

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ЛЕНТОЧНОГО ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЯ ВОЗДУХА

Капинос В.М., д.т.н., проф.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Турбиностроение"
тел. (057) 707-63-11, факс (057) 707-63-11

Навроцкий В.В., к.т.н., с.н.с.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Турбиностроение"
тел. (057) 707-63-11, факс (057) 707-63-11, e-mail: navr@kpi.kharkov.ua

Смородская И.В., к.т.н., ст. преп.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Компьютерная математика и математическое моделирование", тел. (057) 707-63-51

Приведено тепловий розрахунок електричного повітрянагрівача для експериментальної імпульсної газотурбінної установки з робочою температурою 1200°С.

Приведен тепловой расчет электрического воздушнонагревателя для экспериментальной импульсной газотурбинной установки с рабочей температурой 1200°С.

Двумерное температурное поле прямоугольной области с равномерно распределенными источниками теплоты описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{q_v}{\lambda} = 0, \quad (1)$$

где q_v - объемная мощность, $\frac{Вт}{м^3}$; λ - теплопровод-

ность, $\frac{Вт}{м \cdot К}$.

Введем в рассмотрение среднеинтегральную температуру по толщине прямоугольной области (ленты толщиной δ) температуру

$$\theta = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} t dy. \quad (2)$$

Разделим уравнение (1) на δ и проинтегрируем по y в пределах от 0 до δ . Будем иметь

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} + \frac{1}{\delta} \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)_0^{\delta} + \frac{q_v}{\lambda} = 0. \quad (3)$$

При симметричных граничных условиях 3-го рода

$$y = 0 \quad \alpha(t - \vartheta) = \lambda \frac{\partial t}{\partial y} \quad (4)$$

$$y = \delta \quad \alpha(t - \vartheta) = -\lambda \frac{\partial t}{\partial y}, \quad (5)$$

где ϑ - температура нагреваемой среды, уравнение (3) преобразуется к виду

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} - \frac{2\alpha}{\lambda \delta} (t_{\delta} - \vartheta) + \frac{q_v}{\lambda} = 0. \quad (6)$$

Если принять, что температура на поверхности ленты t_{δ} (при $y = \delta$) равна среднеинтегральной температуре θ , что хорошо выполняется для тонких тел, то уравнение (6) принимает вид

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} - \frac{2\alpha}{\lambda \delta} (\theta - \vartheta) + \frac{q_v}{\lambda} = 0. \quad (7)$$

Дифференциальное уравнение для потока нагреваемого воздуха находим из уравнения теплового баланса для элемента потока на участке dx

$$Q = C_p G \vartheta, \quad Q_2 = C_p G \vartheta + C_p G \frac{d\vartheta}{dx} dx,$$

$$Q_3 = 2\alpha(\theta - \vartheta)b_l dx,$$

где α - коэффициент теплоотдачи на поверхности ленты, шириной b_l .

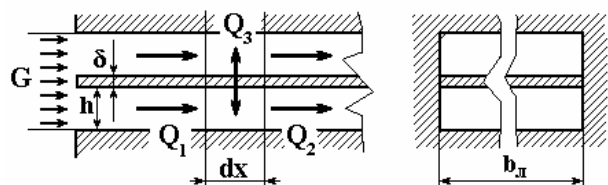


Рис. 1. К выводу уравнения теплового баланса для элемента потока воздуха

Уравнение баланса теплоты

$$Q_1 + Q_3 = Q_2$$

$$C_p \cdot G \cdot \frac{d\vartheta}{dx} = 2 \cdot \alpha \cdot b_l \cdot (\theta - \vartheta) \text{ или} \\ \frac{d\vartheta}{dx} = \frac{2 \cdot \alpha \cdot b_l}{C_p \cdot G} \cdot (\theta - \vartheta). \quad (8)$$

Распределение температуры ленты θ и воздуха ϑ по длине канала x описывается системой уравнений

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - n^2(\theta - \vartheta) + \frac{q_v}{\lambda} = 0, \quad n^2 = \frac{2\alpha}{\lambda\delta}, \quad (9)$$

$$\frac{d\vartheta}{dx} - p^2(\theta - \vartheta) = 0, \quad p^2 = \frac{2 \cdot \alpha \cdot b_l}{C_p \cdot G}. \quad (10)$$

Оценка величины слагаемых уравнения (9) свидетельствует о том, что значение $\frac{d^2\theta}{dx^2}$ на несколько порядков меньше по сравнению с последующими двумя членами. Отсюда следует, что второй производной в уравнении (9) можно пренебречь. Этот вывод для распределения температуры в тонких пластинах известен (см., например [1], с. 282 – 285, где приведен расчет распределения температуры в полый охлаждаемой лопатке газовой турбины). Распределение температуры в тонкой оболочке и температуры охлаждающего воздуха, рассчитанные с учетом второй производной в уравнении (9) и без ее учета практически оказались неразличимыми.

В итоге будем иметь преобразованную систему уравнений, допускающую простое решение в виде

$$\frac{2\alpha}{\lambda\delta} \cdot (\theta - \vartheta) = \frac{q_v}{\lambda}, \quad (11)$$

$$\frac{d\vartheta}{dx} = \frac{2 \cdot \alpha \cdot b_l}{C_p \cdot G} \cdot (\theta - \vartheta). \quad (12)$$

Из (11) следует, что $\theta - \vartheta = \frac{q_v \cdot \lambda \cdot \delta}{2 \cdot \alpha}$. Подставляя $\theta - \vartheta$ в (12), имеем

$$\frac{d\vartheta}{dx} = \frac{q_v \cdot b_l \cdot \delta}{C_p \cdot G}. \quad (13)$$

После интегрирования находим распределение температуры нагреваемого воздуха по длине канала

$$\vartheta = \frac{q_v \cdot b_l \cdot \delta}{C_p \cdot G} x + \vartheta_0, \quad (14)$$

где ϑ_0 значение начальной температуры воздуха при $x = 0$. Соответственно температура ленты нагревателя равна

$$\theta = \frac{q_v \cdot b_l \cdot \delta}{C_p \cdot G} x + \frac{q_v \cdot \delta}{2 \cdot \alpha} + \vartheta_0. \quad (15)$$

Этот результат можно уточнить, приняв во внимание зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости воздуха, а также зависимость физических параметров воздуха $\mu, \lambda, C_p, \text{Pr}$ (динамическая вязкость, теплопроводность, теплоемкость, число Пран-

дтля) от температуры.

Коэффициент теплоотдачи поверхности ленты определяется по формуле

$$\alpha = 0,021 \cdot \frac{\lambda_g}{d_3} \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,43}, \quad (16)$$

где $d_3 = 2h$, h - высота канала для половинного расхода воздуха или другой размер в зависимости от формы канала,

$$w_g = \frac{0,5 \cdot G}{\rho \cdot h \cdot b_l} \text{ - скорость в канале,}$$

$$\text{Re} = \frac{w_g d_3 \rho}{\mu(\vartheta)} = \frac{0,5 G d_3 \rho}{\rho h b_l \mu(\vartheta)} = \frac{G}{b_l \mu(\vartheta)},$$

$\mu(\vartheta)$ - аппроксимация μ в зависимости от температуры, $\lambda_g(\vartheta)$ - аппроксимация λ в зависимости от температуры, $\text{Pr}(\vartheta)$ - аппроксимация Pr в зависимости от температуры.

Тогда

$$\alpha(\vartheta) = 0,021 \frac{\lambda_g(\vartheta)}{2h} \left(\frac{G}{b_l \mu(\vartheta)} \right)^{0,8} \text{Pr}(\vartheta)^{0,93}. \quad (17)$$

При переменной C_p в виде линейной зависимости $C_p = a\vartheta + b$ из уравнения (13) следует

$$\frac{d\vartheta}{dx} = \frac{q_v b_l \delta}{G(a\vartheta + b)}. \quad (18)$$

Разделяем переменные и, интегрируя, будем иметь

$$\frac{a\vartheta^2}{2} + b\vartheta = \frac{q_v b_l \delta}{G} x + C.$$

При $x = 0$ $C = \frac{a\vartheta_0}{2} + b\vartheta_0$. Общий интеграл принимает вид

$$\frac{a\vartheta^2}{2} + b\vartheta - \frac{a\vartheta_0^2}{2} - b\vartheta_0 - \frac{q_v b_l \delta}{G} x = 0. \quad (19)$$

Решение этого уравнения находим зависимость температуры воздуха ϑ от координаты x

$$\vartheta = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 2a(\beta + \gamma x)}}{a}, \quad (20)$$

где $\beta = \frac{a\vartheta_0^2}{2} + b\vartheta_0$, $\gamma = \frac{q_v b_l \delta}{G}$.

Из уравнения (11) и (20) совместно с (17) следует, что температура ленты нагревателя

$$\theta = \frac{q_v \delta}{2\alpha(\vartheta)} + \vartheta. \quad (21)$$

При этом принимается во внимание и переменность физических параметров $\lambda_g(t)$, $\mu(t)$, $C_p(t)$, $\text{Pr}(t)$.

На рис.2 приведено распределение температуры нагреваемого воздуха для импульсной газотурбинной

установки с $G = 0,05$ кг/с на рабочую температуру $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\vartheta_0 = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$).

В качестве исходных данных принято:

- длина ленты – 40 м,
- ширина – $b_d = 23$ мм;
- толщина – $\delta = 1$ мм;
- материал – сталь ХН45Ю;
- теплопроводность стали – $\lambda = 24,3$ Вт/(м·К);
- удельное электрическое сопротивление стали – $\rho = 1,48$ (Ом·мм²)/м;
- рабочее напряжение $V = 440$ В.

Для μ, λ_g, ρ_t воздуха приняты табличные значения, теплоемкость аппроксимирована уравнением $C_p = 0,1833 \cdot \vartheta + 997$, кДж/(кг·К).

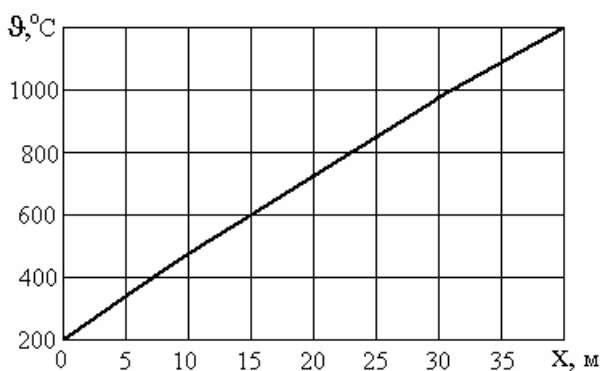


Рис. 2. Распределение температуры нагреваемого воздуха по длине канала

Конструктивно электронагреватель может быть выполнен в виде отдельных U-образных лент, соединенных последовательно. Такая компоновка позволяет уменьшить габариты нагревателя. Каждая лента (рис. 3) проходит внутри керамических электроизоляционных вставок, образующих воздушные каналы. Вставки размещаются внутри стальных труб, которые, в свою очередь, закреплены в общем корпусе.

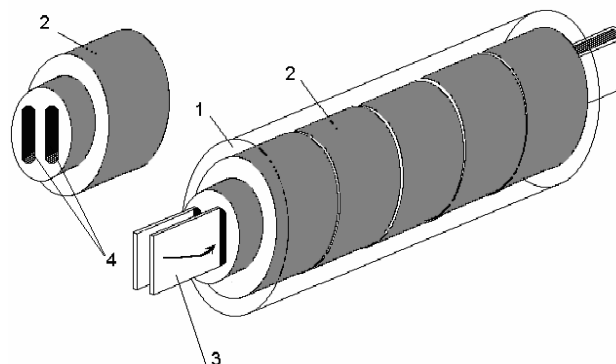


Рис. 3. Нагревательный элемент:
1 – труба; 2 – электроизоляционная вставка;
3 – стальная лента; 4 – воздушные каналы

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шнеэ Я.И., Капинос В.М., Котляр И.В. Газовые турбины. –Киев: Вища школа. 1974. Том 1. – 295 с.

Поступила 03.03.2006