





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,  $\delta$  – 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

$$Q = G_B c_{pB} (T_5 - T_2) = G_G c_{pG} (T_4 - T_6), \quad (4)$$

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  $\delta$  определяется следующим образом. Находят площадь сечения прохода газов  $S_G$ , предварительно задав их скорость  $w_G$

$$S_G = \frac{G_G}{\rho_G w_G}. \quad (5)$$

С другой стороны

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

Отсюда

$$h = \sqrt{\frac{S_G}{\pi}}. \quad (6)$$

Скорость воздуха в пластине находится по формуле

$$w_B = \frac{G_B}{N \rho_B a (h - 2\delta_w)}. \quad (7)$$

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

$$\frac{dT_B}{dx} = \frac{K_B \Pi_B (T_G - T_B)}{G_B c_{pB}}; \quad (8)$$

$$\frac{dT_G}{dx} = \frac{K_G \Pi_G (T_G - T_B)}{G_G c_{pG}}, \quad (9)$$

здесь  $\Pi$  – обогреваемый периметр;  $K$  – коэффициенты теплопередачи.

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

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

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

здесь  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $F$  – площадь поверхности;  $l_p$  – длина ребра;  $\delta_p$  – толщина ребра;  $\lambda$  – 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;  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $\rho$  – 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**

$\sigma$	$\bar{K}_B$ , Вт/м <sup>2</sup> К	$\bar{K}_\Gamma$ , Вт/м <sup>2</sup> К	$L$ , м	$\Delta p_B$ , кПа	$\Delta p_\Gamma$ , кПа	$F_B$ , м <sup>2</sup>	$F_\Gamma$ , м <sup>2</sup>	$\Delta \bar{T}$ , °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.*