

установленной на наддувочном воздухе, приведена на рис. 3.

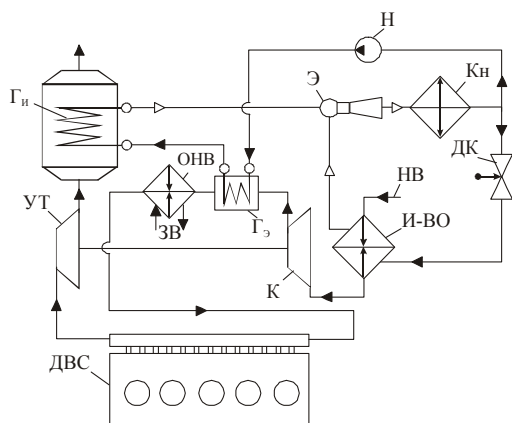


Рис. 3. Схема эжекторной теплоиспользующей установки предварительного охлаждения воздуха:

Гэ и Ги – 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 турбина; НВ – наружный воздух

Использование для нагрева жидкого хладагента в экономайзерной секции генератора эжекторной ТХМ источника теплоты более низкого температурного уровня (по сравнению с испарительной секцией генератора), например охлаждающей двигатель воды

или наддувочного воздуха, как показано на рис. 5, обеспечивает понижение температуры воздуха на входе ТК двигателя примерно на величину $\Delta t_v = 30$ °С (при установке испарительной секции генератора ТХМ после УТ турбокомпрессора).

Выводы

1. Применение эжекторной теплоиспользующей установки для предварительного охлаждения воздуха обеспечивает снижение температуры воздуха на входе турбокомпрессора на 20...30 °С и повышение КПД судовых МОД на 1...2 % .

2. Предложены схемные решения эжекторных теплоиспользующих установок предварительного охлаждения воздуха на входе судовых МОД.

Список литературы:

1. Influence of Ambient Temperature Conditions on Main Engine Operation: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2005. -http://www.mandiesel.com/files/news/files0f762/5510-0005.00pr_low.pdf.
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.-<http://www.mandiesel.com/files/news/files0f5055/P3339161.pdf>.

УДК 621.577

А.А. Сирота, канд. техн. наук, А.Н. Радченко, канд. техн. наук,
Д.В. Коновалов, канд. техн. наук, Н.И. Радченко, д-р техн. наук

ТЕПЛОИСПОЛЬЗУЮЩИЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ЦИКЛОВОГО ВОЗДУХА СУДОВЫХ ДВС

Анализ состояния проблемы, постановка цели исследования

Утилизация теплоты, отводимой с продуктами сгорания, охлаждающей водой и от наддувочного воздуха ДВС является перспективным направлением повышения эффективности судовых энергетических

установок, поскольку реализация даже половины располагаемого теплового потенциала источников сбросной теплоты обеспечила бы прирост мощности энергоустановок примерно на 25 %.

Судовые условия эксплуатации отличаются значительным изменением атмосферных условий. В зависимости от времени года, суток и климатических особенностей района плавания имеют место колебания температуры воздуха на входе двигателя, что сказывается на изменении температуры наддувочного воздуха перед впускными органами цилиндров. Традиционные системы охлаждения наддувочного воздуха современных турбопоршневых ДВС предусматривают применение рекуперативных теплообменников водяного охлаждения. Однако такие системы не в состоянии обеспечить уменьшение температуры воздуха в ресивере до 50...60 °С при повышенных температурах наружного воздуха и забортной воды и высоких давлениях наддува.

Изменение температуры наддувочного воздуха влияет на основные показатели работы ДВС. При работе ДВС по внешней характеристике ($n = \text{const}$, $g_{\text{ц.т}} = \text{const}$), которая является основной характеристикой главных судовых двигателей, под влиянием повышенных температур наддувочного воздуха и соответственно снижения массы поступающего в цилиндры воздуха, уменьшается коэффициент избытка воздуха, растут все характерные температуры рабочего цикла, в том числе температура выпускных газов, увеличиваются потери теплоты в охлаждающую среду, уменьшаются работа газов и индикаторный КПД, возрастают температура и теплонапряженность деталей двигателя. Одновременно происходит снижение характерных давлений рабочего цикла, в том числе максимального давления газов.

Поскольку традиционные рекуперативные системы водяного охлаждения не в состоянии обеспечить требуемые температуры наддувочного воздуха в ресивере, то применение дополнительного (к водяному) охлаждения циклового воздуха ДВС (наддувочного воздуха после турбокомпрессора и наружного воздуха на его всасывании) является

крайне желательным. Решение этой проблемы возможно путем использования машинного холода, и прежде всего, с утилизацией теплоты вторичных энергоресурсов (ВЭР). Применение таких теплоиспользующих холодильных машинах (ТХМ), работающих на низкокипящих рабочих телах (НРТ), для охлаждения циклового воздуха ДВС, обеспечит глубокую утилизацию низкопотенциальных ВЭР и, в конечном счете, повышения топливной экономичности судовых ДВС.

Наиболее простыми и надежными в эксплуатации ТХМ являются эжекторные машины (ТЭХМ), поскольку функцию компрессора в них выполняет эжектор [1]. Однако энергетическая эффективность ТЭХМ невысокая.

Целью исследования является оценка эффективности применения эжекторных теплоиспользующих холодильных машин для охлаждения циклового воздуха судовых ДВС.

Анализ результатов исследования

Схема ТЭХМ, использующей теплоту уходящих газов ДВС для охлаждения воздуха на его входе, показана на рис. 1.

Генератор ТЭХМ в общем случае 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 движущей силой для эжектора.

Энергетическая эффективность ТЭХМ характеризуется тепловым коэффициентом $\zeta = Q_0/Q_r$, представляющим собой отношение холодопроизводительности Q_0 (количества теплоты, отведенной в испарителе-воздухоохладителе от воздуха на входе двигателя к НРТ, кипящему при низких давлении и соответственно температуре) к количеству теплоты

$Q_{г}$, подведенной в генераторе к кипящему НРТ высокого давления от уходящих газов или другого источника сбросной теплоты, невысокая. Тепловой коэффициент ТЭХМ, использующих в качестве НРТ хладоны R142B, R600, R600a, R290, составляет $\zeta = 0,2 \dots 0,3$.

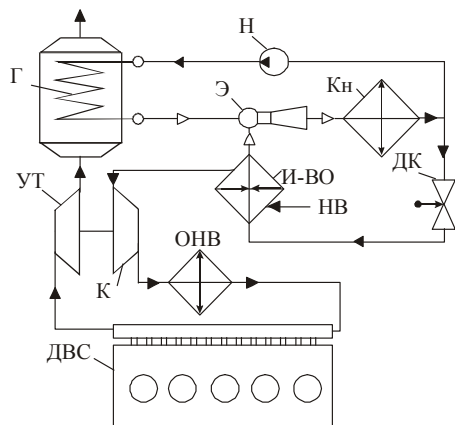


Рис. 1. Схема теплоиспользующей системы охлаждения воздуха на входе ДВС:

Г – генератор паров НРТ; Э – эжектор; Кн – конденсатор; Н – насос; ДК – дроссельный клапан; И-ВО – испаритель-воздухоохладитель; ОНВ – охладитель наддувочного воздуха водяной; К – компрессор; УТ – утилизирующая турбина; НВ – наружный воздух

Об эффективности применения ТЭХМ можно судить по снижению температуры $\Delta t_{в}$ циклового воздуха ДВС в испарителе-воздухоохладителе, значения которого приведены на рис. 2 вместе с другими основными характеристиками ТЭХМ: удельной теплотой, приходящаяся на единичный расход газа или воздуха и отведенной от уходящих газов $\bar{q}_{г}$ и воздуха на входе двигателя (холодопроизводительность) \bar{q}_{0} и температурой $t_{y,г}$ уходящих газов после двигателя (на входе в ТЭХМ) в зависимости от температуры $t_{y,г6}$ уходящих газов после базового двигателя (без ТЭХМ) при температурах кипения НРТ в генераторе $t_{г} = 120^{\circ}\text{C}$ и испарителе $t_{0} = 0$ и 10°C , конденсации $t_{к} = 30^{\circ}\text{C}$, уходящих газов после генератора $t_{г2} = 150^{\circ}\text{C}$. Значение температуры уходящих газов после генератора $t_{г2} = 150^{\circ}\text{C}$ принималось исходя из усло-

вия предотвращения возникновения сернистой коррозии концевых поверхностей экономайзерной секции генератора. В качестве НРТ в ТЭХМ применен озонобезопасный хладон R142b.

При расчете разности температур $\Delta t_{в}$ воздуха на входе двигателя в результате его охлаждения в испарителе ТЭХМ учитывали влияние снижения температуры воздуха на входе на температуру $t_{y,г}$ уходящих газов в соответствии с соотношением $\Delta t_{y,г} = 1,6 \Delta t_{в}$, установленным по результатам стендовых испытаний судовых ДВС фирмы "MAN-B&W" [2, 3]. Рассчитанные таким образом значения $t_{y,г}$ приведены на рис. 2.

Как видно из рис. 2,а, применение ТЭХМ, использующей теплоту уходящих газов, приводит к заметному снижению температуры воздуха на входе двигателя $\Delta t_{в} > 20^{\circ}\text{C}$ только в случае температуры уходящих газов более 250°C , что имеет место при размещении генератора ТЭХМ после утилизирующей турбины турбокомпрессора, т.е. на байпасной линии газовыпуска в обход утилизирующего котла. Ограничение же температуры уходящих газов после экономайзерной секции генератора величиной $t_{г2} = 150^{\circ}\text{C}$, т.е. превышающей температуру кипения НРТ в генераторе $t_{г} = 120^{\circ}\text{C}$, существенно сокращает сбрасываемый в генераторе теплоперепад по уходящим газам, что особенно сказывается при $t_{y,г6} > 250^{\circ}\text{C}$. В результате чего в экономайзерной секции генератора используется теплота уходящих газов сравнительно высокого температурного уровня $t_{y,г} > t_{г}$, которая вполне могла быть реализованной в его испарительной секции.

Эти же характеристики ТЭХМ, но для температуры кипения НРТ в испарителе-воздухоохладителе $t_{0} = 10^{\circ}\text{C}$, приведены на рис. 2,б. Как видно, повышение температуры кипения НРТ в испарителе до $t_{0} = 10^{\circ}\text{C}$ приводит к увеличению снижения темпера-

туры Δt_b воздуха в ТЭХМ практически в 1,5 раза по сравнению с $t_0 = 0^\circ\text{C}$ (см. рис. 2,а и 2,б). Это объяс-

няется относительно большим приращением ζ с повышением t_0 от 0 до 10°C : $\Delta\zeta \approx 0,2$ при $\zeta = 0,1 \dots 0,2$.

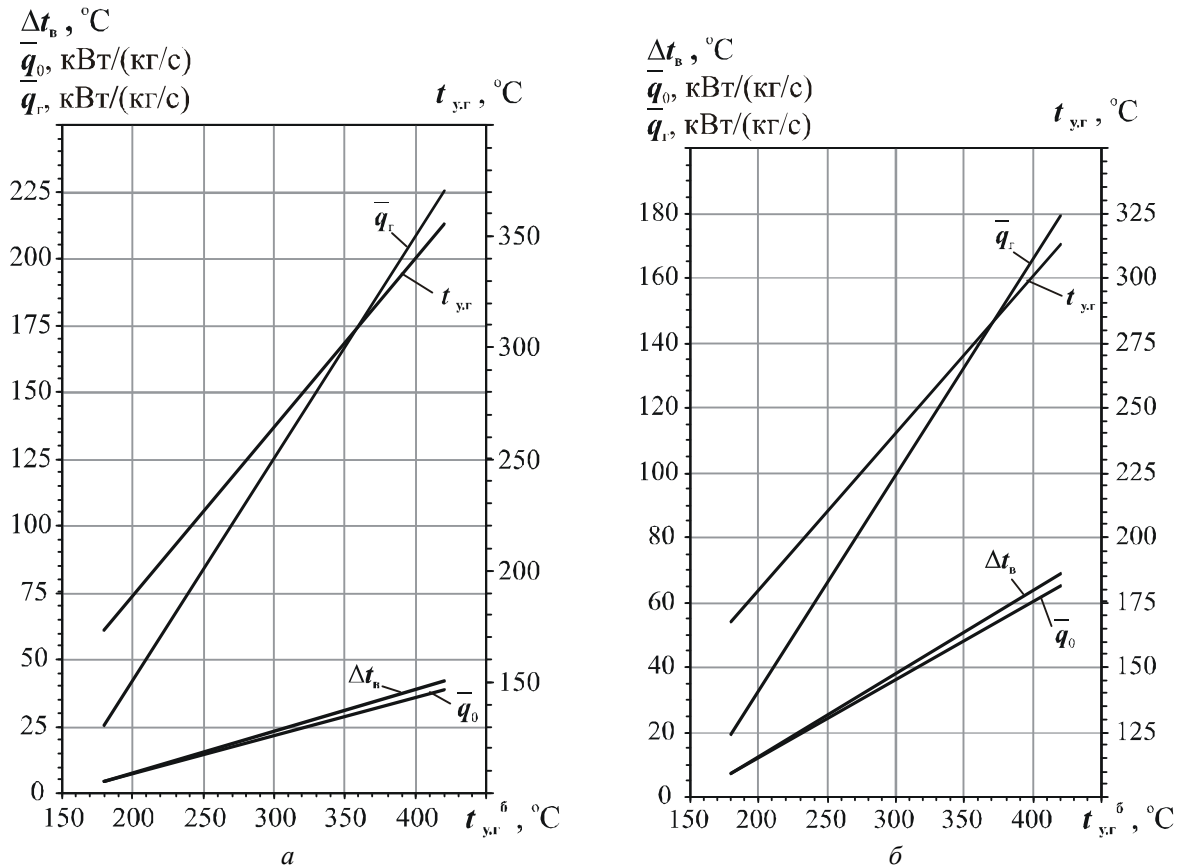


Рис. 2. Удельные теплота, отведенная от уходящих газов \bar{q}_r и воздуха на входе двигателя

(холодопроизводительность) \bar{q}_0 , снижение температуры Δt_b воздуха на входе двигателя и температура $t_{y,r}^6$ уходящих газов после двигателя (на входе в ТЭХМ) в зависимости от температуры $t_{y,r}^6$ уходящих газов после базового двигателя (без ТЭХМ) при температурах кипения НРТ в генераторе $t_2 = 120^\circ\text{C}$, конденсации $t_k = 30^\circ\text{C}$, уходящих газов после генератора $t_{r2} = 150^\circ\text{C}$ и кипения в испарителе t_0 :
 а – $t_0 = 0^\circ\text{C}$; б – $t_0 = 10^\circ\text{C}$

Следует отметить, что ограничение температуры уходящих газов после экономайзерной секции генератора величиной $t_{r2} = 150^\circ\text{C}$, т.е. превышающей температуру кипения НРТ в генераторе $t_r = 120^\circ\text{C}$, существенно сокращает срабатываемый в испарительной секции генераторе теплоперепад по уходящим газам, поскольку значительная его часть (от 30 до 50 % – в зависимости от $t_{y,r}^6$) изымается для нагрева жидкости в экономайзерной секции, для чего вполне могли бы использоваться ВЭР более низкого температурного уровня (охлаждающая двигатель

вода или наддувочный воздух). Ограничение тепловой эффективности испарительной секции генератора особенно сказывается на ТЭХМ при $t_{y,r}^6 > 250^\circ\text{C}$. Для того, чтобы реализовать весь тепловой потенциал испарительной секции генератора даже при таком жестком ограничении по температуре уходящих газов на выходе, $t_{r2} = 150^\circ\text{C}$, необходимо экономайзерную секцию генератора вынести из газовыпускного тракта и использовать в ней теплоту других низкопотенциальных ВЭР (охлаждающей двигатель воды или наддувочного воздуха).

Как видно, при $t_{y,r}^6 > 250^\circ\text{C}$ охлаждение

воздуха в испарителе, Δt_b , оказывается настолько большим, что превышает потенциальные возможности его использования на входе двигателя перед ТК, которые определяются температурой наружного воздуха (или в машинном отделении), а глубина охлаждения воздуха ограничивается температурой кипения НРТ в испарителе-воздухоохладителе t_0 : с учетом температурного напора между воздухом и кипящим НРТ температура воздуха на выходе из испарителя будет, как минимум, на 10...15 °С выше t_0 . С учетом этого воздух на входе ДВС может быть охлажден не более чем на величину $\Delta t_b = 25...35$ °С (меньшее значение соответствует $t_0 = 10$ °С, а большее – $t_0 = 0$ °С). Остающаяся же разность температур Δt_b (избыток холодопроизводительности ТЭХМ) целесообразно задействовать для глубокого охлаждения наддувочного воздуха после водяного ОНВ или же снижения температуры охлаждающей воды, подаваемой на ОНВ, т.е. прибегать к комплексной реализации произведенного холода.

Приращения КПД $\Delta \eta$ за счет охлаждения циклового воздуха в ТЭХМ в зависимости от температуры $t_{y,r}$ уходящих газов на входе в генератор ТЭХМ при температурах уходящих газов после генератора $t_{r2} = 150$ °С, конденсации хладона R142b $t_k = 30$ °С, кипения R142b в генераторе $t_r = 120$ °С и испарителе $t_0 = 0$ и 10 °С приведены на рис. 3.

При оценке влияния уменьшения температуры Δt_b циклового воздуха на эффективность двигателя исходили из того, что каждые 10 °С снижения температуры Δt_b воздуха обеспечивают 0,5 % прироста КПД $\Delta \eta$ двигателя [2, 3].

Как видно, применение ТЭХМ приводит к заметному повышению эффективности ДВС только при установке ЭХМ непосредственно после утилизационной турбины турбонаддувочного агрегата, т.е. на байпасной линии уходящих газов в обход утили-

зационного пароводяного котла (при $t_{y,r6} > 250$ °С). Существенное же приращение КПД, $\Delta \eta = 1,5...2,0$ % и более, имеет место при утилизации теплоты уходящих газов с температурой выше 350 °С. Использование для нагрева жидкого НРТ в экономайзерной секции генератора ЭХМ дополнительных источников, например охлаждающей двигателя воды или наддувочного воздуха, т.е. комплексная утилизация, обеспечит еще большие приросты КПД: $\Delta \eta = 2...4$ % (на рис. 3 не показано).

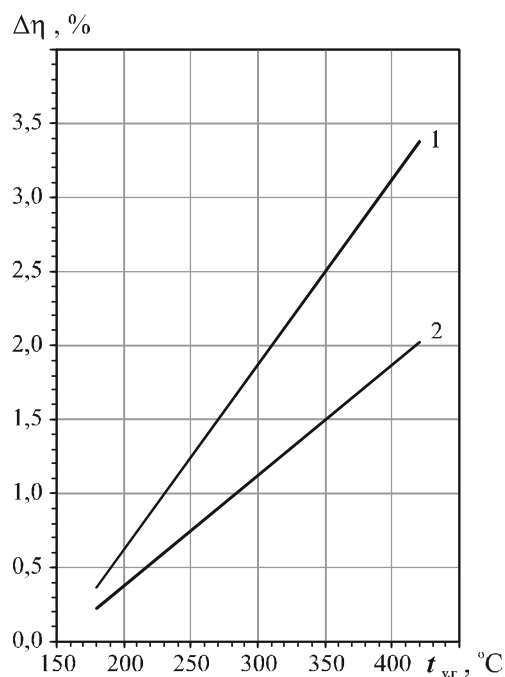


Рис. 3. Приращения КПД двигателя $\Delta \eta$ за счет охлаждения циклового воздуха в зависимости от температуры $t_{y,r}$ уходящих газов на входе в генератор ТЭХМ: 1 – $t_0 = 10$ °С; 2 – $t_0 = 0$ °С

В этом случае экономайзерную секцию генератора ТЭХМ следует выносить из газорывпускного тракта двигателя, например на линию наддувочного воздуха. Образующийся же избыток холодопроизводительности ТЭХМ (сверх ее величины, необходимой для предварительного охлаждения наружного воздуха на входе ДВС) целесообразно задействовать для глубокого охлаждения наддувочного воздуха после водяного ОНВ или же снижения температуры охлаждающей

воды, подаваемой на ОНВ. Схемное решение такой ЭХМ предполагает выполнение испарителя-воздухоохладителя в виде двух секций с установкой одной – на входе турбокомпрессора, а второй – после ОНВ или на охлаждающей воде.

Выводы

1. Использование в ТЭХМ теплоты уходящих газов для охлаждения циклового воздуха судовых ДВС обеспечивает повышение КПД двигателей на 1...2 %.

2. Комплексное использование ВЭР судовых ДВС (уходящих газов, наддувочного воздуха, охлаждающей двигателя воды) в ТЭХМ для охлаждения воздуха двигателей обеспечивает повышение КПД на 2...4 %.

3. Предложены схемные решения тригенерационных систем охлаждения циклового воздуха двигателей с использованием разных источников сбросной теплоты и вынесением экономайзерной секции генератора паров НРТ высокого давления из газораспределительного тракта на наддувочный воздух или на охлаждающую воду.

Список литературы:

1. Радченко А.Н. Анализ эффективности теплоиспользующих хладоновых эжекторных систем охлаждения судовых электродвигателей // Вестник двигателестроения. – 2007. – № 3. – С. 135–139. 2. Influence of Ambient Temperature Conditions on Main Engine Operation: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2005. -http://www.mandiesel.com/files/news/files/762/5510-0005.00pr_low.pdf. 3. MAN B&W. Project Guide. Two-stroke Engines. MC Programme. Vol. 1: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 1986.