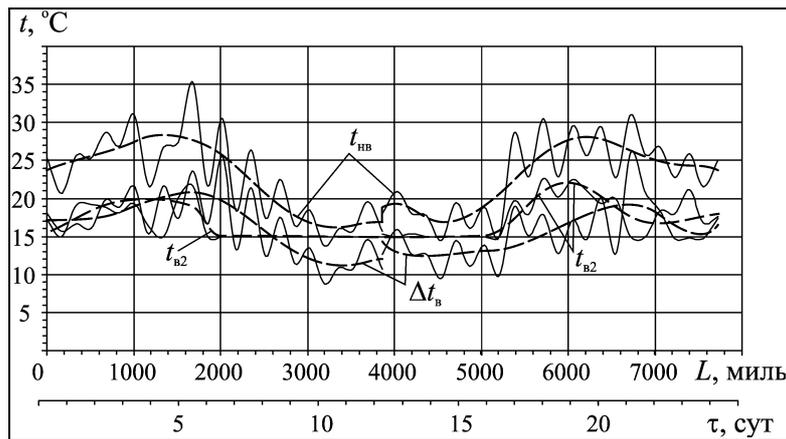
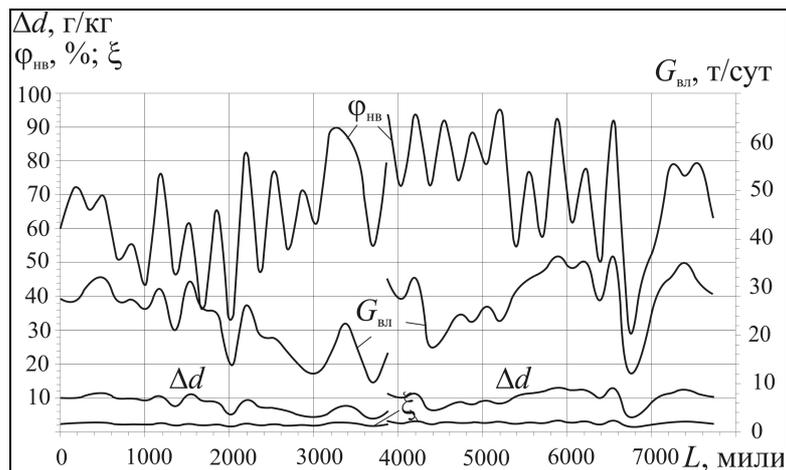


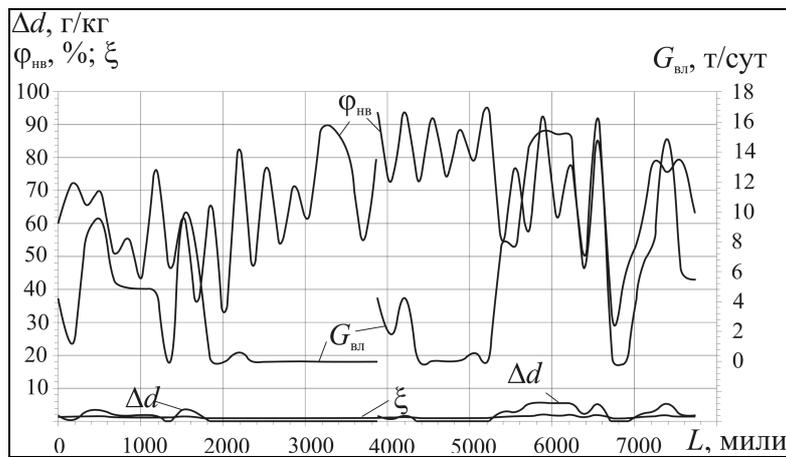
Рис. 5. Изменение температуры наружного воздуха $t_{нв}$, снижение температуры воздуха Δt_B в охладителе на входе ТК и температура воздуха на выходе из охладителя t_{B2} при подаче в охладитель на входе ТК МОД воздуха из МО

Результаты расчетов показывают, что суточный расход влаги $G_{вл}$, получаемой в процессе охлаждения воздуха в охладителе на входе ТК на большей

части рейса Мариуполь–Амстердам–Мариуполь, составляет 15...30 т/сут при заборе воздуха из МО (рис. 6, а).



а



б

Рис. 6. Изменение относительной влажности $\varphi_{нв}$ и коэффициента влагосодержания 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 – воздуха из МО; б – воздух из воздуховода

Расход топлива B_e в зависимости от снижения температуры воздуха на входе ТК рассчитывали с помощью фирменной программы [6] для МОД корпорации MAN в зависимости от температуры воздуха t_{b2} 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 Δb_e , полного расхода топлива на ГД в абсолютных ΔB_e и относительных $\overline{\Delta B_e}$ величинах в течение рейса Мариуполь–Амстердам–Мариуполь (1.07... 13.07.2009) приведены на рис. 7.

Из рис. 7 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 участке рейса вдоль Северной Европы до $2,5 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ в Средиземном море. Соответственно меняется и относительная экономия потребления топлива: $\overline{\Delta B_e} = 1,0...1,4\%$, а абсолютная экономия потребления топлива за один летний рейс для МОД мощностью 10 МВт составляет $\Delta B_e = 9...10 \text{ т}$ (большая величина соответствует подаче в охладитель на входе ТК воздуха из МО с повышенной на 5°C температурой по сравнению с забором наружного воздуха отдельным воздухоподом).

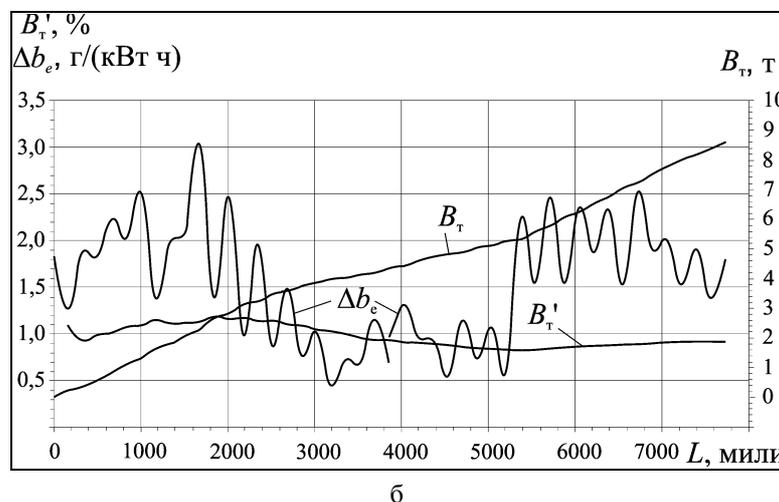
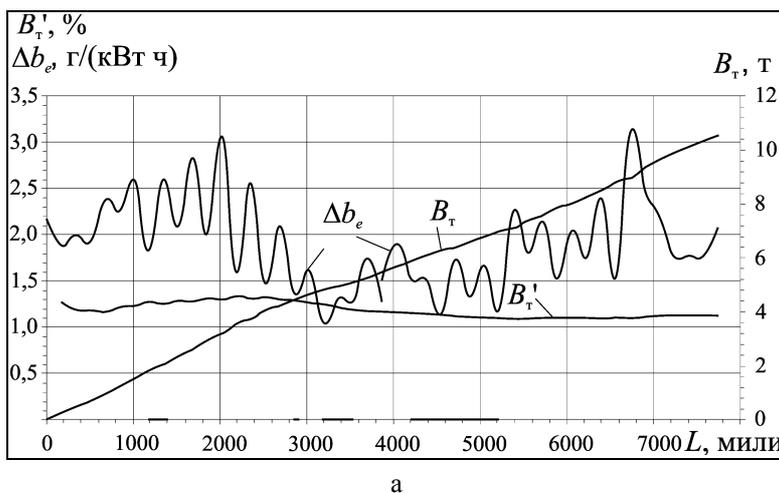


Рис. 7. Изменение относительной влажности $\varphi_{нв}$ и коэффициента влагосодержания ξ наружного воздуха, уменьшение влагосодержания Δd и суточный расход влаги $G_{вл}$, отводимой в процессе охлаждения воздуха в охладителе на входе ТК в течение рейса:

а – воздух из МО; б – воздух из воздуховода

Выводы

Использование теплоты уходящих газов для охлаждения воздуха на входе ТК судового МОД обеспечивает сокращение удельного расхода топлива в летние месяцы на разных участках рейсовой

линии Мариуполь–Амстердам–Мариуполь на $1,5...2,5 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$.

При этом суточный расход влаги, отводимой в процессе охлаждения воздуха на большей части рейса, составляет $15...30 \text{ т/сут}$ при в охладитель воздуха из МО.

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

Литература

1. *Influence of Ambient Temperature Conditions on Main Engine Operation [Text]: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2005.*

2. *Thermo Efficiency System (TES) for reduction of fuel consumption and CO₂ emission [Text]: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2005.*

3. Радченко, Р.Н. Тригенерационные циркуляционные испарительные контуры низкокипящих рабочих тел предварительного охлаждения воздуха дизелей [Текст] / Р.Н. Радченко // *Авиационно-кос-*

мическая техника и технология. – 2009. – № 7 (64). – С. 27 – 30.

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

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

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

Поступила в редакцию 17.05.2011

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

РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧА ТЕПЛОВИКОРИСТОВУЮЧА УСТАНОВКА КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ ДИЗЕЛЯ ТРАНСПОРТНОГО СУДНА

А.М. Радченко, Д.В. Коновалов

Проаналізовано охолодження та осушення повітря на вході турбокомпресора суднового дизеля тепловикористовуючою установкою кондиціонування повітря, що утилізує теплоту відхідних газів. Показана можливість отримання прісної води шляхом конденсації водяної пари з вологого повітря у процесі його охолодження в поверхневому теплообміннику на вході наддувного турбокомпресора. Визначені 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, яке при цьому досягається.

Ключові слова: охолодження, осушення повітря, конденсація водяної пари, утилізація теплоти, тепловикористовуюча установка кондиціонування повітря, дизель.

RESOURCES SAVING WASTE HEAT RECOVERY SYSTEM FOR CONDITIONING THE AIR AT THE INLET OF DIESEL ENGINE OF TRANSPORT SHIP

A.N. Radchenko, D.V. Kononov

Cooling and drying the air at the inlet of turbocompressor of marine diesel engine by waste heat recovery air conditioning system utilizing the heat of exhaust gases has been analyzed. A possibility to receive a fresh water by condensing the steam from humid air during its cooling in the surface heat exchanger at the inlet of discharge turbocompressor was shown. The amount 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.

Key words: cooling, drying of air, steam condensation, heat utilization, waste heat recovery air conditioning system, diesel engine.

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

Коновалов Дмитрий Викторович – канд. техн. наук, доцент кафедры теплотехники Херсонского филиала Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: dimitriy_ko@mail.ru.