ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

УДК 621.362+629.5.064
EDN: AJXVWX

Р.О. Голубев[1], С.П. Столяров[2]
[1] АО «Центральное морское конструкторское бюро «Алмаз», Санкт-Петербург, Россия
[2] ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВОГО УТИЛИЗАЦИОННОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

Объект и цель научной работы. Объектом являются генераторы из состава судовой термоэлектрической системы глубокой утилизации теплоты (СГУТ). Цель – разработка универсальной математической модели для методики проектирования судовых утилизационных термоэлектрических генераторов (ТЭГ).

Материалы и методы. Анализ известных подходов к расчету и проектированию ТЭГ различного назначения; представление термоэлектрических модулей генератора термоэлементами с условными термоэлектрическими свойствами; деление генератора на элементарные участки, рассчитываемые методом последовательных приближений на режим холостого хода и генераторный режим; тепловой расчет режима холостого хода ε-NTU методом.

Основные результаты. Сформулированы основные особенности, которыми должна обладать методика проектирования судовых ТЭГ. Разработана полезная модель унифицированного утилизационного термоэлектрического генератора морского исполнения, соответствующая установленным ограничениям проектирования. Для разработанной конструкции генератора, предназначенной для утилизации тепловых потерь как с газообразной, так и с жидкой рабочей средой, предложена математическая модель проектного расчета.

Заключение. Опыт освоения ТЭГ подтверждает перспективность их применения для утилизации тепловых потерь судовой энергетической установки (СЭУ) с различным тепловым потенциалом. Статическое преобразование энергии в генераторах для различных рабочих сред СЭУ обуславливает широкие возможности по их унификации. Рабочие процессы в судовых утилизационных ТЭГ различного назначения могут быть описаны обобщенной математической моделью, а их проектирование реализуемо в рамках универсальной методики.

Ключевые слова: ε-NTU метод, судовая энергетическая установка, теплообменный аппарат, термоэлектрическая сборка, термоэлектрический генератор, термоэлектрический модуль, термоэлектрический слой, условные термоэлектрические свойства.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

SHIP DESIGN AND STRUCTURE

UDC 621.362+629.5.064
EDN: AJXVWX

R.O. Golubev[1], S.P. Stolyarov[2]
[1] JSC Almaz Marine Design Bureau, St. Petersburg, Russia
[2] St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

MATHEMATICAL MODEL FOR DESIGN OF SHIP WASTE-HEAT THERMOELECTRIC GENERATOR

Для цитирования: Голубев Р.О., Столяров С.П. Математическая модель обеспечения проектирования судового утилизационного термоэлектрического генератора. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 4(410): 97–104.

For citations: Golubev R.O., Stolyarov S.P. Mathematical model for design of ship waste-heat thermoelectric generator. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 4(410): 97–104 (in Russian).

Object and purpose of research. The object of this investigation is generators of the ship thermoelectric system of deep waste-heat recovery. The purpose is to develop a universal mathematical model for design of ship waste-heat thermoelectric generators (TEG).
Materials and methods. Analysis of known approaches to calculation and design of TEGs for different purposes; representation of thermoelectric generator modules by thermal elements with effective thermoelectric properties; division of the generator into elementary units calculated by successive approximations for idle running and generator mode; thermal calculation for idling mode using the ε-NTU method.
Main results. Main features of the design procedure for ship TEGs are formulated. A utility model of the unified marine waste heat thermoelectric generator has been developed within pre-defined design constraints. A mathematical model is suggested for design calculation of the generator intended to recover waste heat of both gaseous and liquid fluids.
Conclusion. Practical application of TEGs provides evidences that this technology is efficient in recovery of waste heat from the marine power plant of different heat potential. The static conversion of power in generators from various working fluids handled by the marine power plant offers broad opportunities for unification. The working processes of various waste-heat TEGs can be described by a general mathematical model and their design can be proceeded within the framework of a general methodology.
Keywords: ε-NTU method, marine power plant, heat exchanger, thermoelectric assembly, thermoelectric generator, thermoelectric module, thermoelectric layer, effective thermoelectric properties.
The authors declare no conflicts of interest.

Введение
Introduction

Термоэлектрический генератор представляет собой устройство для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую за счет свойств термоэлектриков, применяемых в его конструкции. По эффективности преобразования тепловой энергии в электрическую современные опытные образцы ТЭГ, в частности автомобильные [1], приближаются к применяемым на судах системам глубокой утилизации теплоты и не уступают им по возможностям выработки тепловой энергии для общесудовых потребителей.

Для начала внедрения в судостроительной индустрии энергетических установок, оснащенных ТЭГ, требуются методологии проектирования и методики расчета, наличие которых позволит определить нишу для их применения и количественно обосновать эффективность предлагаемых решений.

На современном этапе развития техники и технологии простота конструкции и компактность ТЭГ позволяют обеспечить утилизацию тепловых потерь в энергетических установках различного назначения. Отраслью с энергетическим оборудованием, близким по параметрам к судовому, в которой ТЭГ получили широкое распространение, является автомобилестроение.

При решении задач проектирования ТЭГ применяются различные подходы. Малые габариты ТЭГ, прежде всего автомобильных, позволяют проводить множественные натурные испытания [2–4]. Предложены методики расчета, предполагающие разбиение ТЭГ на укрупненные элементы либо расчет его участков по осредненным параметрам [5–7]. Решается задача оптимизации использования термоэлектрических материалов в составе ТЭГ [8, 9].

В работе [2] описан процесс проектирования термоэлектрической системы утилизации теплоты, установленной на автомобиль-тягач и прошедшей стендовые испытания. Показано, что система может включать несколько ТЭГ (на участке рециркуляции отработавших газов и за системой их очистки) и что в составе ТЭГ могут использоваться термоэлектрические модули (ТЭМ), находящиеся в промышленном производстве.

Авторами работы [3] экспериментально доказана возможность обеспечения существенно большей производительности ТЭГ, утилизирующего теплоту отработавших газов парового котла, при замене воздушного охлаждения на водяное.

В рамках исследований, описанных в [4], сначала были самостоятельно изготовлены ТЭМ с различными размерами конструктивных элементов и опытным путем определены оптимальные, а затем на базе этих модулей изготовлен ТЭГ и проведены его испытания. Показано существенное влияние применения термопасты, наносимой на основания ТЭМ, прилегающие к теплообменным аппаратам (ТА), на производительность генератора и указано на возможность снижения прижимного усилия, которое требуется создавать в конструкции ТЭГ, при ее применении.

В работе [5] предложена математическая модель поэлементного расчета ТЭГ, которая предполагает разделение генератора с сонаправленными каналами охладителя и нагревателя на участки вдоль потока горячей среды. Длина каждого участка равна длине канала ТА, приходящейся на один ряд термоэлектрических ветвей ТЭМ.

В [6] математической моделью в качестве элементарного участка используется объем ТЭГ, приходящийся на одну термопару ТЭМ. Авторы использовали математическую модель для расчета ТЭМ, утилизирующего теплоту солнечной радиации. Расчеты показали, что стоимость электроэнергии, вырабатываемой ТЭГ, получается несколько выше вырабатываемой фотоэлектрическим генератором, однако по массогабаритным показателям ТЭГ оказывается на порядки лучше.

В работе [7] выведены формулы оптимального нагрузочного коэффициента и соотношения теплопроводностей прочих элементов конструкции ТЭГ и его термоэлектрического слоя (ТЭС) для различных режимов работы: при постоянной разности температур сред, при постоянном тепловом потоке, при постоянном тепловом потоке и наличии тепловых потерь, при переменных температурах сред и постоянной разности температур сред на входе. К перечисленным случаям могут быть приведены малые участки ТЭГ, способ применения зависимостей для оптимизации ТЭГ в целом в работе не представлен.

Судовые ТЭГ должны перерабатывать существенно большие тепловые потоки, чем генераторы наземного транспорта, что сопряжено с большим расходом дорогостоящего термоэлектрического материала на один агрегат. Поэтому оптимизация массы используемого термоэлектрического материала – это важная задача, которую нужно решать в ходе проектирования.

В работе [8] подобная задача решалась для ТЭГ морского нефтедобычного сооружения, утилизирующего теплоту перекачиваемой нефти. Определено количество ТЭМ на 1 п.м. длины трубы, обеспечивающее максимизацию вырабатываемой мощности. В [9] предложена последовательность применения оптимизационных алгоритмов для определения количества ТЭМ в рядах ТЭС генератора, утилизирующего теплоту газообразной горячей среды.

На основании анализа рассмотренных публикаций возможно сделать вывод, что методика проектирования судового ТЭГ должна обладать следующими особенностями:

- позволять проектировать прежде всего утилизационные ТЭГ, т.к. в настоящее время в машиностроении утилизация теплоты – это основная область применения термоэлектрической генерации;
- обеспечивать возможность расчета утилизации теплоты от большинства из источников бросового тепла в составе СЭУ, т.к. многократно подтверждена эффективность применения ТЭГ для утилизации теплоты как жидких, так и газообразных сред;
- обеспечивать эффективную работу за счет жидкостного охлаждения;
- необходимая точность расчета судовых ТЭГ достигается ведением расчета по элементарным участкам;
- существенно большее количество ТЭМ в одном ТЭС позволяет увеличить размеры элементарного участка до приходящихся на один модуль;
- обеспечивать возможность расчета генератора, оснащенного ТЭМ, находящимися в промышленном производстве;
- уделять внимание оптимальному размещению фабричных ТЭМ внутри ТЭС.

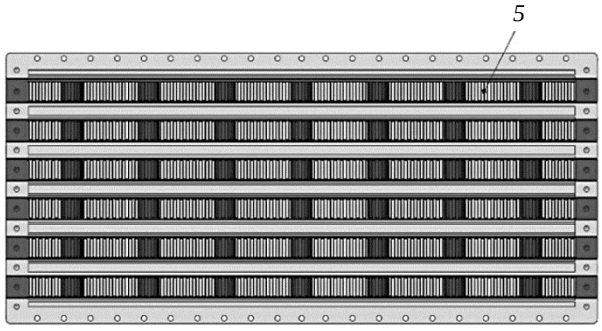
Конструктивные особенности судового утилизационного термоэлектрического генератора

Design features of ship waste-heat thermoelectric generator

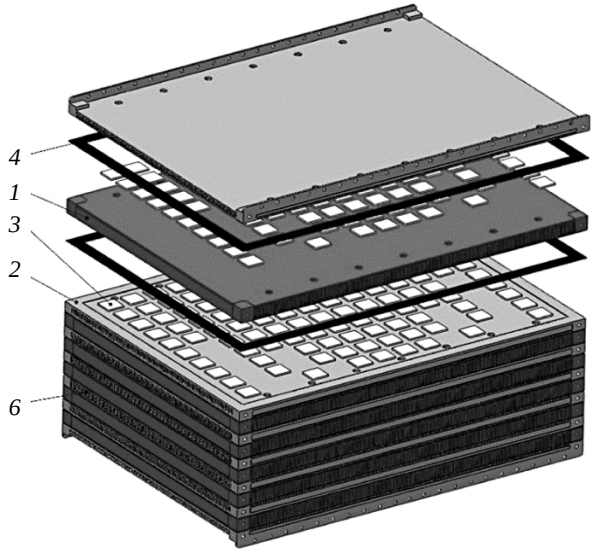
Для судовой термоэлектрической СГУТ разработана полезная модель «Унифицированный утилизационный термоэлектрический генератор морского исполнения». Основной электрогенерирующей частью ТЭГ является термоэлектрическая сборка. Общий вид разработанной конструкции сборки приведен на рис. 1.

Главное отличие этой сборки от автомобильных генераторов заключается в использовании нескольких нагревателей ввиду существенно больших расходов горячих сред. Если горячая среда газообразная, то она разделяется на потоки, протекающие через все нагреватели параллельно. В случае утилизации теплоты жидкой горячей среды несколько нагревателей объединяются в группу, через все ТА которой рабочая среда будет протекать последовательно. Охладители чередуются в сборке с нагревателями, они всегда соединяются друг с другом последовательно в одну или несколько групп, и по ним прокачивается вода системы охлаждения.

Между нагревателями и охладителями располагаются ТЭС, состоящие из фабричных ТЭМ. Основания ТЭМ соединяются с ТА через слой термопасты, уменьшающий контактное тепловое сопротивление. ТЭМ, работая на разности температур сред, прокачиваемых через ТА, генерируют электрический ток. Для удобства подвода сред к ТА и отвода от них, а также для гидравлического соединения ТА



а)



б)

Рис. 1. Термоэлектрическая сборка:
а) вид спереди; *б*) вид с разнесенными частями [10].
Основные элементы: *1* – нагреватели ТЭГ;
2 – охладители ТЭГ; *3* – термоэлектрический слой;
4 – прокладки; *5* – каналы горячей среды;
6 – каналы холодной среды

Fig. 1. Thermoelectric assembly:
a) front view; *b*) exploded view [10].
Main components: *1* – TEG heaters; *2* – TEG coolers;
3 – thermoelectric layer; *4* – gaskets;
5 – hot medium channels; *6* – cold medium channels

друг с другом каналы горячей и холодной сред располагаются друг относительно друга в перекрестном направлении. Интенсификация теплоотдачи в каналах ТА обеспечивается размещением в них оребрения.

Для проектного расчета ТЭГ с подобной термоэлектрической сборкой необходимо в общем случае располагать данными об исходных и предельных давлениях и температурах сред, расходе горячей среды, параметрах ТЭМ и физических свойствах прочих конструкционных материалов.

Особенности реализации алгоритма проектного расчета

Features of design calculation algorithm

В данном разделе приведены основные математические зависимости, полученные для проектного расчета ТЭГ. Учет термоэлектрических эффектов выполняется с применением допущений [11], позволяющих заменять расчетные ТЭМ эквивалентными термоэлектрическими ветвями из некоторого условного материала.

Работа ТЭС из этого материала определяется зависимостями, полученными для ветви идеальной термопары, например, в [12]. Выведены зависимости для условных: электрического сопротивления (ρ^*), коэффициента Зеебека (α^*) и коэффициента теплопроводности (λ^*) в функции от спецификационных параметров ТЭМ.

$$\rho^* = \frac{P^0_{\text{ТЭМ}} A_{\text{ТЭ}}}{I_0^2 h_{\text{ТЭМ}} n_{\text{ТЭ}}}, \tag{1}$$

$$\alpha^* = \frac{2P^0_{\text{ТЭМ}}}{n_{\text{ТЭ}}(T^0_{\text{КГ}} - T^0_{\text{КХ}}) I_0}, \tag{2}$$

$$\lambda^* = \frac{P^0_{\text{ТЭМ}} h_{\text{ТЭМ}}}{n_{\text{ТЭ}} A_{\text{ТЭ}} (T^0_{\text{КГ}} - T^0_{\text{КХ}}) \eta^0_{\text{ТЭМ}}} - \frac{\alpha^{*2}}{4\rho^*}\left(\frac{T^0_{\text{КГ}} + T^0_{\text{КХ}}}{2} + T^0_{\text{КГ}}\right), \tag{3}$$

где $P^0_{\text{ТЭМ}}$, $\eta^0_{\text{ТЭМ}}$ и I_0 – соответственно электрическая мощность, КПД и электрический ток, полученные при подводе теплоты к горячему основанию ТЭМ с температурой $T^0_{\text{КГ}}$ и отводе от холодного основания с температурой $T^0_{\text{КХ}}$; $A_{\text{ТЭ}}$ – площадь поперечного сечения термоэлектрической ветви ТЭМ; $h_{\text{ТЭМ}}$ – высота ТЭМ; $n_{\text{ТЭ}}$ – количество термоэлектрических ветвей в ТЭМ (удвоенное количество термопар). Тогда условная термоэлектрическая добротность ТЭМ определяется как:

$$Z^* = \frac{\alpha^{*2}}{\rho^* \lambda^*}. \tag{4}$$

Поскольку в качестве ТА используются прямоугольные оребренные каналы, то для расчета их геометрических параметров применяются формулы для пластинчато-ребристых теплообменников.

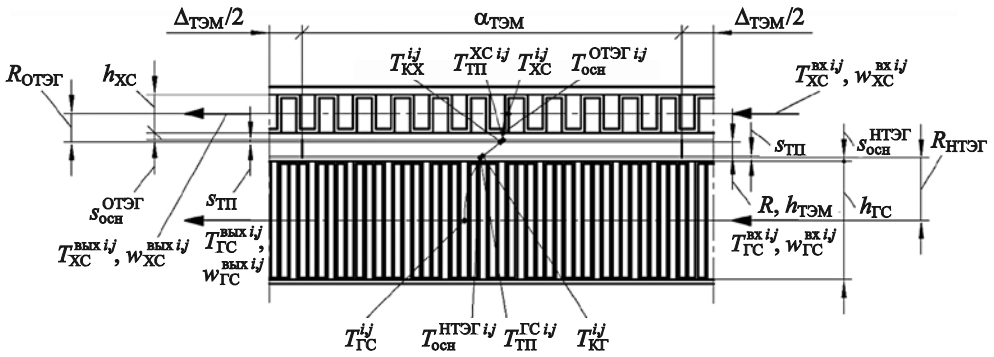


Рис. 2. Элементарный участок термоэлектрического генератора

Fig. 2. Elementary unit of thermoelectric generator

Например, суммарная площадь проходного сечения всех нагревателей рассчитывается по формуле [13]:

$$A_{\text{НТЭГ}}^{\Sigma} = \frac{(h_{\text{ГС}} - \delta_{\text{ГС}})(t_{\text{ГС}} - \delta_{\text{ГС}}) L_{\text{кан}}^{\text{НТЭГ}} n_{\text{НТЭГ}}}{t_{\text{ГС}}}, \quad (5)$$

где $h_{\text{ГС}}$ и $t_{\text{ГС}}$ – соответственно высота и шаг оребрения; $\delta_{\text{ГС}}$ – толщина ребер; $L_{\text{кан}}^{\text{НТЭГ}}$ – ширина оребренного канала нагревателя; $n_{\text{НТЭГ}}$ – количество нагревателей в генераторе.

Площадь поверхности теплообмена всех нагревателей с рассечным оребрением [13]:

$$\begin{aligned} A_{\text{НТЭГ}}^{\text{ТО}\Sigma} &= 2n_{\text{НТЭГ}} L_{\text{кан}}^{\text{НТЭГ}} L_{\text{кан}}^{\text{ОТЭГ}} - \\ &-2\delta_{\text{ГС}} L_{\text{кан}}^{\text{ОТЭГ}} \frac{n_{\text{НТЭГ}} L_{\text{кан}}^{\text{НТЭГ}}}{t_{\text{ГС}}} + 2n_{\text{НТЭГ}} h_{\text{ГС}} L_{\text{кан}}^{\text{ОТЭГ}} + \\ &+2(h_{\text{ГС}} - \delta_{\text{ГС}}) L_{\text{кан}}^{\text{ОТЭГ}} \frac{n_{\text{НТЭГ}} L_{\text{кан}}^{\text{НТЭГ}}}{t_{\text{ГС}}} + \\ &+2(h_{\text{ГС}} - \delta_{\text{ГС}})\delta_{\text{ГС}} \left(\left\lfloor \frac{L_{\text{кан}}^{\text{ОТЭГ}}}{l_{\text{ГС}}} \right\rfloor + 1 \right) \frac{n_{\text{НТЭГ}} L_{\text{кан}}^{\text{НТЭГ}}}{t_{\text{ГС}}} + \\ &+(t_{\text{ГС}} - \delta_{\text{ГС}})\delta_{\text{ГС}} \left\lfloor \frac{L_{\text{кан}}^{\text{ОТЭГ}}}{l_{\text{ГС}}} \right\rfloor \frac{n_{\text{НТЭГ}} L_{\text{кан}}^{\text{НТЭГ}}}{t_{\text{ГС}}} + \\ &+2t_{\text{ГС}}\delta_{\text{ГС}} \frac{n_{\text{НТЭГ}} L_{\text{кан}}^{\text{НТЭГ}}}{t_{\text{ГС}}}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $L_{\text{кан}}^{\text{ОТЭГ}}$ – ширина оребренного канала охладителя, $l_{\text{ГС}}$ – длина гофров.

Тепловой расчет элементарных участков ТЭГ выполняется ε-NTU методом. Данный метод удобен при расчете элементарных участков с известными параметрами сред на входе, протекающих в перекрестном направлении, и площадями поверхностей теплообмена аппаратов. В расчете режима холостого хода ТЭС и участки нагревателя и охладителя представляют собой один теплообменник, показанный на рис. 2.

Для простоты восприятия проходные сечения каналов охладителя (сверху) и нагревателя (снизу) расположены в плоскости рисунка, а среды находятся в прямотоке. В плоскости основания ТА границы участка отлежат от ребер ТЭМ (длиной $a_{\text{ТЭМ}}$) на величину $\Delta_{\text{ТЭМ}}/2$, где $\Delta_{\text{ТЭМ}}$ – это расстояние между соседними модулями.

В начале расчета на входе в элементарный участок известны температуры ($T_{\text{ГС}}^{\text{ВХ}}$, $T_{\text{ХС}}^{\text{ВХ}}$) и скорости ($w_{\text{ГС}}^{\text{ВХ}}$, $w_{\text{ХС}}^{\text{ВХ}}$) сред. В результате расчета определяются параметры сред на выходе из участка и элементарные тепловые сопротивления ($R_{\text{НТЭГ}}$, $R_{\text{ОТЭГ}}$). Например, тепловое сопротивление с горячей стороны рассчитывается по формуле:

$$R_{\text{НТЭГ}} = n_{\text{ТЭ}} A_{\text{ТЭ}} \times \left(\frac{1}{\alpha_{\text{ГС}} E_{\text{ор}}^{\text{НТЭГ}} A_{\text{НТЭГ}}^{\text{ТО элем}}} + \frac{s_{\text{осн}}^{\text{НТЭГ}}}{\lambda_{\text{НТЭГ}} A_{\text{осн}}^{\text{ТО элем}}} + \frac{s_{\text{ТП}}}{\lambda_{\text{ТП}} A_{\text{ТЭМ}}} \right), \quad (7)$$

где $\alpha_{\text{ГС}}$ – коэффициент теплоотдачи со стороны горячей среды, зависящий от условий ее протекания и типа применяемого оребрения; $E_{\text{ор}}^{\text{НТЭГ}}$ – коэффициент эффективности оребрения нагревателя; $\lambda_{\text{НТЭГ}}$ и $\lambda_{\text{ТП}}$ – коэффициенты теплопроводности соответственно материала нагревателя и термопасты; $s_{\text{осн}}^{\text{НТЭГ}}$ и $s_{\text{ТП}}$ – толщины соответственно основания нагревателя и слоя термопасты; $A_{\text{НТЭГ}}^{\text{ТО элем}}$ и $A_{\text{осн}}^{\text{ТО элем}}$ – элементарные площади соответственно поверхности теплообмена нагревателя и основания ТА; $A_{\text{ТЭМ}}$ – площадь поверхности основания ТЭМ.

После расчета тепловых сопротивлений может быть определена теплопередача:

$$UA = \frac{1}{\dfrac{R_{\text{НТЭГ}}}{n_{\text{ТЭ}} A_{\text{ТЭ}}} + \dfrac{h_{\text{ТЭМ}}}{\lambda^{*} n_{\text{ТЭ}} A_{\text{ТЭ}}} + \dfrac{R_{\text{ОТЭГ}}}{n_{\text{ТЭ}} A_{\text{ТЭ}}}}. \quad (8)$$

Далее, в соответствии с ε-NTU методом, рассчитываются водяные эквиваленты обеих сред. Для горячей среды формула имеет вид:

$$W_{\text{экв}}^{\text{ГС}} = c_{\text{р}}^{\text{ГС}} A_{\text{НТЭГ}}^{\text{элем}} w_{\text{ГС}} \rho_{\text{ГС}}, \quad (9)$$

где $c_{\text{р}}^{\text{ГС}}$ – удельная теплоемкость горячей среды (изобарная – для газообразной среды); $A_{\text{НТЭГ}}^{\text{элем}}$ – элементарная площадь проходного сечения нагревателя; $w_{\text{ГС}}$ – средняя скорость, в первом приближении принимаемая равной $w_{\text{ГС}}^{\text{ВХ}}$; $\rho_{\text{ГС}}$ – плотность при средней температуре ($T_{\text{ГС}}$), рассчитываемая в первом приближении в функции от $T_{\text{ГС}}^{\text{ВХ}}$.

Водяные эквиваленты сравниваются друг с другом, среди них определяется наименьший ($w_{\text{экв}}^{\min}$) и находится отношение (C_r) меньшего водяного эквивалента к большему. По формуле (10) рассчитывается число единиц переноса теплоты.

$$NTU = \frac{UA}{W_{\text{экв}}^{\min}}. \quad (10)$$

Далее рассчитывается эффективность теплообменника по одной из формул, приведенных, например, в [13]. Вид формулы зависит от взаимного направления сред и характера их протекания. При перекрестном токе с перемешивающейся горячей средой (протекающей турбулентно), имеющей меньший водяной эквивалент, формула имеет вид:

$$\varepsilon = 1 - e^{-\frac{1}{C_r}(1-e^{-C_r NTU})}. \quad (11)$$

Затем тепловой поток с горячей стороны, равный тепловому потоку через ТЭМ, может быть рассчитан по формуле:

$$Q_{\text{ГС}} = \varepsilon W_{\text{экв}}^{\min} (T_{\text{ГС}}^{\text{вх}} - T_{\text{ХС}}^{\text{вх}}). \quad (12)$$

При известном тепловом потоке и температурах обеих сред могут быть определены все остальные температуры, приведенные на рис. 2: оснований нагревателя ($T_{\text{осн}}^{\text{НТЭГ}}$) и охладителя ($T_{\text{осн}}^{\text{ОТЭГ}}$), термопасты с горячей ($T_{\text{ТП}}^{\text{ГС}}$) и холодной ($T_{\text{ТП}}^{\text{ХС}}$) сторон, на поверхности горячего ($T_{\text{КГ}}$) и холодного ($T_{\text{КХ}}$) оснований ТЭМ. По двум последним температурам рассчитывается коэффициент термопроводности для генераторного режима:

$$k_T = 1 + \frac{Z^* \left(\frac{T_{\text{КГ}} + T_{\text{КХ}}}{2} + m T_{\text{КГ}} \right)}{(1+m)^2}, \quad (13)$$

где m – нагрузочный коэффициент.

При известном нагрузочном коэффициенте КПД элементарного участка рассчитывается по формуле:

$$\eta_{\text{ТЭГ}}^{\text{элем}} = \frac{Z^* (T_{\text{КГ}} + T_{\text{КХ}}) m}{k_T (1+m)^2}. \quad (14)$$

Плотность теплового потока через ТЭС в генераторном режиме:

$$q_{\text{ТЭС}}^{\text{ген}} = \frac{(T_{\text{КГ}} - T_{\text{КХ}}) k_T \lambda^*}{h_{\text{ТЭМ}}}. \quad (15)$$

После получения данных о тепловом, гидравлическом и электрическом режимах работы элементарных участков рассчитываются параметры, характеризующие режим работы генератора в целом. К ним относятся: полная и полезная (с учетом гидравлических потерь) мощности генератора; температуры сред на выходе из него и требуемый расход холодной среды; масса и габариты при принятой конструкции трубной обвязки и т.д.

Заключение

Conclusion

Анализ научных работ в сфере проектирования ТЭГ показал, что в данный момент уровень развития термоэлектрогенерации достаточен для эффективного освоения судостроительной промышленностью установок, реализующих данный физический принцип, в качестве утилизационных источников электрической и тепловой энергии. ТЭГ позволяют вырабатывать электроэнергию при утилизации теплоты даже низкопотенциальных источников (например, смазывающего масла).

Выявлены ключевые признаки ТЭГ, которые должны входить в состав таких установок, приведены основные зависимости, требующиеся для их расчета. Расчет ТЭГ, утилизирующих теплоту той или иной среды и использующих те или иные ТЭМ, с применением предложенных зависимостей позволит количественно обосновать проектные решения по комплектации термоэлектрических теплоутилизационных установок для различных судов.

Список использованной литературы

1. *Bou Nader W.* Thermoelectric generator optimization for hybrid electric vehicles // Applied thermal engineering. 2020. Vol. 167. P. 114761 (p. 1–15). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114761.
2. Design of a thermoelectric generator for waste heat recovery application on a drivable heavy duty vehicle /

A. Risseh, H. Nee, O. Erlandsson [et al.] // SAE International journal of commercial vehicles. 2017. Vol. 10, No. 1. P. 26–44. DOI: 10.4271/2017-01-9178.

3. *Haidar J.G., Ghojel J.I.* Optimization of the thermal regime of thermoelectric generators in waste heat recovery applications // Proceedings of the 21st International conference on thermoelectronics. New York : IEEE, 2002. P. 427–430. DOI: 10.1109/ICT.2002.1190352.
4. A thermoelectric generator for scavenging gas-heat: From module optimization to prototype test / *F. Cheng, Y. Hong, W. Li* [et al.] // Energy. 2017. Vol. 121. P. 545–560. DOI: 10.1016/j.energy.2017.01.025.
5. *Yu J., Zhao H.* A numerical model for thermoelectric generator with the parallel-plate heat exchanger // Journal of power sources. 2007. Vol. 172, No. 1. P. 428–434. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2007.07.045.
6. Design optimization of a large-scale thermoelectric generator / *O.M. Al-Habahbeh, A. Mohammad, A. Al-Khalidi* [et al.] // Journal of King Saud university. Engineering sciences. 2018. Vol. 30, No. 2. P. 177–182. DOI: 10.1016/j.jksues.2016.01.007.
7. *Sempels E.V., Lesage F.J.* Optimization of thermoelectric generators in the presence of heat losses and fluid flows // IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology. 2018. Vol. 8, No. 9. P. 1573–1580. DOI: 10.1109/TCPMT.2018.2864171.
8. Design of a semiconductor thermoelectric generator for remote subsea wellheads / *D.W. Auckland, R. Shuttleworth, A.C. Luff* [et al.] // IEE proceedings. Electric power applications. 1995. Vol. 142, No. 2. P. 65–70. DOI: 10.1049/ipepa:19951707.
9. Optimization of thermoelectric modules' number and distribution pattern in an automotive exhaust thermoelectric generator / *X. Li, C. Xie, S. Quan* [et al.] // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 72143–72157. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2919689.
10. Унифицированный утилизационный термоэлектрический генератор морского исполнения : пат. 217290 Рос. Федерация / *Р.О. Голубев.* № 2023100581; заявл. 11.01.2023; опубл. 24.03.2023, Бюл. № 9. 18 с.
11. *Lee H.S.* Thermoelectrics: design and materials. Chichester ; Hoboken : Wiley, 2017. XII, 420 p.
12. *Ковальский Р.В.* Инженерные методы расчета термоэлектрических генераторов. Москва : Наука, 1990. 187, [2] с.
13. *Lee H.S.* Thermal design: heat sinks, thermoelectrics, heat pipes, compact heat exchangers and solar cells. Hoboken : Wiley, 2010. XVIII, 630 p.

References

1. *Bou Nader W.* Thermoelectric generator optimization for hybrid electric vehicles // Applied thermal engineering. 2020. Vol. 167. P. 114761 (p. 1–15). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114761.
2. Design of a thermoelectric generator for waste heat recovery application on a drivable heavy duty vehicle / *A. Risseh, H. Nee, O. Erlandsson* [et al.] // SAE International journal of commercial vehicles. 2017. Vol. 10, No. 1. P. 26–44. DOI: 10.4271/2017-01-9178.
3. *Haidar J.G., Ghojel J.I.* Optimization of the thermal regime of thermoelectric generators in waste heat recovery applications // Proceedings of the 21st International conference on thermoelectronics. New York : IEEE, 2002. P. 427–430. DOI: 10.1109/ICT.2002.1190352.
4. A thermoelectric generator for scavenging gas-heat: From module optimization to prototype test / *F. Cheng, Y. Hong, W. Li* [et al.] // Energy. 2017. Vol. 121. P. 545–560. DOI: 10.1016/j.energy.2017.01.025.
5. *Yu J., Zhao H.* A numerical model for thermoelectric generator with the parallel-plate heat exchanger // Journal of power sources. 2007. Vol. 172, No. 1. P. 428–434. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2007.07.045.
6. Design optimization of a large-scale thermoelectric generator / *O.M. Al-Habahbeh, A. Mohammad, A. Al-Khalidi* [et al.] // Journal of King Saud university. Engineering sciences. 2018. Vol. 30, No. 2. P. 177–182. DOI: 10.1016/j.jksues.2016.01.007.
7. *Sempels E.V., Lesage F.J.* Optimization of thermoelectric generators in the presence of heat losses and fluid flows // IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology. 2018. Vol. 8, No. 9. P. 1573–1580. DOI: 10.1109/TCPMT.2018.2864171.
8. Design of a semiconductor thermoelectric generator for remote subsea wellheads / *D.W. Auckland, R. Shuttleworth, A.C. Luff* [et al.] // IEE proceedings. Electric power applications. 1995. Vol. 142, No. 2. P. 65–70. DOI: 10.1049/ipepa:19951707.
9. Optimization of thermoelectric modules' number and distribution pattern in an automotive exhaust thermoelectric generator / *X. Li, C. Xie, S. Quan* [et al.] // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 72143–72157. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2919689.
10. Unified marine waste heat thermoelectric generator: Russian Federation patent 217290 / *R.O. Golubev*. No. 2023100581; application 11.01.2023; published 24.03.2023, Bulletin No. 9, 18 p. (*in Russian*).
11. *Lee H.S.* Thermoelectrics: design and materials. Chichester ; Hoboken : Wiley, 2017. XII, 420 p.
12. *Kowalsky R.V.* Engineering calcylation methods of termoelectric generators. Moscow : 1990. 189 p. (*in Russian*).
13. *Lee H.S.* Thermal design: heat sinks, thermoelectrics, heat pipes, compact heat exchangers and solar cells. Hoboken : Wiley, 2010. XVIII, 630 p.

Сведения об авторах

Голубев Роман Олегович, инженер-конструктор 2-й категории АО «ЦМКБ «Алмаз». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Варшавская ул., д. 50. E-mail: swit.roma@mail.ru.

Столяров Сергей Павлович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3. E-mail: stsp56@yandex.ru.

About the authors

Roman O. Golubev, 2nd category Design Engineer, JSC Almaz Marine Design Bureau. Address: 50, Varshavskaya st, St. Petersburg, Russia, post code 196128. E-mail: swit.roma@mail.ru.

Sergei P. Stolyarov, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Head of Internal Combustion Engines and Diesel Installations Department, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190121 St. Petersburg. E-mail: stsp56@yandex.ru.

Поступила / Received: 01.06.24
Принята в печать / Accepted: 14.11.24
© Голубев Р.О., Столяров С.П., 2024