

УДК 629.5:621.4

М.Р. ТКАЧ

*Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина*

## ВЛИЯНИЕ МАСШТАБНОГО ФАКТОРА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГАЗОТУРБИННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ СУДОВ

На базе математического моделирования показано, что в газотурбинной СЭУ специализированного судна мощностью 6 ... 25 МВт, использующей отходы термопластичных полимеров, диапазон температур наружного воздуха, обеспечивающий максимальное значение КПД, составляет (270 ... 310) К. Диапазон температур, обеспечивающий максимальное значение электрической мощности, составляет (260 ... 280) К. Увеличение мощности ГТД приводит к снижению оптимального (по КПД) значения температуры наружного воздуха и повышению оптимального (по мощности) ее значения.

**моделирование, эффективность, альтернативное топливо, судовые энергетические установки**

### 1. Постановка проблемы

Снижение топливной составляющей эксплуатационных затрат специализированных судов рационально осуществлять путем применения альтернативных топлив. Актуальность данной проблемы применительно к нашей стране нашла свое отражение в Законах Украины "Про альтернативні види рідкого та газового палива" (ВР України, Закон № 1391-XIV від 14.01.2000 р.), "Про пріоритетні напрямки інноваційної діяльності в Україні" (ВР України, Закон № 433-IV від 16.01.2003 р.), "Про Загальнодержавну комплексну програму розвитку високих наукоємних технологій" (ВР України, Закон № 1676-IV від 09.04.2004 р.) и в проекте Закона Украины «Про альтернативні джерела енергії» (реестр. № 6145).

**Обзор публикаций и выделение нерешенных проблем.** Применение плавучих производственных комплексов дает ряд существенных преимуществ по сравнению со стационарным размещением аналогичных производств [1].

Использование газотурбинных двигателей (ГТД) позволяет создавать высокоэффективные судовые энергетические установки (СЭУ) различного целевого назначения на базе существующих двигателей с адаптацией к ним СЭУ. Это позволяет минимизировать сроки создания и затраты. В связи с повышением стоимости нефти и нефтепродуктов актуальна проблема использования нефти и отхо-

дов термопластичных полимеров в качестве альтернативных топлив [2]. Схема с электрообогревом технологического оборудования обеспечивает ряд существенных преимуществ для СЭУ специализированного судна [3]. Такое схемное решение особенно актуально для судов, обеспечивающих электроснабжение потребителей.

**Цель исследований.** Задачей данного исследования является определение влияния масштабного фактора и условий эксплуатации на показатели и параметры 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 оборудование из группы первой и второй ступеней технологического процесса (ТП). Энергетическая подсистема создана на базе ГТД простой схемы. КПД процесса производства электроэнергии

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

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

Удельный расход перерабатываемого сырья на кВт-час отпускаемой потребителю электроэнергии

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

Массовый расход сырья, использованного в СЭУ

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

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

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

где  $\eta_e$  – КПД ГТД.

Электрическая мощность СЭУ специализированного судна

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

где  $\eta_{ген}$  – электрический КПД генератора;  $\bar{N}_{сн}$  – удельный расход электроэнергии на собственные нужды технологического оборудования;  $Q_{кр.эл}$  – электрическая мощность, расходуемая на подогрев во второй ступени ТП;  $Q_{пл.эл}$  – электрическая мощность, расходуемая на подогрев в первой ступени ТП.

Определение показателей СЭУ специализированного судна осуществляется путем математического моделирования с учетом взаимосвязи и взаимовлияния параметров энергетической и технологической подсистем.

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:

$$\delta Y_{i ГТД} = \delta \bar{Y}_{i ГТД} \cdot Y_{i ГТД iso}; \quad (6)$$

$$\delta \bar{Y}_{i ГТД} = C_1^i \cdot (1 - v_{вх}) + C_2^i \cdot (1 - v_{вых}), \quad (7)$$

где  $Y_{i ГТД iso}$  – параметр ГТД в условиях ISO 2314;

$\delta \bar{Y}_{i ГТД}$  – изменение относительного значения параметра;  $v_{вх}$  – коэффициент восстановления полного давления во входном устройстве ГТД;  $v_{вых}$  – коэффициент восстановления полного давления в газоотводном устройстве ГТД;  $C_1^i = \delta \bar{Y}_{i ГТД} / \delta P_H$  – коэффициент влияния величины давления воздуха на входе в ГТД;  $C_2^i = \delta \bar{Y}_{i ГТД} / \delta P_4$  – коэффициент влияния величины давления газа на выходе из ГТД.

Зависимость параметров ГТД от температуры наружного воздуха представлена в виде

$$Y_{i ГТД} = \bar{Z}_{i ГТД} \cdot Y_{i ГТД iso}. \quad (8)$$

Влияние температуры наружного воздуха  $T_H$  на относительное изменение мощности ГТД, КПД ГТД и расхода газа на выходе аппроксимировано как

$$\bar{Z}_{i ГТД} = \sum_{j=0}^3 A_j^i T_H^j. \quad (9)$$

При температурах наружного воздуха ниже  $T_{Гр1}$ , выполняется проверка соблюдения условия

$$N_{ГТД} \leq K \cdot N_{ГТД iso}, \quad (10)$$

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

$$\bar{T}_4 = \sum_{j=0}^1 B_j T_H^j, \quad (11)$$

где при  $T_H \leq T_{Гр1}$ ,  $B_j = b_j^1$ , иначе  $B_j = b_j^2$ .

Для некоторых типов двигателей дополнительно установлено ограничение максимального значения температуры  $T_4$ . Исследование влияния масштабного фактора и начальной температуры воздуха на показатели СЭУ специализированного судна выполнено применительно к базовым ГТД производства НПКГ "Зоря" – "Машпроект". Необходимые для

реализации модели характеристики ГТД в условиях ISO 2314 приведены в табл. 1 по данным [4].

Таблица 1  
Характеристики ГТД

Параметры, показатели	ГТ 2 500	ГТ 6 000	ГТ 15 000	ГТ 25 000
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

Коэффициенты влияния величин давления на входе и выходе –  $C_1^i$  и  $C_2^i$  определены методом односторонней вариации на базе характеристик ГТД, представляемых предприятием-изготовителем [4] (табл. 2).

Таблица 2  
Значения коэффициентов  $C_1^i$  и  $C_2^i$

ГТД		ГТ 2 500	ГТ 6 000	ГТ 15 000	ГТ 25 000
$\bar{N}_{ГТД}$	$C_1^1$	-2,0	-1,8	-1,8	-1,6
	$C_2^1$	-0,8	-1,0	-0,6	-0,75
$\bar{\eta}_e$	$C_1^2$	-1,0	-0,9	-0,8	-0,6
	$C_2^2$	-1,0	-0,9	-0,8	-0,6
$\bar{G}_{го}$	$C_1^3$	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0
	$C_2^3$	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0
$\bar{T}_4$	$C_1^4$	0,25	0,25	0,25	0,25
	$C_2^4$	0,25	0,25	0,25	0,25

Коэффициенты зависимостей мощности, КПД и расхода газа на выходе от температуры наружного воздуха –  $A_j^i$  определены путем аппроксимации данных [4] (табл. 3). Коэффициенты зависимостей температуры газа на выходе от температуры наружного воздуха –  $b_j^i$ , определены путем аппроксимации данных [4] (табл. 4).

В качестве варианта альтернативного топлива рассмотрены отходы термопластичных полимеров. Приведенные ниже результаты получены в диапазо-

не температур наружного воздуха (258 ... 318) К. Минимальные температурные напоры  $\Delta T_{кр}$  и  $\Delta T_{пл}$  составляют 55 К; удельный расход электроэнергии на собственные нужды технологического оборудования  $\bar{N}_{сн} = 200$  Втч/кг; удельные затраты тепла на первую и вторую ступени ТП  $\bar{Q}_{пл} = 300$  Втч/кг и  $\bar{Q}_{кр} = 900$  Втч/кг [3, 5]; коэффициенты восстановления полного давления на входе и выходе ГТД  $v_{вх} = 0,985$  и  $v_{вых} = 0,96$ ; КПД электрогенератора  $\eta_{ген} = 0,962$ .

Таблица 3  
Значения коэффициентов  $A_j^i$

ГТД	ГТ 2 500	ГТ 6 000	ГТ 15 000	ГТ 25 000
$A_0^1$	-4,4094	4,1071	3,5537	4,5948
$A_1^1 \cdot 10^2$	4,76	-1,08	-0,89	-1,25
$A_2^1$	-0,0001	0	0	0
$A_3^1$	0	0	0	0
$A_0^2$	-2,8216	-1,9281	0,77130	-0,54924
$A_1^2 \cdot 10^2$	2,914	2,839	0,104	1,261
$A_2^2 \cdot 10^5$	-5,138	-8,057	0,7818	-2,0856
$A_3^2 \cdot 10^8$	-1,33	6,01	-3,01	-1,47
$A_0^3$	1,8363	-10,107	1,1839	-6,7423
$A_1^3 \cdot 10^2$	-0,235	12,316	0,731	8,445
$A_2^3 \cdot 10^6$	-2	-432,51	-39,652	-280,35
$A_3^3 \cdot 10^8$	0	48,2	4,2	28,0

Таблица 4  
Значения коэффициентов  $b_j^i$

ГТД	ГТ 2 500	ГТ 6 000	ГТ 15 000	ГТ 25 000
$b_0^1 \cdot 10$	4,2545	1,2947	1,7363	-1,2166
$b_0^2 \cdot 10^3$	2,13	3,08	3,03	4,01
$b_0^2 \cdot 10$	8,5739	5,4527	6,9072	3,9604
$b_1^2 \cdot 10^3$	0,49	1,58	1,08	2,10
$T_{гр1}, K$	263	270	266	271

Как следует из приведенных данных, в рассматриваемом диапазоне значений температуры наружного воздуха для всех базовых ГТД существуют максимальные значения КПД и электрической мощности СЭУ специализированного судна (рис. 1).

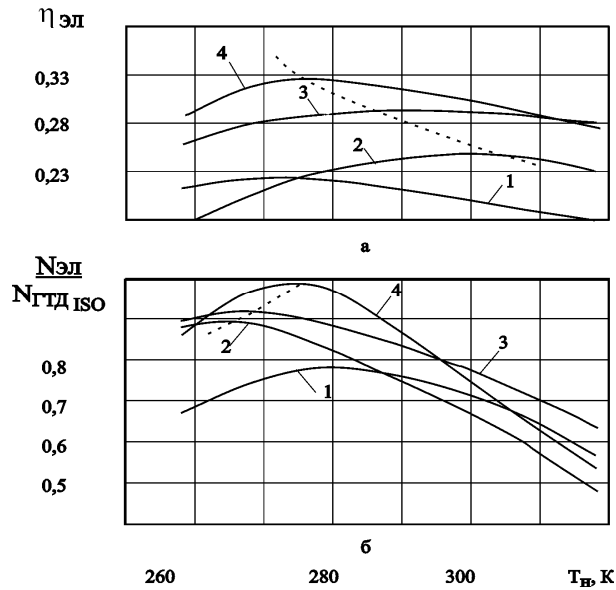


Рис. 1. Влияние мощности на показатели СЭУ специализированного судна в зависимости от температуры наружного воздуха: а – КПД производства электроэнергии; б – относительная вырабатываемая электрическая мощность; 1 – GT2500, 2 – GT6000, 3 – GT15000, 4 – GT25000

Максимальное значение КПД СЭУ на базе GT6000 достигается в диапазоне температур наружного воздуха (300...305) К (рис. 1, а). С увеличением мощности наблюдается снижение значения оптимального температурного диапазона. Так, применительно к GT15000 он равен (280 ... 290) К, а для GT25000 диапазон оптимальных температур снижается до (275...280) К.

С целью обобщения полученных результатов электрическая мощность СЭУ, представлена применительно к каждому базовому ГТД в виде относительного значения  $\frac{N_{эл}}{N_{ГТД_{ISO}}}$ . Максимальное значение электрической мощности СЭУ применительно к GT6000 достигается при температурах наружного воздуха (265..275) К (см. рис. 1, б). С увеличением мощности ГТД наблюдается повышение значения диапазона температур наружного воздуха, обеспечивающего максимальную электрическую мощность СЭУ. Так, применительно к GT25000, максимальная электрическая мощность достигается в диапазоне температур наружного воздуха (270 ... 280) К. Следует отметить, что в данном случае оптимальные значения температуры по КПД и электрической мощности СЭУ совпали.

Дальнейшие исследования должны выявить влияние частичных режимов работы на эффективность газотурбинных СЭУ специализированных судов.

### Заключение

1. В газотурбинной СЭУ специализированного судна мощностью 6 ... 25 МВт, использующей отходы термопластичных полимеров, диапазон температур наружного воздуха, обеспечивающий максимальное значение КПД, составляет (270 ... 310) К.
2. В аналогичных условиях – диапазон температур наружного воздуха, обеспечивающий максимальное значение электрической мощности, составляет (260 ... 280) К.
3. Увеличение мощности ГТД приводит к снижению оптимального (по КПД) значения температуры наружного воздуха и повышению ее значения, оптимального (по мощности).

### Литература

1. Moller A. P., SHIP-SHAPE (FPSOS) // World Oil, 00438790. – 2001. – Vol. 222, Issue 10. – P. 18.
2. Головащенко А.Ф., Ткач М.Р., Тимошевский Б.Г. Энерготехнологические газотурбинные комплексы на базе альтернативных топлив // Судовое и энергетическое газотурбостроение. НТС, т. 1. – Николаев: НПКГ «Зоря» – «Машпроект», НО ИАУ. – 2004. – С. 281 – 285.
3. Ткач М.Р. Эффективность схемных решений энергетических установок специализированных судов и платформ на базе ГТУ // Зб. наук. праць УДМТУ. – Николаїв: УДМТУ. – 2003. – № 5 (391). – С. 58 – 66.
4. Газотурбинные двигатели для энергетики и газотурбинные электростанции. – Николаев: НПКГ «Зоря» – «Машпроект», 2004. – 20 с.
5. Тимошевский Б.Г., Ткач М.Р. Альтернативные топлива для тепловых двигателей // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – Х.: Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ». – 2001. – Вип. 26. Двигуни та енергоустановки. – С. 13 – 18.

Поступила в редакцию 10.05.2004

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