

УДК 621.577

Н.И. РАДЧЕНКО¹, А.А. СТАХЕЛЬ², А.А. СИРОТА³, Д.В. КОНОВАЛОВ¹¹ *Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина*² *Щецинский технический университет, Польша*³ *Черноморский государственный университет им. П. Могилы, Украина*

НАПРАВЛЕНИЯ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА В СУДОВЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ХОЛОДА

Проанализированы направления утилизации теплоты уходящих газов и наддувочного воздуха судовых дизельных установок. Выявлены резервы дальнейшего повышения эффективности дизельных установок путем охлаждения воздуха на входе дизелей. Показано, что применение теплоиспользующих систем охлаждения воздуха с комплексной утилизацией теплоты уходящих газов и наддувочного воздуха обеспечивает приращение КПД дизелей на 2...3 %. Предложены схемные решения систем охлаждения наружного воздуха дизелей с комплексной утилизацией разных источников сбросной теплоты.

Ключевые слова: *дизельная установка, утилизация, уходящие газы, предварительное охлаждение воздуха, теплоиспользующая холодильная машина, низкокипящее рабочее тело.*

1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

Большинство судовых дизельных установок (ДУ) представляют собой установки когенерационного типа, в которых наряду с механической (электрической) получают тепловую энергию в утилизационном котле (УК). Основным направлением в утилизации вторичных энергоресурсов (ВЭР) ДУ является утилизация избыточной, сверх необходимой для наддува, энергии уходящих газов наддувочных турбокомпрессоров (ТК) в паровых турбинах (ПТ) с использованием полученной механической энергии для привода гребного вала или электрогенератора. Утилизационные ПТ образуют единые энергоиспользующие комплексы с дополнительными газовыми турбинами (ГТ), утилизирующими избыточную энергию уходящих газов ГД и установленными на байпасной линии в обход основной утилизационной ГТ ТК. Мощность, получаемая дополнительно в таких турбокомпаундных системах (ТКС), составляет 8...11 % мощности главного дизеля (ГД), что равнозначно повышению КПД на 4,0...5,5 % [1].

Из-за сложности и большой стоимости применение ТКС для малооборотных дизелей (МОД) мощностью меньше 20 МВт нецелесообразно, поскольку срок их окупаемости превышает 12 лет [1]. На частичных режимах работы ГД эффективность ТКС резко снижается: производимая в ТКС мощность уменьшается почти в три раза при снижении нагрузки на ГД до 50 % [1]. Причина – уменьшение расхода уходящих газов. Поэтому при уменьшении

нагрузки ГД ниже 50 % все уходящие газы направляются на основную ГТ ТК.

Остается нерешенной проблема ухудшения экономичности ГД при повышенных температурах наружного воздуха $t_{нв}$ на входе ТК, следствием чего является увеличение удельного расхода топлива b_e на 0,5...0,7 % на каждые 10 °С повышения $t_{нв}$ [1]. Поскольку с увеличением $t_{нв}$ возрастают потери теплоты с уходящими газами, то целесообразно утилизировать их теплоту в теплоиспользующих холодильных машинах (ТХМ), а холод использовать для охлаждения воздуха на входе дизелей, наддувочного воздуха или пресной воды внутреннего контура ОНВ.

Охлаждение воздуха на входе судовых ГТД бромистолитиевыми абсорбционными ТХМ использовано фирмой "Kawasaki Heavy Industries, LTD" [2]. Снижение температуры $t_{нв}$ от 30 °С до 15 °С обеспечило повышение КПД когенерационной ГТУ от 51 % до 58 %.

Цель работы – анализ целесообразности применения ТХМ для охлаждения воздуха ДУ.

2. Результаты исследования

Конструктивно наиболее простыми и надежными в эксплуатации являются эжекторные холодильные машины (ЭХМ) на низкокипящих рабочих телах (НРТ), в которых функцию компрессора выполняет эжектор [3]. Применение НРТ позволяет утилизировать теплоту ВЭР низкого температурного уровня, причем без необходимости поддержания вакуума в испарителе ЭХМ. Эффективность ЭХМ,

характеризуемая тепловым коэффициентом $\zeta = Q_0/Q_r$, представляющим собой отношение холодопроизводительности Q_0 (теплоты, отведенной от воздуха на входе двигателя к НРТ, кипящему в испарителе при низких давлении и соответственно температуре) к теплоте Q_r , подведенной к кипящему НРТ высокого давления от уходящих газов или других ВЭР, невысокая. Так, для ЭХМ на хладагонах R142B, R600, R600a, R290 $\zeta = 0,2...0,3$. С целью

достижения максимально возможных снижения температуры циклового воздуха судовых ДВС и соответственно повышения их экономичности целесообразно задействовать и другие, помимо уходящих газов, ВЭР (наддувочный воздух, охлаждающую воду), т.е. прибегать к комплексному использованию ВЭР ДВС.

Схемы ЭХМ для охлаждения воздуха на входе ДВС приведены на рис. 1.

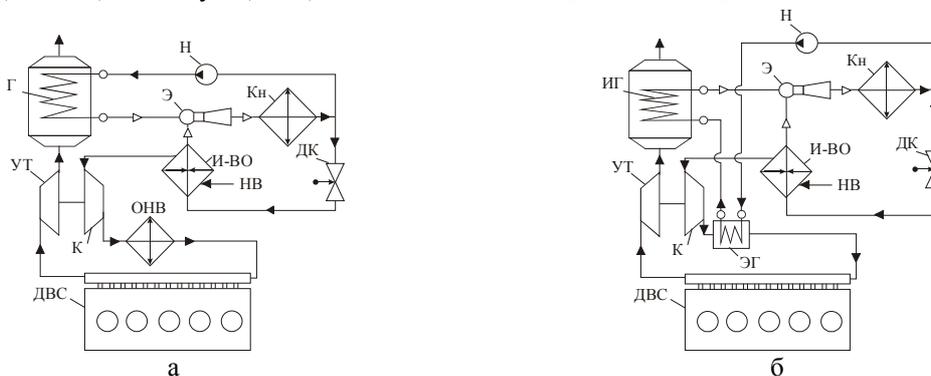


Рис. 1. Схемы ЭХМ, использующих теплоту уходящих газов (а), газов и наддувочного воздуха (б) для охлаждения воздуха на входе ДВС: Г – генератор паров НРТ; ЭГ и ИГ – экономайзерная и испарительная секции генератора; Э – эжектор; Кн – конденсатор; Н – насос; ДК – дроссельный клапан; И-ВО – испаритель-воздухоохладитель; ОНВ – охладитель наддувочного воздуха водяной; К – компрессор; УТ – утилизационная газовая турбина; НВ – наружный воздух

Генератор паров НРТ высокого давления состоит из двух секций: экономайзерной и испарительной. В экономайзерной секции происходит нагрев жидкого НРТ от температуры конденсации t_k до температуры кипения t_r при высоком давлении, в испарительной – кипение жидкого НРТ с образованием паров высокого давления, являющихся силовым потоком в эжекторе. Тепловые нагрузки испарительной и экономайзерной секций связаны между собой соотношением теплоты фазового перехода НРТ в испарительной секции при t_r и теплоты, необходимой для нагрева жидкого НРТ от t_k до t_r в экономайзерной секции.

Результаты расчетов снижения температуры Δt_b воздуха на входе ДВС в ЭХМ при утилизации теплоты уходящих газов после УК ($t_{r1} = 180 \text{ }^\circ\text{C}$) приведены на рис. 2. Температура кипения в испарителе принималась $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$; конденсации $t_k = 35 \text{ }^\circ\text{C}$, уходящих газов после генератора $t_{r2} = 160 \text{ }^\circ\text{C}$ и перед генератором $t_{r1} = 180 \text{ }^\circ\text{C}$. НРТ – хладон R142b.

Как видно, из-за весьма малого перепада температур уходящих газов, срабатываемого в ЭХМ, $\Delta t_{gr} = t_{r1} - t_{r2} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, снижение температуры воздуха на входе ДВС очень малое $\Delta t_b = 3,5...4,0 \text{ }^\circ\text{C}$, что говорит о нецелесообразности утилизации теплоты уходящих газов после УК.

Ситуация улучшается при утилизации в ЭХМ теплоты уходящих газов после ГТ ТК с температурой $t_{r1} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 3, а), когда снижение темпера-

туры Δt_b воздуха на входе ДВС в ЭХМ составляет $\Delta t_b = 16...18 \text{ }^\circ\text{C}$, причем в случае использования в экономайзерной секции генератора ЭХМ другого

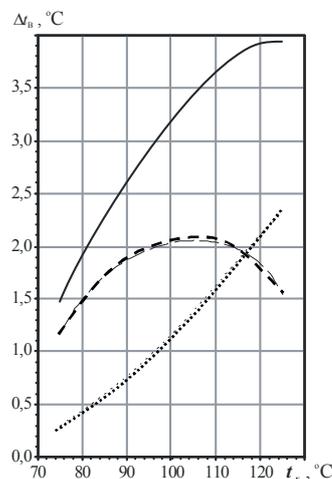


Рис. 2. Снижение температуры Δt_b воздуха на входе ДВС в зависимости от температуры кипения хладагона R142b в генераторе ЭХМ t_r при температуре уходящих газов после генератора $t_{r2} = 160 \text{ }^\circ\text{C}$ и перед генератором $t_{r1} = 180 \text{ }^\circ\text{C}$ (генератор и экономайзер в газоходе после УК); — — за счет отвода теплоты генератором в целом; - - - - испарительной секцией; ... – экономайзером

источника теплоты, например наддувочного воздуха (схема на рис. 1, б), величина Δt_b практически удваивается: $\Delta t_b = 30...35 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 3, б), что обеспечи-

вает довольно существенное абсолютное приращение КПД ДВС: $\bar{\eta} = 1,5 \dots 2,0 \%$ (рис. 4, б).

При оценке влияния уменьшения температуры Δt_b воздуха на эффективность ДВС исходили из то-

го, что каждые $10 \text{ }^\circ\text{C}$ снижения температуры Δt_b воздуха на входе ДВС обеспечивают $0,5 \%$ абсолютного прироста КПД двигателя [1].

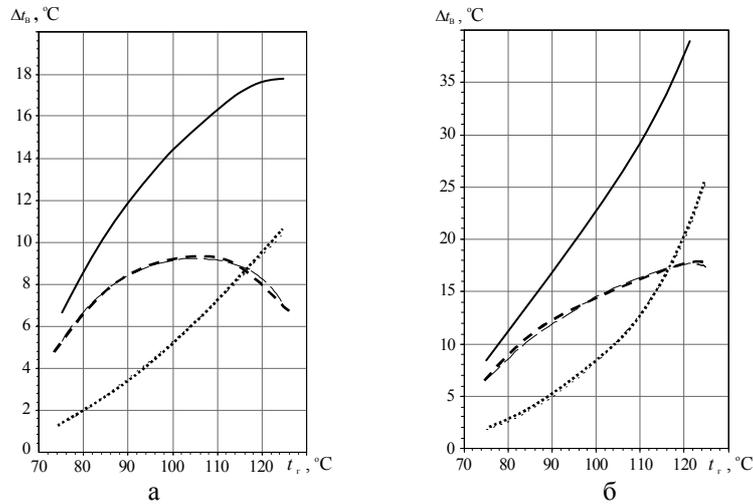


Рис. 3. Снижение температуры Δt_b воздуха на входе ДВС в зависимости от температуры кипения НРТ в генераторе t_r при температуре уходящих газов после генератора $t_{r2} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ и перед генератором $t_{r1} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$: а – экономайзер генератора в газоходе; б – экономайзер на наддувочном воздухе; — — за счет отвода теплоты генератором в целом; - - - - испарительной секцией; – экономайзерной секцией

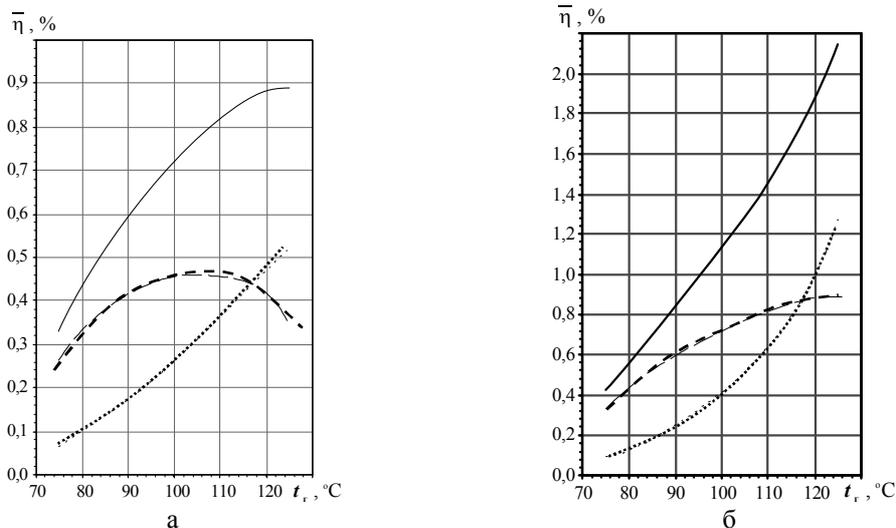


Рис. 4. Абсолютное приращение КПД ДВС $\bar{\eta}$ в зависимости от температуры кипения НРТ в генераторе t_r при температуре уходящих газов перед генератором $t_{r1} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$: а – экономайзер генератора в газоходе; б – экономайзер на наддувочном воздухе; — — за счет отвода теплоты генератором в целом; - - - - испарительной секцией; – экономайзерной секцией

Из приведенного видно, что приращение КПД ДВС за счет предварительного охлаждения циклового воздуха в эжекторных ТХМ примерно в два раза меньше, чем повышение КПД за счет утилизации теплоты уходящих газов в ТКС. Однако следует учитывать, что ЭХМ конструктивно просты, их стоимость и сроки окупаемости в несколько раз меньше. Но главное – ТХМ занимают нишу мощностного ряда ДВС (от сотен кВт до $20 \dots 50 \text{ МВт}$), в

которой применение ТКС экономически неоправданно.

Поскольку тепловые коэффициенты абсорбционных ТХМ примерно в два раза больше, чем ЭХМ, то соответственно выше и прирост КПД ДУ за счет охлаждения циклового воздуха (на входе и наддувочного) в АХМ по сравнению с ЭХМ: $\bar{\eta} = 3 \dots 4 \%$ и выше [3].

Выводы

Применение ТХМ, использующих теплоту уходящих газов и наддувочного воздуха для предварительного охлаждения воздуха на входе судовых дизелей обеспечивает абсолютное приращение их эффективных КПД: $\bar{\eta} = 1,5 \dots 2,0 \%$ в случае эжекторных ТХМ, $\Delta\eta = 3 \dots 4 \%$ для АХМ.

Литература

1. *Thermo Efficiency System (TES) for reduction of fuel consumption and CO₂ emission: MAN B&W*

Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2005. Электронный ресурс. – Режим доступа: <http://www.mandiesel.com/files/news/files/5055/P3339161.pdf>.

2. *Arai M. Development of Future Marine Gas Turbine in Japan (Super Marine Gas Turbine) / M. Arai, T. Sugimoto, H. Miyaji // SMGT, Tokyo, 2002.*

3. *Радченко Р.Н. Теплоиспользующие системы охлаждения циклового воздуха судовых ДВС на базе эжекторной и абсорбционной холодильных машин / Р.Н. Радченко, А.А. Сирота, Д.В. Коновалов, Н.И. Радченко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – №10(57). – С. 123–127.*

Поступила в редакцию 14.04.2009

Рецензент: д-р техн. наук, профессор В.И. Живица, Одесская национальная морская академия, Одесса.

НАПРЯМИ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛА В СУДНОВИХ ДИЗЕЛЬНИХ УСТАНОВКАХ ТА ЇХ РЕАЛІЗАЦІЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ХОЛОДУ

М.І. Радченко, А.А. Стахель, О.А. Сирота, Д.В. Коновалов

Проаналізовано напрями утилізації тепла відхідних газів і наддувочного повітря судових дизельних установок. Виявлено резерви подальшого підвищення ефективності дизельних установок шляхом охолодження повітря на вході дизелів. Показано, що застосування тепловикористовуючих систем охолодження повітря з комплексною утилізацією теплоти відхідних газів та наддувочного повітря забезпечує прирощення ККД дизелів на 2...3 %. Запропоновані схемні рішення систем охолодження зовнішнього повітря дизелів із комплексною утилізацією різних джерел скидної теплоти.

Ключові слова: дизельна установка, утилізація, відхідні гази, попереднє охолодження повітря, тепловикористовуюча холодильна машина, низькокипляче робоче тіло.

THE WAYS OF UTILIZATION OF HEAT IN MARINE DIESEL UNITS AND THEIR REALIZATION BY APPLICATION OF REFRIGERATION

N.I. Radchenko, A.A. Stachel, A.A. Sirota, D.V. Kononov

The ways of utilizing the heat of exhaust gases and scavenge air in marine diesel units has been analyzed. The reserves of further increasing the efficiency of diesel units by cooling of air at the inlet of diesels are revealed. It was shown, that the application of waste heat recovery cooling systems of air with complex utilization of heat of exhaust gases and scavenge air provides increasing the efficiency of diesels by 2...3 %. The schemes of systems for cooling of air of diesels with complex utilization of various exhaust heat sources have been proposed.

Key words: diesel unit, utilization, exhaust gases, precooling of air, waste heat recovery refrigeration machine, low temperature boiling working fluid.

Радченко Николай Иванович – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры кондиционирования и рефрижерации Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина.

Стахель Александр – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технической теплотехники Щецинского технического университета, Щецин, Польша.

Сирота Александр Архипович – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой техногенной безопасности Черноморского государственного университета имени Петра Могилы, Николаев, Украина.

Коновалов Дмитрий Викторович – канд. техн. наук, доцент кафедры судового машиностроения и энергетики Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина.