

УДК 629.12

П.А. Зеленов, С.Н. Зеленов, Л.И. Иванова, А.А. Катаев, Д.А. Конишняк
ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ НА СУДАХ

Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексеева

Рассматривается утилизация «бросовой», теряемой в окружающую среду, энергии как один из способов повышения эффективности топливоиспользования на судах. Практическим решением данной задачи является применение для выработки электрической энергии в ходовых режимах термоэлектрических генераторов, использующих теплоту отработавших газов.

Ключевые слова: утилизация теплоты, отработавшие газы, главные двигатели, термоэлектрический генератор, критическое время эксплуатации.

Во всех современных судовых энергетических установках (СЭУ) с целью повышения КПД и эффективности топливоиспользования широко применяют утилизацию теплоты выпускных газов главных двигателей (ГД). Эта теплота используется для снабжения судовых потребителей горячей водой или паром. В то же время, как показывает практика, из всей располагаемой теплоты газов утилизированная теплота составляет не более 15...20%. С целью более глубокой утилизации теплоты отработанных газов целесообразно рассмотреть возможность применения на судах обычных утилизационных котлов в комбинации с термоэлектрическими утилизаторами [1-3].

В данной статье выполнено технико-экономическое обоснование целесообразности применения на судах таких комбинированных теплоутилизующих установок, состоящих из утилизационного котла и термоэлектрического генератора. Термоэлектрический генератор (ТЭГ) – это техническое устройство, позволяющее непосредственно преобразовывать тепловую энергию в электрическую. Этот процесс возможен благодаря применению в конструкции генератора термоэлементов. В настоящее время существуют несколько видов ТЭГ, отличие которых заключается в происхождении тепловой энергии:

- топливные (используют теплоту, выделяющуюся при сгорании топлива);
- радиоизотопные (используют теплоту, выделяющуюся при распаде изотопов);
- утилизационные (используют теплоту отработанных газов);
- радиационные (используют теплоту солнечного излучения).

Из всех перечисленных видов ТЭГ в судовом использовании наибольший интерес представляет утилизационный (УТЭГ). Это объясняется тем, что УТЭГ для получения электрической энергии использует «бросовую» энергию, то есть энергию продуктов сгорания топлива. Он не требует топливных затрат как, например, дизель-генератор. Он требует «донора» - генератора отработанных газов в виде какой-либо котельной установки или теплового двигателя, например, ДВС. Как автономная единица, УТЭГ не представляет особого интереса, он является вспомогательным устройством, но это не делает его менее полезным в составе СЭУ.

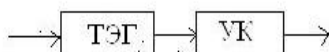
Благодаря особенностям своей работы, применение УТЭГ позволит экономить топливо (по данным [2] до 10%), которое затратилось бы на выработку электроэнергии в судовых дизель-генераторах на ходовых режимах эксплуатации. На основании изложенного, определенный практический интерес представляют результаты технико-экономической оценки возможности применения УТЭГ на судах. В работе рассмотрена возможность применения ТЭГ на грузовом теплоходе смешанного плавания грузоподъемностью 2150 т, где в качестве главных двигателей установлены два дизеля марки 6NVD48-2U, каждый мощностью по 574 кВт. Термогенераторы устанавливаются на газоходе каждого главного двигателя. Суммарная мощность термогенераторов должна быть такой, чтобы обеспечить судно в ходовом режиме

электроэнергией. По таблице загрузки электростанции это составляет $\sim 40,5$ кВт, т.е. мощность каждого термогенератора составляет ~ 20 кВт.

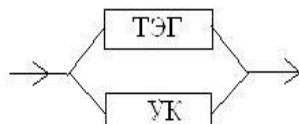
Обоснование выбора оптимального варианта расположения УТЭГ

Для получения горячей воды на каждом газоходе устанавливается утилизационный котел тепловой мощностью 42 кВт. Возникает вопрос, а где расположить ТЭГ по отношению к УК и по отношению к потоку газов? Рассмотрим три возможных варианта расположения.

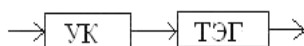
1. Последовательное, с расположением ТЭГ первым по отношению к УК по ходу газов:



2. Параллельное расположение по отношению к потоку газов:



3. Последовательное, с расположением утилизационного котла (УК) первым по потоку газов:



Поэтому возникает задача обоснования варианта расположения. В дальнейшем анализе все параметры, относящиеся к первой схеме, будем обозначать в скобках одним штрихом: соответственно все параметры, относящиеся ко второй схеме – двумя штрихами, к третьей схеме – тремя штрихами. Температуры и соответствующие им теплосодержания (энтальпии) газов на входе в ТЭГ и УК обозначаем $t'_{\gamma}; t'_{\delta}; I'_{\gamma}; I'_{\delta}$ и $t''_{\gamma}; t''_{\delta}; I''_{\gamma}; I''_{\delta}$.

Обоснование выбора будем вести с точки зрения компактности поверхности нагрева котла и с точки зрения получения наибольшего КПД термогенератора. Исходными данными для этого являются следующие параметры:

- температура отработанных газов $t_{\Gamma}^{ДВ} = 450^{\circ}\text{C}$;
- тип котла – водогрейный, газотрубный;
- мощность термогенераторов $N_{\Gamma} = 25$ кВт;
- температура заборной воды $t_{3В} = +8^{\circ}\text{C}$;
- температура воды на выходе из котла $t'_{\text{в}} = 115^{\circ}\text{C}$;
- температура воды на входе в котел $t_{\text{в}} = 50^{\circ}\text{C}$.

Для выявления варианта расположения, дающего наиболее компактную поверхность нагрева котла, воспользуемся уравнением теплопередачи:

$$Q_{\text{к}} = K_{\text{к}} F_{\text{к}} \Delta t_{\text{к}}. \quad (1)$$

При $Q_{\text{к}} = \text{const}$ и $K_{\text{к}} = \text{const}$ будет справедливо следующее соотношение:

$$\frac{(F_{\text{к}})'}{(F_{\text{к}})''} = \frac{(\Delta t_{\text{к}})''}{(\Delta t_{\text{к}})'}; \quad \frac{(F_{\text{к}})''}{(F_{\text{к}})'''} = \frac{(\Delta t_{\text{к}})'''}{(\Delta t_{\text{к}})''}. \quad (2)$$

Для определения температуры газов после утилизационной установки, одинаковой для всех вариантов составим уравнение теплового баланса:

$$\frac{N_{\Gamma}}{\eta_{\Gamma}} + Q_{\text{к}} = B(I_{\Gamma}^{\text{ВХ}} - I_{\Gamma}^{\text{ВЫХ}}), \quad (3)$$

где η_{δ} – КПД ТЭГ, примем $\eta_{\delta} = 0,1$; $I_{\Gamma}^{\text{ВХ}}$ ($I_{\Gamma}^{\text{ВЫХ}}$) – энтальпия газов на входе и выходе из котла соответственно.

Для решения уравнения теплового баланса была построена диаграмма зависимости $I_{\bar{a}} = f(t_{\bar{a}})$ для топлива марки ДТ и для коэффициента избытка воздуха $\alpha = 2,2$.

Из уравнения теплового баланса получено значение температуры газов на выходе утилизационной установки

$$t_{\Gamma}^{\text{БЫХ}} = (t_{\kappa}^{\prime})' = (t_{\kappa}^{\prime\prime})'' = (t_{\kappa}^{\prime\prime\prime})''' = 170^{\circ}\text{C}.$$

Подсчитаем значение температурного напора котла для всех трех случаев:

$$(\Delta t_{\kappa})' = \frac{(\Delta t_{\kappa}^{\prime\prime})'' + (\Delta t_{\kappa}^{\prime\prime\prime})'''}{2} - \frac{t_{\text{в}} - t'_{\text{в}}}{2}.$$

Для определения $(t_{\text{в}}^{\prime})'$ воспользуемся уравнением теплового баланса термогенератора

$$\frac{N}{\eta_{\Gamma}} = B(I'_{\text{г}} - I''_{\text{г}}), \quad (4)$$

откуда $(t_{\text{в}}^{\prime})' = 200^{\circ}\text{C}$. В итоге получаем: $(\Delta t_{\text{г}})' = 102^{\circ}\text{C}$;

$$(\Delta t_{\kappa})'' = \frac{(t'_{\kappa})'' + (t''_{\kappa})''}{2} - \frac{t_{\text{в}} + t'_{\text{в}}}{2} = 252^{\circ}\text{C}; \quad (\Delta t_{\kappa})''' = \frac{(t'_{\kappa})''' + (t''_{\kappa})'''}{2} - \frac{t_{\text{в}} + t'_{\text{в}}}{2}.$$

Для определения $(t_{\text{г}}^{\prime\prime})''$ воспользуемся уравнением теплового баланса котла:

$$Q_{\text{г}} = B \left[(I'_{\text{г}})''' - (I''_{\text{г}})''' \right], \quad (5)$$

откуда получаем $(t_{\kappa}^{\prime\prime})'' = 470^{\circ}\text{C}$ и, следовательно, $(\Delta t_{\text{г}})'' = 402^{\circ}\text{C}$.

Полученные значения температурных напоров $(\Delta t_{\text{г}})$ позволяют получить следующие соотношения:

$$\frac{(F_{\kappa})'}{(F_{\kappa})''} = \frac{(\Delta t_{\kappa})''}{(\Delta t_{\kappa})'} = 2,46; \quad \frac{(F_{\kappa})''}{(F_{\kappa})'''} = \frac{(\Delta t_{\kappa})'''}{(\Delta t_{\kappa})''} = 1,6.$$

Таким образом, $(F_{\kappa})''' < (F_{\kappa})'' < (F_{\kappa})'$, т.е. самую компактную теплообменную поверхность котла дает третий вариант компоновки утилизационной установки.

Проанализируем все три варианта компоновки по величине КПД термогенератора. Исходная формула КПД термогенератора имеет вид:

$$\eta_{\Gamma} = \frac{T_{\Gamma} - T_{\text{х}}}{T_{\Gamma}} - \frac{\frac{M}{M+1}}{1 + \frac{M+1}{z \cdot T_{\Gamma}} - \frac{T_{\Gamma} - T_{\text{х}}}{2T_{\Gamma}(M+1)}}, \quad (6)$$

где T_{Γ} ($T_{\text{х}}$) – температура горячих (холодных) спаев соответственно; z – коэффициент добротности полупроводникового элемента, величина которого зависит от физических свойств полупроводников и температуры газов; M – отношение сопротивления нагрузки к внутреннему сопротивлению термоэлемента, величина принимается постоянной. В первом приближении принимаем температуру холодного спая равной средней температуре охлаждающей воды $T_{\text{х}} = T_{\text{ср.о.в}}$, температуру горячих спаев – равной средней температуре теплоносителя $T_{\Gamma} = T_{\text{ср.тепл}}$.

Аналитическое выражение коэффициента добротности:

$$z = \frac{\alpha_s^2}{\left(\sqrt{\frac{\lambda_p}{\sigma_p}} + \sqrt{\frac{\lambda_n}{\sigma_n}} \right)^2}, \frac{1}{\text{град}}, \quad (7)$$

где α_s – суммарный коэффициент термо-эдс; λ_p (λ_n) – коэффициент теплопроводности соответственно "р" и "n" ветвей; σ_p (σ_n) – удельная электрическая проводимость соответственно "р" и "n" ветвей.

Температура газов $t_{\text{гд}}$ рассчитывается как среднее арифметическое значение между температурой газов на входе и выходе из ТЭГ. Для определения коэффициента z воспользуемся экспериментальными данными ЦНИИ им. А.Н. Крылова (табл. 1 или рис. 1).

Таблица 1
Экспериментальные значения z при различных температурах газов $t_{\text{сп}}$

$t_{\text{сп}}, ^\circ\text{C}$	445	381	321	270	223
$z, 1/\text{град}$	$1,39 \cdot 10^{-3}$	$1,44 \cdot 10^{-3}$	$1,65 \cdot 10^{-3}$	$1,88 \cdot 10^{-3}$	$2,06 \cdot 10^{-3}$

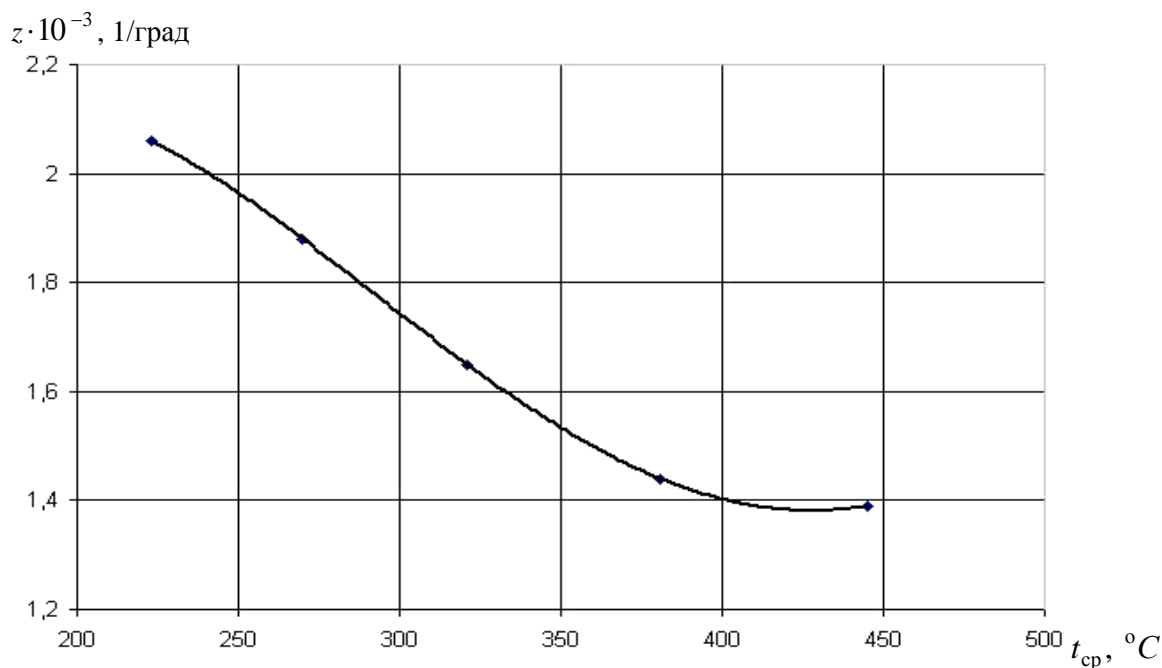


Рис. 1. Экспериментальная зависимость коэффициента добротности z от температуры газов

Для сравнения вариантов напишем следующие выражения:

$$\frac{(\eta_{\text{г}})''}{(\eta_{\text{г}})'} = \frac{\left(\frac{T_{\text{г}} - T_{\text{х}}}{T_{\text{г}}} \right)'' \left(1 + \frac{M+1}{z \cdot T_{\text{г}}} - \frac{T_{\text{г}} - T_{\text{х}}}{2T_{\text{г}}(M+1)} \right)'}{\left(\frac{T_{\text{г}} - T_{\text{х}}}{T_{\text{г}}} \right)' \left(1 + \frac{M+1}{z \cdot T_{\text{г}}} - \frac{T_{\text{г}} - T_{\text{х}}}{2T_{\text{г}}(M+1)} \right)''}, \quad (8)$$

$$\frac{(\eta_T)''}{(\eta_T)'''} = \frac{\left(\frac{T_r - T_x}{T_r}\right)'' \left(1 + \frac{M+1}{z \cdot T_r} - \frac{T_r - T_x}{2T_r(M+1)}\right)''}{\left(\frac{T_r - T_x}{T_r}\right)''' \left(1 + \frac{M+1}{z \cdot T_r} - \frac{T_r - T_x}{2T_r(M+1)}\right)''}. \quad (9)$$

Подсчитаем в этих выражениях отношения первых сомножителей:

$$\frac{\left(\frac{T_r - T_x}{T_r}\right)''}{\left(\frac{T_r - T_x}{T_r}\right)'} = \frac{623 \cdot 314}{608 \cdot 329} = 0,982, \quad \text{где } (T_r)'' = 608\text{K}, (T_r)' = 623\text{K}, T_x = 294\text{K};$$

$$\frac{\left(\frac{T_r - T_x}{T_r}\right)''}{\left(\frac{T_r - T_x}{T_r}\right)'''} = \frac{314 \cdot 593}{608 \cdot 299} = 1,015, \quad \text{где } (T_a)''' = 593\text{K},$$

т.е. эти величины близки к единице. Обозначим :

$$\left(\frac{T_r - T_x}{T_r}\right)' = \left(\frac{T_r - T_x}{T_r}\right)'' = \left(\frac{T_r - T_x}{T_r}\right)''' = C.$$

Тогда выражения (8) и (9) примут вид:

$$\frac{(\eta_T)''}{(\eta_T)'} = \frac{\left(1 + \frac{M+1}{z \cdot T_r} - \frac{C}{2T_r(M+1)}\right)'}{\left(1 + \frac{M+1}{z \cdot T_r} - \frac{C}{2(M+1)}\right)''}, \quad (10)$$

$$\frac{(\eta_T)''}{(\eta_T)'''} = \frac{\left(1 + \frac{M+1}{z \cdot T_r} - \frac{C}{2(M+1)}\right)''}{\left(1 + \frac{M+1}{z \cdot T_r} - \frac{C}{2(M+1)}\right)''}. \quad (11)$$

Анализируя литературные источники [1], можно убедиться, что $M > 1$. Следовательно, величина $\frac{C}{2(M+1)} \ll 1$.

Обозначим $M+1 = C_1$ и $1 - \frac{C}{2(M+1)} = B$, причем отметим, что величина $0 < B < 1$, тогда выражения (10) и (11) примут вид:

$$\frac{(\eta_T)''}{(\eta_T)'} = \frac{[C_1 + B \cdot z \cdot T_r]' (T_r \cdot z)''}{[C_1 + B \cdot z \cdot T_r]'' (T_r \cdot z)'}; \quad (12)$$

$$\frac{(\eta_T)''}{(\eta_T)'''} = \frac{[C_1 + B \cdot z \cdot T_r]'' (T_r \cdot z)''}{[C_1 + B \cdot z \cdot T_r]'' (T_r \cdot z)''}. \quad (13)$$

Используя график (рис. 1), получим значения величин:

$$\frac{(T_r \cdot z)''}{(T_r \cdot z)'} = 0,997; \quad \frac{(T_r \cdot z)'''}{(T_r \cdot z)''} = 0,98.$$

Представим отношение выражений в квадратных скобках в формулах (12) и (13) в следующем виде:

$$\frac{[C_1 + B(z \cdot T_r)]'}{[C_1 + B(z \cdot T_r)]''} = \frac{K'}{K''}; \quad \frac{[C_1 + B(z \cdot T_r)]'''}{[C_1 + B(z \cdot T_r)]''} = \frac{K'''}{K''}.$$

На основе графической интерпретации этих выражений (рис. 2) получим:

$$\frac{K'}{K''} = \frac{a + (z \cdot T_r)'}{a + (z \cdot T_r)''}; \tag{14}$$

$$\frac{K'''}{K''} = \frac{a + (z \cdot T_r)'''}{a + (z \cdot T_r)''}. \tag{15}$$

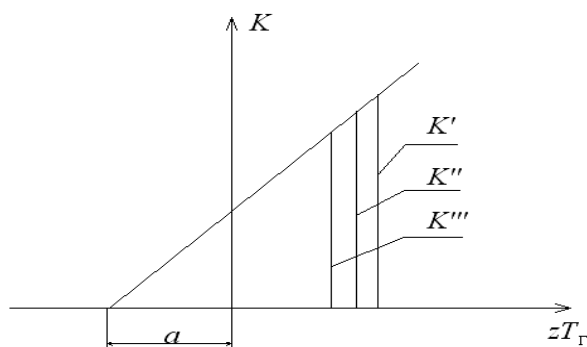


Рис. 2. Графическая интерпретация выражений (12) и (13)

Из анализа данных выражений следует, что

$$1 < \frac{K'}{K''} < \frac{(z \cdot T_r)'}{(z \cdot T_r)''}; \quad 1 < \frac{K'''}{K''} < \frac{(z \cdot T_r)'''}{(z \cdot T_r)''}.$$

Следовательно, отношения $\frac{(\eta_r)''}{(\eta_r)'}$ и $\frac{(\eta_r)'''}{(\eta_r)''}$ пренебрежимо мало отличаются от едини-

цы. Таким образом, по величине КПД ТЭГ все три варианта компоновки можно считать равноценными. Для наглядного сопоставления вариантов составим табл. 2.

Таблица 2
Сравнение вариантов компоновки утилизационной установки

Вариант	Схема	КПД, %	Габариты УК, %
Последовательный		100	394
Параллельный		100	164
Последовательный		100	100

Как видно, наиболее выгодным является третий вариант компоновки. Кроме того, следует добавить, что при реализации второго варианта возникают дополнительные конструктивные трудности, связанные с разделением и регулировкой потока газа.

Технико-экономический анализ применения термогенераторной установки

Для технико-экономического обоснования целесообразности применения ТЭГ рассмотрим два варианта электростанции судна:

- 1) электростанция имеет ходовой термоэлектрический генератор и один резервный дизель-генератор - предлагаемый вариант;
- 2) электростанция имеет два дизель-генератора, один из которых резервный-базовый вариант.

Для каждого из предложенных вариантов годовые эксплуатационные затраты Z_1 и Z_2 (руб) соответственно будут равны:

$$Z_1 = A(C_{ТЭГ} + C_{ДГ});$$

$$Z_2 = A(2C_{ДГ}) + \tau_{ход} Z_{эк}^{ход},$$

где A – коэффициент амортизации капиталовложений, равный 0,15;

$C_{ДГ} = 517000$ руб. – стоимость одного дизель-генератора мощностью 50 кВт (принята по данным ООО «Компания Дизель»);

$C_{ТЭГ} = 90000000$ руб. – стоимость термоэлектрического генератора(блока) мощностью 50 кВт;

$\tau_{ход}$ – ходовое время, ч.;

$Z_{эк}^{ход}$ – удельные эксплуатационные расходы на ходу.

Характер изменения годовых эксплуатационных затрат рассматриваемых вариантов электростанций в зависимости от продолжительности ходовых режимов работы $Z_1(Z_2) = f(\tau_{ход})$ представлен на рис. 3.

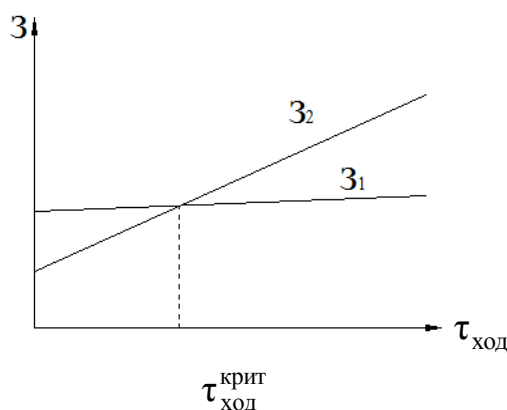


Рис. 3. Зависимости годовых эксплуатационных затрат от ходового времени

Как видно из рис. 3, применение УТЭГ выгодно в случаях, когда $\tau_{о\ddot{u}a} > \tau_{о\ddot{u}a}^{крит}$. Для определения критического ходового времени воспользуемся уравнениями годовых эксплуатационных затрат, подставив значения $\tau_{ход}^{крит}$ и приравняв правые части:

$$A(C_{ТЭГ} + C_{ДГ}) = A(2C_{ДГ}) + \tau_{ход}^{крит} Z_{эк}^{ход};$$

$$\tau_{крит} = \frac{A[(C_{ТЭГ} + C_{ДГ}) - (2C_{ДГ})]}{Z_{эк}^{ход}}.$$

Значения $(C_{ТЭГ} + C_{ДГ})$ и $(2C_{ДГ})$ выразим через удельные стоимости произведенной мощности b_1 и b_2 :

$$(C_{ТЭГ} + C_{ДГ}) = b_1 N; (2C_{ДГ}) = b_2 N,$$

где $N = 2 \times 50$ – мощность базового варианта судовой электростанции в ходовом режиме, кВт. После подстановки в формулы принятых значений соответствующих величин, получим $b_1 \approx 905170$ руб/кВт, $b_2 \approx 10340$ руб/кВт.

Ходовые удельные затраты во время эксплуатации в ходовом режиме:

$$Z_{\text{эк}}^{\text{ход}} = b_e^T N \Pi_T + b_e^M N \Pi_M,$$

где $b_e^T = 0,210$ кг/кВт*ч – удельный расход топлива ДГ, принято;

$\Pi_T = 30000$ руб/т – цена топлива, принято;

$b_e^M = 0,0009$ кг/кВт*ч – удельный расход масла ДГ, принято;

$\Pi_M = 50000$ руб/т – цена масла, принято.

В результате получаем:

$$\tau_{\text{ход}}^{\text{крит}} = \frac{AN(b_1 - b_2) \times 10^3}{N(b_e^T \Pi_T + b_e^M \Pi_M)} = \frac{0,15 \times 100 \times (905170 - 10340) \times 10^3}{100(0,21 \times 30000 + 0,0009 \times 50000)} \approx 21,15 \cdot 10^3 \text{ (ч)}.$$

Так как расчетное годовое время навигации в районе Нижней Волги составляет $\tau_{\text{оиа}} \approx 5 \cdot 10^3$ ч., можно полагать, что применение термоэлектрического утилизатора на суд-

не данного проекта будет давать экономический эффект через $\frac{\tau_{\text{ход}}^{\text{крит}}}{\tau_{\text{ход}}} = \frac{21,15 \cdot 10^3}{5 \cdot 10^3} \approx 4 \dots 5$ лет

эксплуатации и установка его целесообразна.

Расчет экономического эффекта от применения ТЭГ

Масса сэкономленного за одну навигацию топлива одним ДГ составит:

$$G_T = b_e^T N_e \tau_{\text{ход}} = 0,21 \times 77 \times 5000 = 80850 \text{ (кг)} \approx 81 \text{ (т)},$$

где $b_e^T = 0,21$ кг/кВт*ч – удельный расход топлива ДГ;

$N_e = 77$ кВт – мощность двигателя ДГ;

$\tau_{\text{ход}} = 5000$ ч. – ходовое время за навигацию.

Масса сэкономленного за одну навигацию одним ДГ масла:

$$G_M = b_e^M N_e \tau_{\text{ход}} = 0,0009 \times 77 \times 5000 = 346,5 \text{ (кг)} = 2,4 \text{ (т)},$$

где $b_e^M = 0,0015$ кг/кВт*ч – удельный расход масла ДГ.

Стоимость топлива и масла, сэкономленного за навигацию:

$$C_{\text{тм}} = \Pi_T G_T + \Pi_M G_M = 30000 \times 81 + 50000 \times 2,4 = 12120000 \text{ (руб)}.$$

Таким образом, расчетным путем была показана экономическая целесообразность применения УТЭГ на судах. В качестве позитивного аспекта следует отметить также возможность их размещения непосредственно в газоходе в любом его месте.

Мощность современных ТЭГ колеблется от нескольких микроватт до нескольких десятков киловатт, КПД преобразования теплоты – от 2 до 10%, срок службы – от 1 года до 25 лет, стоимость установленной мощности генератора находится в пределах от \$12 до \$190 на 1 Вт. По данным Института термоэлектричества НАН Украины г. Черновцы, реальная их стоимость может быть и ниже, причем меньшие значения относятся к ТЭГ большей мощности.

Благодаря последним достижениям [4] в области разработки термоэлектрических материалов и систем возобновился интерес к применению ТЭГ в СЭУ. Дальнейшие исследования помогут увеличить КПД, уменьшить расходы на материалы, увеличить экономическую выгоду, что однозначно позитивно скажется на данном устройстве.

Естественно, что выполненные расчеты требуют более тщательного технико-экономического анализа с учетом конкретных исходных данных экономической эффективности, необходимости в надежном постоянном источнике электроэнергии и ограниченной температуре выпускных газов и др.

Библиографический список

1. Манасян, Ю.Г. Судовые термоэлектрические устройства и установки [Текст] / Ю.Г. Манасян. – Л.: Судостроение, 1968. – 285 с.
2. Нгуен, К.Д. Теоретический и экспериментальный анализ тепловых выбросов с отработавшими газами судовых дизелей [Текст] // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. 2012. № 1. С. 117-122.
3. Термоэлектрические генераторы [Текст] / А.С. Охотин, А.А. Ефремов, В.С. Охотин, А.С. Пушкарский. – М.: Атомиздат, 1971. – 287 с.
4. Лобунец, Ю.Н. ТЭГ теплообменного типа для корабельных силовых установок. Часть II [Текст] // Термоэлектричество. Международный научный журнал. 2014. № 6. С. 72-81.