

УДК 621.436.13:621.57

Н.И. РАДЧЕНКО¹, Т. БОХДАЛЬ², Р.Н. РАДЧЕНКО¹, Д.В. КОНОВАЛОВ¹,
А.А. АНДРЕЕВ¹¹ *Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Украина*² *Кошалинский технический университет, Польша***ТРЕХКОНТУРНАЯ ТЕПЛОИСПОЛЬЗУЮЩАЯ СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ
НАДДУВОЧНОГО ВОЗДУХА СУДОВОГО МАЛООБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ**

Проанализировано эффективность охлаждения наддувочного воздуха судового малооборотного дизеля в двух- и трехступенчатых охладителях в составе теплоиспользующей системы охлаждения на базе эжекторной холодильной машины, утилизирующей теплоту воздуха. Показано, что основу расчета рациональных параметров трехступенчатых охладителей составляет определение температуры воздуха на выходе из теплоиспользующей высокотемпературной ступени охладителя, обеспечивающей глубину охладителя, а значит и его аэродинамическое сопротивление, сопоставимые с двухступенчатыми охладителями когенерационного типа. Для главного дизеля транспортного судна и климатических условий конкретной рейсовой линии определены снижение температуры наддувочного воздуха и соответствующая экономия топлива по сравнению с традиционным охлаждением воздуха заборной водой.

Ключевые слова: *судовой малооборотный дизель, охлаждение, наддувочный воздух, теплоиспользующая холодильная машина, низкокипящее рабочее тело.*

**1. Анализ проблемы и постановка
цели исследования**

Термодинамическая эффективность судовых малооборотных дизелей (МОД) существенно зависит от температуры наддувочного воздуха. С ее повышением на 10 °С эффективный КПД МОД уменьшается примерно на 0,5 % и, соответственно, возрастает удельный расход топлива b_e [1 – 3].

В судовых МОД применяются, как правило, два типа систем охлаждения наддувочного воздуха – одноконтурная система охлаждения заборной водой и двухконтурная, с промежуточным контуром пресной воды. Все более широкое распространение находят двухконтурные системы охлаждения когенерационного типа, когда нагретая в высокотемпературной ступени охладителя наддувочного воздуха (ОНВ_{ВТ}) вода используется для нужд судовой энергетической установки, например, для нагрева топлива, масла, на теплофикационные цели, либо ОНВ_{ВТ} является экономайзерной секцией нагрева питательной воды утилизационного котла. Хотя при этом потери тепла с охлаждающей наддувочный воздух водой и сокращаются, однако проблема поддержания температуры воздуха на приемлемо низком уровне при плавании судна в южных широтах с высокой температурой заборной воды остается острой. Одним из направлений ее решения является применение машинного охлаждения воздуха, и прежде всего теплоиспользую-

щими холодильными машинами (ТХМ), использующими теплоту наддувочного воздуха, выпускных газов двигателей и других источников [4 – 6]. Использование в ТХМ низкокипящих рабочих тел (НРТ) обеспечивает глубокое охлаждение воздуха в низкотемпературной ступени охладителя наддувочного воздуха (ОНВ_{НТ}) без поддержания вакуума в системе НРТ. В этом случае испаритель НРТ-охладитель воды служит для охлаждения пресной воды, подаваемой в ОНВ_{НТ}, ниже температуры заборной воды.

В таких теплоиспользующих системах охлаждения (ТСО) наддувочного воздуха контур НРТ является дополнительным, третьим, контуром, обеспечивающим охлаждения пресной воды, подаваемой в ОНВ_{НТ}, ниже температуры заборной воды. При этом необходимо решать вопросы выбора числа ступеней ОНВ по ходу воздуха: двухступенчатый ОНВ в составе ОНВ_{ВТ} и ОНВ_{НТ}, практически не зависящий от температуры заборной воды, либо же трехступенчатый ОНВ – с дополнительной ступенью промежуточного охлаждения (ПО) наддувочного воздуха заборной водой между ОНВ_{ВТ} и ОНВ_{НТ}.

Цель работы – оценка тепловой эффективности двух- и трехступенчатых ОНВ в составе ТСО наддувочного воздуха судового МОД, утилизирующей теплоту наддувочного воздуха и обеспечивающей его охлаждение ниже температуры заборной воды при повышенных наружных температурах воздуха и воды.

2. Результаты исследования

Схема двухступенчатой трехконтурной системы охлаждения наддувочного воздуха двигателя внутреннего сгорания (ДВС) на базе теплоиспользующей эжекторной холодильной машины (ТЭХМ), утилизирующей теплоту наддувочного воздуха, приведена на рис. 1.

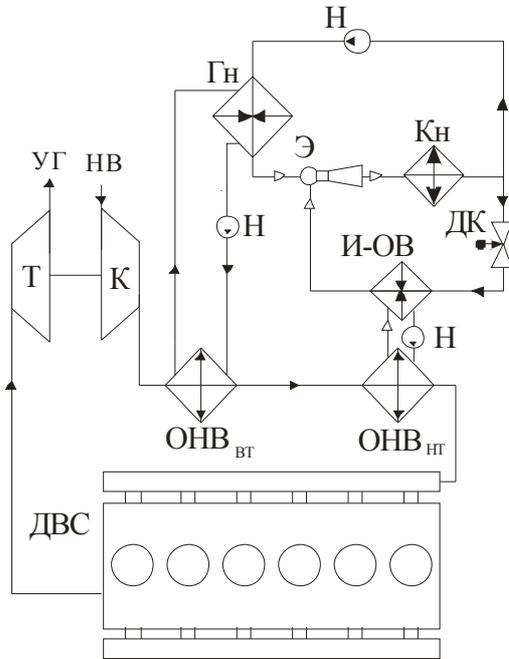


Рис. 1. Схема двухступенчатой трехконтурной ТСО на базе ТЭХМ, использующей теплоту воздуха после ТК: К и Т – компрессор и турбина ТК; ОНВ_{ВТ} и ОНВ_{НТ} – высоко- и низкотемпературная ступени ОНВ; Г – генератор ТЭХМ; К_н – конденсатор; И-ОВ – испаритель-охладитель воды; Н – насос; ДК – дроссельный клапан; НВ – воздух на входе ТК; УГ – уходящие газы

Высокопотенциальная теплота наддувочного воздуха после турбокомпрессора (ТК) отводится высокотемпературным промежуточным водяным контуром в ОНВ_{ВТ} к жидкому НРТ, кипящему в генераторе паров НРТ при высоких давлениях и температуре $t_r = 100...120$ °С. Из генератора пары НРТ поступают в конденсатор, охлаждаемый забортной водой, конденсируются, и жидкий НРТ после дросселирования испаряется в испарителе-охладителе воды (И-ОВ) при низком давлении, соответственно и температуре $t_0 = 2...5$ °С, охлаждая воду, отдавая теплоту от наддувочного воздуха в ОНВ_{НТ}.

Такая ТСО представляет собой двухступенчатую трехконтурную систему охлаждения наддувочного воздуха с пресной водой – в первом, НРТ – во втором и забортной водой – в третьем, разомкнутом, контурах охлаждения. Она обеспечивает охлаждение наддувочного воздуха ниже температуры забортной воды.

Генератор ТЭХМ состоит из двух секций: экономайзерной $\Gamma_э$, в которой происходит нагрев жидкого НРТ, поступающего из конденсатора с температурой конденсации, например $t_k = 35...45$ °С, до температуры кипения НРТ в испарительной секции $\Gamma_и$ генератора $t_r = 100...120$ °С.

Тепловой расчет теплообменников ОНВ проводят, исходя из конечной температуры охлажденного воздуха $t_{в2}$ на выходе НТС, которая в свою очередь принимается в зависимости от температуры t_0 : $t_{в2} = t_0 + 5$ °С + 12 °С, где 5 °С – разница температур пресной воды и НРТ (хладагента), а 12 °С – разница температур наддувочного воздуха и пресной воды промежуточного водяного контура охлаждения. Холодопроизводительность Q_0 , необходимая для охлаждения до этой температуры $t_{в2}$ (далее – фактическая $Q_{0ф}$, т.е. для которой рассчитывают ТОА) сопоставляется с располагаемой $Q_{0р}$, получаемой в ТСО путем трансформации в холод теплоты Q_r , отведенной от наддувочного воздуха в ОНВ_{ВТ}: $Q_0 = \zeta Q_r$.

Изменение температуры наддувочного воздуха t_v , пресной воды t_w и хладагента t_0 по глубине L двухступенчатого ОНВ по воздуху приведено на рис. 2. Хладагент – хладон R152b. Температуры кипения R152b в испарителе-охладителе воды (И-ОВ) $t_0 = 5$ °С, а в испарительной секции генератора ТЭХМ $t_r = 120$ °С. При этом нагреву жидкого НРТ в экономайзерной секции генератора $\Gamma_э$ от температуры конденсации $t_k = 45$ °С до температуры кипения НРТ $t_r = 120$ °С и его кипению при t_r в испарительной секции генератора $\Gamma_и$ (изменению t_0 от $t_0 = t_k = 45$ °С до $t_0 = t_r = 120$ °С) соответствует изменение температуры пресной воды t_w , отдающей тепло НРТ в генератора $\Gamma_э$, и наддувочного воздуха t_v , отдающего тепло пресной воде в ОНВ_{ВТ}.

Из рис. 2 видно, что глубина ОНВ_{ВТ} составляет львиную долю $L = 4,7$ м (84 %) всего двухступенчатого ОНВ ($L = 5,6$ м), причем из них 3,7 м (66 %) приходится на экономайзерную секцию ОНВ_{ВТ}. Соответственно на ОНВ_{НТ} приходится 16 % поверхности ОНВ. Это обусловлено, прежде всего, низким температурным напором $\theta = 11$ С, почти вдвое меньшим по сравнению с ОНВ_{НТ} (22 С) и в 4 раза – чем в ОНВ_{ВТ} (43 С), что и обуславливает большую глубину всего двухступенчатого ОНВ по ходу воздуха: $L = 5,6$ м.

Низкие температурные напоры θ обуславливают и малые плотности теплового потока $q = k \theta$ в экономайзерной секции ОНВ_{ВТ}, что видно из рис. 3.

Очевидно, что рациональным решением задачи сокращения поверхности проблемной экономайзерной секции ОНВ_{ВТ} является уменьшение глубины охлаждения воздуха в ОНВ_{ВТ} с последующим его охлаждением в штатном ОНВ забортной водой, а потом – в ОНВ_{НТ}, т.е. переход на трехступенчатую трехконтурную ТСО с включением ступени

промежуточного охлаждения (ПО) наддувочного воздуха пресной водой и отводом от нее теплоты во внешнем контуре заборной водой (рис. 4).

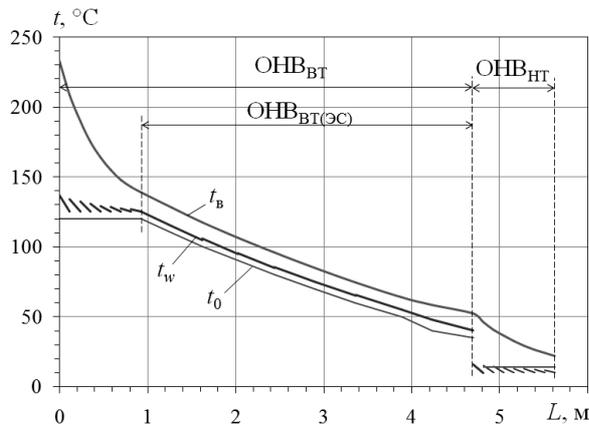


Рис. 2. Изменение температуры наддувочного воздуха t_b , пресной воды t_w и хладагента t_0 по глубине L двухступенчатого ОНВ по воздуху

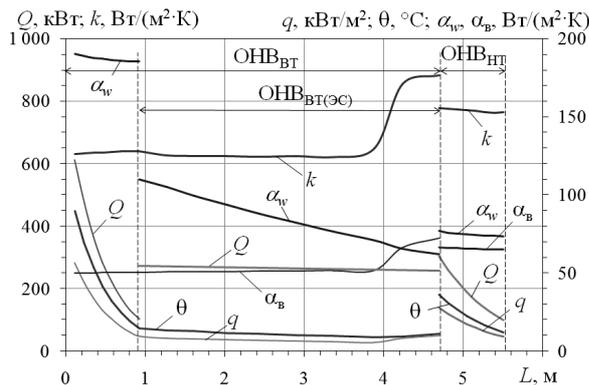


Рис. 3. Изменение коэффициентов теплоотдачи к воде α_w , воздуху α_b , хладагенту α_a и теплопередачи k , приведенных к внутренней поверхности труб, температурного напора θ , плотности теплового потока q к внутренней поверхности труб и тепловой нагрузки Q по глубине L двухступенчатого ОНВ по воздуху ($t_0 = 5^\circ\text{C}$)

Площадь теплообмена ПО благодаря большому температурному напору θ будет существенно меньше, чем экономайзерной секции ОНВ_{ВТ}. Однако при этом уменьшится тепловая мощность Q_r генератора пара НРТ ТЭХМ, следовательно, и генерируемая холодо-производительность Q_0 , дефицит которой должен быть компенсирован снижением тепловой нагрузки на ОНВ_{НТ} за счет дополнительного отвода теплоты от воздуха в ПО.

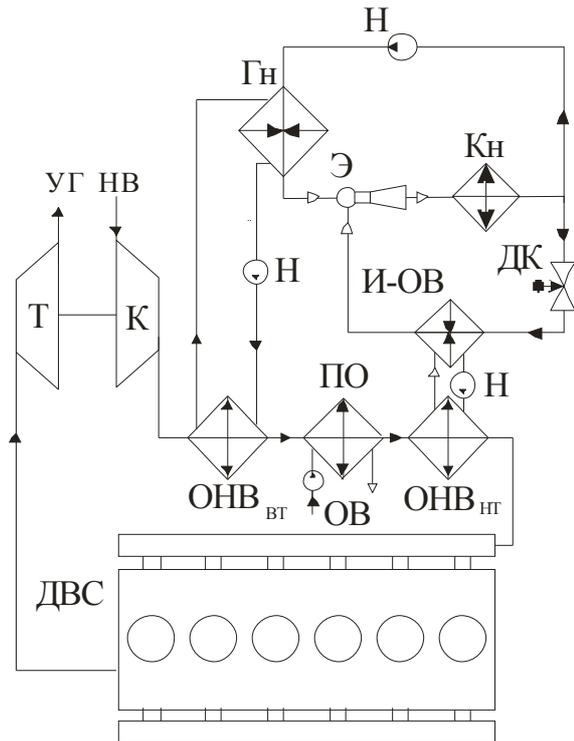


Рис. 4. Схема трехступенчатой трехконтурной ТСО наддувочного воздуха МОД на базе ТЭХМ, использующей теплоту воздуха после ТК: К и Т – компрессор и турбина ТК; ОНВ_{ВТ} и ОНВ_{НТ} – высоко- и низкотемпературная ступени ОНВ; ПО – промежуточный охладитель наддувочного воздуха (заборной водой); ЗВ – заборная вода; Г – генератор ТЭХМ; Кн – конденсатор; И-ОВ – испаритель-охладитель воды; Н – насос; ДК – дроссельный клапан; НВ – воздух на входе ТК; УГ – уходящие газы; ОВ – охлаждающая вода

Для определения оптимальной температуры $t_{b2}^{29\text{C}}$, до которой следует отводить тепло от воздуха в экономайзерной секции ОНВ_{ВТ}, проводят многовариантные тепловые расчеты ступеней ОНВ для нескольких значений температур $t_b^{29\text{C}}$ (при температуре кипения в И-ОВ $t_0 = 5^\circ\text{C}$).

На рис. 5 – 7 приведены изменения температуры воздуха t_b и пресной воды t_w по глубине L трехступенчатого ОНВ по воздуху и хладагента t_0 в генераторе и испарителе НРТ (И-ОВ) при температурах воздуха на выходе ОНВ_{ВТ} – его экономайзерной секции $t_{b2}^{29\text{C}} = 50, 90$ и 140°C .

На рис. 8 приведены изменения коэффициентов теплоотдачи α и теплопередачи k , приведенных к внутренней поверхности труб, температурного напора θ , плотности теплового потока q к внутренней поверхности труб по глубине L трехступенчатого ОНВ при $t_{b2}^{29\text{C}} = 140^\circ\text{C}$.

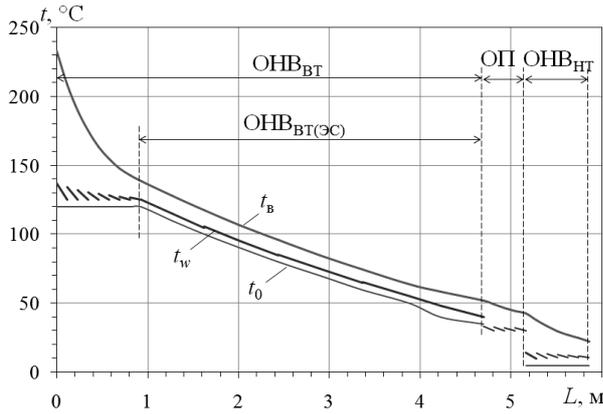


Рис. 5. Изменение температуры воздуха t_b и пресной воды t_w по глубине L трехступенчатого ОНВ по воздуху и хладагенту t_0 в генераторе и испарителе НРТ ($t_0 = 5\text{ }^\circ\text{C}$; $t_{b2}^{\text{ЭС}} = 50\text{ }^\circ\text{C}$)

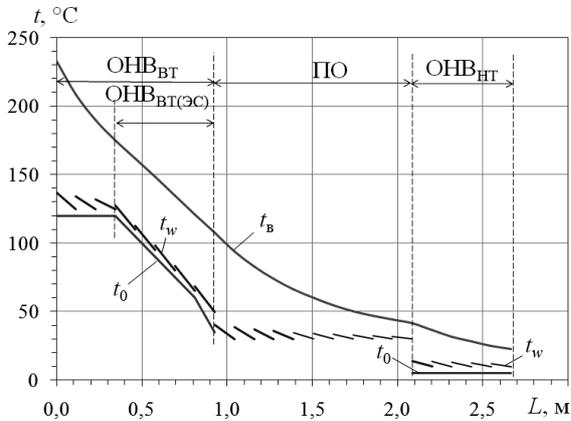


Рис. 7. Изменение температуры воздуха t_b и пресной воды t_w по глубине L трехступенчатого ОНВ по воздуху и хладагенту t_0 в генераторе и испарителе НРТ ($t_0 = 5\text{ }^\circ\text{C}$; $t_{b2}^{\text{ЭС}} = 140\text{ }^\circ\text{C}$)

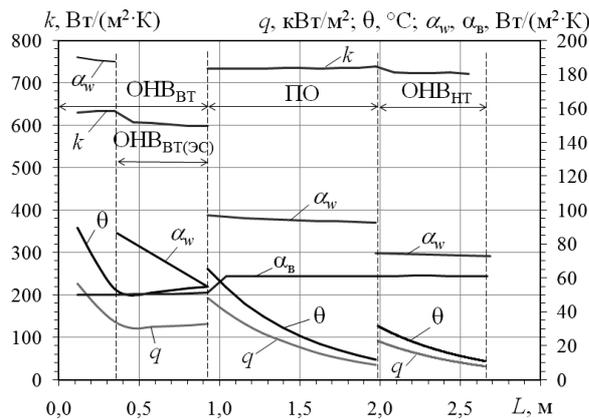


Рис. 8. Изменение коэффициентов теплопередачи k и теплоотдачи α , приведенных к внутренней поверхности труб, температурного напора θ , плотности теплового потока q к внутренней поверхности труб и тепловой мощности q по глубине L ОНВ по воздуху ($t_0 = 5\text{ }^\circ\text{C}$; $t_{b2}^{\text{ЭС}} = 140\text{ }^\circ\text{C}$)

Из рис. 2, 6 и 7 видно, что глубина по ходу воздуха уменьшилась до $L = 2,4\text{ м}$, т.е. стала в два раза меньше глубины L базового варианта (рис. 2) при $t_0 = 5\text{ }^\circ\text{C}$ для ТЭХМ без промежуточной ступени ПО с охлаждением забортной водой. Аэродинамическое сопротивление $\Delta P = 2900\text{ Па}$, что сопоставимо с показателями современных турбчасто-пластинчатых ОНВ системы наддува.

Поскольку в течение рейса меняются температура $t_{нв}$ и влажность $\phi_{нв}$ наружного воздуха, соответственно воздуха в машинном отделении (МО) – на входе ТК, а значит и наддувочного воздуха, а также температура забортной воды $t_{зв}$ и, соответственно, пресной воды промежуточного контура охлаждения наддувочного воздуха (на $5\text{ }^\circ\text{C}$ выше $t_{зв}$), то снижение температуры воздуха Δt_b в ОНВ_{HT}, его температуру t_{b2} после ОНВ_{HT} (на входе в наддувочный ресивер) и соответствующее сокращение потребления топлива МОД определяют с учетом изменения $t_{нв}$, $\phi_{нв}$ и $t_{зв}$ для судна на конкретной рейсовой линии.

В качестве примера рассмотрен контейнеровоз с главным двигателем 6S50ME-C корпорации MAN [3] (номинальная мощность $N_n = 10680\text{ кВт}$, эксплуатационная $N_s = 10000\text{ кВт}$) на рейсовой линия Одесса-Гавана-Одесса. Изменение температуры $t_{нв}$, относительной влажности $\phi_{нв}$ и влагосодержания $d_{нв}$ наружного воздуха, температуры забортной воды $t_{зв}$ в рейсе Одесса-Гавана-Одесса (1.07...16.08.2009) дано на рис. 9.

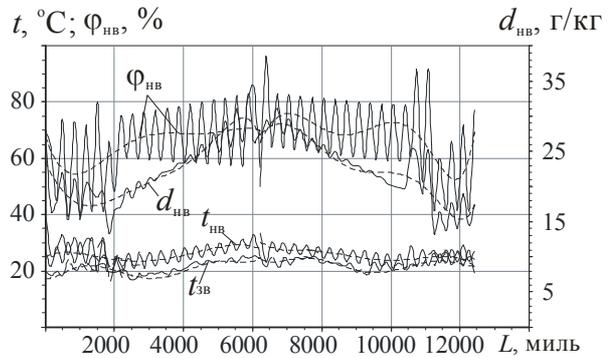


Рис. 9. Изменение температуры $t_{нв}$, относительной влажности $\phi_{нв}$ и влагосодержания $d_{нв}$ наружного воздуха, температуры забортной воды $t_{зв}$ в течение рейса Одесса-Гавана-Одесса (1.07...16.08.2009)

Как видно, на протяжении практически всего рейса температура наружного воздуха $t_{нв}$ составляет $25\text{ }^\circ\text{C}$ и даже $30\text{ }^\circ\text{C}$.

Снижение температуры наддувочного воздуха Δt_b в ОНВ_{HT} и температура воздуха после ОНВ_{HT} t_{b2} при температурах забортной воды $t_{зв}$ в течение рейса Одесса-Гавана-Одесса (1.07...16.08.2009) приведено на рис. 10.

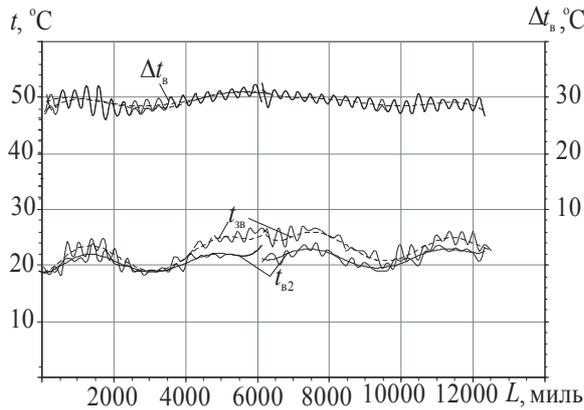


Рис. 10. Снижение температуры наддувочного воздуха Δt_b в охладителе воздуха ТУО и температура наддувочного воздуха после охладителя t_{b2} при температурах забортной воды $t_{3в}$ в течение рейса Одесса–Гавана–Одесса (1.07...16.08.2009)

Как видно, применение ТСО обеспечивает охлаждение наддувочного воздуха ниже температуры забортной воды: $t_{b2} < t_{3в}$, и, следовательно, значительно ниже, чем температура воздуха $t_{bв2}$, до которой он может быть охлажден в традиционном водяном ОНВ.

Расход топлива V_e и удельный расход топлива b_e в зависимости от температуры охлажденного наддувочного воздуха, а также сокращение расхода топлива ΔV_e и удельного расхода топлива Δb_e за счет более глубокого охлаждения наддувочного воздуха в охладителе ТСО по сравнению с температурой воздуха, охлажденного в традиционном водяном ОНВ, на величину $\Delta t_{во} = t_{bв2} - t_{b2}$ рассчитывали с помощью программы [3] для МОД корпорации MAN при разных температурах воздуха $t_{МО}$ в МО (на входе ТК). Значения снижения удельного расхода топлива Δb_e , полного расхода топлива МОД 6S50ME-C корпорации MAN [3] (номинальная мощность $N_n = 10680$ кВт и эксплуатационная $N_э = 10000$ кВт) в абсолютных ΔV_e и относительных $\overline{\Delta V_e}$ величинах в течение рейса Одесса–Гавана–Одесса (1.07...16.08.2009) приведены на рис. 11.

Как видно, практически на протяжении всего рейса уменьшение удельного расхода топлива составляет $\Delta b_e \approx 2,0$ г/(кВт·ч), относительная экономия потребления топлива $\overline{\Delta V_e} = 1,1...1,2$ %, а абсолютная экономия потребления топлива ΔV_e за рейс для МОД мощностью 10 МВт составляет около 18 т.

Выводы

Проанализировано эффективность охлаждения наддувочного воздуха судового малооборотного дизеля в двух- и трехступенчатых охладителях в

составе трехконтурной ТСО на базе эжекторной холодильной машины, утилизирующей теплоту воздуха. В отличие от традиционных двухконтурных систем охлаждения (с пресной водой в первом контуре охлаждения и забортной – во втором) трехконтурная ТСО включает теплоиспользующую холодильную машину охлаждения пресной воды в качестве дополнительного промежуточного контура.

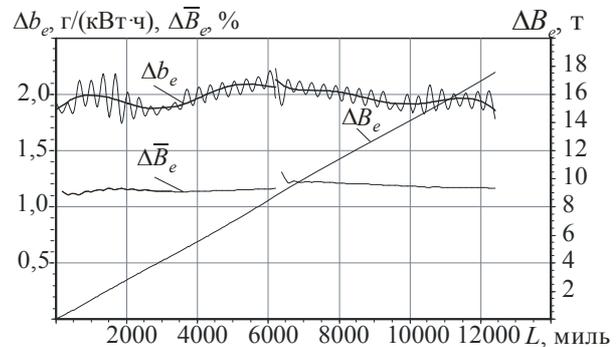


Рис. 11. Значения снижения удельного расхода топлива Δb_e , полного расхода топлива МОД в абсолютных ΔV_e и относительных $\overline{\Delta V_e}$ величинах в течение рейса Одесса–Гавана–Одесса (1.07...16.08.2009)

Показано, что основу расчета рациональных параметров трехступенчатых охладителей составляет определение температуры воздуха на выходе из теплоиспользующей высокотемпературной ступени охладителя, обеспечивающей глубину охладителя, а значит и его аэродинамическое сопротивление, сопоставимые с двухступенчатыми охладителями когенерационного типа.

На примере конкретного рейса показано, что утилизация теплоты наддувочного воздуха МОД в ТСО обеспечивает охлаждение наддувочного воздуха до температуры, близкой 20 °С, и сокращение удельного расхода топлива примерно на 2,0 г/(кВт·ч) по сравнению с традиционным охлаждением воздуха забортной водой.

Литература

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. *Thermo Efficiency System (TES) for reduction of fuel consumption and CO₂ emission [Text]: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2005.*
3. *MAN B&W ME/ME-C/ME-GI/ME-B-III engines [Text]. – Copenhagen, Denmark: MAN Diesel. – 2010.*
4. Андреев, А.А. Теплоиспользующая система охлаждения наддувочного воздуха судового малооборотного дизеля [Текст] / А.А. Андреев, Н.И. Рад-

ченко, А.А. Сирота // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 1 (98). – С. 66 – 70.

5. Андреев, А.А. Сравнительная оценка охлаждения наддувочного воздуха главного судового дизеля с утилизацией его теплоты и забортной водой [Текст] / А.А. Андреев, Н.И. Радченко, А.А. Сирота // *Авиационно-космическая техника и технология*.

– 2013. – № 2 (99). – С. 92–96.

6. Радченко, А.Н. Ресурсосберегающая теплоиспользующая установка кондиционирования воздуха на входе дизеля транспортного судна [Текст] / А.Н. Радченко, Д.В. Коновалов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 5 (82). – С. 61–67.

Поступила в редакцию 15.05.2013, рассмотрена на редколлегии 14.06.2013

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

ТРИКОНТУРНА СИСТЕМА ОХОЛОДЖЕННЯ НАДДУВНОГО ПОВІТРЯ СУДНОВОГО МАЛООБЕРТОВОГО ДИЗЕЛЯ

М.І. Радченко, Т. Бохдаль, Р.М. Радченко, А.А. Андреев, Д.В. Коновалов

Проаналізовано ефективність охолодження наддувочного повітря судового малооборотного дизеля у дво- та триступневих охолоджувачах у складі тепловикористовуючої системи охолодження на базі ежекторної холодильної машини, що утилізує теплоту повітря. Показано, що основу розрахунку раціональних параметрів триступневих охолоджувачів становить визначення температури повітря на виході з тепловикористовуючого високотемпературного ступеня охолоджувача, яка забезпечує глибину охолоджувача, а відтак і його аеродинамічний опір, порівняні з двоступневими охолоджувачами когенераційного типу. Для головного дизеля транспортного судна і кліматичних умов конкретної рейсової лінії визначені зниження температури наддувочного повітря та відповідна економія палива в порівнянні з традиційним охолодженням повітря забортної водою.

Ключові слова: судовий малооборотний дизель, охолодження, наддувне повітря, тепловикористовуюча холодильна машина, низькокипляче робоче тіло.

THREE CONTOUR SCAVENGE AIR COOLING SYSTEM OF MARINE LOW SPEED DIESEL ENGINE

N.I. Radchenko, T. Bohdal, R.N. Radchenko, A.A. Andreev, D.V. Konovalov

The efficiency of cooling of scavenge air of marine low speed diesel engine in two- and three stage scavenge air coolers of waste heat recovery cooling system on the base of ejector machine that utilizes the heat of air is analyzed. The heat load upon utilizing (high-temperature) and cooling (low temperature) sections of waste heat recovery cooling plant and corresponding scavenge air temperature are calculated. It is shown that the goal of calculation of three stage air cooler rational parameters is finding the temperature of air at the exit of waste heat recovery high temperature stage of cooler, providing deep size of the cooler and corresponding air pressure drop compared with two stage scavenge air coolers of cogenerative type. The decrease in the scavenge air temperature and corresponding fuel saving compared with traditional air cooling by seawater are evaluated for the main engine of the transport ship and climate conditions on the rout line.

Key words: marine low speed diesel engine, cooling, scavenge air, waste heat recovery cooling machine, low boiling working fluid.

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

Бохдаль Тадеуш – д-р техн. наук, проф., ректор Кошалинского технического университета, Польша.

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

Андреев Артем Андреевич – ассистент Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.

Коновалов Дмитрий Викторович – канд. техн. наук, доц. Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.