

ДК 629.5:621.4

М.Р. ТКАЧ

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНОВ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С УТИЛИЗАЦИЕЙ ТЕПЛА ДЛЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ СУДОВ

На базе математического моделирования показано, что в газотурбинной СЭУ специализированного судна, применение утилизации тепла обеспечивает повышение КПД и электрической мощности в 1,15...1,3 раза. Диапазон температур наружного воздуха, обеспечивающих максимум КПД, составляет (265...320) К. Максимальное значение электрической мощности достигается в диапазоне температур (265...295) К. Увеличение мощности ГТД приводит к снижению значения оптимальной температуры наружного воздуха

моделирование, альтернативное топливо, судовые энергетические установки, утилизация тепла

1. Постановка проблемы

Применение альтернативных топлив позволяет снизить топливную составляющую эксплуатационных затрат специализированных судов. Актуальность данной проблемы применительно к нашей стране нашла свое отражение в Законах Украины "Про альтернативні види рідкого та газового палива", "Про пріоритетні напрямки інноваційної діяльності в Україні", "Про Загальнодержавну комплексну програму розвитку високих наукоємних технологій" и в проекте Закона Украины «Про альтернативні джерела енергії».

Обзор публикаций и выделение нерешенных проблем. Применение газотурбинных двигателей (ГТД) простой схемы позволяет создавать судовые энергетические установки (СЭУ) различного целевого назначения. Использование сырой нефти и отходов термопластичных полимеров в качестве сырья для получения альтернативных топлив обеспечивает высокую эффективность СЭУ специализированных судов и технологических платформ [1,2]. Технологический электрообогрев оборудования дает ряд существенных преимуществ для таких СЭУ [2], что особенно актуально для судов, обеспечивающих электроснабжение потребителей.

Цель исследований. Задачей данного исследования является определение влияния утилизации тепла на параметры и показатели СЭУ специализированных судов и технологических платформ, использующих альтернативные топлива.

2. Решение проблемы

СЭУ специализированного судна, обеспечивающего выработку электроэнергии при использовании альтернативного топлива, состоит из ряда подсистем. Технологическая подсистема СЭУ включает в себя из группы оборудования первой и второй ступеней технологического процесса (ТП). Энергетическая подсистема – создана на базе ГТД с утилизацией тепла отходящих газов (рис. 1). Теплоутилизирующий контур (ТУК) выполнен по схеме одного давления на водяном паре. Утилизационный парогенератор (УПГ) включает в себя пароперегревательную, испарительную и экономайзерную поверхности нагрева. Схема питания УПГ – бездеаэрационная, с "теплым ящиком" (ТЯ). Принудительная циркуляция воды в УПГ, обеспечивается циркуляционным насосом (ЦН). Паровая турбина (ПТ) работает с перерасширением. Паровой конденсатор прокачивается охлаждающей водой с помощью главного циркуляционного насоса (ГЦН).

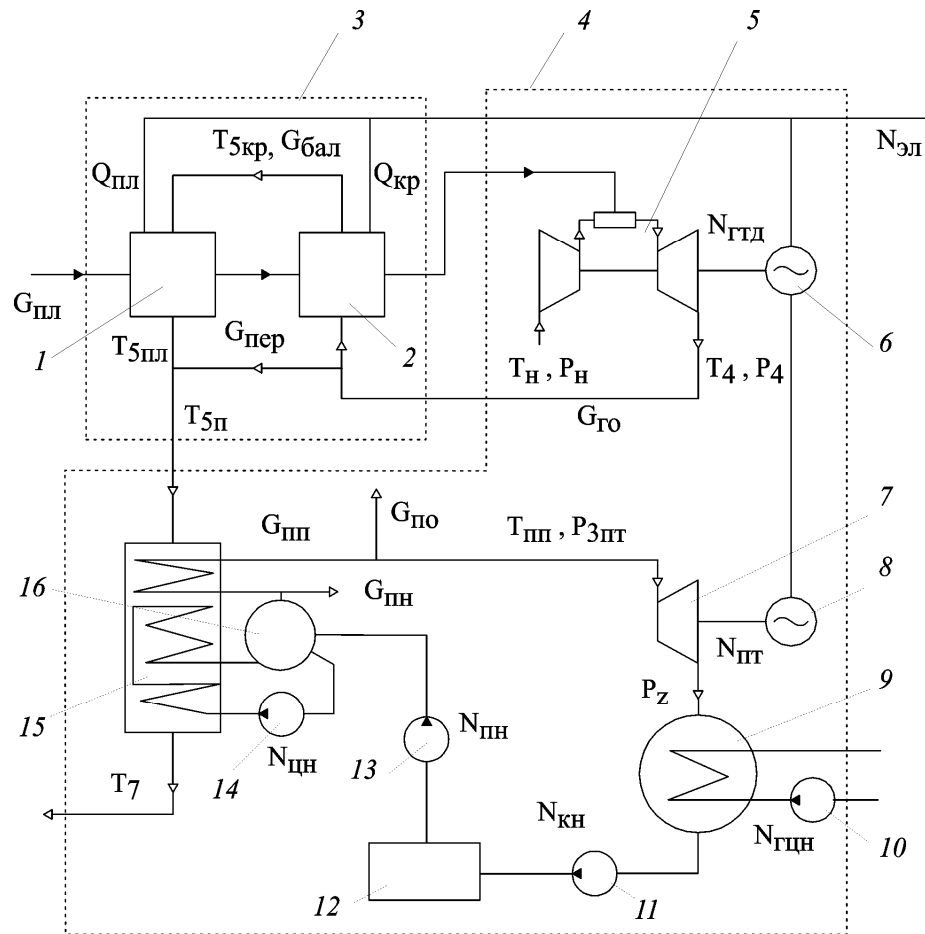


Рис. 1. Структурная схема газотурбинной энергетической установки специализированного судна: 1 – первая ступень ТП, 2 – вторая ступень ТП, 3 – технологическая подсистема, 4 – энергетическая подсистема, 5 – газотурбинный двигатель, 6, 8 – электрогенераторы, 7 – ПТ, 9 – конденсатор, 10 – ГЦН, 11 – КН, 12 – ТЯ, 13 – ПН, 14 – ЦН, 15 – УПГ, 16 – СП

Подачу конденсата из парового конденсатора обеспечивает конденсатный насос (КН), а из ТЯ в сепаратор (СП) – питательный насос (ПН). В схеме предусмотрены также отборы перегретого пара (ПП) и насыщенного пара (НП).

КПД процесса производства электроэнергии

$$\eta_{эл} = \frac{3600}{N_U \cdot b_e}, \quad (1)$$

где N_U – низшая располагаемая теплотворная способность топлива, кДж/кг.

Удельный расход перерабатываемого сырья на кВт-час отпускаемой потребителю электроэнергии

$$b_e = \frac{G_{пл} \cdot 3600}{N_{эл}}, \quad \text{кг}/(\text{кВт} \cdot \text{ч}). \quad (2)$$

Массовый расход сырья, использованного в СЭУ

$$G_{пл} = \frac{C_N \cdot N_{гтд}}{3600 \cdot k_{тех}}, \quad \text{кг}/\text{с}, \quad (3)$$

где C_N – удельный расход топлива ГТД, кг/(кВт·ч);

$N_{гтд}$ – механическая мощность ГТД, кВт;

$k_{тех}$ – относительный выход альтернативного топлива в процессе переработки сырья.

Удельный расход топлива ГТД

$$C_N = \frac{3600}{N_U \cdot \eta_e}, \quad (4)$$

где η_e – КПД ГТД.

Электрическая мощность СЭУ специализированного судна с утилизацией тепла

$$N_{эл} = N_{ГТД} \cdot \left(\eta_{ген} - \frac{\bar{N}_{сн} \cdot C_N}{k_{тех}} \right) + N_{пт} \cdot \eta_{ген} - \sum N_{н.тук} - Q_{кр.эл.} - Q_{пл.эл.}, \quad (5)$$

где $\eta_{ген}$ – электрический КПД генератора;

$\bar{N}_{сн}$ – удельный расход электроэнергии на собственные нужды технологического оборудования;

$N_{пт}$ – мощность ПТ ТУК;

$\sum N_{н.тук}$ – суммарная мощность насосов ТУК;

$Q_{кр.эл.}, Q_{пл.эл.}$ – электрическая мощность, расходуемая на подогрев во второй и первой ступенях ТП.

Определение показателей СЭУ специализированного судна осуществляется на базе математического моделирования с учетом взаимосвязи и взаимовлияния параметров подсистем [3].

Изменение мощности ($i = 1$), КПД ($i = 2$), расхода газа ($i = 3$) и температуры газа на выходе из ГТД ($i = 4$) в зависимости от коэффициентов восстановления полного давления на входе и выходе учтено методом малых отклонений [3]:

$$\delta Y_{iГТД} = [C_1^i \cdot (1 - v_{вх}) + C_2^i \cdot (1 - v_{вых})] Y_{iГТД_{iso}}, \quad (6)$$

где C_1^i, C_2^i – коэффициенты влияния;

$v_{вх}, v_{вых}$ – коэффициенты восстановления полного давления во входном и газоотводном устройстве устройствах ГТД;

$Y_{iГТД_{iso}}$ – соответствующий i параметр ГТД в условиях ISO 2314.

Влияние температуры наружного воздуха T_H на относительное изменение мощности ГТД, КПД ГТД и расхода газа на выходе аппроксимировано зависимостями вида:

$$\bar{Z}_{iГТД} = \sum_{j=0}^3 A_j^i T_H^j. \quad (7)$$

При температурах наружного воздуха, ниже $T_{гр1}$ выполняется проверка соблюдения условия

$$N_{ГТД} \leq K \cdot N_{ГТД_{iso}}, \quad (8)$$

где K – отношение максимальной допустимой мощности ГТД к номинальной.

Изменение относительной температуры газа на выходе из ГТД в функции температуры наружного воздуха аппроксимировано в виде

$$\bar{T}_4 = \sum_{j=0}^1 B_j T_H^j. \quad (9)$$

Для некоторых типов двигателей дополнительно установлено ограничение максимального значения температуры T_4 .

Коэффициенты уравнений (6)...(9) определены путем обработки данных [4].

Мощность паровой турбины ТУК

$$N_{пт} = (G_{пт} - G_{по}) \cdot (1 - \delta_{пт}) \times \Delta h_{пт} \cdot \eta_{пт} \cdot \eta_{м_{пт}}, \quad (10)$$

где $G_{пт}, G_{по}$ – паропроизводительность утилизационного парогенератора и отбор перегретого пара за пароперегревателем;

$\delta_{пт}$ – относительный расход перегретого пара на собственные нужды ТУК и утечки;

$\Delta h_{пт}$ – располагаемый теплоперепад в ПТ;

$\eta_{пт}$ – внутренний КПД ПТ;

$\eta_{м_{пт}}$ – механический КПД ПТ.

Паропроизводительность утилизационного парогенератора можно записать в виде следующей зависимости:

$$G_{пт} = f(G_{го}, c_{p_r}, T_{5п}, T_7, G_{пн}, k_1, x, P_{упг}, P_z, v_i), \quad (11)$$

где $G_{го}, c_{p_r}$ – расход и средняя массовая теплоемкость отходящих газов ГТД;

$T_{5п}, T_7$ – температуры газа на входе и выходе УПГ;

$G_{пн}$ – отбор насыщенного пара из СП;

k_1 – кратность циркуляции в УПГ;

x – степень сухости пара, поступающего в испарительный пучок утилизационного парогенератора;

$P_{упг}$ – давление пара в сепараторе утилизационного парогенератора;

P_Z – давление пара в конденсаторе ТУК;

v_i – коэффициенты учета потерь давления по паровой стороне ТУК.

Давление пара в сепараторе пара УПГ определяется по рекомендациям [5]:

$$P_{упг} = f(T_{5п}, \Delta T_{ип}, P_Z), \quad (12)$$

где $\Delta T_{ип}$ – минимальный температурный напор за испарительной поверхностью нагрева утилизационного парогенератора.

Оптимальная температура перегрева пара находится по сопряженным параметрам пара [5]:

$$T_{пп} = f(P_{упг}, \eta_{пт}, x_{\min}, P_Z), \quad (13)$$

где x_{\min} – минимальная степень сухости пара в конце действительного процесса расширения.

Суммарная мощность на привод насосов ТУК определится как

$$\sum N_{н.тук} = N_{нц} + N_{нп} + N_{нк} + N_{гнц} = f(G_{пп}, G_{пн}, G_{по}, k_1, Ц_K, \Delta P_1, \eta_{нi}), \quad (14)$$

где $Ц_K$ – кратность охлаждения конденсатора;

$\Delta P_1, \eta_{нi}$ – напор и КПД соответствующего насоса ТУК.

Определение рациональных диапазонов применения ГТУ с утилизацией тепла выполнено применительно к СЭУ специализированного судна с базовыми ГТД производства НПКГ "Зоря"- "Машпроект". Характеристики ГТД в условиях ISO 2314 приведены в табл. 1 [4].

Минимальные температурные напоры $\Delta T_{кр}$ и $\Delta T_{пл}$ составляют 55 К; удельный расход электроэнергии на собственные нужды технологического оборудования $\bar{N}_{сн} = 200$ Вт·ч/кг; удельные затраты

тепла на первую и вторую ступени ТП $\bar{Q}_{пл} = 300$ Вт·ч/кг и $\bar{Q}_{кр} = 900$ Вт·ч/кг [2, 3]; коэффициенты восстановления полного давления на входе и выходе ГТД $v_{вх} = 0,985$ и $v_{вых} = 0,96$; КПД электрогенератора $\eta_{ген} = 0,962$; кратность циркуляции $k_1 = 1,2...1,8$; кратность охлаждения парового конденсатора $Ц_K = 70...100$.

Таблица 1

Характеристики ГТД

Параметры, показатели	ГТ 2500	ГТ 6000	ГТ 15000	ГТ 25000
Механическая мощность, МВт	2,85	6,70	17,50	27,50
КПД, %	28,5	31,5	35,0	36,0
Температура газов на выходе, К	708	693	706	748
Расход газов на выходе, кг/с	15,0	31,0	70,4	86,0
Степень повышения давления	12,00	14,00	19,58	21,58

Как следует из приведенных результатов, утилизация тепла обеспечивает повышение КПД и электрической мощности СЭУ в 1,15...1,3 раза. В рассматриваемом диапазоне значений температуры наружного воздуха существуют максимальные значения КПД и электрической мощности СЭУ (рис. 2). Анализ приведенных данных свидетельствует, что с увеличением температуры наружного воздуха выше оптимального значения, не происходит существенного снижения КПД производства электроэнергии. Это является следствием применения утилизации тепла ГТД. Максимальное значение КПД СЭУ на базе ГТ6000 с ТУК достигается в диапазоне температур наружного воздуха (280...320) К (рис. 2, а). С увеличением мощности ГТД наблюдается снижение значений оптимальных температур. Так, применительно к ГТ15000 с ТУК он равен (265...285) К, а для ГТ25000 с ТУК диапазон оптимальных температур составляет (260...300) К.

Результаты расчетов электрической мощности СЭУ, представлены в виде относительного значения $N_{эл} / N_{ГТД_{ISO}}$ применительно к каждому базовому ГТД с ТУК. Максимальное значение электрической мощности СЭУ на базе GT6000 с ТУК достигается в диапазоне температур наружного воздуха (270...290) К (рис. 2, б). С увеличением мощности ГТД наблюдается снижение значения диапазона температур наружного воздуха, обеспечивающего максимальную электрическую мощность СЭУ.

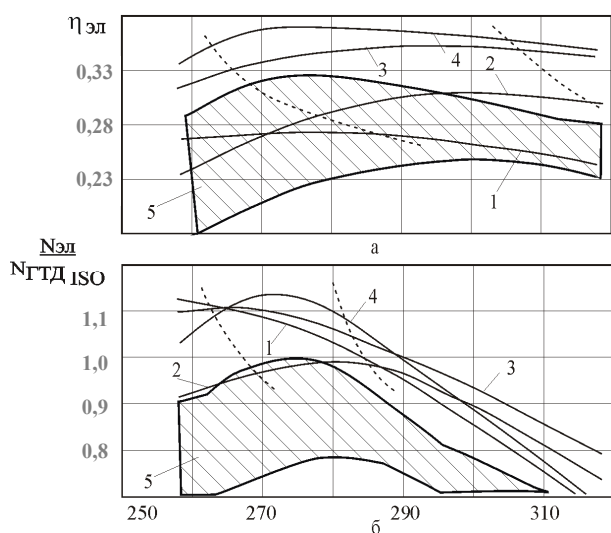


Рис. 2. Влияние ТУК на показатели СЭУ специализированного судна в зависимости от T_H : а – КПД производства электроэнергии; б – относительная вырабатываемая электрическая мощность; 1 – GT2500, 2 – GT6000, 3 – GT15000, 4 – GT25000, 5 – простая схема [3]

Так, применительно к GT25000 максимальная электрическая мощность достигается в диапазоне температур наружного воздуха (265...280) К.

Дальнейшие исследования должны выявить влияние частичных режимов работы на показатели эффективности газотурбинных СЭУ специализированных судов с утилизацией тепла.

Заключение

1. Применительно к СЭУ специализированного судна, использующего альтернативное топливо, утилизация тепла обеспечивает повышение КПД вырабатываемую мощность в 1,15...1,3 раза.

2. Утилизации тепла отходящих газов ГТД обеспечивает оптимальный по КПД температурный диапазон применения газотурбинной СЭУ специализированного судна $T_H = 265...320$ К; максимальное значение электрической мощности достигается $T_H = 265...295$ К.

3. Увеличение мощности ГТД приводит к снижению как оптимального по КПД, так и оптимального по мощности значения диапазона температур наружного воздуха.

Литература

1. Головащенко А.Ф., Тимощевский Б.Г., Ткач М.Р. Энерготехнологические газотурбинные комплексы на базе альтернативных топлив // Судовое и энергетическое газотурбостроение. Научно-технический сборник. Т. 1. – Николаев: НПКГ «Зоря»-«Машпроект», НО ИАУ. – 2004. – С. 281 – 285.
2. Ткач М.Р. Эффективность схемных решений энергетических установок специализированных судов и платформ на базе ГТУ // 36. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – № 5 (391). – С. 58 – 66.
3. Ткач М.Р. Влияние масштабного фактора на эффективность газотурбинных энергетических установок специализированных судов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – Вып. 7 (15). – С. 16 – 20.
4. Газотурбинные двигатели для энергетики и газотурбинные электростанции. – Николаев: НПКГ «Зоря»-«Машпроект», 2004. – 20 с.
5. Романовський Г.Ф., Ващиленко М.В., Сербін С.І. Теоретичні основи проектування судових газотурбінних агрегатів: Навчальний посібник. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – 304 с.

Поступила в редакцию 20.05.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.Д. Жуков, ЦКБ «Шип Дизайн энд Инжиниринг Юкрейн», Николаев.