

УДК 629.5 : 621.4

М.Р. ТКАЧ

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГАЗОТУРБИННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ СУДОВ

Газотурбинная энергетическая установки специализированного судна, использующего альтернативное топливо, состоит из технологической и энергетической подсистем. Моделирование выполнено путем построения регрессионной модели на основе применения трехуровневых ротатбельных планов. Применительно к СЭУ специализированного судна, использующего в качестве альтернативного топлива отходы термопластичных полимеров, показано влияние затрат тепла на ТП, аэродинамического сопротивления и температурного напора на выходе технологического оборудования на КПД и мощность СЭУ.

моделирование, эффективность, альтернативное топливо, судовые энергетические установки

Постановка проблемы

Снижение топливной составляющей затрат судов путем применения альтернативных топлив является актуальной проблемой, что 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. В настоящее время получили широкое развитие специализированные суда – плавучие производственные комплексы, которые применяются при разработке нефтегазовых месторождений, обеспечении электроэнергией и теплом и т.п. [5]. Такое организационно-техническое решение дает ряд существенных преимуществ по сравнению со стационарным размещением производств.

С повышением стоимости нефти и нефтепродуктов проблема использования нефти в качестве топлива судовых двигателей обостряется [2]. Другим перспективным видом альтернативных топлив являются отходы термопластичных полимеров. Выполненные в последние годы работы, показали целесообразность использования таких топлив в судо-

вых условиях [2, 4]. Электрический обогрев технологического оборудования дает ряд компоновочных преимуществ при создании энергетических установок [5]. Математическая модель газотурбинной судовой энергетической установки (СЭУ) с электрическим обогревом технологического оборудования 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 и теплоносителей, что позволило определить показатели эффективности СЭУ – КПД и мощность [5].

Цель исследований. Выявление закономерностей влияния технологических параметров на показатели эффективности судовых газотурбинных СЭУ на базе альтернативных топлив с электрическим обогревом технологического оборудования.

Решение проблемы

Структура энергетической подсистемы СЭУ специализированного судна, для выработки электроэнергии 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 электрическим обогревом технологического оборудования (рис. 1).

Мощность и КПД судовой газотурбинной энергетической установки с электрическим обогревом технологического оборудования определены по зависимостям [5] и могут быть формализованы в виде:

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

где N – мощность СЭУ;

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

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

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

η – КПД СЭУ.

В качестве варианта альтернативного топлива рассмотрены отходы термопластичных полимеров.

Исследование влияния параметров технологического процесса на показатели СЭУ с электрическим обогревом технологического оборудования целесообразно осуществлять на базе регрессионных моделей. Выполненные оценки значимости параметров

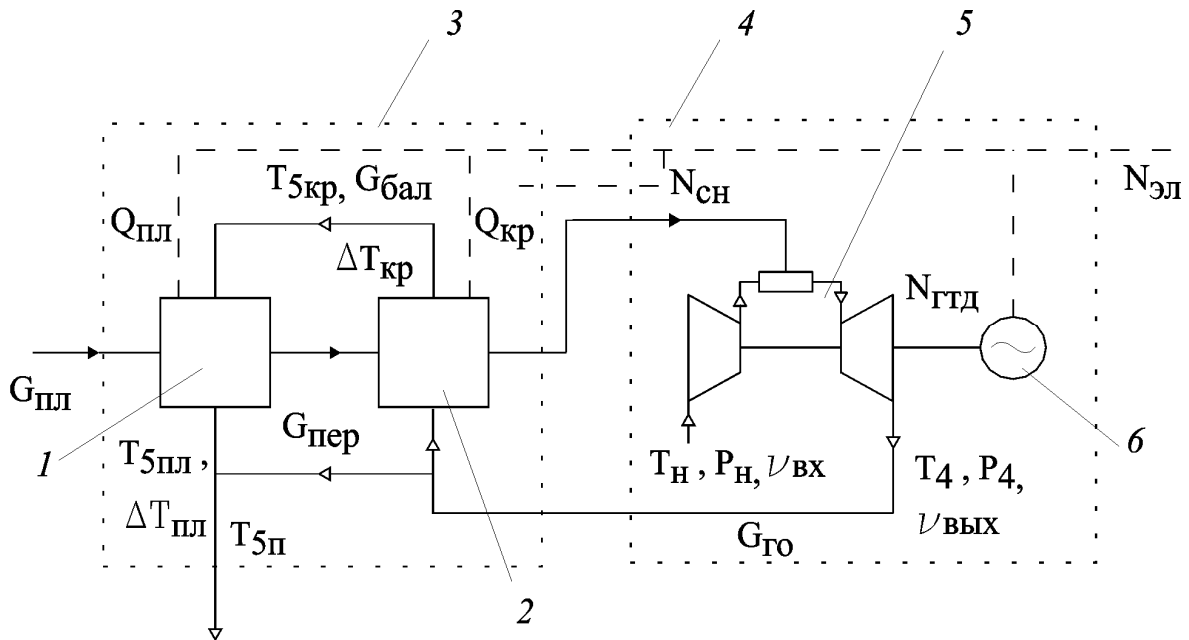


Рис. 1. Структурная схема газотурбинной энергетической установки специализированного судна:
1 – первая ступень ТП; 2 – вторая ступень ТП; 3 – технологическая подсистема;
4 – энергетическая подсистема; 5 – газотурбинный двигатель; 6 – электрогенератор

позволили ограничить рассмотрение следующим параметрами технологического процесса: удельными затратами тепла на вторую и первую ступени технологического процесса – $Q_{кр}$ и $Q_{пл}$ соответственно; коэффициентом восстановления полного давления на выходе ГТД $\nu_{вых}$; температурным напором на выходе второй ступени ТП – $\Delta T_{кр}$. Иссле-

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

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

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 ротатбельных планов [6]. В этом случае 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 |

В виду существенных различий абсолютных значений технологических параметров выполнено их нормирование на диапазоне $-1...+1$. Тогда, минимальное, среднее и максимальное значения нормированных параметров составят $-1, 0$ и 1 соответственно.

План численного эксперимента приведен в табл. 2 [6].

Определение регрессионных коэффициентов выполнено в соответствии с [6]:

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

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

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

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

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.

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 «Зоря»-«Машпроект» при температуре наружного воздуха 288 К. Необходимые для реализации модели характеристики ГТД в условиях по $ISO2314$ ($T_n = 288$ К, $v_{вх} = 0,0$, $v_{вых} = 0,0$) приведены в [1, 3].

Приведенные ниже результаты получены при следующих исходных данных. Минимальный температурный напор после первой ступени ТП $\Delta T_{пл}$ составляет 55 К; удельный расход электроэнергии на собственные нужды технологического оборудования $\bar{N}_{сн} = 200$ Вт ч/кг [4]; коэффициент восста-

новления полного давления на входе ГТД $v_{вх} = 0,985$; КПД генератора $\eta_{ген} = 0,962$.

Средняя квадратичная погрешности регрессионного моделирования зависимостей КПД и мощности составляет 0,26...0,27%

Анализ величин регрессионных коэффициентов свидетельствует о весьма слабой зависимости пока-

зателей СЭУ от величины затрат электроэнергии на первую ступень ТП $\bar{Q}_{пл}$ (табл. 3). Этот результат является следствием использования тепла отходящих газов ГТД для обогрева технологических аппаратов второй ступени. При этом, дополнительных затрат энергии не требуется.

Таблица 3

Коэффициенты уравнений (2)

| Показатель | | КПД СЭУ | | | | Мощность СЭУ | | | |
|---------------------|-------|---------|--------|----------|--------|--------------|-------|--------|----------|
| b_0 | | 0,1828 | | | | 1,001 | | | |
| Y_0 | | 0,1824 | | | | 3881 | | | |
| i | | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| $b_{ii} \cdot 10^3$ | | -8,7 | 0,0 | -0,05833 | -37,89 | -47,67 | 0,0 | 3,447 | -206,5 |
| $b_{ji} \cdot 10^3$ | $j=1$ | 0,0375 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,539 | 0,0 | -0,116 | -0,00644 |
| | $j=2$ | | 0,0375 | 0,0 | 0,0 | | 1,542 | 0,0 | 0,0 |
| | $j=3$ | | | -0,075 | -0,725 | | | 0,6496 | -7,943 |
| | $j=4$ | | | | -0,075 | | | | -2,227 |

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 $v_{вых}$, $\Delta T_{кр}$.

Как следует из результатов расчетов, приведенных на рис. 2, мощность СЭУ на базе GT6000 в рассматриваемых диапазонах варьирования параметров изменяется от 2,81 МВт до 4,96 МВт.

Максимальное значение мощности СЭУ достигается при минимальном значении $Q_{кр}$ и $\Delta T_{кр}$ и максимальном значении $v_{вых}$ (см. табл. 1). 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 – $\Delta T_{кр}$. Так, при изменении $\Delta T_{кр}$ от 30К до 80К происходит снижение мощности СЭУ на 1,55...1,65 МВт в зависимости от величины $v_{вых}$.

Снижение мощности СЭУ при увеличении $Q_{кр}$ от 800 до 1000 Вт ч/кг оказалось практически постоянным и равным 370...380 кВт для рассмотренных диапазонов изменения $\Delta T_{кр}$ и $v_{вых}$.

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

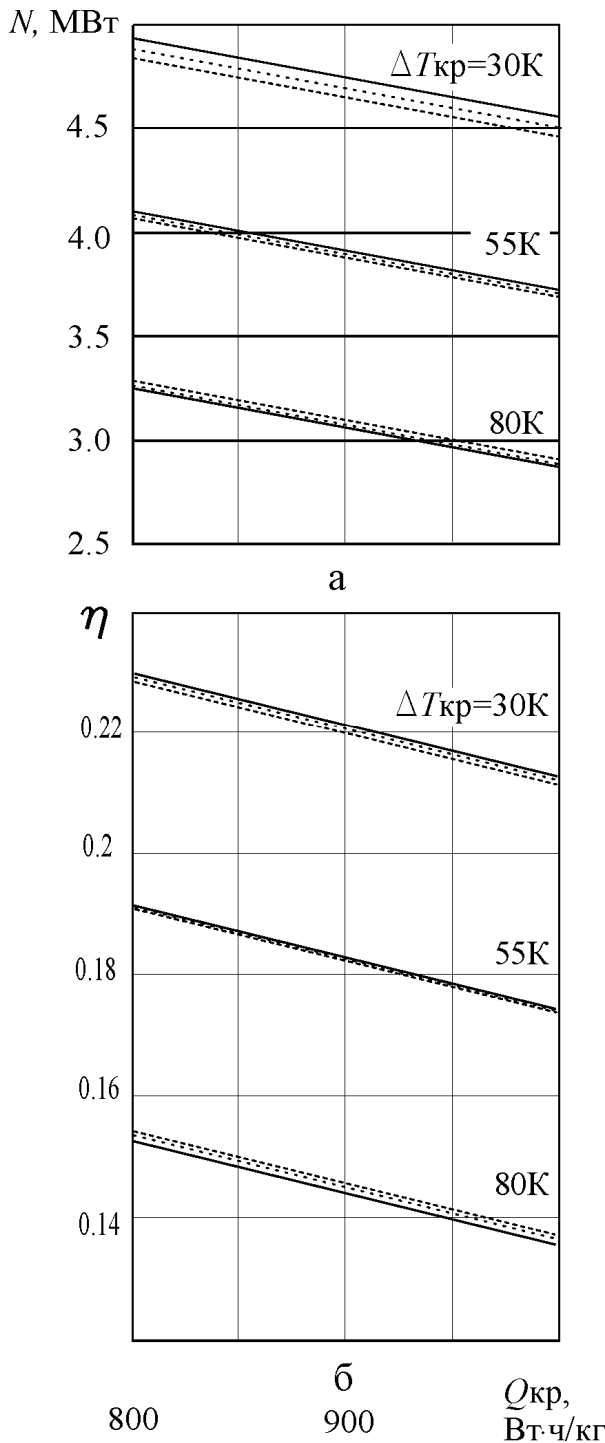


Рис. 2. Влияние технологических параметров на мощность (а) и КПД (б) СЭУ специализированного судна:
 — $v_{вых} = 0,98$;
 — $v_{вых} = 0,96$;
 - · - · - · — $v_{вых} = 0,94$.

значениях $\Delta T_{кр} = 30$ К уменьшение $v_{вых}$ от 0,98 до 0,94 приводит к снижению мощности СЭУ на 90...100 кВт.

При значениях $\Delta T_{кр} = 80$ К уменьшение $v_{вых}$ от 0,98 до 0,94 приводит к повышению мощности СЭУ на 34...36 кВт. Минимальное значение мощности выявлено в этих условиях при максимальном значении $Q_{кр}$ и $\Delta T_{кр}$ и максимальном значении $v_{вых}$. Данный результат является несколько неожиданным. Действительно, повышение значения $Q_{кр}$ и $\Delta T_{кр}$ приводят к увеличению затрат энергии на технологический процесс, а уменьшение $v_{вых}$ — к снижению мощности ГТД.

Однако, одновременно повышается значение температуры газов на выходе ГТД — T_4 , что приводит к снижению затрат энергии на технологический процесс, которые при больших значениях $Q_{кр}$ и $\Delta T_{кр}$ весьма существенны. Взаимодействие этих тенденций и приводит к отмеченному выше снижению мощности СЭУ.

При $\Delta T_{кр} = 50$ К влияние $v_{вых}$ существенно слабее. Так, снижение $v_{вых}$ в диапазоне 0,98...0,94 приводит в этих условиях к снижению мощности СЭУ на 25...30 кВт. Дальнейший анализ позволил выявить диапазон значений $\Delta T_{кр} = 65...70$ К в котором влияние сопротивления на выходе ГТД на величину мощности СЭУ пренебрежимо мало.

Результаты исследования влияния технологических параметров на КПД СЭУ приведены на рис. 2, б.

Как следует из результатов, расчетов КПД СЭУ на базе *GT6000* в рассматриваемых диапазонах варьирования параметров изменяется от 0,230 до 0,135.

Максимальное значение КПД достигается при минимальном значении $Q_{кр}$ и $\Delta T_{кр}$ и максимальном значении $v_{вых}$ (см. табл. 1), т.к. при таком соче-

тании значений технологических параметров обеспечиваются наименьшие затраты энергии на технологический процесс 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 изменении $\Delta T_{кр}$ от 30 до 80 К происходит снижение КПД СЭУ на 7...8% 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 1,5...1,7% для рассмотренных диапазонов изменения $\Delta T_{кр}$ и $v_{вых}$.

Приведенные результаты свидетельствуют, что влияние $v_{вых}$ на изменение КПД СЭУ в зависимости от величины $\Delta T_{кр}$ аналогично его влиянию на мощность СЭУ. Следует отметить при этом, что в рассматриваемом диапазоне параметров влияние $v_{вых}$ не превышает 0,15%.

Выводы

1. На базе методов планирования эксперимента построена регрессионная модель зависимостей мощности и КПД СЭУ специализированного судна от технологических параметров.

2. На базе исследования регрес ионной модели показано, что изменение $\Delta T_{кр}$ в диапазоне 30...80К приводит к снижению мощности СЭУ на базе GT6000 на 1,55...1,65 МВт и снижению величины КПД на 7...8%.

3. Показано, что изменение $Q_{кр}$ в диапазоне 800...1000 Вт·ч/кг приводит к снижению мощности СЭУ на базе GT6000 на 0,37...0,38 МВт и снижению величины КПД на 1,5...1,7%.

4. Влияние технологических параметров $v_{вых}$ и $\bar{Q}_{пл}$ на значения мощности и КПД СЭУ на базе GT6000 существенно ниже.

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-техн. сб. – Николаев: НПКГ «Зоря»-«Машпроект», НО ИАУ. – 2004. – Т. 1. – 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: Зб. наук. праць.* – 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.

Поступила в редакцию 18.05.2005

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