

УДК 621.57

Н.И. РАДЧЕНКО, А.В. КОНОВАЛОВ

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина

УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛА УХОДЯЩИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА С ОХЛАЖДЕНИЕМ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ ПРИВОДНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Проанализирована эффективность использования тепла уходящих газов приводного двигателя дизель-генератора для охлаждения наружного воздуха на входе наддувочного турбокомпрессора теплоиспользующей эжекторной холодильной машины на низкокипящем рабочем теле, включающей силовой и холодильный контуры. Показана зависимость теплового коэффициента и коэффициента эжекции, удельной холодопроизводительности холодильной машины и достигаемого снижения температуры воздуха от температуры кипения низкокипящего рабочего тела в силовом контуре машины. Значения снижения температуры наружного воздуха на входе наддувочного турбокомпрессора приводного двигателя дизель-генератора рассчитаны с учетом изменения климатических условий эксплуатации.

Ключевые слова: дизель-генератор, утилизация теплоты, теплоиспользующая эжекторная холодильная машина, низкокипящее рабочее тело, воздух на входе, уходящий газ.

1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

В качестве первичных двигателей дизель-генераторов (ДГ) в большинстве случаев применяются двигатели внутреннего сгорания (ДВС) с турбонаддувом. Эффективность ДВС существенно зависит от температуры воздуха на входе наддувочных турбокомпрессоров (ТК).

С ее повышением на 10 °С КПД ДВС снижается на 0,5...0,7 % (соответственно возрастает удельный расход топлива b_e), а мощность сокращается на 5...7 % [1 – 3]. При этом повышается температура уходящих газов после турбины ТК и, следовательно, потери теплоты с ними.

Понизить температуру воздуха на входе ТК и за счет этого повысить термодинамическую эффективность ДВС и ДГ в целом (увеличить КПД, уменьшить b_e) можно с помощью теплоиспользующих холодильных машин (ТХМ), или термотрансформаторов (ТТ), вырабатывающих холод путем трансформации сбросной теплоты ДВС: теплоты уходящих газов, наддувочного воздуха или охлаждающей двигатель воды.

В качестве рабочего тела ТТ обычно применяются низкокипящие рабочие тела (НРТ), в частности озонобезопасные хладоны R142b и R600 (н-бутан), что позволяет охлаждать воздух на входе ТК до 10...15 °С без необходимости поддержания вакуума в испарителе НРТ-воздухоохладителе (И-ВО).

Цель работы – оценка эффективности использования тепла уходящих газов приводного ДВС ДГ для охлаждения воздуха на входе ТК с помощью ТТ ТХМ с учетом климатических условий эксплуатации.

2. Результаты исследования

В качестве ТТ рассмотрена эжекторная ТХМ (ТЭХМ) как конструктивно наиболее простая и надежная в эксплуатации, в которой функцию компрессора выполняет эжектор (рис. 1).

Теплота уходящих газов используется сначала для нагрева воды до температуры около 200 °С (под повышенным давлением) в утилизационном теплообменнике (УТО), а потом для испарения НРТ в генераторе ТЭХМ при 100...120 °С.

Эффективность эжектора характеризуется коэффициентом эжекции

$$U = G_0 / G_r,$$

где G_0 и G_r – расходы НРТ через И-ВО (всасываемый НРТ низкого давления) и генератор (силовой НРТ высокого давления), а ТЭХМ – тепловым коэффициентом ζ , представляющим собой отношение холодопроизводительности Q_0 (теплоты, отведенной от воздуха на входе ТК дизеля к НРТ, кипящему в И-ВО) к теплоте Q_r , подведенной в генераторе к кипящему НРТ высокого давления от уходящих газов:

$$\zeta = Q_0 / Q_r.$$

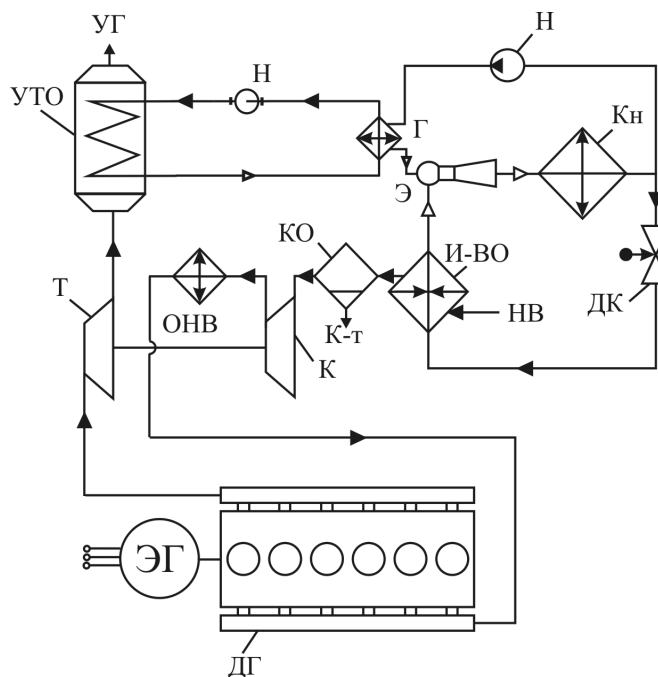


Рис. 1. Схема ТЭХМ, использующей теплоту уходящих газов для охлаждения воздуха на входе ТК ДГ:

- К – компрессор ТК; Т – турбина ТК;
- УТО – утилизационный теплообменник;
- ОНВ – охладитель наддувочного воздуха;
- И-ВО – испаритель НРТ – воздухоохладитель;
- КО – каплеотделитель; К-т – конденсат; Э – эжектор;
- Г – генератор паров НРТ; Н – насос;
- ДК – дроссельный клапан; УГ – уходящие газы;
- ЗВ – заборная вода; НВ – наружный воздух

Коэффициенты U и ζ зависят от параметров цикла ТЭХМ, увеличиваясь с повышением температуры кипения НРТ в генераторе t_r и И-ВО t_0 и снижением температуры конденсации t_k .

Холодопроизводительность ТЭХМ Q_0 определяют исходя из теплоты, отводимой от уходящих газов Q_r и значения ζ :

$$Q_0 = \zeta \cdot Q_r,$$

где $Q_r = G_{yr} \cdot c_{yr} (t_{yr1} - t_{yr2})$.

Температура уходящих газов t_{yr1} на входе УТО (после турбины ТК) для среднеоборотных ДВС составляет около 350 °С.

Температуру уходящих газов после УТО t_{yr2} принимают 150...160 °С исходя из условия предотвращения сернистой коррозии.

Снижение температуры воздуха в И-ВО

$$\Delta t_b = t_{b1} - t_{b2}$$

находят из теплового баланса:

$$Q_0 = G_b \cdot c_b (t_{b1} - t_{b2}) \xi,$$

где c_b – теплоемкость влажного воздуха; ξ – коэффициент влаговыпадения представляет собой отно-

шение полного количества теплоты (разности энтальпий воздуха на входе и выходе из И-ВО), отведенной от влажного воздуха в И-ВО (холодопроизводительности ТЭХМ Q_0 , к количеству явной теплоты, определяемому разностью температур по сухому термометру:

$$\xi = Q_0 / [G_b \cdot c_b \cdot (t_{b1} - t_{b2})].$$

Значения удельных, приходящихся на единицу расхода газов (воздуха) теплоты, отведенной от уходящих газов в генераторе ТЭХМ \bar{q}_a , и холодопроизводительности ТЭХМ \bar{q}_0 , снижения температуры Δt_b воздуха в И-ВО на входе ТК ДГ, а также коэффициентов U и ζ в зависимости от температуры t_r кипения НРТ в генераторе при следующих значениях:

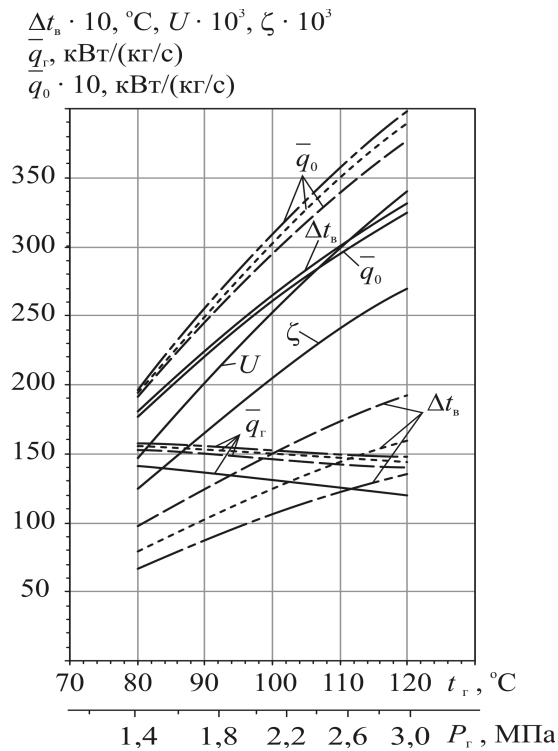
$$\xi = 1,0; 2,0; 2,5 \text{ и } 3,0$$

и температурах кипения R142b в испарителе

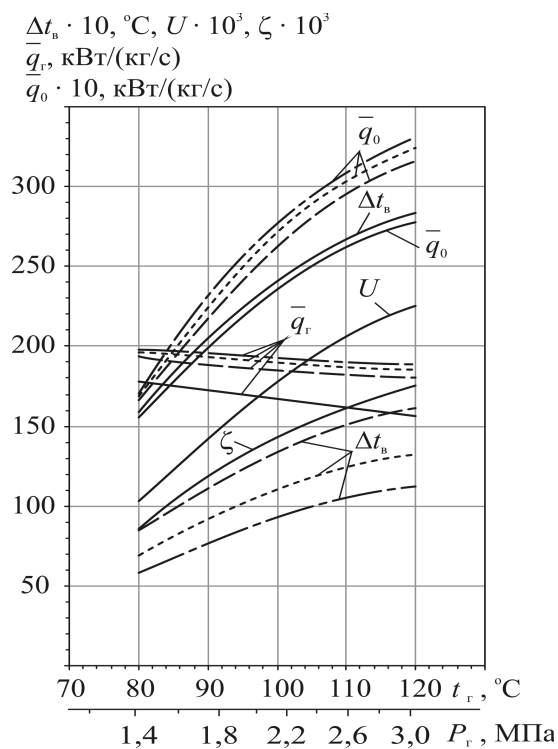
$$t_0 = 2 \text{ и } 5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

приведены на рис. 2.

В качестве НРТ в ТЭХМ применен хладон R142b.



а



б

Рис. 2. Удельные теплоты, отведенная от уходящих газов \bar{q}_a , и холодопроизводительность ТЭХМ \bar{q}_0 , снижение температуры Δt_b воздуха в охладителе на входе ТК ДГ в зависимости от температуры t_r и давления P_r кипения R142b в генераторе при коэффициентах влаговываждения ξ : — $\xi = 1,0$; - - - $\xi = 2,0$; - - - $\xi = 2,5$; - · - · - $\xi = 3,0$; а — $t_0 = 5 ^\circ\text{C}$; б — $t_0 = 2 ^\circ\text{C}$

Как видно, при $t_r = 120$ °С снижение температуры Δt_b воздуха в И-ВО наибольшее и составляет:

при $t_0 = 5$ °С: $\Delta t_b = 13, 16, 19$ и 33 °С при $\xi = 3,0; 2,5; 2,0$ и $1,0$ соответственно (рис. 2, а);

при $t_0 = 2$ °С: $\Delta t_b = 11, 13, 16$ и 28 °С (рис. 2, б).

Чем больше ξ , тем больше теплоты необходимо отвести от влажного воздуха и, следовательно, снижение его температуры Δt_b меньше.

Величина $\xi = 1$ соответствует охлаждению без влаговываждения.

Условия эксплуатации ДГ характеризуются суточными и сезонными колебаниями температуры $t_{нв}$ и относительной влажности $\phi_{нв}$ наружного воздуха (на входе ТК), что влияет на глубину охлаждения воздуха в И-ВО на входе ТК, соответственно и на термодинамическую эффективность ДГ (КПД и b_c). Изменение температуры $t_{нв}$, относительной влажности $\phi_{нв}$ и влагосодержания $d_{нв}$ наружного воздуха в течение 1.07...14.07.2009 в районе г. Одессы представлено на рис. 3.

Как видно, в течение суток имеют место существенные колебания температуры $t_{нв}$ и относительной влажности ϕ наружного воздуха, причем максимумам температур соответствуют минимумы влажности и наоборот. Наличие дневных и ночных противоположно направленных экстремумов $t_{нв}$ и ϕ , существование которых проявляется только при локальных во времени измерениях $t_{нв}$ и ϕ , создает благоприятные условия для большего снижения температуры воздуха на входе ТК ДГ днем (благодаря меньшей относительной влажности ϕ), когда имеет место значительное ухудшение термодинамической эффективности ДГ из-за повышенных тем-

ператур $t_{нв}$. В ночное время, когда $t_{нв}$ ниже и меньше потребность в охлаждении воздуха на входе ТК, снижение температуры воздуха также меньше из-за большей влажности ϕ .

При температуре кипения R142b в И-ВО $t_0 = 5$ °С с учетом минимальной разности температур между охлажденным воздухом и t_0 :

$$t_{b2} - t_0 = 8...10$$
 °С,

глубина охлаждения воздуха ограничивается температурой $t_{b2} = 15$ °С, а при $t_0 = 2$ °С – соответственно $t_{b2} = 10$ °С.

Значения снижения температуры воздуха Δt_b и его влагосодержания Δd , коэффициента влаговываждения ξ процессов охлаждения воздуха в И-ВО ТЭХМ от текущей $t_{нв}$ до $t_{b2} = 15$ °С (при $t_0 = 5$ °С) и $t_{b2} = 10$ °С (при $t_0 = 2$ °С) в течение 1.07...14.07.2009 приведены на рис. 4.

Как видно, значения коэффициента влаговываждения ξ в процессах охлаждения воздуха в И-ВО на входе ТК изменяется в диапазоне 1,5...2,0.

Повышенные ξ соответствуют большей влажности $\phi_{нв}$, т.е. в ночное время, когда и потребность в охлаждении воздуха меньше.

Как видно из рис. 4, снижение температуры воздуха на входе наддувочного ТК приводного двигателя ДГ в июле месяце составляет 10...20 °С, что значительно меньше ее величины (20...30 °С), достижимой исходя из получаемого в ТЭХМ холода (рис. 2 при $\xi = 1,5...2,0$). Охлаждение воздуха на входе ТК на 10...20 °С обеспечивает повышение КПД ДГ на 0,7...1,4 % с соответствующим сокращением удельного расхода топлива.

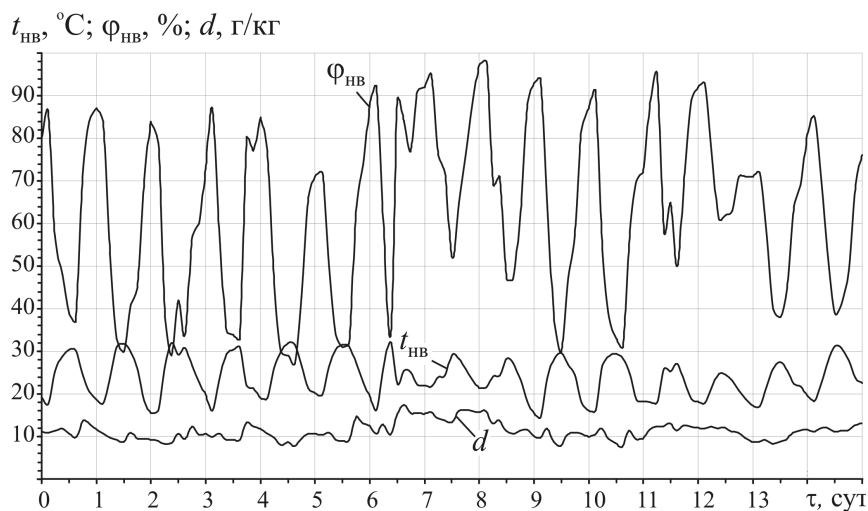


Рис. 3. Изменение температуры $t_{нв}$, относительной влажности $\phi_{нв}$ и влагосодержания $d_{нв}$ наружного воздуха в течение 1.07...14.07.2009

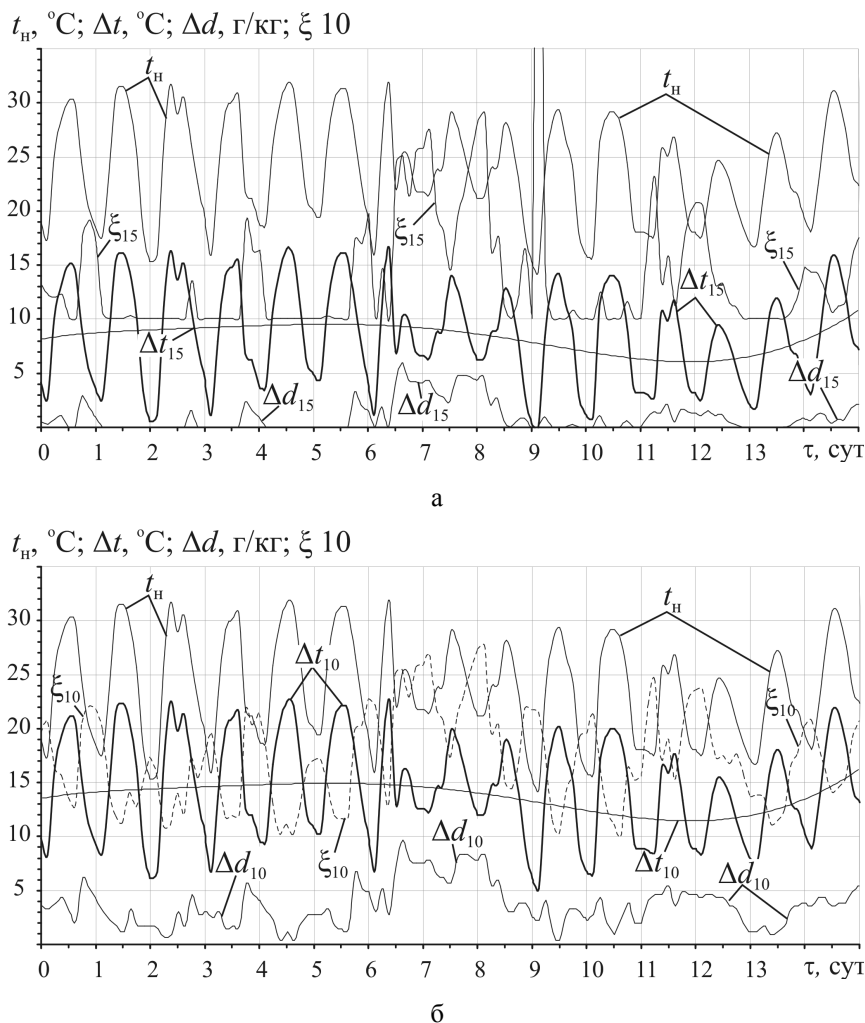


Рис. 4. Значения снижения температуры воздуха Δt и его влагосодержания Δd , коэффициента влаговываждения ξ в охладителе ТЭХМ на входе ТК с изменением температуры наружного воздуха $t_{нв}$ (1.07...14.07.2009): Δt_{10} и Δd_{10} ; Δt_{15} и Δd_{15} – при $t_{н2} = 15$ °C (а) и 10 °C (б)

Избыток холодопроизводительности ТЭХМ может быть использован как в рабочем цикле приводного двигателя ДГ (для охлаждения наддувочного воздуха), так и для внешнего по отношению к ДГ холодоснабжения, например, охлаждения воздуха в системах комфортного кондиционирования.

Выводы

Предложено использование теплоты уходящих газов ДГ для охлаждения воздуха на входе наддувочного ТК приводного двигателя с помощью ТЭХМ.

Применение ТЭХМ обеспечивает снижение температуры воздуха на 20...30 °C, что значительно превышает ее величину, рассчитанную исходя из климатических условий эксплуатации

ДГ и составляющую 10...20 °C в наиболее жаркие летние месяцы.

Литература

1. Influence of Ambient Temperature Conditions on Main Engine Operation: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2005.
2. Thermo Efficiency System (TES) for reduction of fuel consumption and CO₂ emission: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2005.
3. Суворов П.С. Управление режимами работы главных судовых двигателей / П.С. Суворов. – Одесса: ЛАТСТАР, 2000. – 238 с.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований по Гранту Президента Украины (проект № GP/F32/152).

Поступила в редакцию 17.05.2011

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

УТИЛИЗАЦІЯ ТЕПЛА ВІДХІДНИХ ГАЗІВ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА З ОХОЛОДЖЕННЯМ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ ПРИВОДНОГО ДВИГУНА

М.І. Радченко, А.В. Коновалов

Проаналізована ефективність використання тепла відхідних газів приводного двигуна дизель-генератора для охолодження зовнішнього повітря на вході наддувного турбокомпресора тепловикористовуючою ежекторною холодильною машиною на низькокиплячому робочому тілі, яка включає силовий і холодильний контури. Показана залежність теплового коефіцієнта та коефіцієнта ежекції, питомої холодопродуктивності холодильної машини та досяжного зниження температури повітря від температури кипіння низькокиплячого робочого тіла в силовому контурі машини. Значення зниження температури зовнішнього повітря на вході наддувного турбокомпресора приводного двигуна дизель-генератора розраховані з урахуванням зміни кліматичних умов експлуатації.

Ключові слова: дизель-генератор, утилізація теплоти, тепловикористовуюча ежекторна холодильна машина, низькокипляче робоче тіло, повітря на вході, відхідний газ.

UTILIZATION OF THE HEAT OF DIESEL-GENERATOR EXHAUST GASES FOR COOLING THE INTAKE AIR OF DRIVING ENGINE

N.I. Radchenko, A.V. Konvalov

The efficiency of utilizing the heat of exhaust gases of driving engine of diesel-generator to cool the ambient air at the inlet of discharge turbocompressor by waste heat recovery cooling machine on low boiling working fluid that includes power and cooling contours has been analyzed. It was shown the dependence of heat coefficient and coefficient of ejection, specific refrigeration capacity of waste heat recovery cooling machine and air temperature decrease from boiling temperature of low boiling working fluid in machine power contour. The values of ambient air temperature drop at the inlet of discharge turbocompressor of driving engine of diesel-generator for changing climate conditions of the performance were calculated.

Keywords: diesel-generator, heat utilization, waste heat recovery ejector cooling machine, low boiling working fluid, intake air, exhaust gas.

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

Коновалов Андрей Викторович – аспирант Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.