

ФИАЛКО Н.М., ШЕРЕНКОВСКИЙ Ю.В.,
СТЕПАНОВА А.И., ДОЛГОПОЛОВ И.С.,
ГОЛУБИНСКИЙ П.К., НАВРОДСКАЯ Р.А., НОВАКОВСКИЙ М.А.

Институт технической теплофизики НАН Украины

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ УТИЛИЗАТОРА ТЕПЛОТЫ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ ТЕПЛООВОГО ДВИГАТЕЛЯ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ

Двома ексергетичними методами виконано ексергетичний аналіз ефективності роботи газоводяного теплообмінника, що входить до складу системи утилізації теплоти відхідних газів теплового двигуна когенераційної установки. Запропоновано ексерго-технологічні критерії, та виконано розрахунки ексергетичної ефективності окремих елементів теплообмінника.

Для газоводяного теплообмінника, входящего в систему утилизации теплоты отходящих газов теплового двигателя когенерационной установки, проводится эксергетический анализ эффективности на основе двух эксергетических методов. Предлагаются эксерго-технологические критерии эффективности, и оценивается эксергетическая эффективность отдельных элементов теплообменника.

The main goal of the paper – is the research of thermodynamic efficiency gas-water heat exchanger which is the part of general system of utilization of the heat created by outgoing gas generated by machine for the cogeneration, using the exergue methods. Exergue and technologic criteria of the efficiency were chosen and exergue usefulness elements of the heat exchanger were calculated.

E – эксергетическая мощность;
 e – удельная эксергия;
 F – поверхность теплообмена;
 f – площадь поперечного сечения тракта;
 G – массовый расход;
 m – масса тепловой части;
 p – давление;
 $P_{\alpha\beta}$ – тензор вязких напряжений;
 Q – тепловая мощность;
 q – тепловой поток;
 T – температура;
 t – время;
 u – скорость;
 x – координата;
 α – коэффициент теплоотдачи;
 Δ – изменение параметра;

δ – толщина стенки;
 η_{ex} – эксергетический КПД;
 λ – коэффициент теплопроводности;
 ξ – коэффициент гидродинамического сопротивления;
 ρ – плотность;
 τ – эксергетическая температурная функция.

Индексы верхние:

$d, g; v.$ – дымовые газы; вода;
 b, ε – балансовый, энтропийный;
 $ид$ – идеальный теплообменник;
 $тепл., гидр.$ – тепловой, гидродинамический.

Индексы нижние:

$ст$ – стенка;
 $пот$ – потери;
 o – окружающая среда.

Недостаточный уровень использования тепловых вторичных энергоресурсов в таких энергоустановках, как котельные агрегаты, промышленные печи, тепловые двигатели и т.п., связан, в основном, либо с недостаточной эффективностью теплоутилизационного оборудования, либо с его отсутствием. Потери теплоты с отходящими газами в таких установках составляют от 16% до

40%. Для Украины как энергодефицитной страны возможность уменьшения расхода первичных энергоресурсов за счет внедрения оптимальных технологий утилизации теплоты чрезвычайно актуальна [1]. Совершенство работы теплоиспользующего оборудования связано с эффективностью теплообменных аппаратов, входящих в системы утилизации теплоты. Несмотря на раз-

Табл. 1. Эксергетические характеристики, рассчитанные интегральным балансовым методом

№ элемента	1	2	3	4	5	6	7	8
Q	100,2	116,7	115,1	109,5	102,5	95,0	87,5	80,2
ΔE^e	17,282	19,827	17,222	17,055	13,851	12,358	11,350	10,776
$\Delta E^{d.z}$	59,109	67,006	64,212	60,010	53,164	47,577	41,994	37,068
E_{nom}	41,827	47,179	46,990	42,955	39,313	35,219	30,644	27,292
$\Delta E^{d.z.менл}$	58,951	66,852	64,060	58,860	53,109	47,430	41,909	36,773
$\Delta E^{e.менл}$	17,833	19,852	18,584	16,776	14,870	13,039	11,374	9,890
$E_{nom}^{менл}$	41,118	47,000	45,476	42,084	38,239	34,391	30,535	26,883
$E_{nom}^{гидр}$	0,708	0,179	1,514	0,871	1,074	0,828	0,109	0,409
η_{ex}^o	29,2	29,6	26,8	28,4	26,1	26,0	27,0	29,1
ΔT	355,30	334,08	310,98	288,13	266,11	245,19	225,52	207,10
ε	0,417	0,404	0,408	0,392	0,384	0,371	0,350	0,340

нообразии применяемых в настоящее время критериев оценки эффективности [2,3], они не дают достаточно полной информации, необходимой для выбора оптимальной конструкции теплообменного устройства. Вышесказанное определяет целесообразность применения критериев, для которых общий принцип построения можно сформулировать следующим образом: критерий должен включать характерные общие параметры, позволяющие описать теплообменник с различных позиций: термодинамической, теплотехнической, технологической. Так, использование для оценки термодинамической эффективности теплообменных аппаратов современных методов эксергетического анализа [4,5], в частности, такой характеристики, как потери эксергетической мощности, дает возможность рассматривать теплообмен и гидродинамические потери с единой позиции, а именно с позиции анализа термодинамической необратимости. Один из основных параметров теплообменных аппаратов, который позволяет оценить эффективность теплообменника с теплотехнической позиции – передаваемая тепловая мощность. С технологической позиции достаточно важная характеристика теплообменника – масса тепловой части, позволяющая учесть не только величину, но и характер теплопередающей поверхности. Предложены эксерго-технологические критерии эффективности теплообменных аппаратов, входящих в системы утилизации теплоты, включающие указанные характеристики:

$$k_{ex}^T = \frac{E_{nom} m}{Q}; \quad \varepsilon = \frac{E_{nom}}{Q}; \quad k_{ex} = \frac{\eta_{ex}}{\eta_{ex}^{уд}}$$

Целью данной работы является исследование эффективности утилизационного трубчатого газодводяного теплообменника, входящего в систему утилизации теплоты отходящих газов теплового двигателя когерационной установки, на основе применения двух эксергетических методов различного типа: интегрального балансового и метода, использующего диссипативные функции.

Рассматриваемый утилизационный теплообменник представляет собой трубчатый газодводяной теплообменник, состоящий из гладких труб с шахматной компоновкой в пучке. Теплообменник моделировался в виде восьми последовательно соединенных дискретных элементов. В случае использования интегрального балансового эксергетического метода составлялись уравнения эксергетического баланса для отдельных элементов теплообменника, при этом в качестве исходных термодинамических параметров использовались температура теплоносителей, давление, массовый расход и изобарная теплоемкость. Материальное и энергетическое взаимодействие элементов теплообменника осуществлялось по принципу “вход-выход” черного ящика. Результаты расчета представлены в табл. 1.

Для применения эксергетического метода, использующего диссипативные функции, получено дифференциальное уравнение эксергии, харак-

Табл. 2. Характеристики, рассчитанные с помощью диссипативных функций

№	$R_{\alpha 1}$, кВт	R_{λ} , кВт	$R_{\alpha 2}$, кВт	$R_{z 1}$, Вт	$R_{z 2}$, Вт	$\sum R_i$, Вт	η_{ex}^3 , %	ε
1	39,414	0,286	1,527	0,303	0,0086	41,539	27,0	0,415
2	44,614	0,392	2,142	0,280	0,0086	47,437	27,4	0,406
3	42,925	0,388	2,171	0,257	0,0086	45,750	28,0	0,397
4	39,792	0,359	2,046	0,235	0,0086	42,441	28,2	0,388
5	36,177	0,321	1,860	0,215	0,0085	38,582	28,4	0,376
6	32,474	0,282	1,653	0,197	0,0085	34,615	28,8	0,364
7	28,878	0,243	1,446	0,181	0,0085	30,756	29,2	0,351
8	25,491	0,208	1,250	0,166	0,0085	27,124	29,3	0,338

теризующее изменение удельной эксергии, связанное с изменением энтальпии вещества.

$$\rho \frac{de_i}{dt} = -\text{div}(\tau q) + \tau P_{\alpha\beta} \frac{\partial u_{\alpha\alpha}}{\partial x_{\beta}} + T_o \left(\frac{q \cdot \text{grad} T}{T^2} \right)$$

Последнее слагаемое определяет удельные эксергетические потери при необратимом теплообмене. Для определения полных потерь эксергетической мощности выполнено интегрирование по объему и получены диссипативные функции, определяющие процессы теплообмена между дымовыми газами и стенкой, теплопроводности в стенке и теплообмена между стенкой и водой:

$$R_{\alpha 1} = \frac{T_o q^2 F}{\alpha_1 T^{\partial \cdot z} T_{cm1}}, R_{\alpha 2} = \frac{T_o q^2 F}{\alpha_2 T^{\partial \cdot z} T_{cm2}},$$

$$R_{\lambda} = \frac{T_o q^2 F}{(\lambda_{cm} / \delta) T_{cm1} T_{cm2}}.$$

При расчете потерь эксергетической мощности, связанных с гидравлическими сопротивлениями, конвективный перенос газа и жидкости рассматривался в одномерном движении вдоль поверхности теплообмена. В такой модели потери эксергетической мощности на преодоление гидравлических сопротивлений, возникающих на участке между входом и выходом теплообменника, определяются по формулам:

$$R_{z1} = \frac{\xi^{\partial \cdot z} T_o G^{\partial \cdot z^3}}{2 T^{\partial \cdot z} \rho^{\partial \cdot z^2} f^{\partial \cdot z^2}}, R_{z2} = \frac{\xi^{\partial \cdot z} T_o G^{\partial \cdot z^3}}{2 T^{\partial \cdot z} \rho^{\partial \cdot z^2} f^{\partial \cdot z^2}}.$$

Результаты расчета эксергетических характеристик представлены в табл. 2.

Количество исходных данных для расчета потерь эксергетической мощности определяется приведенными формулами. Расхождение между значениями общих потерь эксергетической мощности, рассчитанных рассмотренными способами, составляет, в среднем, 1,6%, а между значениями эксерго-технологических критериев – 1,2%. С помощью η_{ex}^6 , определяющего степень реализации поставленной цели, т.е. показывающего долю полезной эксергии, полученной водой от дымовых газов, определены элементы теплообменника, нуждающиеся в конструктивной доработке – третий, пятый и шестой.

Таким образом, сравнительная оценка эксергетических характеристик отдельных элементов теплообменника, входящего в систему утилизации теплоты отходящих газов теплового двигателя когенерационной установки, на основе двух методов эксергетического анализа позволяет в каждом конкретном случае проведения эксергетического анализа теплообменников выбрать приоритетный метод, с помощью которого возможно определить его отдельные элементы, нуждающиеся в конструктивной доработке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долинский А.А., Драганов Б.Х., Дубровин В.А. Оптимизация технических систем методами эксергоэкономики // Промышленная теплотехника. – 2003. – Т.25, №5. – С.57-60.

2. *Fabbi G.* Heat Transfer Optimisation in Internally Finned Tubes under Laminar Flow Condition// Int. J. Heat Mass Transfer. – 1998. – Vol.41. – P.1243–1253.

3. *Конюхов Г.В., Петров А.И.* К определению эффективности теплообменных поверхностей в условиях конвективного теплообмена // Изв. АН

СССР, Энергетика и транспорт. – 1990. – №3. – С.168–172.

4. *Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К.* Эксергетический метод и его приложение. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 388с.

5. *Шаргут Я., Петела Р.* Эксергия. – М.: Энергия, 1968. – 277с.