

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В РЕКУПЕРАТОРЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МИКРОГАЗОТУРБИНОЙ УСТАНОВКИ

В.В. Кириллов, А.Л. Карташев

Исследованы рабочие процессы в рекуператоре энергетической микрогазотурбинной установки. Предложена математическая модель и метод расчёта рабочих процессов в рекуператоре. Приведены результаты математического моделирования рабочих процессов рекуператора рассматриваемой установки.

Ключевые слова: энергетическая микрогазотурбинная установка, рекуператор, рабочие процессы, математическая модель.

Газовоздушный рекуператор энергетической микрогазотурбинной установки (МГТУ) предназначен для повышения коэффициента полезного действия (КПД) установки за счёт дополнительного подогрева воздуха, выходящего из компрессора. Нагрев воздуха в рекуператоре происходит за счёт тепла выхлопных газов (продуктов сгорания), выходящих из турбины. На рис. 1 представлен цикл МГТУ с регенерацией теплоты и сгоранием топлива при постоянном давлении.

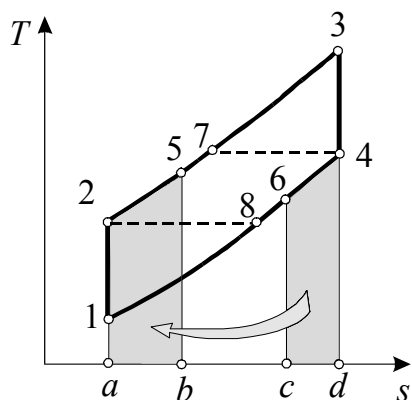


Рис. 1. Схема цикла МГТУ

Исходное состояние воздуха на входе в компрессор определяется точкой 1. Сжатый воздух после компрессора (точка 2) подогревается в рекуператоре за счёт теплоты продуктов сгорания (процесс 2–5) и подаётся в камеру сгорания. Таким образом, часть отводимой теплоты возвращается в цикл. Точки 7 и 8 соответствуют полной регенерации, точки 5 и 6 соответствуют частичной регенерации. Полнота регенерации характеризуется степенью регенерации

$$\sigma = \frac{T_5 - T_2}{T_4 - T_2}. \quad (1)$$

При заданных степени регенерации и температуры T_4 после турбины из (1) можно найти температуру воздуха после рекуператора

$$T_5 = T_2 + \sigma(T_4 - T_2). \quad (2)$$

Оба теплоносителя в рекуператоре МГТУ – газы, расходы которых отличаются незначительно. Так как коэффициенты теплоотдачи к газам невелики, для передачи тепла требуется развитая поверхность теплообмена (значительно большая, чем в теплообменниках, реализующих схемы «жидкость – жидкость» или «жидкость – газ»).

Рассматривается кольцевой рекуператор пластинчатого типа, схема которого представлена на рис. 2. Схема пластин рекуператора представлена на рис. 3.

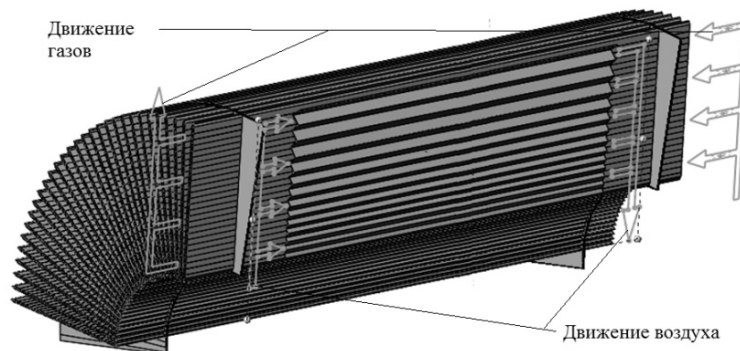


Рис. 2. Принципиальная конструктивная схема кольцевого противоточного пластинчатого рекуператора (стрелками показано движение горячих газов и воздуха)

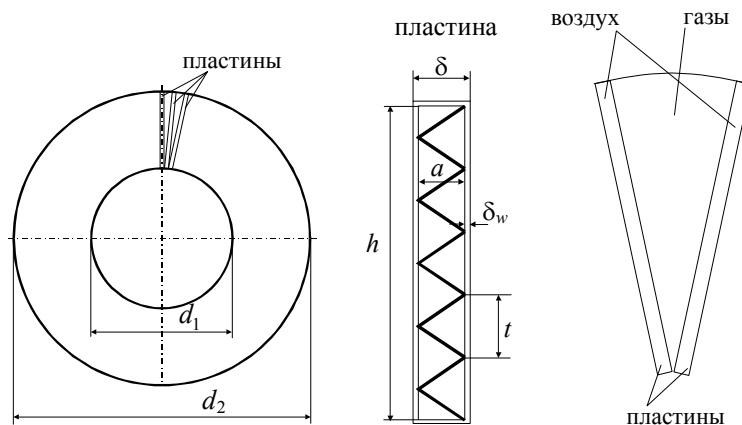


Рис. 3. Схема пластин рекуператора

Пластины располагаются внутри цилиндрического корпуса. Воздух движется внутри прямоугольных пластин, продукты сгорания в режиме противотока движутся между пластинами. Количество пластин теплообменника определяется по формуле

$$N = \frac{\pi d_1}{\delta}, \quad (3)$$

где d_1 – внутренний диаметр, δ – толщина пластины (см. рис. 3).

Для увеличения тепловых потоков в таких теплообменниках широко применяется оребрение поверхности теплообмена. С этой целью внутри воздушной пластины устанавливается гофрированная вставка (воздух движется в каналах треугольной формы).

Количество тепла, передаваемое воздуху, определяется по уравнению баланса тепла

$$Q = G_{\text{в}} c_{p\text{в}} (T_5 - T_2) = G_{\text{г}} c_{p\text{г}} (T_4 - T_6), \quad (4)$$

где G – расход, c_p – удельная теплоёмкость; T – температура; индексы: в – воздух; г – продукты сгорания (далее, газы). Теплоёмкости воздуха и газов рассчитываются по средним температурам.

Высота пластины h при заданной толщине δ определяется следующим образом. Находят площадь сечения прохода газов $S_{\text{г}}$, предварительно задав их скорость $w_{\text{г}}$

$$S_{\text{г}} = \frac{G_{\text{г}}}{\rho_{\text{г}} w_{\text{г}}}. \quad (5)$$

С другой стороны

$$S_{\text{г}} = \frac{\pi [(d_1 + 2h)^2 - d_1^2]}{4} - Nh\delta = \pi h^2.$$

Отсюда

$$h = \sqrt{\frac{S_{\text{г}}}{\pi}}. \quad (6)$$

Скорость воздуха в пластине находится по формуле

$$w_{\text{в}} = \frac{G_{\text{в}}}{N \rho_{\text{в}} a (h - 2\delta_w)}. \quad (7)$$

Изменение температуры воздуха и газов по длине теплообменника можно определить из решения уравнений энергии

$$\frac{dT_{\text{в}}}{dx} = \frac{K_{\text{в}} \Pi_{\text{в}} (T_{\text{г}} - T_{\text{в}})}{G_{\text{в}} c_{p\text{в}}}, \quad (8)$$

$$\frac{dT_{\text{г}}}{dx} = \frac{K_{\text{г}} \Pi_{\text{г}} (T_{\text{г}} - T_{\text{в}})}{G_{\text{г}} c_{p\text{г}}}, \quad (9)$$

здесь Π – обогреваемый периметр; K – коэффициенты теплопередачи.

$$K_B = \frac{1}{\frac{F_B}{\alpha_\Gamma F_\Gamma} + \frac{\delta_w F_B}{\lambda_w F_\Gamma} + \frac{1}{\alpha_{прив}}}; \quad K_\Gamma = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_\Gamma} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha_{прив}} \frac{F_\Gamma}{F_B}}. \quad (10)$$

Коэффициенты, входящие в (10), приведены в работах [1, 2]

$$\alpha_{прив} = \alpha_B \eta_{0B}; \quad \eta_{0B} = 1 - \frac{F_p}{F_B} (1 - \eta_p); \quad \eta_p = \frac{th(ml_p/2)}{ml_p/2}; \quad m = \sqrt{\frac{2\alpha_B}{\delta_p \lambda_p}},$$

здесь α – коэффициент теплоотдачи; F – площадь поверхности; l_p – длина ребра; δ_p – толщина ребра; λ – коэффициент теплопроводности; x – координата вдоль пластины; индексы: w – стенка, p – ребро.

Начальные условия для уравнений (8) и (9) задаются в виде

$$T_B(0) = T_2; \quad T_\Gamma(0) = T_6. \quad (11)$$

Коэффициенты теплоотдачи рассчитываются по критериальным уравнениям в зависимости от режима течения. В числах Рейнольдса в качестве характерного размера используются эквивалентные диаметры $d_3 = 4S/\Pi$. При течении в щелевых каналах при ламинарном режиме число Нуссельта рекомендуется принимать равным 7,55 [3]. При турбулентном режиме течения можно использовать уравнение Михеева [1, 4]: $Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43}$.

Изменение давления по длине теплообменника рассчитывается по уравнениям импульса для воздуха и газов

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{G_B^2}{S_B \rho_B} + p_B S_B \right) = -\xi_B \frac{G_B^2 \Pi_B}{8 S_B^2 \rho_B}; \quad (12)$$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{G_\Gamma^2}{S_\Gamma \rho_\Gamma} + p_\Gamma S_\Gamma \right) = \xi_\Gamma \frac{G_\Gamma^2 \Pi_\Gamma}{8 S_\Gamma^2 \rho_\Gamma}, \quad (13)$$

здесь S – площадь сечения; p – давление; ξ – коэффициент гидравлического сопротивления; ρ – плотность.

Начальные условия для уравнений (12) и (13) записываются в виде: $p_B(0) = p_2$; $p_\Gamma(L) = p_4$.

Уравнения (8), (9), (12), (13) решались численно методом Рунге-Кутты 4-го порядка. Интегрирование ведётся до тех пор, пока температуры воздуха и газов не станут равными T_5 и T_4 , соответственно. При этом за длину пластины принимается значение координаты x .

В таблице представлены результаты расчёта противоточного рекуператора с оребрённой воздушной пластиной, шаг оребрения $t = 3$ мм, толщина $\delta_p = 0,12$ мм. Газовый канал без рёбер. Количество пластин – 523, высота пластины $h = 0,19$ м, толщина пластины $\delta = 2,4$ мм, толщина стенки $\delta_w = 0,2$ мм, диаметр $d_1 = 0,4$ м. Температуры: $T_2 = 248,2$ °С, $T_4 = 603$ °С. Давления: $p_2 = 0,55$ МПа, $p_4 \approx 0,1$ МПа. Расходы воздуха и газов равны $G_B = 1,04$ кг/с и $G_\Gamma = 1,05$ кг/с.

Результаты расчёта рекуператора с оребрённой воздушной пластиной

σ	\bar{K}_B , Вт/м ² К	\bar{K}_Γ , Вт/м ² К	L , м	Δp_B , кПа	Δp_Γ , кПа	F_B , м ²	F_Γ , м ²	$\Delta \bar{T}$, °С	T_5 , °С	T_6 , °С
0,6	27,7	73,6	0,117	0,698	0,48	61,6	23,3	159,6	461,1	403,9
0,7	27,5	73,1	0,180	1,15	0,74	95,3	35,9	123,6	496,6	370
0,8	27,3	72,4	0,306	2,06	1,25	161,8	60,96	87,3	532,0	336,0
0,9	21,2	72,3	0,676	4,87	2,79	357,1	134,5	49,3	567,5	301,5

Представленная математическая модель и метод расчета позволили провести исследование рабочих процессов в рекуператоре МГТУ, реализующем регенерацию тепловой энергии продуктов сгорания с целью повышения КПД установки. Приведены результаты математического моделирования рабочих процессов в кольцевом рекуператоре пластинчатого типа.

Литература

1. Бажан, П.И. Справочник по теплообменным аппаратам / П.И. Бажан, Г.Е. Каневец, В.М. Селиверстов. – М.: Машиностроение, 1989. – 366 с.
2. Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок: учеб. для вузов / В.А. Иванов, А.И. Леонтьев, Э.А. Манушкин, М.И. Осипов; под ред. А.И. Леонтьева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 592 с.
3. Уонг, Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров / Х. Уонг. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.
4. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.; Л.: Энергия, 1965. – 424 с.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проекта «Создание производства модельного ряда микротурбинных энергоустановок нового поколения» по договору № 02.G25.31.0078 от 23.05.2013 г.

Кириллов Валерий Владимирович. Доктор технических наук, профессор кафедры «Двигатели летательных аппаратов», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск). Тел.: +79127741611; valery.v.kirillov@gmail.com.

Карташев Александр Леонидович. Доктор технических наук, профессор кафедры «Летательные аппараты и автоматические установки», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск). Тел.: +79193458556; al_kartashev@mail.ru.

**Bulletin of the South Ural State University
Series "Mechanical Engineering Industry"
2013, vol. 13, no. 2, pp. 144–147**

**RESEARCH OF OPERATION PROCESS IN RECUPERATOR
OF POWER MICRO GAS TURBINE INSTALLATION**

*V.V. Kirillov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
valery.v.kirillov@gmail.com,*

*A.L. Kartashev, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
al_kartashev@mail.ru*

The operation processes in recuperator of power micro gas turbine installation are investigated. The mathematical model and method of calculation of operation processes in recuperator is introduced. The results of mathematical modeling recuperator's operation processes of considered installation are given.

Keywords: power micro gas turbine installation, recuperator, operation processes, mathematical model.

Поступила в редакцию 17 сентября 2013 г.