

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*

ТРИГЕНЕРАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СБРОСНОЙ ТЕПЛОТЫ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Анализ состояния проблемы, постановка цели исследования

Судовые энергетические установки на базе двигателей внутреннего сгорания (ДВС) представляют собой установки когенерационного типа, производящие наряду с основным видом энергии (механической, передаваемой на гребной винт, или электрической) еще и тепловую в виде пара или нагретой воды. Условия их эксплуатации отличаются значительными колебаниями температуры наружного воздуха и забортной воды, что сказывается на изменении температуры наддувочного воздуха. Традиционные системы воздухоподготовки современных высоконаддувных ДВС предусматривают применение охладителей наддувочного воздуха (ОНВ) водяного охлаждения. Однако при повышенных температурах окружающей среды они не в состоянии поддерживать температуру воздуха в наддувочном ресивере на требуемом уровне: 40...50 °С и ниже. Очевидно, что для надежного охлаждения циклового воздуха (на входе турбокомпрессора и наддувочного) современных высоконаддувных дизелей требуется применение принципиально новых способов, в частности, с использованием машинного холода.

Поскольку повышение температуры наружного воздуха и забортной воды сопровождается возрастанием тепловых потерь с охлаждающей водой и уходящими газами, то их теплоту целесообразно использовать для выработки холода, а тот – для снижения температуры воздуха на входе ДВС и наддувочного воздуха. Производство холода за счет теплоты вторичных энергоресурсов (ВЭР) осуществляется в теплоиспользующих холодильных машинах (ТХМ),

а соответствующие когенерационные системы относятся к тригенерационным системам энергетического назначения.

Конструктивно наиболее простыми и надежными в эксплуатации являются эжекторные холодильные машины (ЭХМ), в которых функцию компрессора выполняет эжектор [1]. Применение в ЭХМ низкокипящих рабочих тел (НРТ) позволяет утилизировать теплоту ВЭР низкого температурного уровня. Однако энергетическая эффективность ЭХМ, которая характеризуется тепловым коэффициентом $\zeta = Q_0/Q_{\Gamma}$, представляющим собой отношение холодопроизводительности Q_0 (количества теплоты, отведенной от воздуха на входе двигателя к НРТ, кипящему при низких давлении и соответственно температуре) к количеству теплоты Q_{Γ} , подведенной к кипящему НРТ высокого давления от уходящих газов или другого источника сбросной теплоты, невысокая. Так, тепловой коэффициент ЭХМ, использующих в качестве НРТ хладоны R142B, R600, R600a, R290 составляет $\zeta = 0,2...0,3$. Очевидно, что с целью достижения максимально возможных снижения температуры циклового воздуха судовых ДВС и соответственно повышения их экономичности целесообразно задействовать и другие, помимо уходящих газов, источники сбросной теплоты (наддувочный воздух, охлаждающую воду), т.е. прибегать к комплексному использованию ВЭР двигателей.

Целью исследования является оценка эффективности применения тригенерационных систем комплексного использования ВЭР на базе ЭХМ для охлаждения циклового воздуха судовых дизелей.

Анализ результатов исследования

Схема ЭХМ, использующей теплоту уходящих газов для охлаждения наружного воздуха на входе ДВС, приведена на рис. 1.

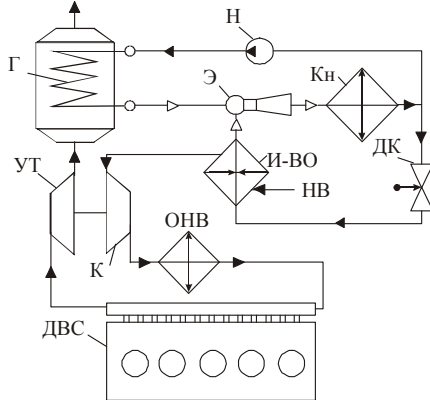


Рис. 1. Схема ЭХМ, использующей теплоту уходящих газов ДВС для охлаждения воздуха на его входе:

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 – утилизационная турбина; НВ – наружный воздух

В общем случае 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 движущей силой для эжектора.

Снижение температуры воздуха в испарителе ЭХМ Δt_b , удельные, отнесенные к единичному расходу воздуха, тепловые нагрузки на испаритель \bar{q}_0 (холодопроизводительность) и на генератор \bar{q}_r , а также тепловой коэффициент ζ представлены на рис. 2 в зависимости от температуры $t_{y,r}$ уходящих газов на входе в генератор ЭХМ при температурах кипения НРТ в генераторе $t_r = 120$ °С, конденсации $t_k = 35$ °С, уходящих газов после генератора $t_{r2} = 150$ °С и кипения НРТ в испарителе $t_0 = 0$ и 10 °С. В качестве НРТ в ЭХМ применен озонобезопасный хладагент R142b. Предполагается, что экономайзерная и

испарительная секции генератора установлены в газовыпускном тракте ДВС. Следует подчеркнуть, что под температурой $t_{y,r}$, значения которой использованы при построении графиков на рис. 2, подразумевают исходные значения температуры уходящих газов на входе в генератор ЭХМ – без учета ее уменьшения из-за снижения температуры наружного воздуха на входе ДВС на величину Δt_b . Действительные значения температуры уходящих газов на входе генератора ЭХМ $t_{y,r}^d$ будут ниже исходных $t_{y,r}$ на величину уменьшения температуры уходящих газов, обусловленного снижением температуры воздуха на входе: $t_{y,r}^d = t_{y,r} - \Delta t_{y,r}$, где $\Delta t_{y,r} = 1,6 \Delta t_b$ [2].

Значение температуры уходящих газов после генератора $t_{r2} = 150$ °С принималось исходя из условия предотвращения возникновения сернистой коррозии концевых поверхностей экономайзерной секции.

Как видно, применение ЭХМ, использующей теплоту уходящих газов, приводит к заметному снижению температуры воздуха на входе двигателя, $\Delta t_b > 20$ °С, только в случае температуры уходящих газов более 250 °С, что имеет место при размещении генератора ЭХМ после утилизационной турбины турбокомпрессора, т.е. на байпасной линии газовойпуска в обход утилизационного котла. Ограничение же температуры уходящих газов после экономайзерной секции генератора величиной $t_{r2} = 150$ °С, т.е. превышающей температуру кипения НРТ в генераторе $t_r = 120$ °С, существенно сокращает срабатываемый в генераторе теплоперепад по уходящим газам. В результате чего в экономайзерной секции генератора используется теплота уходящих газов сравнительно высокого температурного уровня $t_{y,r} > t_r$, которая вполне могла быть реализованной в его испарительной секции. Подтверждением этого является тот факт, что и при повышенной температуре кипения НРТ в испарителе $t_0 = 10$ °С (рис. 2,б) снижение температуры Δt_b воздуха в нем практически остается таким же, как и в случае $t_0 = 0$ °С (рис. 2,а).

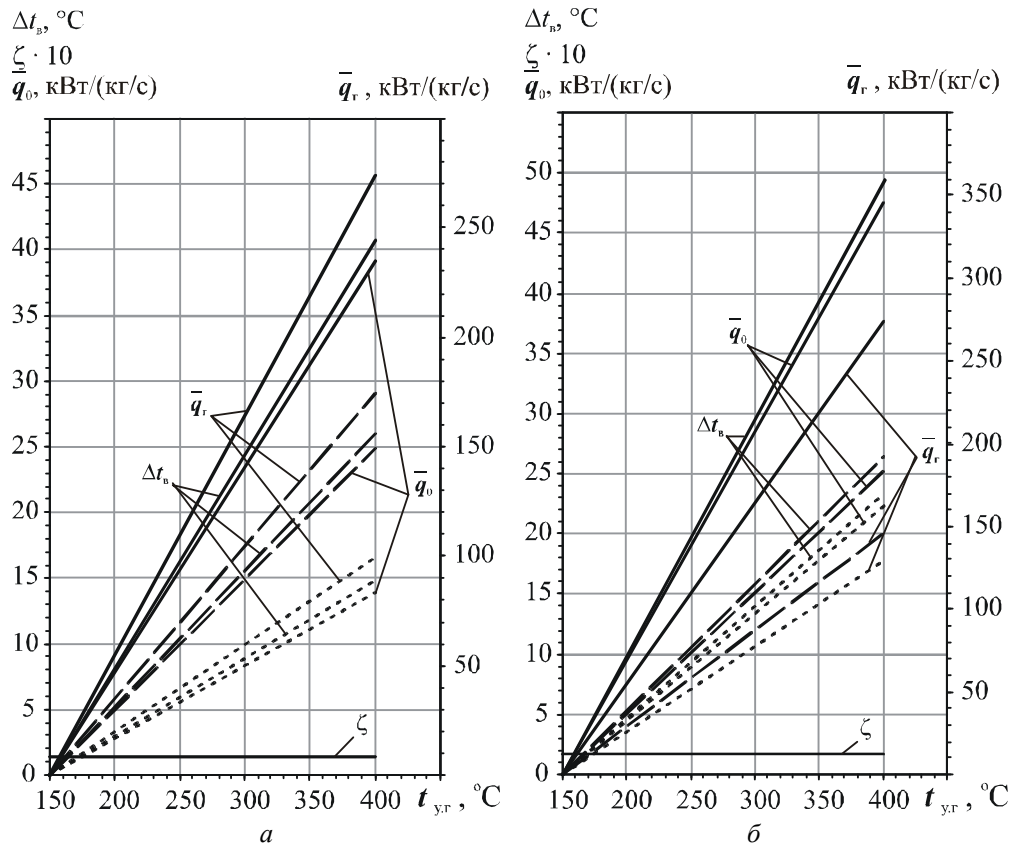


Рис. 2. Удельные теплота, отведенная от уходящих газов \bar{q}_r и воздуха на входе двигателя (холодопроизводительность) \bar{q}_0 , снижение температуры Δt_n воздуха на входе двигателя, тепловой коэффициент ЭХМ ζ в зависимости от температуры $t_{y,z}$ уходящих газов на входе в генератор ЭХМ с экономайзером, установленным в газоходе, при температурах кипения R142b в генераторе $t_z = 120^\circ\text{C}$, конденсации $t_k = 35^\circ\text{C}$, уходящих газов после генератора $t_{z2} = 150^\circ\text{C}$ и кипения R142b в испарителе t_0 :

$a - t_0 = 0^\circ\text{C}$; $b - t_0 = 10^\circ\text{C}$; --- за счет отвода теплоты генератором в целом, \bar{q}_r и \bar{q}_0 ; ---- испарительной секцией, \bar{q}_r'' и \bar{q}_0'' ; экономайзерной секцией \bar{q}_r' и \bar{q}_0'

Ситуация резко меняется в случае использования для нагрева жидкого НРТ в экономайзерной секции генератора другого источника сбросной теплоты, например нагретой воды контура охлаждения двигателя или наддувочного воздуха. Схема системы охлаждения наружного воздуха на входе двигателя с экономайзером генератора, вынесенным из газовыпускного тракта двигателя на наддувочный воздух, приведена на рис. 3, а ее характеристики – на рис. 4.

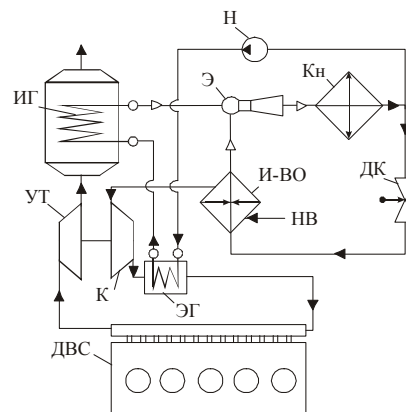


Рис. 3. Схема ЭХМ, использующей теплоту уходящих газов и наддувочного воздуха ДВС:

ЭГ, ИГ – экономайзерная и испарительная секции генератора пара НРТ

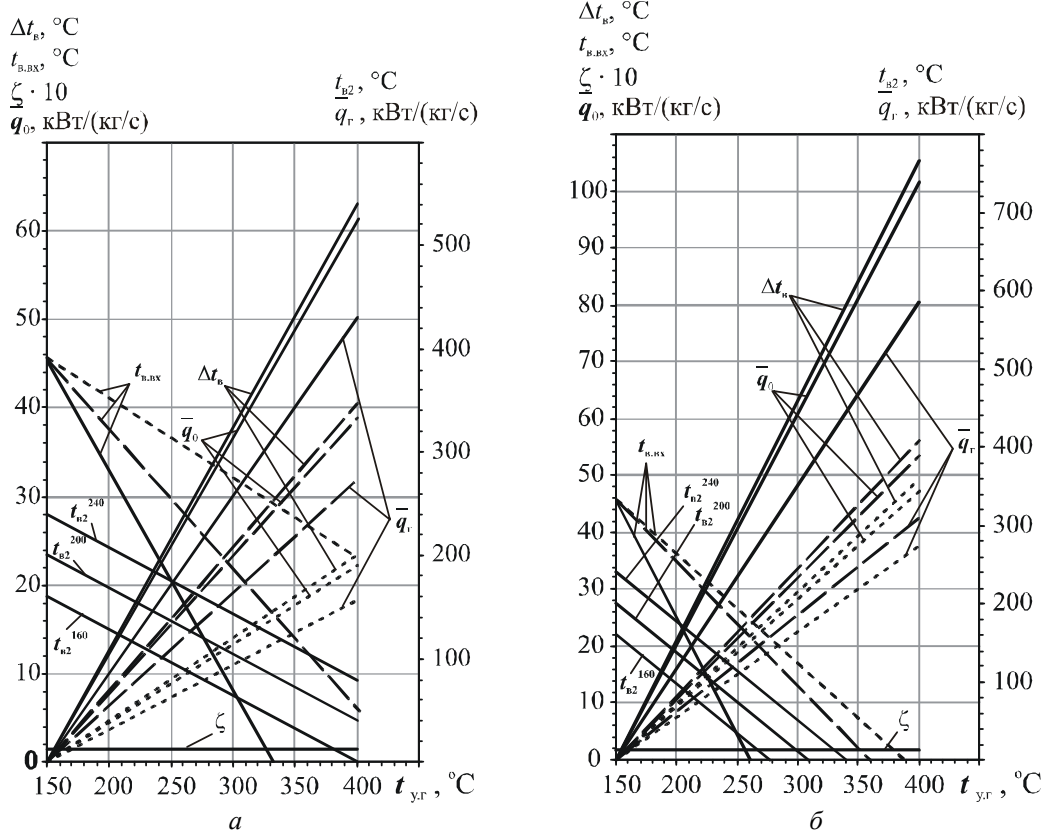


Рис. 4. Удельные теплота, отведенная от уходящих газов \bar{q}_r и воздуха на входе двигателя (холодопроизводительность) \bar{q}_0 , снижение температуры Δt_v воздуха на входе двигателя, тепловой коэффициент ЭХМ ζ , температуры $t_{в2}$ наддувочного воздуха после экономайзера генератора ЭХМ (экономайзер установлен на наддувочном воздухе вне газохода) и охлажденного воздуха на входе ТК $t_{в,вх}$ в зависимости от температуры $t_{y,2}$ уходящих газов на входе в генератор ЭХМ при температурах кипения в испарителе t_0 :

$a - t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$; $b - t_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$; — за счет отвода теплоты генератором в целом, \bar{q}_r и \bar{q}_0 ; - - - - испарительной секцией, \bar{q}_r'' и \bar{q}_0'' ; - экономайзерной секцией \bar{q}_r' и \bar{q}_0' ; надстрочные индексы $t_{в2}^{160...240}$ соответствуют температурам наддувочного воздуха на входе экономайзерной секции генератора $t_{в1} = 160...240 \text{ }^\circ\text{C}$

Однако не вся потенциально возможная (определяемая располагаемым тепловым потенциалом ВЭР и эффективностью ЭХМ) разность температур Δt_v может быть реализована на входе ДВС, поскольку степень охлаждения воздуха зависит от его исходной температуры (наружный воздух или воздух машинного отделения), а ее глубина 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 $10...15 \text{ }^\circ\text{C}$ выше t_0 . С учетом этого воздух на входе ДВС может быть охлажден не более чем на

величину $\Delta t_v = 25...35 \text{ }^\circ\text{C}$ (меньшее значение соответствует $t_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, а большее – $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$). Остающуюся же разность температур Δt_v (избыток холодопроизводительности ЭХМ) целесообразно использовать для глубокого охлаждения наддувочного воздуха после водяного ОНВ или же снижения температуры охлаждающей воды, подаваемой на ОНВ, т.е. прибегать к комплексным не только использованию ВЭР ДВС, но и реализации произведенного холода.

Расчеты показывают, что применение ЭХМ 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 утилизационного пароводяного котла. При утилизации теплоты уходящих газов с температурой выше 350 °С и дополнительных источников, например охлаждающей двигателя воды или наддувочного воздуха, приращение КПД составляет $\Delta\eta = 1,5...2,0\%$ и более. Для этого экономайзерную секцию генератора ЭХМ следует выносить из газовойпускного тракта двигателя, например на линию наддувочного воздуха. Образующийся при этом избыток холодопроизводительности ЭХМ (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. При оценке влияния уменьшения температуры Δt_v циклового воздуха на эффективность

двигателя исходили из того, что каждые 10 °С снижения температуры Δt_v воздуха обеспечивают 0,5 % прироста КПД $\Delta\eta$ двигателя [2].

Выводы

1. Комплексное использование ВЭР судовых ДВС (уходящих газов, наддувочного воздуха, охлаждающей воды) в тригенерационных системах охлаждения циклового воздуха двигателей на базе ЭХМ обеспечивает повышение их КПД на 1...2 %.
2. Предложены схемные решения тригенерационных систем охлаждения воздуха двигателей с использованием разных источников сбросной теплоты.

Список литературы:

1. Радченко Н.И., Сирота А.А., Коновалов Д.В. Рациональные параметры тригенерационных контуров судовых среднеоборотных дизелей // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2007. – № 2. – С. 131 – 135.
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.

УДК 004.9

А.В. Чигрин, инж., А.В. Белогуб, канд. техн. наук, М.А. Максимова, канд. техн. наук

НЕКОТОРЫЕ ПОДХОДЫ К ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ ПОРШНЕЙ

В современных условиях при проектировании новых изделий или доработке существующих конструкций поршней и узлов ДВС ставятся не только сугубо конструкторские задачи, а также и задачи наглядной демонстрации полученных при проектировании результатов, а также визуальный анализ результатов расчета.

Основными тенденциями визуализации поршней и различных процессов, происходящих в ДВС,

являются:

1. отображение внешнего вида и конструкции поршня, узла или двигателя;
2. отображение процесса работы двигателя;
3. визуализация конструктивных особенностей поршня (поля температур, статическое и динамическое нагружение и т.д.);

Основными областями использования визуализации являются: