

УДК 629.5:621.4

М.Р. ТКАЧ

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина

ВЛИЯНИЕ МОЩНОСТИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГАЗОТУРБИННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СУДОВ

Моделирование влияния параметров выполнено путем построения регрессионных модели на основе применения трехуровневых ротатбельных планов. Применительно к СЭУ специализированного судна, использующего в качестве альтернативного топлива отходы термопластичных полимеров, показано что повышение $\Delta T_{кр}$ приводит к снижению величин мощности и КПД СЭУ. Повышение $Q_{кр}$ приводит к снижению мощности и КПД. Влияние $v_{вых}$ и $\bar{Q}_{пл}$ на значение мощности и КПД СЭУ существенно слабее.

моделирование, эффективность, альтернативное топливо, судовые энергетические установки

1. Постановка проблемы

Топливная составляющая в структуре затрат судов является определяющей. Ее существенное снижение возможно путем применения альтернативных топлив что является актуальной проблемой и отражено в Законе Украины "Про альтернативні види рідкого та газового палива" (№ 1391-XIV от 14.01.2000 г.) и в проекте Закона Украины «Про альтернативні джерела енергії» (реестр. № 6145).

Обзор публикаций и выделение нерешенных проблем. Специализированные технологические суда – энерготехнологические комплексы – широко применяются в различных отраслях хозяйствования что дает ряд существенных преимуществ по сравнению со стационарным размещением аналогичных производств.

Перспективным видом альтернативных топлив являются отходы термопластичных полимеров. Выполненные в последние годы работы, показали целесообразность использования таких топлив в судовых условиях [2, 4]. Электрический обогрев технологического оборудования дает ряд компоновочных преимуществ при создании энергетических установок [5]. Математическая модель газотурбинной су-

довой энергетической установки (СЭУ) с электрическим обогревом технологического оборудования рассматривает потоки энергии и массы, что позволяет определить параметры рабочих тел и теплоносителей и на их основе – показатели эффективности СЭУ (КПД и мощность) [5].

Цель исследований. Выявление влияния мощности базовых ГТД и технологических параметров на показатели эффективности газотурбинных энергетических установок специализированных технологических судов на базе альтернативных топлив с электрическим обогревом технологического оборудования.

2. Решение проблемы

Структура судовой энергетической установки на базе газотурбинного двигателя (ГТД) простой схемы с электрическим обогревом технологического оборудования приведена на рис. 1.

Зависимости для определения мощности и КПД судовой газотурбинной энергетической установки с электрическим обогревом технологического оборудования [5] формализованы в виде [7]:

$$\begin{aligned} N &= N(Q_{кр}, Q_{нл}, \Delta T_{кр}, \Delta T_{нл}, N_{ГТД_{ISO}}, \dots); \\ \eta &= \eta(Q_{кр}, Q_{нл}, \Delta T_{кр}, \Delta T_{нл}, N_{ГТД_{ISO}}, \dots). \end{aligned} \quad (1)$$

где N – мощность СЭУ;

$Q_{кр}, Q_{нл}$ – удельные затраты тепла на вторую и первую ступени технологического процесса;

$\Delta T_{кр}, \Delta T_{нл}$ – температурный напоры на выходе второй и первой ступеней ТП;

$N_{ГТД_{ISO}}$ – мощность ГТД в условиях ISO 2314;

η – КПД СЭУ.

В качестве альтернативного топлива рассмотрены отходы термопластичных полимеров.

Исследуемые зависимости представлены в виде квадратичных функций от параметров технологического процесса:

$$N = \left[b_0 + \sum_{i=1}^4 (b_i X_i + \sum_{j=i}^4 b_{ij} X_i X_j) \right] N_0,$$

$$\eta = b_0 + \sum_{i=1}^4 (b_i X_i + \sum_{j=i}^4 b_{ij} X_i X_j), \quad (2)$$

где X_i, X_j – относительные значения параметров ТП;

b_i, b_j – регрессионные коэффициенты для каждой зависимости.

Рассмотрено влияние следующих параметров технологического процесса подготовки альтернативного топлива: удельные затраты тепла на вторую и первую ступени технологического процесса – $Q_{кр}$ и $Q_{нл}$ соответственно; коэффициент восстановления полного давления на выходе ГТД $\nu_{вых}$; температурный напор на выходе второй ступени ТП – $\Delta T_{кр}$.

Определение коэффициентов уравнения (2) выполнено методом планирования численного эксперимента на базе квадратичных ротатбельных планов [6, 7]. Диапазоны варьирования параметров приведены в табл. 1.

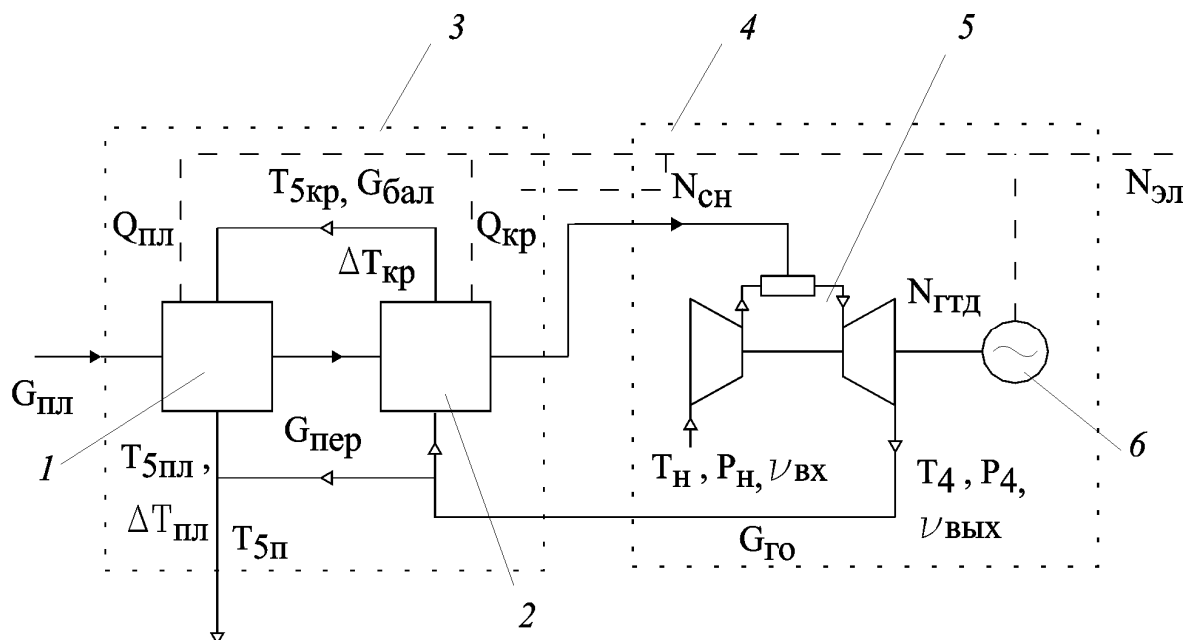


Рис. 1. Структурная схема газотурбинной энергетической установки специализированного судна:

1 – первая ступень ТП, 2 – вторая ступень ТП, 3 – технологическая подсистема, 4 – энергетическая подсистема, 5 – газотурбинный двигатель, 6 – электрогенератор

Таблица 1
Диапазон варьирования параметров
технологического процесса

Параметр	Значение	
	Мин.	Макс.
Удельные затраты тепла на вторую ступень ТП $\bar{Q}_{кр}$, Вт·ч/кг	800	1000
Удельные затраты тепла на первую ступень ТП $\bar{Q}_{пл}$, Вт·ч/кг	200	400
Коэффициент восстановления полного давления на выходе ГТД $v_{вых}$	0,94	0,98
Температурный напор на выходе второй ступени ТП $\Delta T_{кр}$, К	30	80

С целью обеспечения равнозначности выполнено приведение параметров технологического процесса к диапазону варьирования $-1 \dots +1$. Тогда минимальное, среднее и максимальное значения нормированных параметров составят -1 , 0 и 1 соответственно.

План численного эксперимента приведен в таблице 2 [6, 7].

Таблица 2
Матрица планирования численного эксперимента

Параметры				Примечания
$\bar{Q}_{кр}$	$\bar{Q}_{пл}$	$v_{вых}$	$\Delta T_{кр}$	
X_1	X_2	X_3	X_4	Относительное значение
± 1	± 1	0	0	Число опытов – 4
0	0	± 1	± 1	Число опытов – 4
± 1	0	0	± 1	Число опытов – 4
0	± 1	± 1	0	Число опытов – 4
± 1	0	± 1	0	Число опытов – 4
0	± 1	0	± 1	Число опытов – 4
0	0	0	0	Число опытов – 3

Примечание: условное обозначение ± 1 указывает на необходимость составить все возможные сочетания каждой из двух ненулевых переменных на верхнем и нижнем уровнях варьирования.

Определение регрессионных коэффициентов выполнено в соответствии с [6]:

$$b_0 = Y_0; \quad b_i = 0,0833 \sum_{u=1}^{27} X_{iu} Y_u;$$

$$b_{ii} = 1/8 \sum_{u=1}^{27} X_{iu}^2 Y_u - 0,0208 \sum_{i=1}^4 \sum_{u=1}^{27} X_{iu}^2 Y_u - \frac{Y_0}{2};$$

$$b_{ij} = 0,25 \sum_{u=1}^{27} X_{iu} X_{ju} Y_u, \quad (3)$$

где: Y_0, Y_u – значения функции (мощности или КПД) в нулевой и текущей точках плана;

u – порядковый номер опыта.

С целью исследования влияния мощности базового ГТД на показатели эффективности СЭУ рассмотрены двигатели производства НПКГ «Зоря»-«Машпроект» при температуре наружного воздуха 288 К. Необходимые для реализации модели характеристики ГТД в условиях по *ISO2314* ($T_n = 288K$, $v_{ex} = 0,0$, $v_{вых} = 0,0$) приведены в [1, 3].

Результаты исследований получены при следующих исходных данных. Минимальный температурный напор за первой ступенью ТП $\Delta T_{пл}$ составляет 55К; удельный расход электроэнергии на собственные нужды технологического оборудования $\bar{N}_{сн} = 200$ Вт ч/кг [4]; коэффициент восстановления полного давления на входе ГТД $v_{ex} = 0,985$; КПД генератора $\eta_{ген} = 0,962$.

Реализации модели позволила получить значения регрессионных коэффициентов для ГТД *GT15000* и *GT15000*. Ввиду ограниченного объема публикации они не приводятся. Средняя квадратичная погрешности регрессионного моделирования зависимостей КПД и мощности составляет 0,1 % и 0,4 % применительно к *GT15000* и *GT15000*. Аналогичные данные применительно к *GT6000* получены ранее [7].

Проведенный анализ свидетельствует о весьма слабой зависимости показателей СЭУ от величины затрат электроэнергии на первую ступень ТП $\bar{Q}_{пл}$, что является следствием использования тепла отходящих газов ГТД для обогрева технологических аппаратов второй ступени ТП.

Исследование влияния относительных затрат электроэнергии на вторую ступень ТП – $\bar{Q}_{кр}$, коэффициента восстановления полного давления на выходе – $v_{вых}$ и температурного напора на выходе ГТД – $\Delta T_{кр}$ на показатели СЭУ выполнено путем сечения гиперповерхности соответствующей зависимости при постоянных значениях двух параметров из трех.

Результаты расчетов мощности СЭУ представлены в относительном виде N/N_0 . В качестве нормирующего значения для каждого базового ГТД принято среднее арифметическое значение мощности во всем рассмотренном диапазоне изменения технологических параметров. Эти значения составляют 3,88 МВт, 12,1 МВт и 22,6 МВт для ГТД *GT6000*, *GT15000* и *GT25000* соответственно.

Как следует из результатов расчетов, приведенных на рис. 2, относительная мощность СЭУ в рассматриваемых диапазонах варьирования параметров

изменяется в диапазоне 0,75...1,26 для *GT6000*. При увеличении мощности базового ГТД происходит снижение влияния технологических параметров на значение мощности СЭУ. Так, диапазон изменения величины относительной мощности СЭУ составит 0,8 ... 1,2 для *GT15000* и 0,87 ... 1,19 применительно к *GT25000*.

Максимальное значение мощности СЭУ достигается для всех базовых ГТД при минимальном значении $\bar{Q}_{кр}$ и $\Delta T_{кр}$ и максимальном значении $v_{вых}$ (см. табл. 1), т.к. при таком сочетании значений технологических параметров обеспечиваются наименьшие затраты энергии на технологический процесс и максимальная мощность ГТД.

Наиболее сильное влияние на величину мощности СЭУ в рассмотренном диапазоне параметров оказывает температурный напор на выходе второй ступени технологического процесса – $\Delta T_{кр}$

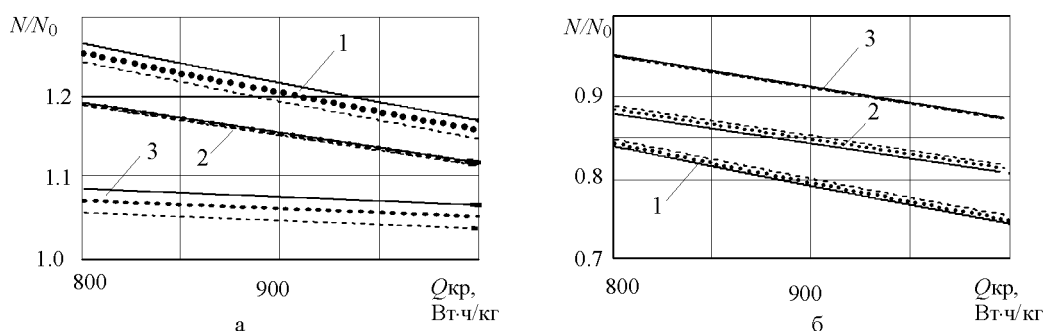


Рис. 2. Влияние мощности базового ГТД и технологических параметров на относительную мощность СЭУ специализированного судна:

а – $\Delta T_{кр} = 30\text{K}$; б – $\Delta T_{кр} = 80\text{K}$; 1 – *GT6000* ($N_0 = 3,88$ МВт); 2 – *GT15000* ($N_0 = 12,1$ МВт); 3 – *GT25000* ($N_0 = 22,6$ МВт); — $v_{вых} = 0,98$; $v_{вых} = 0,96$; $v_{вых} = 0,94$

Так, при изменении $\Delta T_{кр}$ от 30К до 80К происходит снижение относительной мощности СЭУ в диапазоне 1,25...0,75 для ГТД *GT6000*, 1,20...0,80 *GT15000* и 1,08...0,87 *GT25000*.

Снижение мощности СЭУ при увеличении $\bar{Q}_{кр}$ от 800 до 1000 Вт ч/кг оказалось для каждого базового ГТД практически постоянным и равным для

рассмотренных диапазонов изменения $\Delta T_{кр}$ и $v_{вых}$ 0,20...0,25, 0,10...0,20 для ГТД *GT6000*, *GT15000* и 0,05...0,20 для *GT25000* соответственно.

Приведенные результаты свидетельствуют, что влияние $v_{вых}$ на изменение мощности СЭУ различно в зависимости от величины $\Delta T_{кр}$. Так, при зна-

чениях $\Delta T_{кр}=30\text{К}$ уменьшение $v_{вых}$ от 0,98 до 0,94 приводит к снижению мощности СЭУ.

При значениях $\Delta T_{кр}=80\text{К}$ уменьшение $v_{вых}$ от 0,98 до 0,94 приводит к повышению мощности СЭУ. Это связано с противоположным влиянием сопротивления на выходе ГТД на его мощность и величину температура газов на выходе T_4 [7].

Анализ результатов показал, что для всех базовых ГТД существует диапазон значений $\Delta T_{кр}$, в котором влияние сопротивления на выходе ГТД на величину мощности СЭУ пренебрежимо мало.

Результаты исследования влияния мощности и технологических параметров на КПД СЭУ приведены на рис. 3.

Как следует из результатов, расчетов КПД СЭУ существенно повышается при увеличении мощности базового ГТД.

Так, если для $GT6000$ в рассматриваемых диапазонах варьирования параметров он составляет 0,135...0,230, то для $GT15000$ КПД составляет 0,19...0,29 и 0,26...0,32 для $GT25000$.

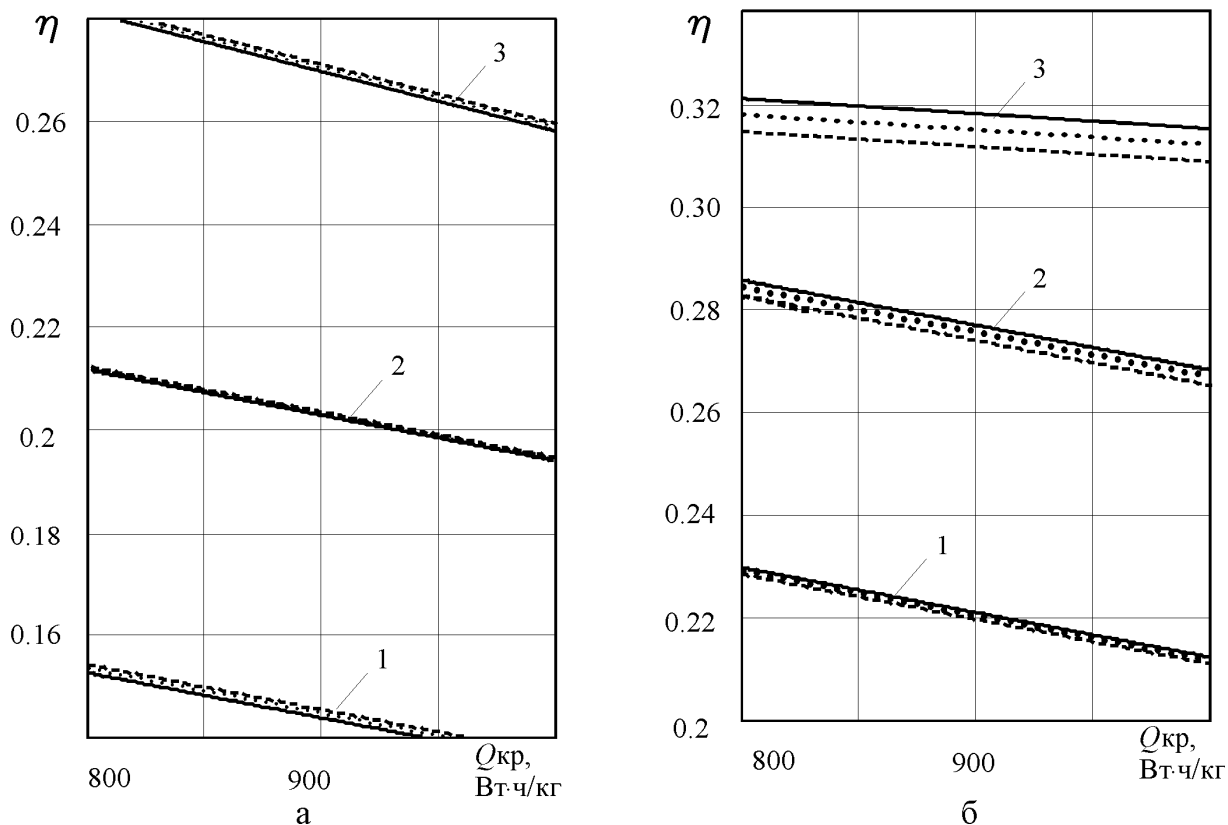


Рис. 3. Влияние мощности и технологических параметров на КПД СЭУ специализированного судна:
а – $\Delta T_{кр}=30\text{К}$; б – $\Delta T_{кр}=80\text{К}$; 1- $GT6000$; 2- $GT15000$; 3- $GT25000$;

— $v_{вых}=0,98$; $v_{вых}=0,96$; - - - $v_{вых}=0,94$

Максимальное значение КПД достигается для всех базовых ГТД при минимальном значении $Q_{кр}$ и $\Delta T_{кр}$ и максимальном значении $v_{вых}$ (табл. 1), т.к. при этом обеспечиваются наименьшие затраты

энергии на технологический процесс и наибольшее значение КПД ГТД.

Наиболее сильное влияние на величину КПД СЭУ в рассмотренном диапазоне параметров оказы-

вает температурный напор на выходе второй ступени технологического процесса – $\Delta T_{кр}$. Так, при изменении $\Delta T_{кр}$ от 30К до 80К происходит снижение КПД СЭУ в зависимости от величины $v_{вых}$ на 7%...8% для GT6000, на 6%...7% GT15000 и 4%...5% для GT25000.

Изменение КПД СЭУ при увеличении $Q_{кр}$ от 800 до 1000 Вт ч/кг оказалось практически постоянным для рассмотренных диапазонов изменения $\Delta T_{кр}$ и $v_{вых}$ и равным 1,5%...1,7% для GT6000, 1,2...1,5 % для GT15000 и 0,5...2,5 % применительно к базовому ГТД GT25000

Приведенные результаты свидетельствуют, что влияние $v_{вых}$ на изменение мощности СЭУ в зависимости от величины $\Delta T_{кр}$ аналогично влиянию на мощность СЭУ. Следует отметить при этом, что в рассматриваемом диапазоне параметров влияние $v_{вых}$ не превышает десятых долей процента.

Выводы

1. Построены регрессионные модели зависимости мощности и КПД СЭУ на базе ГТД мощностью 6...25 МВт.

2. Показано, что для рассматриваемых ГТД изменение $\Delta T_{кр}$ в диапазоне 30К...80К приводит к снижению величин мощности СЭУ и КПД СЭУ на 30...50% и 6...10% соответственно.

3. Показано, что повышение $Q_{кр}$ от 800 до 1000 Вт·ч/кг приводит к снижению мощности СЭУ 10...25% и снижению величины КПД на 1,5...1,7%.

4. Влияние технологических параметров $v_{вых}$ и $\bar{Q}_{пл}$ на значение мощности и КПД СЭУ существенно слабее.

Литература

1. Газотурбинные двигатели для энергетики и газотурбинные электростанции. – Николаев: НПКГ «Зоря»-«Машпроект», 2004. – 20 с.
2. Головащенко А.Ф., Тимошевский 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.
3. Сташок А.Н., Шелестюк А.И. Газотурбинные двигатели НПП «Машпроект» для электростанций. Опыт и новые энергосберегающие технологии // Известия академии инженерных наук Украины. – Николаев: НПП Машпроект, 1999. – Вып. 1. – С 52 – 57.
4. Тимошевский Б.Г., Ткач М.Р. Альтернативные топлива для тепловых двигателей // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – Х.: Нац. Аерокосмічний ун-т «ХАІ», 2001. – Вып. 26. – Двигуни та енергоустановки. – С. 13 –18.
5. Ткач М.Р. Моделирование влияния условий эксплуатации на эффективность газотурбинных энергетических установок специализированных судов // Вестник двигателестроения. – Запорожье: Мотор Сич, 2004. – № 2. – С. 13 – 17.
6. Box G.E.P., Behnken D.W. Some new three level designs for the study of quantitative variables // Technometrics, 1960. – V. 2. – № 4. – P. 455 – 475.
7. Ткач М.Р. Моделирование влияния технологических параметров на эффективность газотурбинных энергетических установок специализированных судов (в печати).

Поступила в редакцию 1.06.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.И. Сербин, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев.