

УДК 629.5:621.4

М.Р. ТКАЧ, Б.Г. ТИМОШЕВСКИЙ

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГАЗОТУРБИННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ТОПЛИВНЫЕ РЕСУРСЫ

На базе решения задачи оптимизации определены эффективные значения КПД газотурбинных установок (ГТУ), использующих альтернативные топливные ресурсы (АТЭР). В диапазоне величин средне-массовой температуры газов перед турбиной высокого давления ГТД ($T_3 = 1300\text{K} \dots 1500\text{K}$) КПД ГТУ составит $0,29 \dots 0,34$. Показано влияние параметров технологического процесса на КПД и оптимальные параметры ГТУ. Выявлено наличие локальных оптимумов параметров в условиях областных ограничений. Показано, что отклонение термодинамических, гидравлических и технологических параметров ГТУ от оптимальных значений приводит к снижению рациональной величины суммарной степени повышения давления компрессоров ГТД.

Ключевые слова: газотурбинные установки, альтернативное топливо, оптимизация, параметры.

Введение

Постановка проблемы. Использование альтернативных топливных ресурсов позволяет существенно расширить сырьевую базу энергетики, существенно ослабить экологические проблемы и, в значительной степени, решить социальные, а также политические проблемы государства. Важность применения АТЭР отражена как в Законах "Про альтернативні види рідкого та газового палива", "Про альтернативні джерела енергії", так и в постановлениях правительства.

Обзор публикаций и выделение нерешенных проблем. Ранее показано, что существенное повышение эффективности применения современных энергетических установок достигается использованием жидкого топлива, получаемого в их составе путем переработки АТЭР [1, 2]. Структурная схема комбинированной газотурбинной энергетической установки включает в себя две ступени технологической подсистемы (ТП) получения жидкого топлива из АТЭР и энергетическую подсистему (ЭП) (рис. 1) [3]. Методами системного анализа применительно к "базовым" ГТД отечественного производства исследовано влияние основных параметров технологического процесса и факторов окружающей среды на энергетическую эффективность ГТУ [3, 4]. Влияние параметров на энергетическую эффективность газотурбинной ЭУ на базе АТЭР исследовано путем анализа изопараметрических кривых [5]. При этом выявлен дополнительный резерв повышения эффективности, возникающий вследствие рационального перераспределения потоков энергии между ее подсистемами.

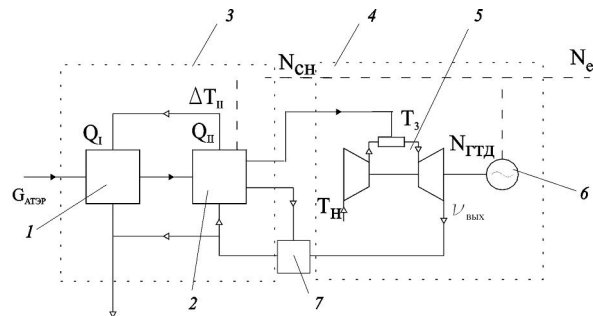


Рис. 1. ГТУ на базе АТЭР:

1 – первая ступень ТП; 2 – вторая ступень ТП; 3 – ТП; 4 – ЭП; 5 – ГТД; 6 – генератор; 7 – ДКС

Цель исследований. Определение оптимальных сочетаний значений параметров ГТУ, использующих АТЭР, обеспечивающих достижение максимальных значений КПД в условиях имеющихся ограничений.

Решение проблемы

Формализация целевой функции. Анализ взаимосвязей параметров и показателей эффективности процессов энергопреобразования в газотурбинной энергетической установке, использующей АТЭР, позволил установить ряд параметров, существенно влияющих на ее энергетическую эффективность. Это: величины удельных затрат тепла на первую и вторую ступени ТП – \bar{Q}_I, \bar{Q}_{II} , Вт·ч/кг; значение коэффициента восстановления полного давления на выходе ЭП – $v_{\text{вых}}$; величина температурного напора на выходе второй ступени ТП – ΔT_{II} , К; суммарная степень повышения давления компрессоров ГТД –

π_K ; величина среднемассовой температуры на входе в ТВД ГТД – T_3 ; температура воздуха на входе в ГТД – T_H .

Зависимость эффективного КПД ГТУ, использующих АТЭР, формализована в виде:

$$\eta_e = F(\bar{Q}_I, \bar{Q}_{II}, v_{\text{вых}}, \Delta T_{II}, \pi_K, T_3, T_H).$$

Уровни варьирования параметров $\bar{Q}_I, \bar{Q}_{II}, v_{\text{вых}}, \Delta T_{II}$ соответствуют данным [5] (табл. 1).

Таблица 1

Уровни варьирования параметров $\bar{Q}_I, \bar{Q}_{II}, v_{\text{вых}}, \Delta T_{II}$

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

Значение $T_H = 288\text{K}$ принято по требованиям стандарта ISO 2314.

Предварительные исследования показали, что достижение приемлемой точности моделирования требует установления взаимосвязи диапазонов варьирования значения суммарной степени повышения давления ГТД π_K и величины среднемассовой температуры на входе в ТВД ГТД T_3 (табл. 2).

Таблица 2

Взаимосвязь диапазонов варьирования

Величина степени повышения давления ГТД π_K	Температура T_3 , К		
	1300	1400	1500
Минимальная	10	14	18
максимальная	16	22	30

Постановка задачи оптимизации. Задача оптимизации параметров газотурбинной энергетической установки, использующей АТЭР, сформулирована следующим образом: определить значения параметров $\bar{Q}_I, \bar{Q}_{II}, v_{\text{вых}}, \Delta T_{II}, \pi_K, T_3$, обеспечивающих при заданном значении T_H , выполнении областных и функциональных ограничений, максимальное значение ее эффективного КПД [6].

Приведенная постановка задачи эквивалентна математической формулировке: выбрать вектор непрерывно изменяющихся параметров $X = X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ из условия максимума функции

$\eta_e = \eta(X, Y(X), Z)$ при наличии областных $X_{\text{min}} \leq X \leq X_{\text{max}}$ и функциональных ограничений $Y_{\text{min}} \leq Y[X, Y(X)] \leq Y_{\text{max}}$. Оптимальная величина дискретно меняющихся параметров Z определяется на базе вариантных исследований [6, 7].

К числу непрерывно изменяющихся параметров ГТУ, использующих АТЭР, отнесены: $\bar{Q}_I, \bar{Q}_{II}; v_{\text{вых}}; \Delta T_{II}, K; \pi_K$. Влияние величины среднемассовой температуры на входе в ТВД ГТД T_3 исследовано на трех уровнях варьирования (см. табл. 1).

Значения оптимальных параметров ГТУ определены методом случайного поиска с самообучением [7]. Выполненные исследования позволили вскрыть резервы совершенствования процессов энергопреобразования, происходящих в ее подсистемах.

Как следует из полученных результатов, значения эффективного КПД ГТУ при оптимальных значениях ее параметров в зависимости от величины среднемассовой температуры газов перед турбиной высокого давления газотурбинного двигателя составляют 0,292...0,305 (при $T_3 = 1300\text{K}$), 0,315...0,325 ($T_3 = 1400\text{K}$) и 0,320...0,334 ($T_3 = 1500\text{K}$) (рис. 2).

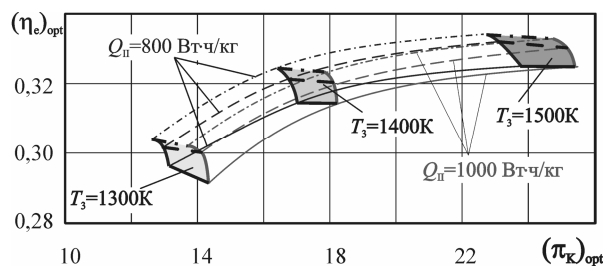


Рис. 2. Эффективный КПД ГТУ на базе АТЭР при оптимальных значениях параметров:

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

При этом рациональные величины степени повышения давления ГТД лежат в диапазоне 12...14 (при $T_3 = 1300\text{K}$), 16...18 ($T_3 = 1400\text{K}$) и 23...25 ($T_3 = 1500\text{K}$). Следует отметить, что во всех рассмотренных вариантах максимум КПД достигнут при значениях ΔT_{II} , соответствующих нижнему пределу диапазона варьирования (см. табл. 1). Решение задачи оптимизации позволило также установить влияние параметров \bar{Q}_{II} и $v_{\text{вых}}$ на оптимальное значение π_K (см. рис. 3). Как следует из приведенных данных, снижение величины \bar{Q}_{II} и (или) повышение $v_{\text{вых}}$ приводит к росту КПД ГТУ на базе АТЭР и снижению оптимального значения π_K (см. рис. 2).

В практике создания ГТУ достаточно часто возникает ситуация, при которой требуется принятие значений ряда параметров, отличающиеся от оптимальных их значений. Вследствие наличия ограничений по компоновке и габаритам оборудования на объекте, величина ΔT_{II} может быть увеличена директивным порядком. Это приводит к снижению КПД, в соответствии с данными [5]. Так, при увеличении ΔT_{II} от 30К до 80К при постоянном значении π_K величина КПД ГТУ на базе АТЭР снизится на 2,5...3,0%.

Существенное нивелирование указанного негативного явления возможно путем выбора рациональных параметров ГТУ на базе оптимизации ее параметров при дополнительном условии заданного значения ΔT_{II} (рис. 3). В условиях, аналогичных рас-

смотренным выше, снижение КПД за счет отклонения ΔT_{II} уменьшится в два раза. Такое решение задачи оптимизации ГТУ соответствует локальным оптимумам ее эффективности.

Приведенные ниже данные свидетельствуют, что при отклонении термодинамических, гидравлических и технологических параметров ГТУ на базе АТЭР от оптимальных значений происходит снижение рациональной величины суммарной степени повышения давления ГТД. В рассматриваемом диапазоне параметров его величина достигнет 3...3,5 ед.

Следует отметить, что и в условиях нахождения локальных максимумов сохранилась тенденция к снижению значений π_K при уменьшении затрат энергии на ТП (см. рис. 3).

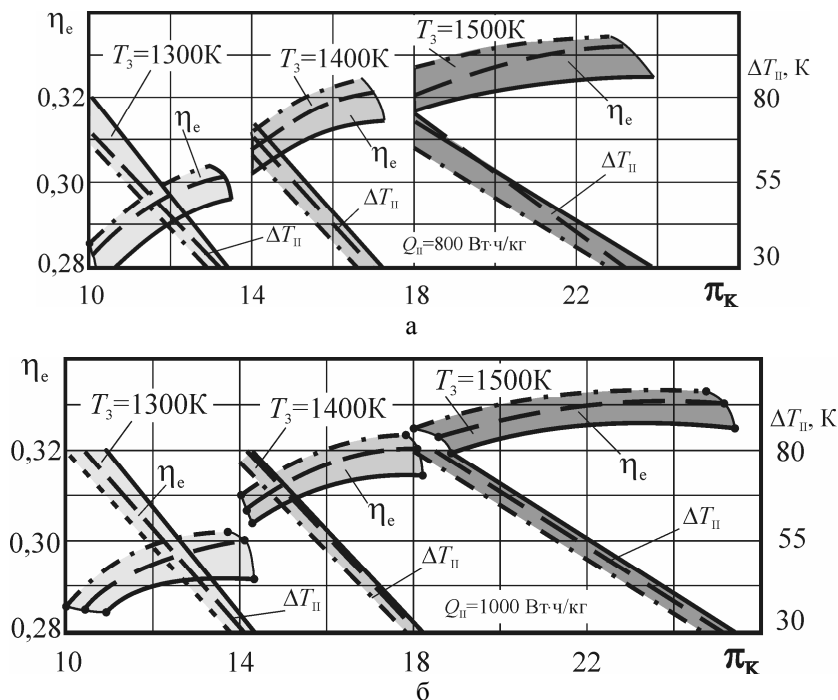


Рис. 3. Эффективность ГТУ, использующих АТЭР и взаимосвязь ее параметров:

а– $Q_{II} = 800 \text{ Вт}\cdot\text{ч/кг}$; б– $Q_{II} = 1000 \text{ Вт}\cdot\text{ч/кг}$

— $v_{\text{вых}} = 0,94$; — — — $v_{\text{вых}} = 0,96$; - · - · - $v_{\text{вых}} = 0,98$.

Выводы

1. Методами математического моделирования показано, что в диапазоне изменения коэффициента восстановления полного давления 0,94...0,98, удельных затрат тепла на вторую ступень ТП – 800...1000 Вт·ч/кг, температурного напора на выходе второй ступени ТП – 30К...80К значение степени повышения давления, соответствующее максимуму КПД ГТУ, составит 12,4...14 при $T_3 = 1300\text{К}$; 16,5...18, при $T_3 = 1400\text{К}$ и 23...25 при $T_3 = 1500\text{К}$.

2. В этих же условиях величина эффективного КПД ГТУ на базе АТЭР изменяется в диапазоне 0,292...0,305 при $T_3 = 1300\text{К}$; 0,315...0,325 при $T_3 = 1400\text{К}$; и 0,320...0,334 при $T_3 = 1500\text{К}$.

3. Определена зависимость рационального значения суммарной степени повышения давления компрессоров ГТД от значений температурного напора на выходе второй ступени ТП, температуры T_3 , величины коэффициента восстановления полного давления и удельных затрат тепла на вторую ступень ТП.

Литература

1. Головащенко А.Ф. Энерготехнологические газотурбинные комплексы на базе альтернативных топлив / А.Ф. Головащенко, Б.Г. Тимошевский, М.Р. Ткач // Судовое и энергетическое газотурбостроение. Научно-технический сборник. Т. 1. – Николаев: НПКГ «Зоря»-«Машипроект», НО ИАУ, 2004. – С. 281-285.
2. Ткач М.Р. Моделирование влияния технологических параметров на эффективность газотурбинных энергетических установок с ДКС для специализированных технологических судов / М.Р. Ткач // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – №10(26). – С. 111-115.
3. Газотурбинные двигатели для энергетики и газотурбинные электростанции. – Николаев: НПКГ «Зоря»-«Машипроект», 2004. – 20 с.
4. Ткач М.Р. Характеристики ГТУ с дополнительной камерой сгорания, использующих альтернативные топливные ресурсы / М.Р. Ткач // Авиационно-космическая техника и технология. 2008. – №7(54). – С. 142-144.
5. Ткач М.Р. К выбору параметров газотурбинных установок, использующих альтернативные топливные ресурсы / М.Р. Ткач // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – №10(57). – С. 112-114.
6. Попырин Л.С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок / Л.С. Попырин. – М.: Энергия, 1978. – 415 с.
7. Борисенко В.Д. Исследования по оптимизации...турбин: дисс. ... канд. техн. наук / Борисенко В.Д. – 1977. – 198 с.

Поступила в редакцию 2.06.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., профессор кафедры турбин С.И. Сербин, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев.

ЕФЕКТИВНІСТЬ ГАЗО-ПАРОТУРБІННИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ АЛЬТЕРНАТИВНІ ПАЛИВНІ РЕСУРСИ

М.Р. Ткач, Б.Г. Тимошевський

На базі вирішення задачі оптимізації визначено ефективні значення ККД газотурбінних установок, що використовують альтернативні паливні ресурси. В діапазоні значень середньомасової температури газів перед турбіною високого тиску ($T_3 = 1300\text{K} \dots 1500\text{K}$) КПД ГТУ складає 0,29...0,34. Визначено вплив параметрів технологічного процесу на ККД та оптимальні параметри ГТУ. Доведена наявність локальних оптимумів параметрів в умовах обласних обмежень. Доведено, що наслідком відхилення термодинамічних, гідравлічних та технологічних параметрів ГТУ від оптимальних значень є зниження локального оптимуму сумарного ступеню підвищення тиску компресорів ГТД.

Ключові слова: газотурбінні установки, альтернативне паливо, оптимізація, параметри.

EFFICIENCY GT POWER PLANTS, USING ALTERNATIVE FUEL RESOURCES

M.R. Tkach, B.G. Tymoshevskyy

On the basis of the decision of a task of optimization the effective meanings of GT power plants using alternative fuel resources are determined. In a range of sizes temperature of gases in front of the turbine of high pressure GT ($T_3 = 1300\text{K} \dots 1500\text{K}$) the efficiency GT will make 0,29 ... 0,34. The influence of parameters of technological process on efficiency and optimum parameters GT is shown. The presence of local optimum of parameters in conditions of regional restrictions is revealed. Is shown, that at a deviation of thermodynamic, hydraulic and technological parameters GT from optimum meanings there is a reduction of a local optimum of size of a total degree of increase of pressure GT.

Key words: GT power plants, alternative fuel, optimization, parameters.

Ткач Михаил Романович – д-р техн. наук, зав. кафедрой теоретической механики, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: MTKach@usmtu.edu.ua.

Тимошевський Борис Георгиевич – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой двигателей внутреннего сгорания, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Украина, Николаев, e-mail: BTymoshevskyy@usmtu.edu.ua.