

УДК 621.438

Шкляр В.И., Дубровская В.В., Задвернюк В.В., Колпаков А.Г.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

## ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

Проведено ексергетичний аналіз двох типів ГТУ, які працюють за простою схемою. Розраховано втрати ексергії в елементах обладнання.

Проведен ексергетический анализ двух типов ГТУ, работающих по простой схеме. Рассчитаны потери эксергии в элементах оборудования.

The exergy analysis of two simple scheme gas turbines is performed. The exergy losses in GTU elements are calculated.

$E_x$  – эксергия;  
 $G$  – расход рабочего тела;  
 $p$  – давление;  
 $\Delta s$  – изменение энтропии;  
 $T, t$  – температура;  
 $\eta_{EX}$  – эксергетический КПД;

$\Pi$  – потери эксергии.

**Индексы нижние:**

вх – вход;  
 вых – выход;  
 о – окружающая среда.

Украина имеет достаточно развитую отрасль газотурбостроения, способную обеспечить любые потребности энергетики в ГТУ. Появление на отечественном рынке энергетических ГТУ малой и средней мощности с неплохими экономическими показателями (КПД, габаритные размеры, стоимость) и с использованием разных видов топлива, в том числе биогаза, доменного, коксового и синтетических газов, дает возможность реализовывать комбинированное производство электроэнергии и теплоты.

В связи с тем, что ГТУ, даже если они работают по одному и тому же циклу, имеют в своем составе агрегаты с разными техническими характеристиками и параметрами рабочих тел, отличаются условиями эксплуатации, местом установки, всегда существует необходимость выбора наиболее эффективной ГТУ для энергообеспечения заданного объекта.

**Цель работы** – анализ эффективности работы газотурбинных установок эксергетическим методом.

Для анализа эффективности работы ГТУ используют разнообразные методы, отличающиеся как по своей сути, так и по целям, которые необходимо достичь в результате их применения. Среди таких методов, получивших широкое распространение в последние годы, необходимо от-

метить эксергетический [1-3].

В соответствии с этим методом любую теплоэнергетическую установку или ее узел можно условно изобразить в виде так называемого „термодинамического ящика” [2], ограниченного контрольной поверхностью, к которой подводятся и отводятся разные по качеству и количеству виды энергии, пригодные для технического использования, в четырех различных формах – механической (или электрической) энергии, эксергии теплоты, эксергии потока и химической эксергии (эксергии топлива). Через эту же поверхность отводятся эксергетические потери. В отдельных случаях некоторые потоки могут отсутствовать.

Эксергетический баланс любой теплоэнергетической установки базируется на уравнении:

$$E_{x_{\text{ВЫХ}}} = E_{x_{\text{ВХ}}} - \sum_{i=0}^n \Pi_i,$$

где  $E_{x_{\text{ВХ}}}$ ,  $E_{x_{\text{ВЫХ}}}$  – эксергия на входе и выходе установки.

Эксергетические потери, вызванные каким-либо необратимым процессом, равны произведению абсолютной температуры окру-

жающей среды на прирост энтропии системы:

$$\sum_{i=0}^n \Pi_i = T_0 \cdot \sum_{i=0}^n \Delta s_i$$

Передача теплоты при конечной разности температур является необратимым процессом, связана с возрастанием энтропии и потерей части максимально возможной работы. В связи с этим, основным показателем эксергетического метода является эксергетический КПД [1,3], равный отношению эксергии, полезно отведенной из установки ( $Ex_{ВХ} - Ex_{ВЫХ}$ ), к эксергии, подведенной к ней  $Ex_{ВХ}$ :

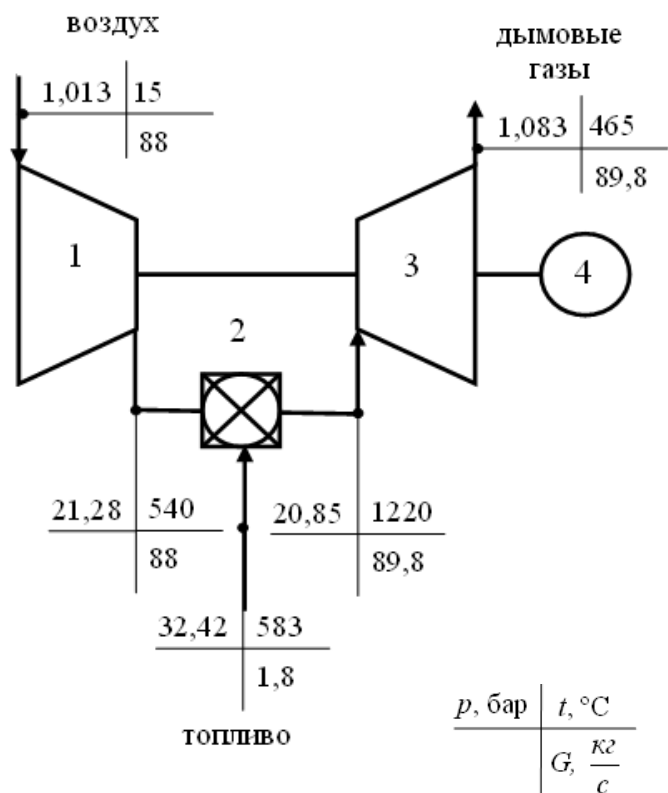
$$\eta_{EX} = \frac{Ex_{ВХ} - Ex_{ВЫХ}}{Ex_{ВХ}} \cdot 100\%$$

Он характеризует термодинамическое совершенство работы как любого узла, так и установки в целом.

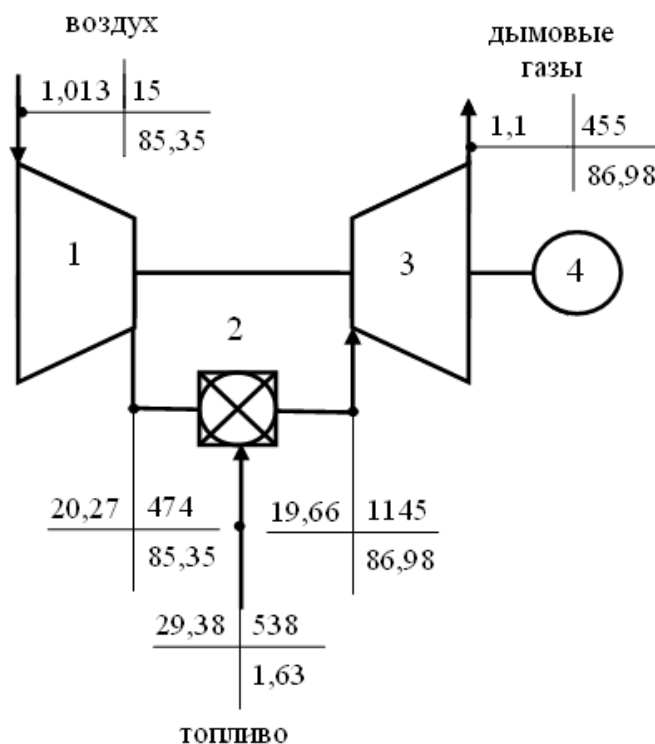
Для проведения эксергетического анализа была разработана компьютерная программа, позволяющая определить основные термодинамические параметры (давление, температуру, энтальпию) и массовый расход рабочего тела в характерных точках схемы ГТУ при заданных начальных режимных параметрах. В результате расчетов определяются энергетические показатели установки.

С целью выбора ГТУ для покрытия электрической нагрузки в 25 МВт проведем сравнительный эксергетический анализ двух ГТУ простого цикла [4]:

- UGT – 25000, разработанной Николаевским НПП „Машпроект”;
- FT8, созданной компанией „Pratt & Whitney



**Рис. 1. Схема ГТУ с параметрами установки UGT – 25000**  
 1 – компрессор; 2 – камера сгорания;  
 3 – турбина; 4 – электрогенератор.



**Рис. 2. Схема ГТУ с параметрами установки FT8. Обозначения те же, что и на рис. 1**

Табл. 1. Основные характеристики ГТУ

Наименование величины, размерность	UGT – 25000	FT8
Полезная мощность на клеммах генератора, МВт	26,7	25,5
Начальная температура воздуха перед компрессором, °С	15	
Расход воздуха, кг/с	88	85,35
Температура газов на входе в турбину, °С	1220	1145
Температура газов на выходе из турбины, °С	465	455
Максимальное отношение давлений в цикле	21	20
Общий эффективный КПД установки, %	36,5	38
Адиабатный КПД компрессора установки	0,76	0,85
Коэффициент расхода давления входной шахты	0,975	
Коэффициент расхода давления выходной шахты	0,96	0,9447
Коэффициент расхода давления камеры сгорания	0,98	0,97
Коэффициент полноты сгорания топлива в камере сгорания	0,97	
Показатель адиабаты	1,4	
КПД электрогенератора	0,9	0,979
Механический КПД установки	0,95	0,98
Отпуск электроэнергии, тыс. кВт·ч/год	210000	
Себестоимость выработанной электроэнергии, грн./кВт·ч.	0,1543	0,1488
Отпуск тепловой энергии, тыс. Гкал/год	335,916	
Себестоимость выработанной тепловой энергии, грн./Гкал	14,84	16,97

Power Systems”.

Их схемы с параметрами в характерных точках приведены соответственно на рис. 1 и рис. 2, а основные характеристики установок – в табл. 1.

Результаты расчета эксергетического баланса для двух газотурбинных установок проведены в соответствии с [3,5] и приведены в табл. 2.

Из таблицы видно, что для двух установок наибольшие потери эксергии – в камере сгорания и с уходящими газами, что обусловлено большими конечными разностями температур, повышенным давлением в процессе горения и отличиями в составе продуктов сгорания и окружающего воздуха.

Для повышения эффективности работы (увеличения эксергетического КПД) следует снижать температуру уходящих газов путем утилизации их теплоты; приблизить процессы

сжатия и расширения рабочего тела в цикле к изотермическим (промежуточное охлаждение в компрессоре и промежуточный подогрев в турбине); улучшить условия сгорания и использовать комбинированные установки, работающих по парогазовому циклу.

Окончательное решение о выборе типа ГТУ можно сделать только после анализа технико-экономических показателей рассматриваемых вариантов ГТУ.

### **Выводы**

1. На основании проведенного анализа определена эксергетическая эффективность рассмотренных установок: FT8 – 33,77 % и UGT – 25000 – 30,94 %.

2. В результате расчетов определены эксергетические потери в элементах установок, при этом максимальные потери эксергии со-

Табл. 2. Общий эксергетический баланс ГТУ

Составляющая баланса	Величина составляющей баланса			
	UGT-25000		FT8	
	МВт	%	МВт	%
<b>Подведенная эксергия</b>				
С воздухом	0,264	0,27	0,256	0,29
Физическая эксергия горючего газа	3,607	3,65	2,911	3,25
Химическая эксергия горючего газа	95,03	96,08	86,055	96,46
<b>Итого</b>	<b>98,9</b>	<b>100</b>	<b>89,2</b>	<b>100</b>
<b>Отведенная эксергия</b>				
Полезная работа	30,598	30,94	30,126	33,76
С дымовыми газами	14,144	14,3	18,754	21,02
Потери от неизоэнтропийного расширения в турбине	0,076	0,08	0,829	0,93
Потери от неизоэнтропийного сжатия в компрессоре	4,824	4,88	2,847	3,19
Потери в камере сгорания	44,074	44,55	33,763	37,84
Механические потери	1,789	1,81	1,321	1,48
Электрические потери	3,4	3,44	1,586	1,78
<b>Итого</b>	<b>98,9</b>	<b>100</b>	<b>89,2</b>	<b>100</b>
<b>Эксергетический КПД</b>	<b>30,94</b>		<b>33,77</b>	

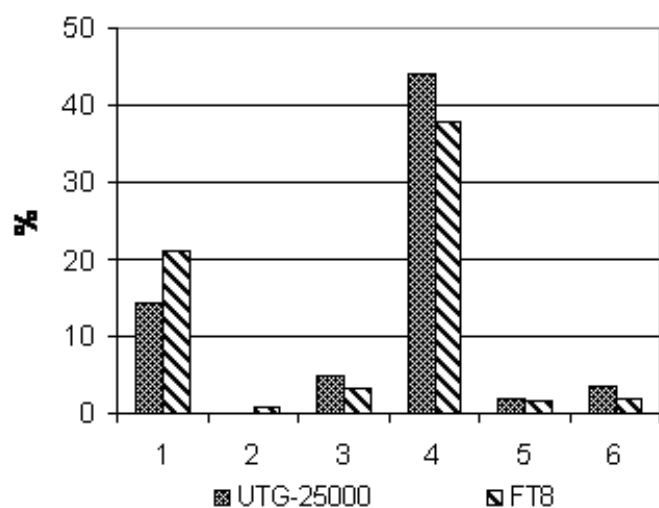


Рис. 3. Эксергетические потери в ГТУ:  
 1 – с дымовыми газами; 2 – от неизоэнтропийного расширения в турбине;  
 3 – от неизоэнтропийного сжатия в компрессоре; 4 – в камере сгорания;  
 5 – механические; 6 – электрические.

ставляют:

- в камере сгорания – 37 % для FT8 и 44 % для UGT – 25000;
- с уходящими газами – 21 % и 14 % соответственно.

Это обусловлено внешней необратимостью протекающих процессов.

3. Выбор типа ГТУ рекомендуется проводить на основании экономического и эксергетического анализа установки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Эксергетические* расчеты технических систем: Справочное пособие // В.М. Бродянский, Г.П. Верхивкер, Я.Я. Карчев. – К.: Наукова думка, 1991. – 361 с.

2. *Ковтун В.В.* Применение эксергетического метода для оценки эффективности работы теплоэнергетических установок, утилизационного оборудования и схем утилизации вторичных энергоресурсов. – К.: УМК ВО,

1989. – 76 с.

3. *Эльснер Н., Фратчер В.* Составление эксергетического баланса газотурбинной установки // В сб.: Вопросы термодинамического анализа (эксергетический метод). Под ред. В. М. Бродянского. – М.: «Мир», 1965. – С. 122.

4. *Воробьев И.Е., Тодорович Е.Г.* Реабилитация ТЭС и ТЭЦ: пути, эффективность. Пособие для теплоэнергетиков // Сер. Энергетика: реабили-

литация, развитие. – К.: Энергетика и электрофикация, 2000. – Вып. 1. – 256 с.

5. *Глушко В.П., Гурвич Л.В., Бергман Г.А., Вейц И.В., Медведев В.А., Хачкурузов Г.А., Юнгман В.С.* Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справочник / Под ред. В.П. Глушко. – М.: Наука. – Т. 1–4, 1978–1982.

*Получено 05.11.09 г.*