

**ZESZYTY NAUKOWE NR 1(73)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE**

EXPLO-SHIP 2004

Цезарь Бехрендт, Анатолий Моторный

**Влияние температуры окружающей среды на величину
эксергетического КПД главного двигателя**

Ключевые слова: судовые энергетические установки, главные двигатели,
КПД двигателя, температура окружающей среды

Принятый в прошлом столетии для оценки совершенства использования тепла в циклах ДВС термический КПД основан только первом законе термодинамики. Показано, что для проведения более полного термодинамического анализа необходимо использование показателей, учитывающих оба принципа термодинамики. В качестве такого показателя термического совершенства предлагается эксергетический КПД. Приведена методика определения значений эксергетического КПД главного двигателя, основанная на впервые полученных зависимостях, показано влияние на его величину температуры окружающей среды.

**The Influence of Ambient Temperature on the Efficiency Factor
of Main Engine Operation**

Key words: marine power plant, main engine, efficiency factor, ambient temperature

The factor of thermal efficiency, used for the assesment of the use of heat in the diesel engine working cycles, has been based on the the first law of thermodynamics only. This paper indicates the fact that to achieve more comprehensive thermodynamic analyses it is necessary to use factors based on the two laws of thermodynamics. One such factor herein proposed is the exoergic efficiency. The method for the determination of this factor for the main engine is presented. Original relations involving the exoergic efficiency are set out. The factor depends on the ambient temperature.

Введение

Результаты проведенного предварительного анализа показали, что наибольшее влияние на эксергетический КПД двигателя внутреннего сгорания оказывают потери тепла с выхлопными газами, в свою очередь зависящими от температуры окружающей среды.

На первом этапе анализа определению подлежали значения эксергетических потерь при полном уносе тепла выхлопных газов главного двигателя в окружающую среду, т.е., без утилизации их тепла.

Постановка задачи исследования

Эксергетические потери от передачи тепла уходящих газов главных двигателей окружающей среде зависят от температуры газов, их количества и температуры воздуха [1]:

$$P_{exg} = M_g \cdot [i_{g1} - i_{g2} - T_{os} \cdot (s_{g1} - s_{g2})] \text{ кВт}, \quad (1)$$

где:

- M_g – секундный расход выхлопных газов, кг/с;
- i_{g1}, i_{g2} – энтальпии выхлопных газов при температуре на выходе из двигателя и окружающей среды, кДж/кг;
- s_{g1}, s_{g2} – энтропии газов при тех же температурах, кДж/кг К;
- T_{os} – температура окружающей среды, К.

Для проведения более детального исследования уравнение (1) было представлено в виде суммы составляющих, отражающих влияние температур газов и воздуха на энтальпию и энтропию потока выхлопных газов. Приводя уравнение к 1 кг газов, можно получить выражение для проведения анализа влияния температур газов и воздуха на изменение значений удельных эксергетических потерь выхлопных газов, т.е.

$$\Delta ex_g = \Delta ex i_g - \Delta ex s_g \text{ кДж/кг газов}, \quad (2)$$

где:

- $\Delta ex i_g = (i_{g1} - i_{g2})$ – удельное изменение энтальпии выхлопных газов,
- $\Delta ex s_g = T_{os} \cdot (s_{g1} - s_{g2})$ – удельное (энтальпийное) изменение эксергии газов.

Основные расчетные уравнения

Проведенный по специально разработанному алгоритму, с использованием табличных данных [2], анализ показал, что влияние температур выхлопных газов на выходе из двигателя и воздуха на величину первой составляющей уравнения (2) может быть с большой степенью точности отражено корреляционным уравнением

$$\Delta ex_i_g = a \cdot (t_{g1} - t_{os}) + b \cdot (t_{g1}^2 - t_{os}^2) + c \cdot (t_{g1}^3 - t_{os}^3) \text{ кДж/кг г.} \quad (3)$$

Второе слагаемое уравнения (2), отражающее влияние указанных параметров на «энтропийную» часть удельных эксергетических потерь (кДж/кг г.), может быть представлено уравнением

$$\Delta ex_s_g = a + b \cdot t_{os} + c \cdot \ln t_{g1} + d \cdot t_{os}^2 + e \cdot (\ln t_{g1})^2 + f \cdot t_{os} \cdot \ln t_{g1} \quad (4)$$

Результаты суммирования составляющих уравнения (2), с использованием полученных корреляционных зависимостей (3, 4), дало возможность получить графики, отражающие характер изменения удельных эксергетических потерь выхлопных газов двигателя в зависимости от их температуры на выходе из двигателя и температуры окружающей среды, представленные на рис. 1.

Из рис. 1 следует, что с увеличением температуры окружающей среды величины эксергетических потерь от передачи тепла выхлопных газов значительно снижаются. Градиент падения значений эксергии колеблется в пределах от 10,9 до 15,5 кДж/кг на каждые 10°C снижения температуры воздуха. При этом большие значения соответствуют среднеоборотным двигателям, выхлопные газы которых имеют более высокую температуру.

Рассчитанные с использованием уравнения (2) значения удельных потерь эксергии и представленные на рис. 1 зависимости позволили перейти к нахождению общего корреляционного выражения, отражающего совместное влияние на величину потерь температур газов и воздуха. Указанное уравнение явилось одним из необходимых для построения функциональной математической модели машинно-двигательного комплекса судна.

На рис. 2 представлена полученная 3 – D зависимость. На основе обработки данных получено корреляционное уравнение, (при коэф. $r^2 = 0,999$ и ст. ошибке = 0,33):

$$\Delta ex_g = a + b \cdot t_{os} + c \cdot \ln t_{g1} + d \cdot t_{os}^2 + e \cdot (\ln t_{g1})^2 + f \cdot t_{os} \cdot \ln t_{g1} \text{ кДж/кг.} \quad (5)$$

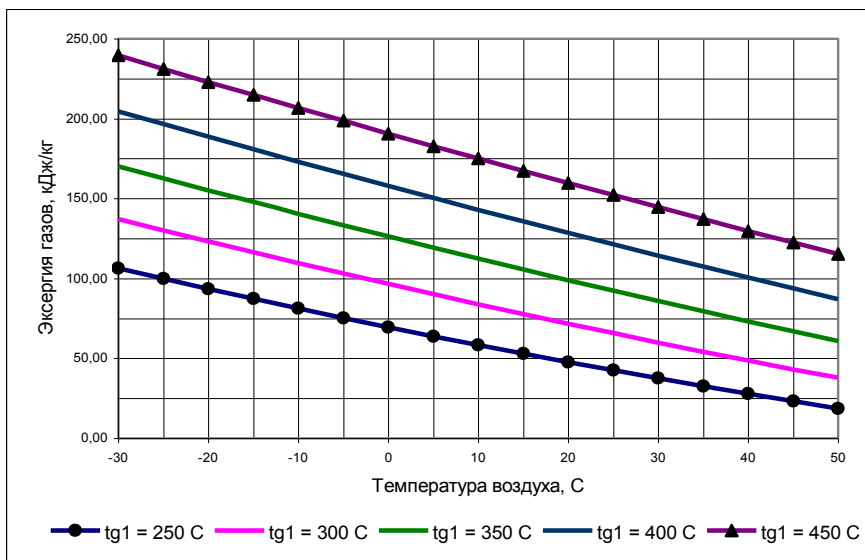


Рис. 1. Зависимость удельных эксергетических потерь тепла с выхлопными газами от температур газов и окружающей среды

Fig. 1. Dependence of the specific exoergic losses of heat from exhaust gases on the temperatures of the gases and surrounding atmosphere

Обращая внимание на вид криволинейной поверхности, представленной на рис. 2, можно отметить, что значения эксергетических потерь, имеющих место при передаче тепла выхлопных газов окружающей среде, резко увеличиваются при снижении температуры воздуха и повышении температуры выхлопных газов. Это дает основание полагать, что степень общего использования тепла топлива, сгораемого в цилиндрах ГД, т.е. эксергетический КПД, при этих значениях температур газов и воздуха будет иметь наименьшее значение.

Как известно, основные паспортные характеристики двигателя всегда даются в соответствии с условно принятыми, стандартными параметрами окружающей среды, и при этих условиях эксергетический КПД двигателей внутреннего сгорания численно равен его эффективному КПД [1]. В представляемом разделе исследований проведено сопоставление рассчитанных потерь эксергии во всем диапазоне принятых значений температур воздуха, с потерями, соответствующими стандартной температуре воздуха, т.е. произведено определение отклонений значений эксэргий:

$$\Delta ex_{gst} = \Delta ex_g - \Delta ex_{g20} \quad \text{кДж/кг газов.} \quad (6)$$

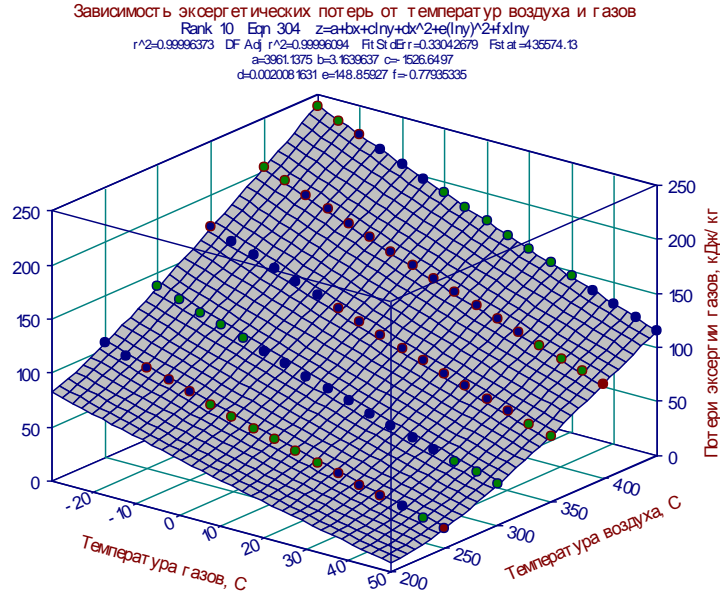


Рис. 2. 3- D зависимость удельных эксергетических потерь передачи тепла выхлопных газов двигателя от температур газов и воздуха
 Fig. 2. Specific exoergic losses in exhaust gases of the main engine as a 3D function of gas and air temperatures

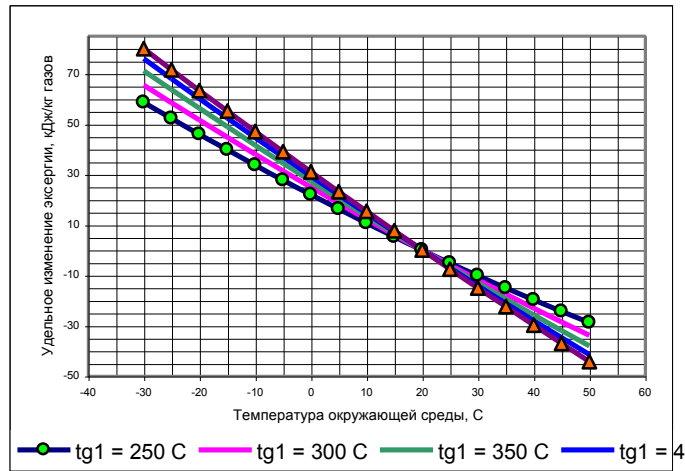


Рис. 3. Зависимость отклонений удельных эксергетических потерь от температур газов и воздуха (по отношению к 20°C)
 Fig. 3. Dependence of deflections of specific exoergic losses on the temperatures of gases and air (to 20°C)

На рис. 3 представлены графики зависимостей, полученных в результате вычитания «стандартных потерь эксергии», соответствующих $t_{OS} = 20^{\circ}\text{C}$, из рассчитанных при помощи уравнения (5).

Как видно из рис. 3 отклонения значений потерь эксергии с выхлопными газами при различных температурах газов и воздуха по сравнению с потерями при «стандартной температуре» достигают значительных величин. Например, при температуре воздуха -30°C это отклонение колеблется от $\sim +60$ до $\sim +80$ кДж/кг газов (большие значения соответствуют среднеоборотным двигателям). В свою очередь при работе в тропических условиях это отличие составляет от -28 до -44 кДж/кг газов при меньших отклонениях значений от стандартных для малооборотных двигателей.

Обработка рассчитанных значений отмеченными ранее методами позволила получить корреляционное уравнение, отражающее связь отклонений значений удельных эксергетических потерь при передаче тепла выхлопных газов окружающей среде от температур воздуха и газов. Полученное уравнение (7) имеет вид:

$$\Delta ex_{gst} = \frac{a + ct_{os} + et_{g1} + gt_{os}^2 + it_{g1}^2 + k \cdot t_{g1}t_{os}}{1 + bt_{os} + dt_{g1} + ft_{os}^2 + ht_{g1}^2 + j \cdot t_{os}t_{g1}} \quad (7)$$

и представлено в виде плоскости значений на рис. 4.

Учитывая приведенные соотношения, можно на основе полученного уравнения определить отклонения реальных значений эксергетического КПД главного двигателя – показателя термодинамического совершенства, от его номинального эффективного КПД в зависимости от параметров окружающей среды. В этом случае будут учтены реальные возможности использования располагаемого тепла сгоревшего топлива по отношению к температуре окружающей среды. Потери тепла в окружающую среду с охлаждающей водой, так же как излучение тепла ГД, на этом этапе анализа принимались независимыми от температуры воздуха.

Выражения для определения эксергетических КПД для каждого случая можно представить в виде

$$\eta_{TC.t} = 1 - \Omega_{g.t} - \Omega_w - \Omega_r \quad \text{и} \quad \eta_{TC.i} = 1 - \Omega_{g.i} - \Omega_w - \Omega_r ,$$

где:

$\Omega_{g.t}$ и $\Omega_{g.i}$ – относительные эксергетические потери тепла выхлопных газов окружающей среде с ее температурами равными 20°C и t_i ;

Ω_w и Ω_r – относительные эксергетические потери с охлаждающей водой и при излучении тепла в окружающую среду.

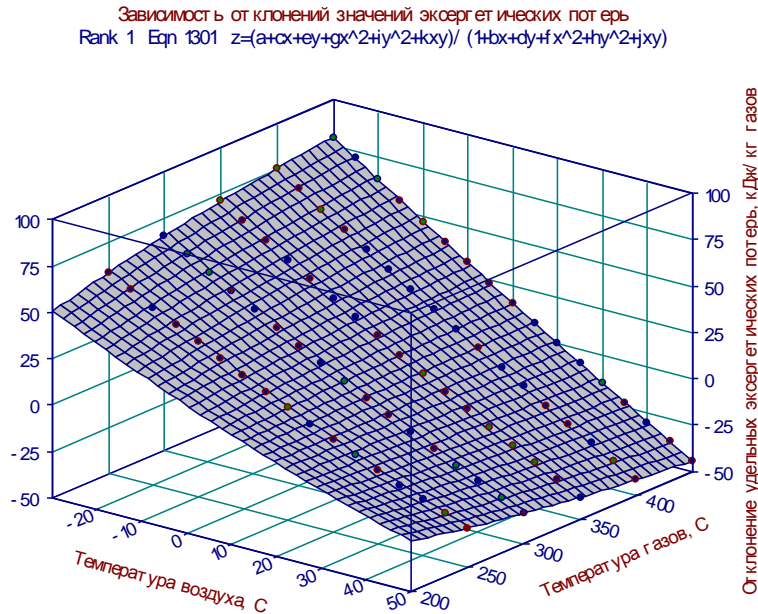


Рис. 4. Зависимость отклонений удельных эксергетических потерь от температур газов и воздуха (по отношению к 20°C)

Fig. 4. Dependence of deflections of specific exoergic losses on the temperatures of gases and air (to 20°C)

При переходе от значений эксергетических потерь к изменению КПД главного двигателя использовалось полученное на основе анализа теплового баланса ГД [3] выражение

$$\Omega_g = \frac{\Pi_g}{\mathcal{E}_{ex}} \text{ и } \Delta\Omega_g = \frac{\Delta\Pi_g}{\mathcal{E}_{ex}} ;$$

где:

\mathcal{E}_{ex} – теплота сгорания кг топлива, равная, Q_n^p .

С учетом изложенного выражение для определения изменений эксергетического КПД будет иметь вид

$$\Delta\eta_{TC} = -\Delta\Omega_g = -\frac{\Delta ex_{gst} \cdot m_g}{Q_n^p} . \quad (8)$$

Результаты анализа и выводы

В частности, для иллюстрации возможностей анализа влияния температуры воздуха на изменения значений отклонений показателя термодинамического совершенства ГД от эффективного КПД были проведены сопоставительные расчеты. Для сравнения был принят вариант ГД, работающего с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 3,0$, и использующего топливо с теплотой сгорания равной 41 000 кДж/кг т. Результаты расчетов приведены на рис. 5.

Из представленного рис. 5 видно, что эксергетический КПД, отражающий степень использования тепла в конкретных условиях окружающей среды будет тем сильнее отличаться от эффективного КПД двигателя, отражающего совершенство его цикла, чем больше температура окружающей среды отличается от стандартной.

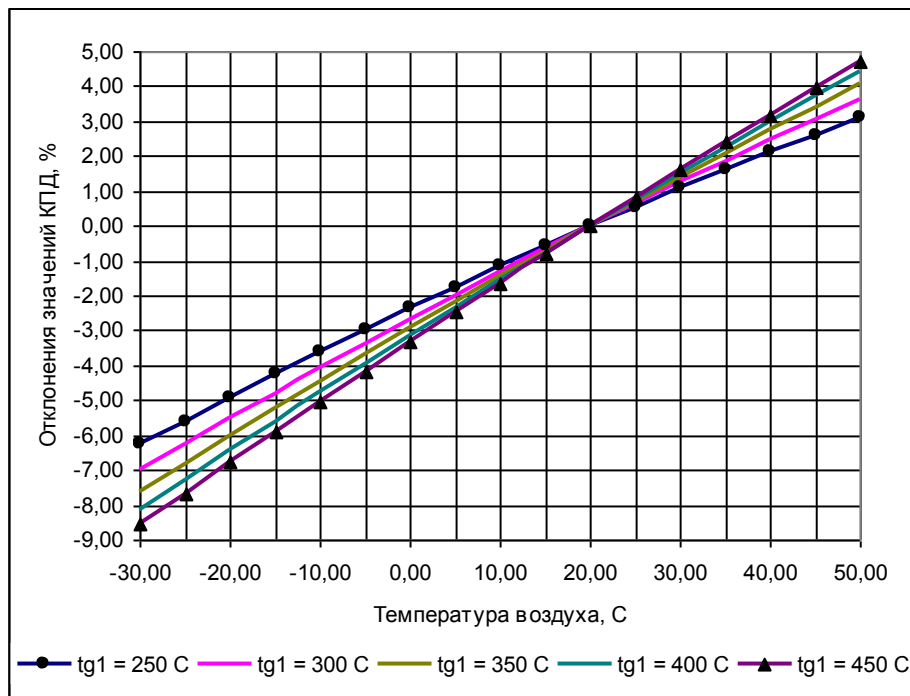


Рис. 5. Разница значений эксергетического и эффективного КПД ГД в зависимости от температур выхлопных газов и воздуха

Fig. 5. The difference in the importance of exoergic losses and efficiency of the main engine as the function of exhaust gases and air temperatures

При этом с понижением температуры воздуха теоретические возможности использования располагаемого теплоперепада увеличиваются, однако полезно используемая доля тепла не меняется, что и приводит к понижению эксергетического КПД. Для среднеоборотных двигателей при повышенных значениях температур выхлопных газов это снижение может достигать 9%.

При работе ГД в тропических условиях эксергетические потери располагаемого тепла выхлопных газов уменьшаются, что приводит к повышению эксергетического КПД двигателя.

В определенном смысле полученные величины отклонений дают представления о возможных пределах повышения степени использования располагаемого тепла выхлопных газов ГД при его работе в составе комплекса, предназначенного для комбинированной выработки механической и тепловой энергий.

Литература

1. Гохштейн Д.П., *Современные методы термодинамического анализа энергетических установок*, - М, Энергия, 1969. -367с.
2. Ривкин С.Л., *Термодинамические свойства газов*, -М.: Энергия, 1998. – 298 с.
3. Бехрендт Ц., Моторный А., *Термодинамический анализ использования тепла в комбинированных энергетических установках*, КГТУ, Международный сборник научных трудов «Повышение эффективности работы энергетических установок. – Калининград.: 2002 г. 38 – 49 с.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.

Recenzenci

dr hab. inż. Benedykt Litke, prof. PS

dr hab. inż. Zbigniew Matuszak, prof. AM

Adresy Autorów

dr inż. Cezary Behrendt
Akademia Morska w Szczecinie,
Instytut Technicznej Eksploatacji
Siłowni Okrętowych
ul. Wały Chrobrego 1/2
70-500 Szczecin

doc. dr inż. Anatoly Motorny
KPI, Instytut Dyscyplin
Ogólnotechnicznych
ul. Emelyanowa 203
236000 Kaliningrad, Rosja