

управлять утилизации сбросной теплоты судовых дизелей с применением термоэлектрических генераторов.

Список литературы

1. Официальный сайт РМРС, раздел «Регистровая книга судов». URL: <http://www.rs-head.spb.ru/ru/regbook>.
2. Руководящий технический материал (РТМ 212.0142-86). Схемы утилизации теплоты судовых дизелей. Л. : Транспорт, 1989. 42 с.
3. Манасян Ю. Г. Судовые термоэлектрические устройства и установки. Л. : Судостроение, 1988. 320 с.
4. Пат. на полезную модель RU 108 214 U1. Устройство для утилизации теплоты отработавших газов в судовых энергетических установках / С. В. Виноградов, К. Р. Халыков, К. Д. Нгуен и др.; опуб. 10.09.2001, Бюл. № 25.
5. <http://kryotherm.ru>.
6. Виноградов С. В., Халыков К. Р., Нгуен К. Д. Методика расчета и оценки параметров экспериментального термоэлектрического генератора // Вестник Астраханского гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2011. № 1. С. 84–91.
7. Термоэлектрические модули и устройства на их основе. Справочное пособие. – СПб. : ИПФ «Криотерм», 2004. 53 с.

УДК 621.431.74.068.4:662.76

РАСЧЕТ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА, РАБОТАЮЩЕГО ОТ ТЕПЛОТЫ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

С. В. Виноградов, Т. В. Хоменко***

**Астраханский государственный технический университет*

***Астраханский государственный
архитектурно-строительный университет*

Создание новых материалов, развитие нанотехнологий и прочие достижения в области термоэлектричества возобновили интерес к генерированию электрической энергии и применению термоэлектричества. В данной работе предложен алгоритм расчета эксплуатационных характеристик.

Ключевые слова: сбросная теплота, термоэлектрические генераторы, судовые энергетические установки.

The creation of new materials, the development of nanotechnology and other achievements in the field of thermoelectricity renewed interest in the generation of electricity and the use of thermoelectricity. The algorithm of calculation of operational characteristics is offered in this work.

Keywords: waste heat, thermoelectric generators, ship power plants.

Введение

В настоящее время общий объем от реализации термоэлектрических устройств составляет более 3 млрд долл. В таблице 1 представлены данные по разработке гибридных установок, состоящих из ДВС (двигатель внут-

ренного сгорания) и ТЭГ (термоэлектрический генератор): дополнительная выработка электроэнергии дает определенную экономию, что позволяет снизить расход топлива.

Таблица 1

Разработка гибридных установок компаниями

Компания	Двигатели внутреннего сгорания (ДВС)	Термоэлектрического генератора (ТЭГ)	Эффективность ТЭГ
BMW AG	+	+	до 10 %
General Motors	+	+	до 10 %
Komatsu	+	+	до 7,2 %

Постановка задачи. В научной литературе многие работы посвящены расчету термоэлектрических устройств. В работе [1] рассматриваются этапы моделирования ТЭГ и определение электрических параметров устройств, зависящих от количества теплоты. В работе [2] решена задача оптимизации параметров при расчете ТЭГ. В работе [3] представлена модель ТЭГ генерирования энергии как тепловой, так и электрической. Однако в проанализированных работах ТЭГ – источник электрической энергии. Такая унифицированность позволяет определять оптимальные условия работы ТЭГ, учитывая их функциональные назначения, но не позволяет определять эксплуатационные характеристики, в частности, температуру спаев ТЭГ, что является необходимым на определенных этапах проектирования.

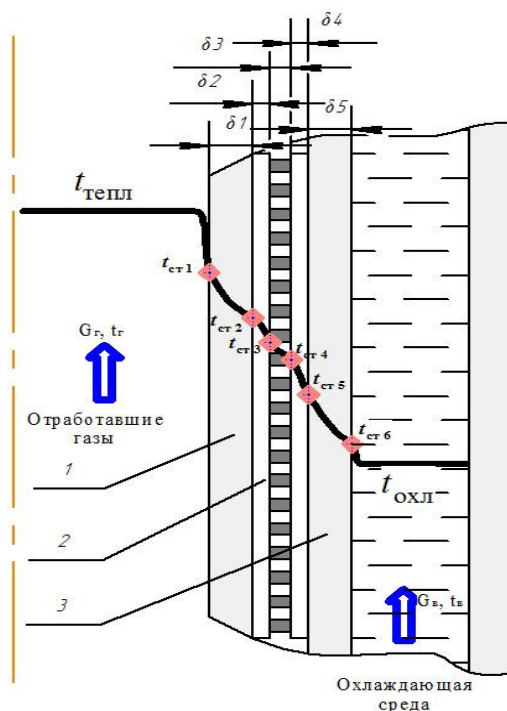


Рис. 1. Характер изменения температуры через слои ТЭГ: 1 – стенка горячего узла; 2 – термоэлектрический модуль ТГМ-287-1,0-1,5; 3 – стенка холодного узла

Методы и результаты исследования. Для расчета тепловых и электрических эксплуатационных характеристик ТЭГ используется математический аппарат описания процессов теплопередачи.

Для простоты расчета приняты круглые сечения узлов ТЭГ, площади которых эквивалентны площадям соответствующих шестиугольных сечений узлов ТЭГ. Горячий и холодный узлы выполнены из одного материала (рис. 1).

Расчет теплоотдачи горячего теплоносителя

Таблица 2

Данные для расчета

Площадь поперечного сечения газохода	$F_r = \frac{a^2 3\sqrt{3}}{2}, (м^2)$	a – размер грани стенки горячего узла, м.
Эквивалентный диаметр газохода	$d_{экви} = \frac{4F_r}{6a}, (м)$	
Скорость газа в экспериментальном участке	$\omega_r = \frac{G_r}{\rho_r \cdot F_r}, (м/с)$	G_g – расход горячего теплоносителя (кг/с) ρ_g – плотность теплоносителя при температуре $t_{ср}$ (кг/м ³)

Поскольку средняя температура воды в ТЭГ вычисляется по формуле:

$$t_{вср} = \frac{t_{в1} + t_{в2}}{2}, (°C)$$

где $t_{в1}, t_{в2}$ – температура воды на входе и выходе ТЭГ соответственно, средний логарифмический температурный напор вычисляется:

$$\Delta t_{ср} = \frac{(t_{г1} - t_{в1}) - (t_{г2} - t_{в2})}{\ln\left(\frac{t_{г1} - t_{в1}}{t_{г2} - t_{в2}}\right)}, (°C)$$

Температура стенки горячего/холодного узла в первом приближении определяется по формулам:

$$t_{ст1} = t_{гср} - \frac{\Delta t_{ср}}{2}, (°C) \quad t_{ст6} = t_{вср} + \frac{\Delta t_{ср}}{2}, (°C)$$

Поэтому суммарный коэффициент теплоотдачи для газа:

$$\alpha_r = \alpha_{гк} + \alpha_{гл}, \left(\frac{Вт}{м^2 \cdot К}\right)$$

где коэффициент теплоотдачи излучением для горячего теплоносителя:

$$\alpha_{гл} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon \cdot \frac{(t_{гср} + 273)^4 - (t_{ст1} + 273)^4}{t_{гср} - t_{ст1}}, \left(\frac{Вт}{м^2 \cdot К}\right)$$

Расчет теплоотдачи холодного теплоносителя

Таблица 3

Данные для расчета

Расход воды	$G_B = \frac{G_r \cdot c_{pr} \cdot (t_{r1} - t_{r2})}{c_{pb} \cdot (t_{b2} - t_{b1})}, \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right)$	Уравнение теплового баланса
Площадь поперечного сечения	$F_B = \frac{3\sqrt{3}(c^2 - b^2)}{2}, (\text{м}^2)$	b – размер грани стенки холодного узла (м); c – размер грани кожуха (м)
Эквивалентный диаметр площади поперечного сечения	$d_{\text{эквв}} = \frac{4F_B}{\Omega}, (\text{м})$	$\Omega = 6(b + c)$ – периметр рубашки охлаждения (м)
Скорость воды	$\omega_B = \frac{G_B}{\rho_B \cdot F_B}, (\text{м/с})$	ρ_B – плотность воды при $t_{вср}$ (кг/м^3)
Число Рейнольдса для воды	$Re_B = \frac{\omega_B \cdot d_{\text{эквв}}}{\nu_B}$	ν_B – кинематическая вязкость воды при $t_{вср}$ ($\text{м}^2/\text{с}$)
Число Грасгофа	$Gr_B = \frac{9,8 \cdot \beta \cdot (t_{ст6} - t_{вср}) \cdot L^3}{\nu_B^2}$	β – коэффициент объемного расширения воды при $t_{вср}$ (1/К)

Поскольку, число Нуссельта зависит от режима течения воды, тогда возможны следующие случаи.

1. $Re_B \leq 2000$, число Нуссельта при ламинарном режиме определяется по формуле:

$$Nu_B = 0,15 \cdot Re_B^{0,33} \cdot Pr_B^{0,43} \cdot Gr_B^{0,1} \cdot \left(\frac{Pr_B}{Pr_{B6}} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_{Iв}$$

где Pr_B / Pr_{B6} – число Прандтля воды при температуре $t_{вср} / t_{ст6}$; $\varepsilon_{Iв}$ – средний поправочный коэффициент, зависящий от отношения $L/d_{\text{эквв}}$.

2. $Re_B \geq 104$, число Нуссельта при турбулентном режиме определяется по формуле:

$$Nu_B = 0,021 \cdot Re_B^{0,8} \cdot Pr_B^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_B}{Pr_{B6}} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_{Iв}$$

3. $2000 \leq Re_B \leq 104$, число Нуссельта при переходном режиме определяется по формуле:

$$Nu_B = K_0 \cdot Pr_B^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_B}{Pr_{B6}} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_{Iв}$$

Тогда теплоотдача по воде вычисляется следующим образом:

$$\alpha_B = \frac{Nu_B \cdot \lambda_B}{d_{\text{эквв}}}, \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right)$$

где λ_B – коэффициент теплопроводности воды при температуре $t_{вср}$ ($\text{Вт/м}\cdot\text{К}$).

Данные для расчета

Температура горячего спая	$T_r = t_{ст3} + 273$, (К)	
Температура холодного спая	$T_x = t_{ст4} + 273$, (К)	
Средняя температура между спаями	$T_{cp} = \frac{T_r + T_x}{2}$, (К)	
Коэффициент Зеебека	$E_1 = 2 \cdot N \cdot e$, (В/К)	N – количество термоэлектрических пар в модуле; e – коэффициент Зеебека термоэлемента (В/К)
Коэффициент Зеебека модулей	$E = n \cdot E_1$, (В/К)	n – количество модулей

Поскольку, перепад температуры между спаями (холодный/горячий):

$$\Delta T = T_r - T_x, \text{ (К)}$$

Учитывая следующие величины:

Сопротивление модуля	$R_{mod} = 2 \cdot N \cdot \rho \cdot \gamma$ (Ом)	ρ – удельное электрическое сопротивление термоэлемента (Ом.м);
Геометрический фактор термоэлемента	$\gamma = \frac{\delta_3}{a_3^2}$, (м ⁻¹)	a_3 – сторона поперечного сечения термоэлемента (м)
Сопротивление модулей	$R_m = n \cdot R_{mod}$ (Ом)	
Коэффициент нагрузки	$m = \frac{R_n}{R_m}$	R_n – сопротивление нагрузки (Ом)
Сила тока в цепи	$I = \frac{E \cdot \Delta T}{R_m \cdot (1 + m)}$, (А)	
Напряжение на нагрузке	$U = E \cdot \Delta T \cdot \frac{m}{1 + m}$, (В)	
Мощность внешней цепи	$P = I \cdot U = \frac{E^2 \cdot \Delta T^2}{R_m} \cdot \frac{m}{(1 + m)^2}$	

Имеем КПД термоэлектрического генератора:

$$\eta = \frac{T_r - T_x}{T_r} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{m} + \frac{1}{Z \cdot T_r} \cdot \frac{(m+1)^2}{m} - \frac{1}{2} \cdot \frac{T_r - T_x}{T_r} \cdot \frac{1}{m}}$$

Тогда, электрическая мощность, отдаваемая потребителю:

$$P_{ном} = P - P_{насос}$$

где $P_{насос}$ – мощность, затрачиваемая на прокачку охлаждающей воды.

Заключение

Расчет эксплуатационных характеристик проводится методом последовательных приближений с использованием уточненного алгоритма, в котором происходит постоянное уточнение значений эксплуатационных характеристик с учетом изменения температуры. Схема алгоритма расчета показана на рис. 2.

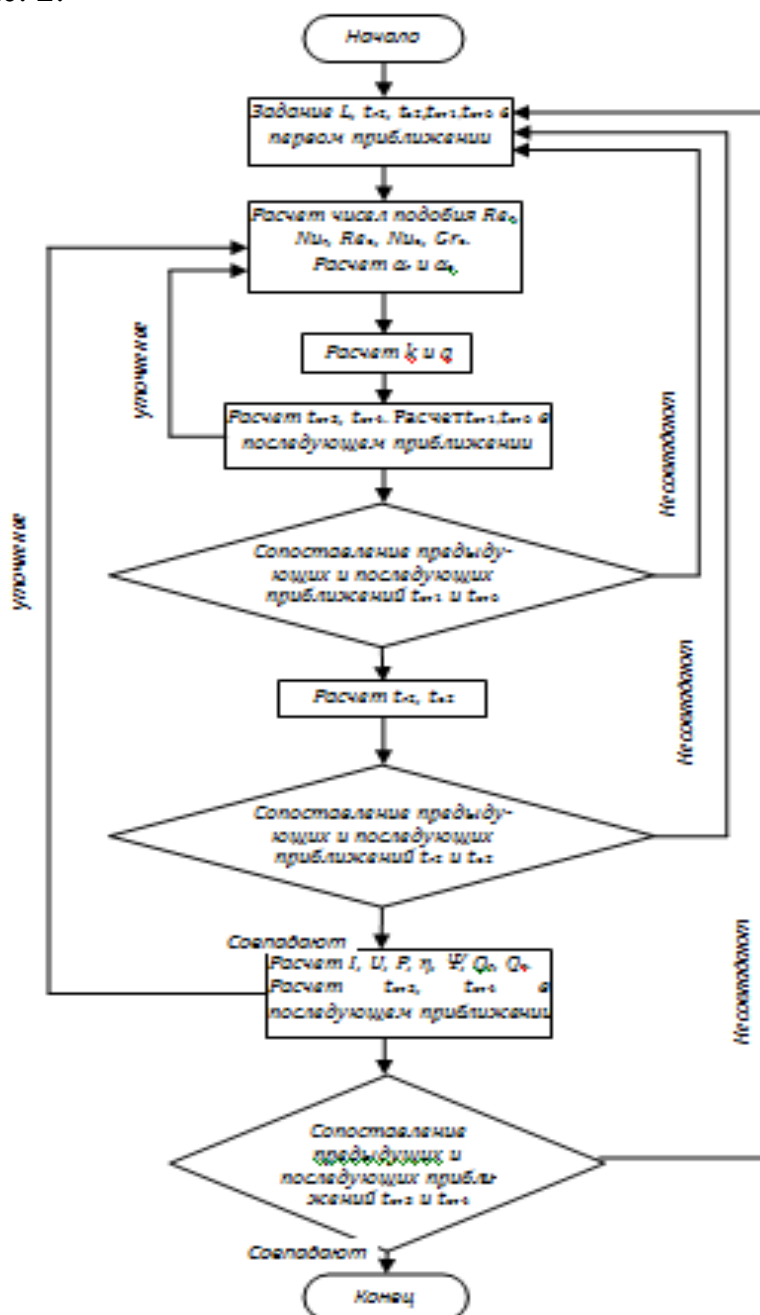


Рис. 2. Схема алгоритма расчета эксплуатационных характеристик ТЭГ

Поскольку, в процессе работы уточняются параметры теплоносителей, следовательно, изменяются их средние температуры и, как следствие, теплофизические свойства теплоносителей. Кроме того, при расчете учитываются теплофизические и электрические характеристики термоэлек-

трического материала. Методика расчета эксплуатационных характеристик ТЭГ может быть использована для дальнейших разработок ТЭГ, включая моделирование различных конфигураций теплообменных аппаратов.

Список литературы

1. Bitschi A. Modelling of thermoelectric devices for electric power generation : dissertation submitted to the Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2009. 144 p.
2. Cobble M. H. Calculations of Generator Performance // CRC Handbook of thermoelectric. 1995. Chapter 39.
3. Михайловский В. Я., Струтинская Л. Т., Чайковская Е. В. Моделирование термоэлектрической системы генерирования тепловой и электрической энергии // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2005. № 4. С. 27–30.
4. <http://kryotherm.ru>.
5. Термоэлектрические генераторы / А. С. Охотин, А. А. Ефремов, В. С. Охотин, А. С. Пушкарский. М. : Атомиздат, 1971. 287 с.
6. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача : учеб. для вузов. М. : Энергия, 1975. 488 с.
7. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. М. : Атомиздат, 1979. 416 с.
8. Манасян Ю. Г. Судовые термоэлектрические устройства и установки. Л. : Судостроение, 1988. 320 с.
9. <http://www.ecomash.ru>.
10. Термоэлектрические модули и устройства на их основе: Справочное пособие / ОАО «Криотерм». – 53 с.
11. Кириллин В. А., Сычев В. В., Шейндлин А. Е. Техническая термодинамика. М. : Энергоатомиздат, 1983. 407 с.