

УДК 629.5:621.4

М.Р. ТКАЧ

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГАЗОТУРБИННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ДКС ДЛЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СУДОВ

Газотурбинная энергетическая установка специализированного технологического судна, состоит из технологической и энергетической подсистем. Построение регрессионной модели влияния технологических параметров выполнено на основе применения трехуровневых ротатабельных планов. Применительно к, использованию в качестве альтернативного топлива отходов термопластичных полимеров, показано влияние затрат тепла на технологический процесс, аэродинамического сопротивления и температурного напора на выходе технологического оборудования на КПД и мощность СЭУ.

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

Введение

Применение альтернативных топлив является одним из перспективных путей снижения топливной составляющей затрат судов. Актуальность данной проблемы отражена 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» (ре-е-стр. № 6145).

Обзор публикаций и выделение нерешенных проблем. Специализированные технологические суда применяются при разработке нефтегазовых месторождений, обеспечении электроэнергией и теплом, что дает ряд существенных преимуществ по сравнению со стационарным размещением аналогичных производств [1].

Перспективным видом альтернативных топлив являются отходы термопластичных полимеров. Выполненные в последние годы работы, показали целесообразность использования таких топлив в судовых условиях [2, 3]. Применение дополнительной камеры сгорания (ДКС) обеспечивает существенное повышение эффективности СЭУ специализированного судна.[1]. Математическая модель газотурбин-

ной судовой энергетической установки (СЭУ) с ДКС разработана на основе первого начала термодинамики и теории систем. На базе рассмотрения потоков энергии и массы получены зависимости, позволяющие определить значения температур, давлений и расходов рабочих тел (теплоносителей), что позволило определить показатели эффективности СЭУ – КПД и мощность [1].

Цель исследований. Выявление закономерностей влияния технологических параметров на показатели эффективности газотурбинных энергетических установок с ДКС на базе альтернативных топлив для специализированных технологических судов.

Результаты исследований

Структура энергетической подсистемы СЭУ специализированного технологического судна, включает в себя в общем случае главные и вспомогательные двигатели и оборудование по утилизации тепла. Структура технологической подсистемы включает в себя группы оборудования первой и второй ступеней технологического процесса (ТП). В данном исследовании рассмотрена СЭУ на базе газотурбинного двигателя (ГТД) простой схемы с до-

полнительной камерой сгорания (рис. 1). Показатели эффективности судовой газотурбинной энергетической установки с дополнительной камерой сгорания – мощность и КПД с определены по зависимостям [1] и формализованы в виде:

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

где N – мощность СЭУ; $Q_{кр}, Q_{нл}$ – удельные затраты тепла на вторую и первую ступени технологического процесса; $\Delta T_{кр}, \Delta T_{нл}$ – температурные напоры на выходе второй и первой ступеней ТП; $N_{ГТД_{ISO}}$ – мощность ГТД в условиях *ISO 2314*; η – КПД СЭУ.

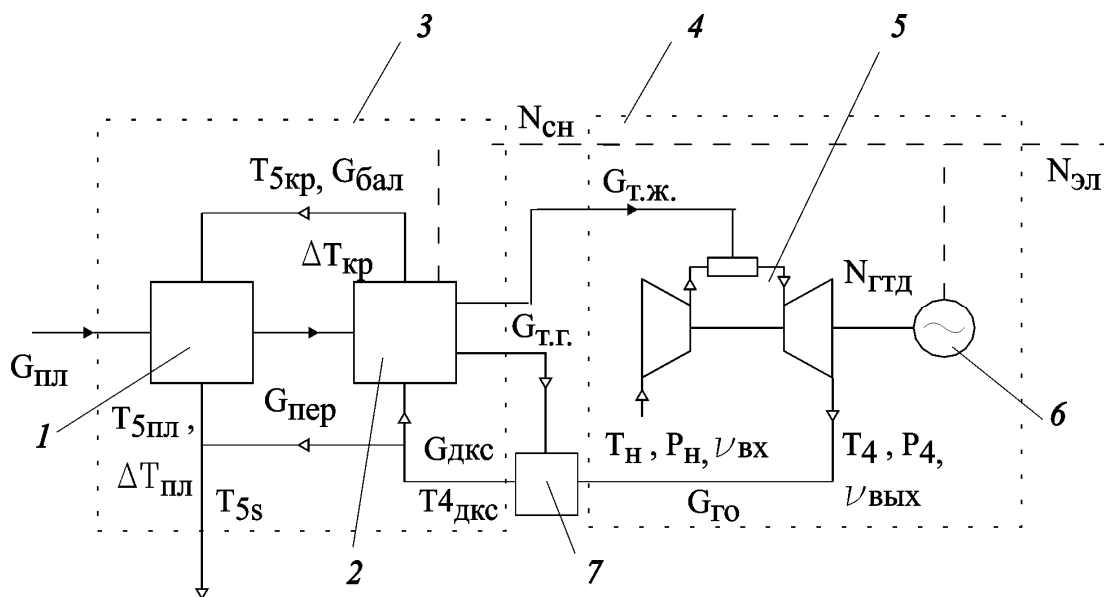


Рис. 1. Структурная схема газотурбинной энергетической установки специализированного судна: 1 – первая ступень ТП, 2 – вторая ступень ТП, 3 – технологическая подсистема, 4 – энергетическая подсистема, 5 – газотурбинный двигатель, 6 – электрогенератор, 7 – ДКС

В качестве альтернативного топлива рассмотрены отходы термопластичных полимеров.

Исследование влияния параметров технологического процесса на показатели СЭУ выполнено на базе регрессионного моделирования. Оценка значимости технологических параметров позволила рассматривать следующие параметры технологического процесса: удельные затраты тепла на вторую и первую ступени технологического процесса – $Q_{кр}$ и $Q_{нл}$ соответственно; коэффициент восстановления полного давления на выходе ГТД – $v_{вых}$; температурный напор на выходе второй ступени ТП – $\Delta T_{кр}$. Исследуемые зависимости представлены в виде квадратичных функций от параметров технологического процесса:

$$\begin{aligned} N &= \left[b_0 + \sum_{i=1}^4 (b_i X_i + \sum_{j=i}^4 b_{ij} X_i X_j) \right] N_0; \\ \eta &= b_0 + \sum_{i=1}^4 (b_i X_i + \sum_{j=i}^4 b_{ij} X_i X_j), \end{aligned} \quad (2)$$

где X_i, X_j – относительные значения параметров ТП; b_i, b_j – регрессионные коэффициенты для каждой зависимости.

Определение коэффициентов уравнения (2) выполнено методом планирования численного эксперимента на базе квадратичных ротатабельных планов [4]. Рассматриваются три уровня варьирования параметров. Максимальное и минимальное значения варьируемых параметров приведены в табл. 1. Третий уровень варьирования является средним значением в рассматриваемом диапазоне изменения.

Таблица 1
Диапазоны 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

Существенные различия в значениях значений технологических параметров потребовали приведение их к диапазону $-1...+1$. Минимальное, среднее и максимальное значения нормированных параметров составят $-1, 0$ и 1 соответственно.

План численного эксперимента приведен в таблице 2 по данным [4].

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 [4]:

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

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

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

где Y_0, Y_u – значения функции (мощности или КПД) в нулевой и текущей точках плана; u – порядковый номер опыта.

Погрешность построения регрессионной модели определена как средняя квадратичная разность значений функции – исходных и рассчитанных по регрессионной модели.

В качестве базового ГТД рассмотрен *GT6000* производства НПКГ «Зорья»-«Машпроект» при температуре наружного воздуха 288 К.

Необходимые для реализации модели характеристики ГТД в условиях по *ISO2314* ($T_1 = 288$ К, $v_{ex} = 0,0, v_{вых} = 0,0$) даны в [5, 6].

Приведенные ниже результаты получены при следующих исходных данных.

Минимальный температурный напор после первой ступени ТП $\Delta T_{пл}$ составляет 55К; удельный расход электроэнергии на собственные нужды технологического оборудования $\bar{N}_{сн} = 200$ Вт ч/кг [3]; коэффициент восстановления полного давления на входе ГТД $v_{ex} = 0,985$; КПД генератора $\eta_{ген} = 0,962$.

Средняя квадратичная погрешности регрессионного моделирования зависимостей КПД и мощности составляет 0,27 и 0,32 % соответственно.

Анализ величин регрессионных коэффициентов свидетельствует о весьма слабой зависимости показателей СЭУ от величины затрат электроэнергии на первую ступень ТП $\bar{Q}_{пл}$ (табл. 3). Этот результат является следствием использования тепла отходя-

щих газов ГТД для обогрева технологических аппаратов второй ступени.

Исследование влияния относительных затрат электроэнергии на вторую ступень ТП $\bar{Q}_{кр}$, коэффициента восстановления полного давления на вы-

ходе $v_{вых}$ и температурного напора на выходе второй ступени ТП – $\Delta T_{кр}$ на показатели СЭУ выполнено путем сечения гиперповерхности соответствующей зависимости при постоянных значениях $v_{вых}$, $\Delta T_{кр}$.

Таблица 3

Коэффициенты уравнений (2)

Регрессионные коэффициенты	Показатель СЭУ								
	КПД				Мощность				
b_0	0.2169				0.9998				
Y_0	0.1824				5461				
i	1	2	3	4	1	2	3	4	
$b_{ii} \cdot 10^3$	-4,475	0	1,242	-17.18	-1,384	0	22,03	-5,241	
$b_{ji} \cdot 10^3$	$j=1$	0.0458	0	0	0,00382	0,003815	0	-0,0137	0,0458
	$j=2$	–	-0,04167	0	0	–	0,00610	0	0
	$j=3$	–	–	-0,0792	0	–	–	0,0473	-0,1144
	$j=4$	–	–	–	0	–	–	–	0,3059

Как следует из результатов расчетов, приведенных на рис. 2, величина мощности СЭУ на базе GT6000 с ДКС изменяется в достаточно узком диапазоне – 5,30...5,62 МВт.

Это является следствием применения ДКС для обеспечения температурных режимов технологического процесса. При изменении параметров ТП происходит адекватное изменение расхода топлива на ДКС и связанное с ним изменение затрат сырья и величины мощности, затрачиваемой на собственные нужды [1].

Максимальное значение мощности СЭУ достигается при минимальном значении $Q_{кр}$ и $\Delta T_{кр}$ и максимальном значении $v_{вых}$ (табл. 1). При таком сочетании значений технологических параметров обеспечиваются и наименьшие затраты энергии на технологический процесс и максимальная мощность ГТД.

Результаты исследования влияния технологических параметров на КПД газотурбинной СЭУ с ДКС приведены на рис.2б. Как следует из результатов, расчетов КПД СЭУ на базе GT6000 с ДКС в рас-

считываемом диапазоне варьирования параметров изменяется от 0,20 до 0,24.

Максимальное значение КПД достигается при минимальном значении $Q_{кр}$ и $\Delta T_{кр}$ и максимальном значении $v_{вых}$ (табл. 1), так как при таком сочетании значений технологических параметров обеспечиваются и наименьшие затраты топлива на ДКС и наибольшее значение КПД ГТД.

Наиболее сильное влияние на величину КПД СЭУ в рассмотренном диапазоне параметров оказывает температурный напор на выходе второй ступени технологического процесса – $\Delta T_{кр}$. Так, при увеличении $\Delta T_{кр}$ от 30 до 80 К происходит снижение КПД СЭУ на 3 ... 4% в зависимости от величины $v_{вых}$.

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

Приведенные результаты также показывают, что влияние $v_{вых}$ на изменение КПД СЭУ на базе ГТД

с ДКС существенно слабее. Так, при увеличении $v_{\text{ВЫХ}}$ от 0,94 до 0,98 происходит повышение КПД на 0,3%...0,4%.

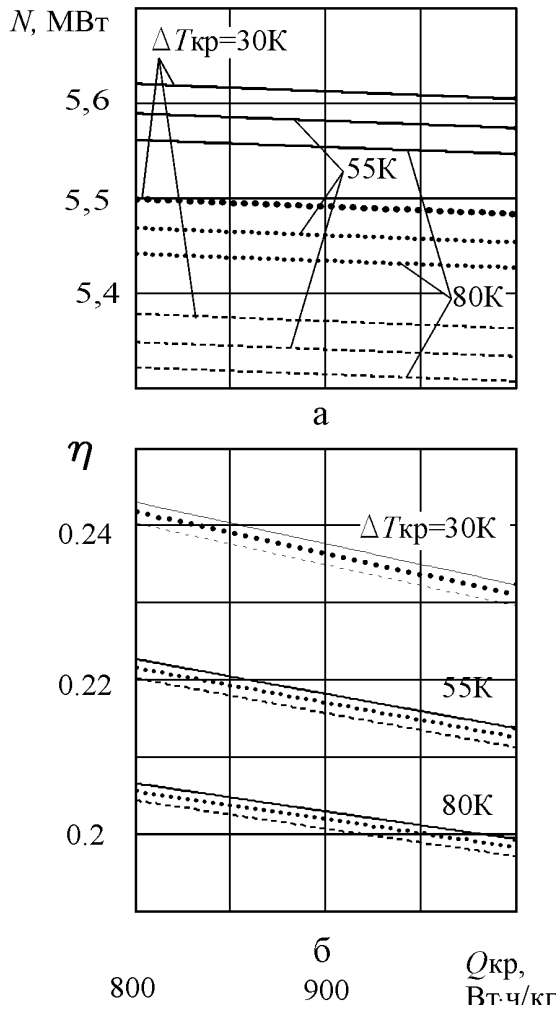


Рис.2. Влияние технологических параметров на мощность (а) и КПД (б) СЭУ специализированного судна:

- $v_{\text{ВЫХ}}=0,98$;
- $v_{\text{ВЫХ}}=0,96$;
- $v_{\text{ВЫХ}}=0,94$.

Выводы

1. Построена регрессионная модель зависимости мощности и КПД СЭУ специализированного технологического судна на базе ГТД с ДКС от технологических параметров.

2. Показано, что изменение $\Delta T_{\text{êđ}}$ в диапазоне 30 ... 80 К приводит к снижению мощности СЭУ на

базе GT6000 на 0,25...0,32 МВт и снижению величины КПД на 3%...4%. 3. Изменение $Q_{\text{êđ}}$ в диапазоне 800 Вт·ч/кг...1000 Вт·ч/кг приводит к снижению КПД СЭУ на 0,7%...1,0%. 4. Влияние технологических параметров $v_{\text{âúđ}}$ и $\bar{Q}_{\text{îë}}$ на значения мощности и КПД существенно слабее.

Литература

1. Ткач М.Р. Моделирование эффективности газотурбинных энергетических установок с дополнительной камерой сгорания для специализированных судов // 36. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ. – 2005. – № 2. – С. 75 – 86.
2. Головащенко А.Ф., Тимошевский Б.Г., Ткач М.Р. Энерготехнологические газотурбинные комплексы на базе альтернативных топлив // Судовое и энергетическое газотурбостроение. Т. 1.– Николаев: НПКГ «Зоря»-«Машпроект», НО ИАУ. – 2004.– С. 281 – 285.
3. Тимошевский Б.Г., Ткач М.Р. Альтернативные топлива для тепловых двигателей // Авіаційно-космічна техніка і технологія: 36. наук. праць. – Х.: Нац. аерокосм. ун-т “ХАІ”. – 2001. – Вып. 26. Двигуни та енергоустановки. – С. 13 – 18.
4. Газотурбинные двигатели для энергетики и газотурбинные электростанции. – Николаев: НПКГ «Зоря»-«Машпроект», 2004. – 20 с.
5. 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.

Поступила в редакцию 12.05.2005

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