

УДК 621.577

А.Н. РАДЧЕНКО*Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина***ТЕПЛОИСПОЛЬЗУЮЩИЕ УСТАНОВКИ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА СУДОВЫХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ДИЗЕЛЕЙ**

Проанализирована целесообразность предварительного охлаждения циклового воздуха судовых вспомогательных дизелей в турбодетандерной холодильной машине, использующей энергию выпускных газов. Рассмотрены схемные решения турбодетандерных установок кондиционирования циклового воздуха на входе дизелей, включая их комбинацию с теплоиспользующей эжекторной кондиционирующей установкой на низкокипящих рабочих телах. Отмечены особенности применения разных вариантов теплоиспользующих установок кондиционирования циклового воздуха судовых дизелей, их основные преимущества и недостатки.

судовой вспомогательный дизель, предварительное охлаждение циклового воздуха, турбодетандер, низкокипящее рабочее тело, теплоиспользующая холодильная машина

1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

В качестве вспомогательных двигателей (дизель-генераторов) на судах применяются обычно четырехтактные ДВС с турбонаддувом. Их эффективность существенно зависит от параметров воздуха на входе наддувочного турбокомпрессора (ТК). Повышение температуры воздуха приводит к ухудшению топливной экономичности дизелей. Так, каждые 10 °С увеличения температуры воздуха на входе вызывают снижение эффективного КПД η_e судовых ДВС на 0,5...0,7% с соответствующим возрастанием удельного расхода топлива b_e [1]. Уменьшение массовой подачи воздуха в цилиндры двигателей, обусловленное снижением его плотности с возрастанием температуры, вызывает сокращение их мощности. Возрастание температуры $t_{зв}$ забортной воды, подаваемой на охладители наддувочного воздуха (ОНВ) и отличающейся от температуры наружного воздуха на 2...4 °С, приводит к снижению эффективности охлаждения наддувочного воздуха, которое могло бы демпфировать негативное воздействие повышенный температур воздуха на входе ТК. Следствием этого является дополнительное ухудшение показателей экономичности работы дизелей.

Известным способом снижения температуры наддувочного воздуха судовых ДВС является турбодетандерное охлаждение, применяемое в двигателях фирмы "Купер-Бессемер" еще с 1950 г. [2], в которых сжатие воздуха осуществляется последовательно в двух центробежных компрессорах с приводом первого компрессора от утилизационной турбины (УТ), установленной на газовыхлопе, а второго – от воздушного турбодетандера, при расширении в котором и происходит окончательное охлаждение наддувочного воздуха. При этом предусмотрено также промежуточное его охлаждения водой после каждого из компрессоров.

Турбодетандер, по сути, представляет собой воздушную холодильную машину, использующую энергию выпускных газов и работающую по разомкнутому циклу. Ее главным достоинством является отсутствие специального холодильного агента, роль которого выполняет воздух, и относительная простота конструкции. Эффективность турбодетандерного охлаждения по сравнению с обычным водяным охлаждением наддувочного воздуха зависит от наличия резерва мощности УТ, который можно задействовать для дополнительного повышения давления наддувочного воздуха (сверх регламентированного).

ванного давления наддува). Если КПД турбокомпрессорных газового и воздушного агрегатов в турбодетандерных системах охлаждения наддувочного воздуха судовых дизелей "Купер–Бессемер" составляла $\eta_{TK} = 0,6$ и $0,55$ соответственно (при степенях повышения давления компрессоров π_k около 2,7 и 1,3 соответственно), что предопределяло невысокую эффективность турбодетандерного охлаждения по сравнению с обычным водяным, то КПД современных ТК превышает $\eta_{TK} = 0,7$, приближаясь к 0,75 [3, 4]. Образующаяся благодаря этому избыточная (сверх необходимой для наддува дизелей) энергия выпускных газов позволила перейти ведущим дизелестроительным фирмам на системы более полной утилизации энергии выпускных газов, в частности турбокомпаундные системы TCS (Turbo Compound System) с байпасированием части выпускных газов (около 10% общего расхода), минуя ТК, на вход силовой турбины (power turbine) и использованием получаемой в турбине механической энергии для привода вала двигателя, дополнительно к мощности самого двигателя, – TCS/PTI (Power Take In – подвод мощности), или электрогенератора – TCS/PTO (Power Take Out – отвод мощности) [5]. Турбокомпаундные системы утилизации TCS применяются в **двухтактных главных двигателях**, и пар, вырабатываемый утилизационным котлом (УК), используется в паровой турбине, мощность которой передается либо на вал двигателя, либо на привод электрогенератора.

Фирмой "Mitsubishi Heavy Industries (MHI)" разработана альтернативная турбокомпаундная система без байпасирования части выпускных газов на дополнительную силовую турбину и предполагающая отвод избыточной мощности от утилизационной турбины, приводящей наддувочный компрессор, на привод электрогенератора [4]. Избыток мощности УТ образуется за счет применения высокоэффективных ТК серии MET-MA с КПД около 74 %. Использование такого гибридного турбоагрегата

(Hybrid Turbocharger) с отбором части мощности УТ на привод электрогенератора позволяет получать дополнительную электрическую мощность, эквивалентную примерно 5 % мощности главного дизеля. При этом температура уходящих газов на входе ТК составляла $t_{y,г} = 450$ °С и $\pi_k = 3,3$. Несомненным достоинством гибридной системы HT-TCS является отсутствие второй газовой турбины.

Избыточная энергия выпускных газов главного двигателя может быть реализована с помощью интегрированной системы наддува ICS (Integrated Charge Air System), когда при пониженных нагрузках на вспомогательный четырехтактный ДВС на вход его ТК дополнительно подводится часть наддувочного воздуха от ТК главного двухтактного ДВС [5]. Такая система может применяться в комбинации со стандартной турбокомпаундной схемой TCS/ICS [5].

Таким образом, благодаря повышению КПД турбокомпрессорных агрегатов с 0,55...0,60 до 0,70...0,75 образуется избыток энергии выпускных газов, свыше величины, необходимой для турбонаддува, который реализуется различными системами утилизации энергии выпускных газов судовых ДВС с турбонаддувом: TCS, HT-TCS, ICS, TCS/ICS. Избыток энергии выпускных газов зависит от их температуры: для четырехтактных ДВС с температурой газов после двигателя $t_{y,г} = 450...500$ °С он выше, чем для двухтактных с гораздо меньшими значениями $t_{y,г}$.

Целью исследования является оценка целесообразности предварительного охлаждения циклового воздуха судовых вспомогательных дизелей в турбодетандерной холодильной машине, использующей энергию выпускных газов.

В основу **концепции** кондиционирования воздуха на входе судовых вспомогательных дизелей положена **гипотеза** использования избыточной энергии агрегатов турбонаддува, образующейся при нагрузках дизелей свыше 50 %. Избыточная энергия

может составлять от 10 % N_e (для двухтактных дизелей) до 20 % и выше (для четырехтактных).

2. Анализ результатов исследования

Согласно вышеприведенной гипотезе источником энергии для теплоиспользующих установок кондиционирования воздуха на входе судовых дизелей служит избыточная мощность высокоэффективных турбонаддувочных агрегатов (с $\eta_{ТК} = 0,7 \dots 0,75$), образующаяся при нагрузках дизелей свыше 50 %.

Поскольку КПД турбокомпрессорных агрегатов $\eta_{ТК}$ существенно зависит от степени повышения давления π_k , принимая максимальное значение при некоторой оптимальной величине $\pi_{корт}$, например, для ТК типа МЕТ МА $\eta_{ТКmax} = 0,74$ при $\pi_{корт} = 3,3$, снижаясь до $\eta_{ТК} = 0,67$ при $\pi_k = 4,5$ [4], то представляется целесообразным реализовать избыточную энергию выпускных газов не путем повышения давления наддувочного воздуха (с учетом последующего его уменьшения в турбодетандере до требуемой величины), как в традиционной турбодетандерной системе охлаждения наддувочного воздуха [5], а увеличением производительности ТК с использованием энергии избыточного количества наддувочного воздуха в теплоиспользующей установке кондиционирования воздуха на входе двигателя (ТУКВ). Исходя из этой гипотезы, можно предложить следующие схемные решения ТУКВ, использующих энергию избыточного количества наддувочного воздуха.

Простейшим схемным решением ТУКВ является стандартная система турбонаддува с дросселированием избыточного количества наддувочного воздуха после теплообменника-охладителя наддувочного воздуха на вход ТК.

Такая ТУКВ по составу элементов не отличается от стандартной системы перепуска части наддувочного, но не охлажденного воздуха (перед ТО-ОНВ), на вход ТК для предотвращения недопустимого повышения давления в цилиндрах двигателя, что воз-

можно при пониженных температурах воздуха на входе ТК: $t_{нв} < -5$ °С [6]. Основной недостаток простой схемы – потери энергии сжатого воздуха при его дросселировании, которую можно было бы получить при условии расширения воздуха в турбодетандере.

Схема ТУКВ с турбодетандером, мощность которого используется для привода компрессора, приведена на рис. 1.

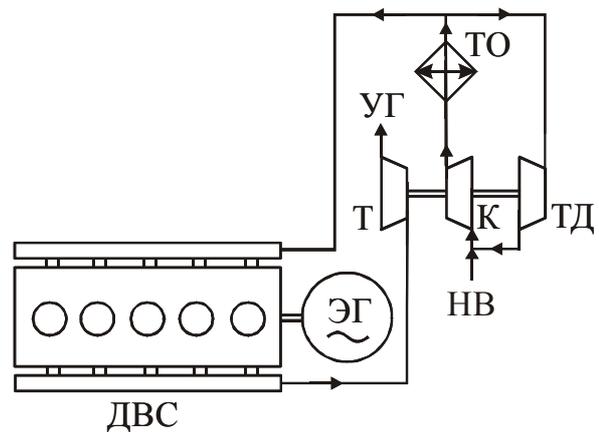


Рис. 1. Схема ТУКВ с турбодетандером:

Т – утилизационная турбина; К – компрессор; ТД – турбодетандер; ТО – теплообменник-охладитель наддувочного воздуха; ЭГ – электрогенератор; НВ – наружный воздух; УГ – уходящие газы

Путем соответствующих переключений, не прибегая к каким-либо конструктивным изменениям, можно трансформировать в ТУКВ стандартную турбодетандерную систему охлаждения наддувочного воздуха: достаточно на турбодетандер подавать только избыток наддувочного воздуха, используемый в ТУКВ, а основное его количество направлять в наддувочный ресивер двигателя в обход турбодетандера (рис. 2).

Результаты расчетов показывают, что при исходных температурах воздуха, подаваемого на вход ТК двигателя, составляющих 35 °С (наружный воздух, соответствующий тропическим условиям эксплуатации) и 45 °С (воздух в машинном отделении), температура воздуха на выходе из турбодетандера может достигать –40 °С и –30 °С соответственно. В зависимости от количества избыточного наддувоч-

ного воздуха, подаваемого в турбодетандер ТУКВ, снижение температуры воздуха на входе ТК двигателя Δt_b за счет смешения наружного воздуха с охлажденным в ТУКВ составит около 10 °С (при расходе сжатого воздуха через турбодетандер ТУКВ 10% от общего его расхода) и почти 20 °С при 20% суммарного расхода.

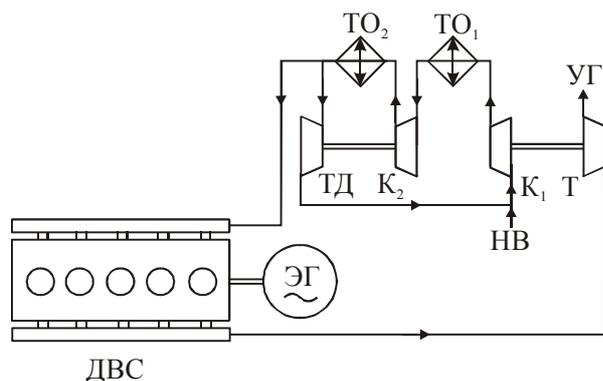


Рис. 2. Схема ТУКВ с турбодетандером и двумя компрессорами с промохлаждением:
Т – утилизирующая турбина; ТД – турбодетандер; К₁ и К₂ – компрессоры; ТО₁ и ТО₂ – теплообменники; ЭГ – электрогенератор; НВ – наружный воздух; УГ – уходящие газы

С учетом того, что каждые 10 °С снижения температуры воздуха на входе вызывают увеличение эффективного КПД η_e судовых ДВС на 0,5...0,7%, можно ожидать абсолютного повышения η_e на 1,0...1,5% за счет применения турбодетандерного охлаждения воздуха на входе двигателя.

В случае повышенных температур наружного воздуха и забортной воды, когда стандартная система водяного охлаждения ДВС не в состоянии обеспечить требуемые температуры наддувочного воздуха, а также при недостаточном количестве избыточного наддувочного воздуха с целью его более глубокого охлаждения можно применить машинный холод, вырабатываемый, в частности, теплоиспользующей эжекторной холодильной машиной (ТЭХМ) как конструктивно наиболее простой вариант. Источником сбросной теплоты для ТЭХМ могут служить уходящие газы или наддувочный воздух после компрессора, температура которого в зависимости

от давления может составлять от 100 °С (при двухступенчатом сжатии с промежуточным охлаждением) до 200 °С и выше (без промежуточного охлаждения). В качестве рабочего тела в холодильных машинах применяются низкокипящие рабочие тела (НРТ).

Схема ТУКВ с турбодетандером и ТЭХМ приведена на рис. 3.

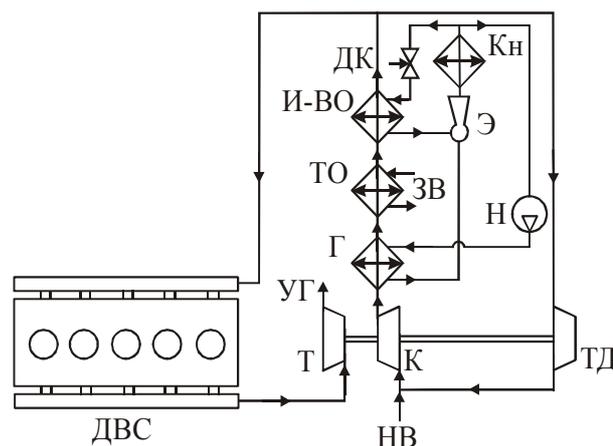


Рис. 3. Схема ТУКВ с турбодетандером и ТЭХМ:
Т – утилизирующая турбина; К – компрессор; ТД – турбодетандер; ТО – теплообменник; ТЭХМ: Г – генератор; И-ВО – испаритель-воздухоохладитель; Э – эжектор; Кн – конденсатор; Н – насос; ДК – дроссельный клапан; НВ – наружный воздух; ЗВ – забортная вода; УГ – уходящие газы

Как видно, в генераторе ТЭХМ теплота наддувочного воздуха после компрессора используется для получения пара НРТ высокого давления, энергия которого в свою очередь расходуется на эжектирование пара НРТ низкого давления, испаряющегося в И-ВО с отводом теплоты от наддувочного воздуха на входе турбодетандера.

В качестве НРТ для ТЭХМ целесообразно применение хладонов R142b и R600 (н-бутан), обеспечивающих достижение приемлемых тепловых коэффициентов. Тепловой коэффициент $\zeta = Q_0/Q_T$ представляет собой отношение холодопроизводительности Q_0 (количества теплоты, отведенной от наддувочного воздуха, подаваемого в турбодетандер) к количеству теплоты Q_T , подведенной в гене-

раторе к кипящему НРТ от наддувочного воздуха после компрессора или от выпускных газов.

Для ТЭХМ, использующих теплоту наддувочного воздуха или выпускных газов судовых ДВС, значения теплового коэффициента составляют $\zeta = 0,25 \dots 0,3$. Применение ТЭХМ обеспечивает дополнительное (в дополнение к охлаждению в стандартном водяном ОНВ) снижение температуры наддувочного воздуха на входе турбодетандера на $20 \dots 40$ °С и уменьшение температуры воздуха на выходе из него на $15 \dots 30$ °С. Благодаря весьма низкой температуре воздуха на выходе из турбодетандера, смешиваемого с наружным воздухом (воздухом машинного отделения), на входе ТК получают достаточно низкие температуры воздуха (около 10 °С) даже при температурах воздуха в машинном отделении $45 \dots 50$ °С и забортной воды 32 °С, соответствующих тропическим условиям эксплуатации, что позволяет сократить удельный расход топлива на вспомогательные двигатели на $2 \dots 3\%$.

Выводы

1. Применение турбодетандерной кондиционирующей установки обеспечивает повышение КПД судовых вспомогательных дизелей на $1,0 \dots 1,5$ % за счет охлаждения воздуха на входе наддувочного турбокомпрессора.

2. Комбинированная турбодетандерная и эжекторная теплоиспользующая кондиционирующая установки обеспечивает приращение КПД вспомогательных дизелей на $2 \dots 3\%$

3. Предложены схемные решения теплоиспользующих установок кондиционирования воздуха на входе судовых вспомогательных дизелей.

Литература

1. Influence of Ambient Temperature Conditions on Main Engine Operation: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2005 [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.mandiesel.com/files/news/files/762/5510-0005.00pr_low.pdf.

2. Zinner K., Reinloin H. Thermodynamische Untersuchung über die Anwendbarkeit der Turbokühlung bei aufgeladenen vierfakt // Dieselmotoren, "MTZ". – 1964. – Nr. 5. – S. 188-195.

3. Heim K. Existing and Future Demands on the turbocharging of Modern Large Two-stroke Diesel Engines // 8-th Supercharging Conference, Dresden, 1-2 October 2002.

4. Shiraishi K., Ono Y. Hybrid Turbocharger with integrated High Speed Motor-generator // Technical Review: Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. – 2007. – Vol. 44. – No. 1 (Mar.). – 3 p. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e441/e441049.pdf>.

5. MAN B&W. Project Guide. Two-stroke Engines. MC Programme. Vol. 1: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 1986.

6. Schmid H. Less Emissions through Waste Heat Recovery // Green Ship Technology Conference, London, 28-29 April, 2004. – 10 p. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.wartsila.com/Wartsila/global/docs/en/ship_power/media_publications/technical_papers/sulzer/waste_heat_recovery.pdf

Поступила в редакцию 19.05.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.И. Живица, Одесская государственная академия холода, Одесса.