

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ

В.В. Кириллов, А.О. Шульц

Предлагается математическая модель электрического воздухоподогревателя, предназначенного для нагрева воздуха на испытательном стенде микрогазотурбинной установки.

Ключевые слова: подогреватель, математическая модель, численный метод.

Подогреватель предназначен для проточного нагрева сжатого воздуха в диапазоне температур от 20 до 500 °С.

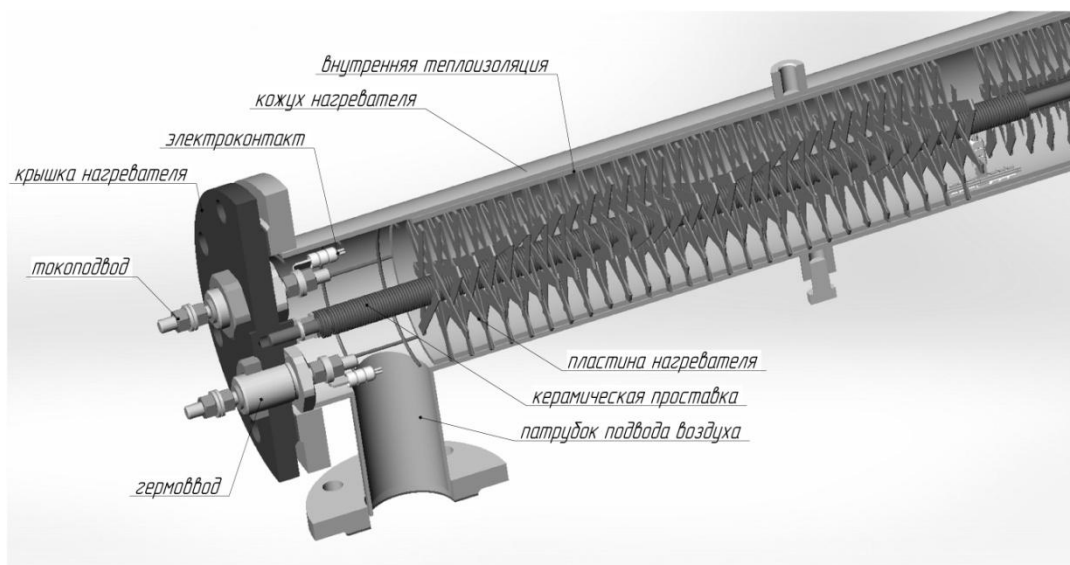


Рис. 1. Конструкция подогревателя

Теплообменник представляет собой кожух с фланцами, крышками и патрубками подвода и отвода воздуха, внутри которого расположен специальным образом уложенный и закрепленный ленточный нихромовый нагреватель (рис. 1). Дистанцирование пластин нагревателя друг относительно друга производится при помощи керамических втулок, расположенных на металлическом стержне в центре кожуха.

Подвод электропитания к нагревателю производится через высокотемпературные гермовводы, расположенные на одной из крышек. Весь нагреватель разделен на три секции, каждая из которых питается от одной фазы трехфазного переменного тока.

Регулирование выходной температуры воздуха производится с помощью ПИД-регулятора с обратной связью по температуре.

Для минимизации тепловых потерь в окружающую среду, а также для теплозащиты преобразователей температуры, кожух нагревателя и воздушные патрубки закрыты теплоизоляцией.

На рис. 2 показано взаимное расположение пластин нагревателя.

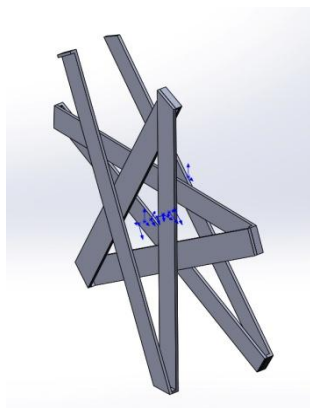


Рис. 2. Взаимное расположение пластин

При формировании математической модели приняты следующие допущения.

1. При обтекании пакета пластин воздушный поток турбулизует, в результате температура потока в сечении выравнивается и может быть принята одинаковой по радиусу теплообменника в каждом сечении. Таким образом, температуру воздуха можно считать постоянной для каждой пластины.

2. Теплофизические свойства материала пластины и ее удельное электрическое сопротивление не зависят от температуры.

Пакет пластин можно представить в виде стержня с длиной, равной суммарной длине пластин пакета, обтекаемого поперечным потоком воздуха. При этом в пределах каждой пластины температура воздуха, коэффициент теплоотдачи, скорость воздуха будут постоянны.

Изменение температуры пластины по длине определяется уравнением [1]:

$$\frac{d^2 t_{\text{п}}}{dx^2} - \frac{\alpha \Pi (t_{\text{п}} - t_{\text{в}})}{\lambda_{\text{п}} f} = -\frac{q_v}{\lambda_{\text{п}}}, \quad (1)$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} \lambda \frac{dt_{\text{п}}(0)}{dx} &= \alpha_{\text{T}} [t_{\text{п}}(0) - t_{\text{в}}(0)]; \\ -\lambda \frac{dt_{\text{п}}(L)}{dx} &= \alpha_{\text{T}} [t_{\text{п}}(L) - t_{\text{в}}(L)]. \end{aligned} \quad (2)$$

где t – температура; α – коэффициент теплоотдачи; Π – периметр сечения пластины; f – площадь сечения пластины; λ – коэффициент теплопровод-

ности; q_v – плотность внутренних источников тепловыделения; x – координата вдоль пластины; L – суммарная длина пластин в пакете; индексы: в – воздух; п – пластина; т – торец пластины.

Условия обтекания пластин существенно отличаются от классических случаев, принятых в теории теплообмена (таких как поперечное обтекание цилиндра и пакетов труб). Поэтому были выполнены расчеты подогревателя по трехмерной модели в приложении Flow Simulation программного продукта SolidWorks. В результате расчетов определялась средняя температура пластины в нескольких сечениях по длине подогревателя. В результате обработки результатов численного эксперимента получено критериальное уравнение для расчета коэффициента теплоотдачи в виде:

$$\text{Nu} = 1,01 \text{Re}^{0,404}, \quad (3)$$

$$\text{Re} = \frac{w\Delta}{\nu_B}, \quad \text{Nu} = \frac{\alpha\Delta}{\lambda_B},$$

где Δ – ширина пластины; ν – вязкость

Коэффициент теплоотдачи на торце пластины можно определить по уравнению [2]:

$$\text{Nu}_T = 0,664 \text{Re}_T^{0,5} \text{Pr}^{0,33}, \quad \text{Re}_T = \frac{w\delta}{\nu_B}; \quad \text{Nu}_T = \frac{\alpha\delta}{\lambda_B},$$

где δ – толщина пластины.

Уравнение (1) с граничными условиями (2) решается численно методом конечных разностей [3]. На пластине строится равномерная сетка с шагом h . Уравнение (1) и граничные условия (2) аппроксимируются разностной схемой:

$$\frac{t_{n-1} - 2t_n + t_{n+1}}{h^2} - m_j t_n = -m_j t_{B,j} - \frac{q_v}{\lambda_{\text{п}}}, \quad m = \frac{\alpha \Pi}{\lambda_n f}; \quad (4)$$

$$\lambda_{\text{п}} \frac{t_2 - t_1}{h} = \alpha_T (t_1 - t_{B,1}); \quad -\lambda_{\text{п}} \frac{t_N - t_{N-1}}{h} = \alpha_T (t_N - t_{B,J}), \quad (5)$$

где n – номер узла сетки, j – номер пластины; N – число узлов сетки; J – количество пластин. Уравнение (4) с граничными условиями (5) решается трехточечной прогонкой [3].

Результаты расчета показывают, что значения температуры пластин в начале и средней части секций отличаются от результатов, полученных при трехмерном моделировании не более, чем на 5...7 %. В конце секции это отклонение вырастает до 17 %. Во всех случаях предлагаемая модель дает заниженные значения температуры пластин по сравнению с трехмерным моделированием.

Расхождение результатов расчета по трехмерной и одномерной моделям вызвано рядом обстоятельств. Пластины в подогревателях частично закрывают друг друга. Причем площадь перекрытия по длине секции меняется. У второй пластины закрыто примерно 8 % поверхности. У третьей

пластины уже около 10 %. Пластины расположены всего на расстоянии 1,5 мм друг от друга, поэтому условия обтекания их существенно отличаются от поперечного обтекания первой пластины. Температура пластины не одинакова по ее длине и средняя температура заметно выше, чем при одинаковых условиях теплообмена.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках комплексного проекта «Создание производства модельного ряда микротурбинных энергоустановок нового поколения» по договору № 02.G25.31.0078 от 23.05.2013 г. между Министерством образования и науки Российской Федерации и Открытым акционерным обществом специальным конструкторским бюро «Турбина» в кооперации с головным исполнителем НИОКТР – Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет).

Библиографический список

1. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.–Л.: Энергия, 1965. – 424 с.
2. Уонг, Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров / Х. Уонг. – М.: Атомиздат, 1979. – 212 с.
3. Самарский, А.А. Методы решения сеточных уравнений / А.А. Самарский, Е.С. Николаев. – М.: Наука, 1978. – 592 с.