

ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ ГЛАВНЫХ ДИЗЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНОГО СУДНА ЭЖЕКТОРНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНОЙ

Радченко Р.Н., науч. сотрудник, Охотин С.А., Казанцева В.Е., магистранты
Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев

Проанализировано применение охлаждения воздуха на входе судовых малооборотных дизелей в теплоиспользующей холодильной машине, утилизирующей теплоту выпускных газов и надвучного воздуха.

The application of cooling the air at the intake of marine low speed diesel engine in the waste heat recovery refrigeration system utilizing the heat of exhaust gases and scavenge air have been analyzed.

Ключевые слова: охлаждения наружного воздуха, судовой малооборотный дизель, утилизация теплоты.

1. Анализ состояния проблемы повышения эффективности судовых дизельных установок. Выделение нерешенных задач, постановка цели исследования. На транспортных судах в качестве главных двигателей (ГД) в большинстве случаев применяются малооборотные дизели (МОД). Эффективность судовых МОД существенно зависит от температуры наружного воздуха $t_{\text{нв}}$. Согласно [1–3] каждые 10°C повышения температуры воздуха на входе надвучного турбокомпрессора (ТК) МОД вызывают увеличение удельного расхода топлива b_e на $0,2\dots 0,7\%$. При этом возрастает температура $t_{\text{ут}}$ выпускных газов после турбины ТК на 16°C и, следовательно, потери теплоты с ними. Возрастает также потери с водой, охлаждающей надвучный воздух и цилиндры двигателей, и, в конечном счете, ухудшается топливная экономичность двигателей, снижается их КПД η_e . По данным [1–3] для современных судовых МОД с эффективным КПД $\eta_e = 50\dots 51\%$ типа МЕМС фирмы «MAN» и RTA фирмы «Wartsila» тепловые потери с выпускными газами составляют $25\dots 26\%$ (в сверхдлинноходовых МОД несколько меньше — $20\dots 22\%$), а водой, отводимой от надвучного воздуха, $14\dots 17\%$.

Существенное влияние температуры t_b воздуха на входе ТК на показатели судовых ГД свидетельствует о наличии резервов повышения их эффективности путем охлаждения воздуха на входе, а значительные потери теплоты с выпускными газами и охлаждающей надвучный воздух водой — о целесообразности применения с этой целью теплоиспользующих холодильных машин, утилизирующих теплоту выпускных газов, т.е. термотрансформаторов (ТТ). Конструктивно наиболее простыми и надежными в эксплуатации являются термотрансформаторы эжекторного типа (ТТЭ). Применение в ТТЭ низкокипящих рабочих тел (НРТ) позволяет утилизировать теплоту ВЭР сравнительно невысокого температурного уровня и охлаждать воздух на входе ТК МОД до $15\dots 20^\circ\text{C}$.

Целью исследования является технико-экономическая оценка целесообразности охлаждения воздуха на входе главного двигателя транспортного судна эжекторным термотрансформатором на конкретной рейсовой линии.

2. Изложение основных результатов исследования. Глубина охлаждения воздуха теплоиспользующей холодильной машиной, а значит и эффект от применения охлаждения воздуха на входе судового МОД, зависят от располагаемой сбросной теплоты судовой энергетической установки (сверх необходимой для покрытия потребностей энергетической установки и всего судна), а также от требуемых затрат холода, зависящих от температуры и относительной влажности воздуха на входе МОД (параметров наружного воздуха), т.е. климатических условий плавания. Анализ статей расходования пара на балкере типа «Киев» [4] показал, что в теплое время объемы потребления пара (давление пара $7\dots 8$ бар) составляют примерно 25% производительности утилизационного котла (УК). Соответственно располагаемая доля пара, который можно использовать в ТТЭ для охлаждения воздуха на входе ТК МОД, составляет 75% паропроизводительности УК. Если помимо теплоты выпускных газов (глубина утилизации теплоты газов ограничивается температурой $150\dots 160^\circ\text{C}$, исключая возникновение сернистой коррозии материала экономайзерной поверхности УК) в ТТЭ утилизировать еще и теплоту надвучного воздуха после ТК, отводимую в водяном охладителе надвучного воздуха, то количество утилизируемой теплоты и, соответственно, выработка холода практически удваиваются.

В качестве главного двигателя балкера типа «Киев» рассмотрен МОД 8S50ME-C7.1-III корпорации MAN [5]: номинальные мощность $N_{L1} = 12640$ кВт и число оборотов $n_{L1} = 127$ об/мин; эксплуатационные $N_3 = 10580$ кВт и $n_3 = 120$ об/мин (для них рассчитывается расход топлива двигателя); оптимизационные

$N_o = 11400$ кВт и $n_o = 117$ об/мин (на них рассчитывается нагрузка на охладитель воздуха на входе двигателя). Исходя из располагаемой теплоты выпускных газов и наддувочного воздуха, т.е. тепловой нагрузки Q_r генератора ТТЭ, определяют холодопроизводительность ТТЭ $Q_o = \zeta Q_r$, где ζ — тепловой коэффициент ТТЭ, $\zeta = 0,30 \dots 0,35$. При подаче в ТК МОД воздуха из машинного отделения (МО) его температура t_{mo} превышает наружную на 10°C согласно [1]. Эта температура и принималась за температуру воздуха на входе охладителя перед ТК.

При текущих температуре наружного воздуха $t_{нв}$ и относительной влажности $\phi_{нв}$ (соответственно $t_{в1}$ и $\phi_{в1}$) из теплового баланса охладителя по воздуху $Q_o = G_b \cdot c_b (t_{в1} - t_{в2}) \xi$ определяют снижение температуры воздуха $\Delta t_b = t_{в1} - t_{в2} = Q_o / [G_b \cdot c_b \cdot \xi]$ в охладителе, где ξ — коэффициент влаговываждения; G_b и c_b — расход и теплоемкость воздуха. Расход воздуха через ТК рассчитывали с помощью фирменной программы для МОД корпорации MAN в зависимости от температуры воздуха $t_{в2}$ на входе ТК [5]. В ТТЭ в качестве НРТ применен хладон R142b. Температура кипения R142b в испарителе-воздухоохладителе (И-ВО) $t_0 = 5^\circ\text{C}$. С учетом минимальной разности температур между охлажденным воздухом и кипящим R142b, равной $t_{в2} - t_0 = 10^\circ\text{C}$, глубина охлаждения воздуха в И-ВО ограничивается температурой $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$.

В качестве примера рассмотрена рейсовая линия Одесса–Иокогама–Одесса. Значения температуры t и относительной влажности ϕ наружного воздуха брались по данным метеоцентра. Изменение температуры наружного воздуха $t_{нв}$, снижение температуры воздуха Δt_b в охладителе на входе ТК и температура воздуха на выходе из охладителя $t_{в2}$ (на входе ТК ГД) в течение рейса Одесса–Иокогама–Одесса (1.07.2009–24.08.2009) показаны на рис. 1.

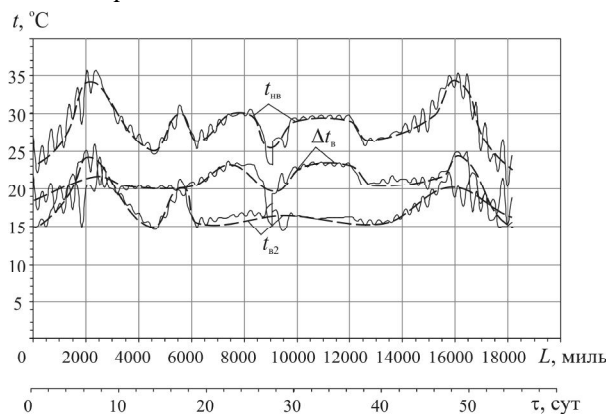


Рис. 1 – Температура наружного воздуха $t_{нв}$, снижение температуры воздуха Δt_b в охладителе на входе ТК и температура воздуха на выходе из охладителя $t_{в2}$ в течение рейса Одесса–Иокогама–Одесса (1.07.2009...24.08.2009)

Расход топлива B_e в зависимости от снижения температуры воздуха на входе ТК МОД рассчитывали с помощью фирменной программы для МОД корпорации MAN в зависимости от температуры воздуха $t_{в2}$ на входе ТК. О сокращении расхода топлива ΔB_e за каждый рейс Одесса–Иокогама–Одесса в отдельности и суммарном за I–VI рейсы (6 рейсов в году) при использовании теплоты выпускных газов и наддувочного воздуха для охлаждения воздуха на входе ТК можно судить по рис. 2.

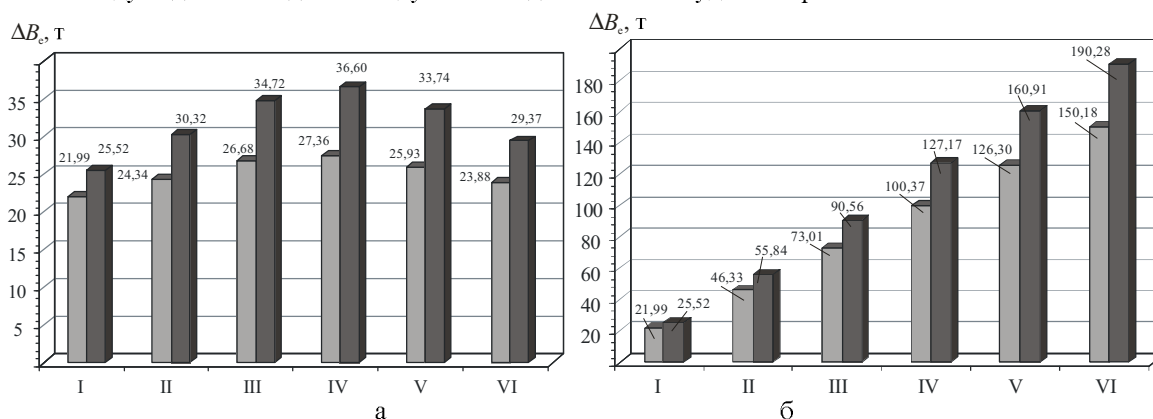


Рис. 2. – Сокращение расхода топлива ΔB_e за отдельные I–VI рейсы Одесса–Иокогама–Одесса (а) и суммарное за 6 рейсов Одесса–Иокогама–Одесса (6 рейсов в году)

Из рис. 2 видно, что при использовании для охлаждения воздуха на входе главного двигателя теплоты выпускных газов и наддувочного воздуха годовая экономия топлива (из расчета на мощность двигателя, принятую для удобства пересчета на другие мощности равной 10 МВт) на рейсовой линии Одесса–Иокогама–Одесса составляет 145...150 т (светлым цветом).

Из-за большой относительной влажности наружного воздуха $\varphi_{нв}$ и, соответственно, влажности воздуха $\varphi_{в1}$ на входе И-ВО имеют место повышенные затраты холода на конденсацию водяных паров во влажном воздухе и, следовательно, тепловая нагрузка на воздухоохладитель. В результате холода, вырабатываемого в ТТЭ за счет использования теплоты выпускных газов и наддувочного воздуха оказывается недостаточно, чтобы охладить воздух от исходной температуры $t_{в1}$ до $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$. Если для покрытия дефицита холода задействовать в ТТЭ дополнительные источники теплоты, например горячую воду контура высокотемпературного охлаждения двигателя, то за счет более глубокого охлаждения воздуха на входе ТК ГД (до $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$) годовая экономия топлива возрастет до 190 т (на рис. 2 показано темным цветом).

Рассмотрены варианты применения в качестве ГД балкера типа «Киев» двигателей MAN B&W: МОД 6S60MC, установленного на головном судне серии, номинальные (в точке L_1 поля рабочих параметров) мощность $N_{L1} = 12240$ кВт и число оборотов $n_{L1} = 105$ об/мин, и МОД 8S50ME-C7.1-ТII ($N_{L1} = 12640$ кВт; $n_{L1} = 127$ об/мин) [5].

Эффект от охлаждения воздуха на входе судового МОД состоит в снижении эксплуатационных расходов — сокращении потребления топлива. Оценка целесообразности применения ТТЭ произведена исходя из срока окупаемости τ затрат на оборудование ТТЭ. Расчеты срока окупаемости $T_{ок}$ ТТЭ охлаждения воздуха на входе главного двигателя балкера типа «Киев» производили для мощностей двигателей 6S60MC6.1-ТI (мощность в точке оптимизации $N_0 = 9790$ кВт; эксплуатационная мощность $N_э = 7810$ кВт) и 8S50ME-C7.1-ТII ($N_0 = 11400$ кВт; $N_э = 10580$ кВт).

Удельные, отнесенные к холодопроизводительности Q_0 , стоимости воздухоохладителей хладоновых (испарителей-воздухоохладителей) $C_{И-ВО,уд} = C_{И-ВО}/Q_0$ и водяных $C_{ВОВ,уд} = C_{ВОВ}/Q_0$, а также каплеуловителей $C_{КУ,уд} = C_{КУ}/Q_0$ для разной холодопроизводительности Q_0 по данным фирмы-изготовителя «Guentner» [6] приведены на рис. 3.

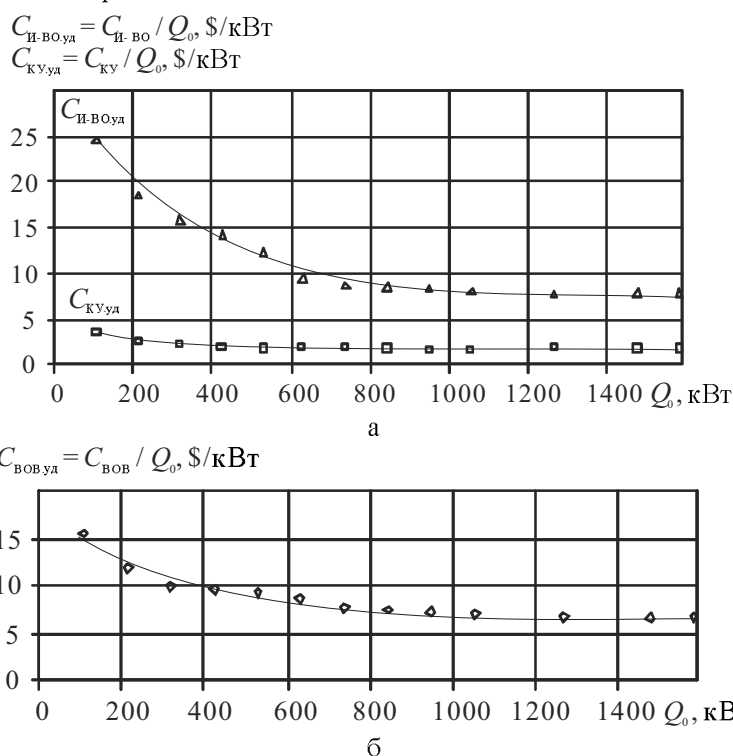


Рис. 3 – Удельные стоимости воздухоохладителей хладоновых (испарителей-воздухоохладителей) $C_{И-ВО,уд}$ и каплеуловителей $C_{КУ,уд}$ (а) и воздухоохладителей водяных $C_{ВОВ,уд}$ для разной холодопроизводительности Q_0 данным фирмы-изготовителя «Guentner»

Удельные стоимости кожухотрубных испарителей $C_{И,уд} = C_{И}/Q_0$ и конденсаторов $C_{Кн,уд} = C_{Кн}/Q_0$ для разных тепловых нагрузок Q по данным фирмы-изготовителя «Onda» [7] даны на рис. 4.

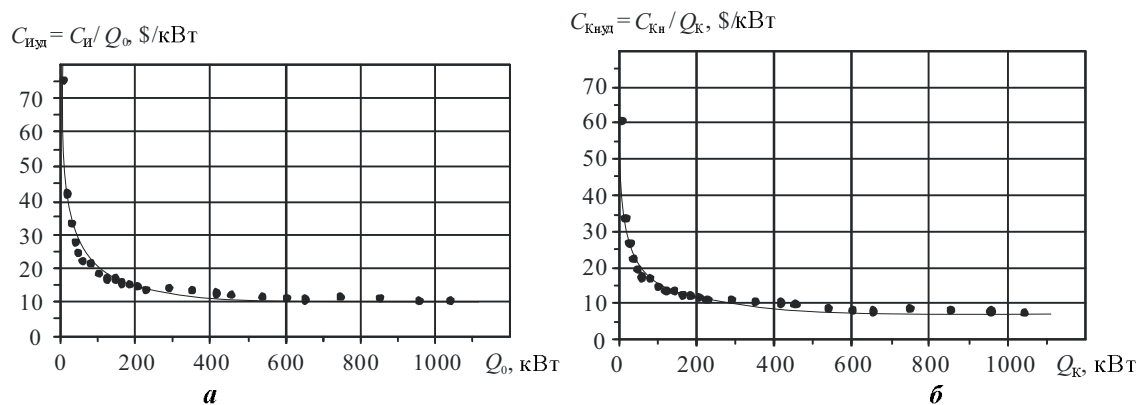


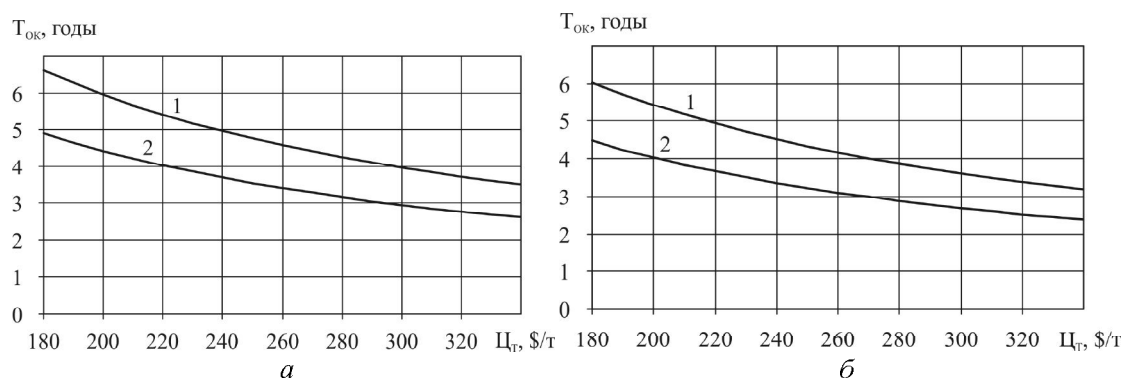
Рис. 4 – Удельные стоимости кожухотрубных испарителей $C_{И,уд} = C_{И}/Q_{0}$ (а) и конденсаторов водяного охлаждения $C_{Кн,уд} = C_{Кн}/Q_{К}$ (б) для разных тепловых нагрузок $Q_{К}$ по данным фирмы-разработчика «Onda»

При утилизации теплоты отходящих газов и наддувочного воздуха необходимо установить один И-ВО тепловой нагрузкой Q_0 , два примерно одинаковой тепловой нагрузкой кожухотрубных аппарата: испарительная секция генератора НРТ в пароводяном контуре УК на отходящих газах и экономайзерная секция НРТ в контуре пресной воды ОНВ; кожухотрубный конденсатор нагрузкой Q_K .

Целесообразность применения утилизации теплоты выпускных газов и наддувочного воздуха для охлаждения воздуха на входе ТК с помощью ТТЭ оценивали по сроку окупаемости ТТЭ $T_{ок}: T_{ок} = K / (Д - Э)$, где K — капитальные затраты на ТТЭ; $Д$ — годовой доход за счет экономии топлива; $Э$ — годовые эксплуатационные затраты.

Применение ТТЭ связано также с затратами энергии на привод циркуляционных насосов: $N_n = G_w \Delta P_n$, кВт, где G_w — расход хладо- или теплоносителя, кг/с; ΔP_n — создаваемый насосом напор, бар. Расходы хладо- и теплоносителей определяют из соответствующих тепловых балансов.

Результаты расчетов приведены на рис. 5 в виде зависимости срока окупаемости $T_{ок}$ теплоиспользующей установки от цены дизельного топлива C_d при эксплуатации балкера на рейсовой линии Одесса–Иокогама. При этом капитальные затраты на теплоиспользующую установку охлаждения воздуха на входе ГД рассчитывали исходя из мощности ГД в точке оптимизации N_0 , а сокращение потребления топлива двигателем — при эксплуатационной мощности N_3 , которая меньше N_0 . Поэтому сроки окупаемости теплоутилизационной установки для ГД 6S60MC6.1-TI с мощностью $N_3 = 7810$ кВт, намного меньше $N_0 = 9790$ кВт, больше.



*а – утилизация теплоты выпускных газов и наддувочного воздуха;
б – утилизация теплоты выпускных газов, наддувочного воздуха и воды высокотемпературного контура охлаждения двигателя;
1 – ГД 6S60MC6.1-TI ($N_0 = 9790$ кВт; $N_3 = 7810$ кВт);
2 – ГД 8S50ME-C7.1-TII ($N_0 = 11400$ кВт; $N_3 = 10580$ кВт)*

Рис. 5 – Сроки окупаемости $T_{ок}$ теплоиспользующей установки охлаждения воздуха на входе главного двигателя балкера типа «Киев» в зависимости от цены дизельного топлива C_d на рейсовой линии Одесса–Иокогама

Весьма неожиданное, на первый взгляд, увеличение срока окупаемости ТТЭ при использовании для покрытия дефицита холода (на отдельных участках рейса) дополнительной теплоты охлаждающей двигатель воды обусловлено непродолжительным применением дополнительного теплообменного оборудования при значительных затратах на него.

Выводы

Применение ТХМ-ТТЭ, использующих теплоту уходящих газов и наддувочного воздуха для охлаждения циклового воздуха судовых МОД обеспечивает сокращение удельного расхода топлива на 2...3 г/(кВт·ч). Сроки окупаемости затрат на оборудование составляют 3...4 года.

Литература

1. Influence of Ambient Temperature Conditions on Main Engine Operation. – MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark. – 2005. – 15 p.
2. MAN B&W. Project Guide. Two-stroke Engines. MC Programme. Vol. 1. – MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark. – 1986.
3. Thermo Efficiency System (TES) for reduction of fuel consumption and CO2 emission. – MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark. – 2005. – 12 p.
4. Проектная документация балкера типа «Киев»: Спецификация 17006.360060.0026: Черноморсудопроект, 1993.
5. MAN B&W ME/ME-C/ME-GI/ME-B-TII engines. – Copenhagen, Denmark: MAN Diesel. – 2010.
6. Прейскурант фирмы «Guentner»: Hans Güntner GmbH: <http://www.guntner.su/>; <http://www.guentner.de>: Güntner Product Calculator
7. Прейскурант фирмы «Onda»: <http://www.onda.su/>; <http://www.onda.su/prais-list>

Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований МОН Украины в рамках гранта Президента Украины.