

УДК 536.3.535.34

РАСЧЕТ СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ С ТУРБУЛЕНТНЫМ ТЕЧЕНИЕМ

Абдуллин Айрат Махмутович

кандидат технических наук
Нижнекамский химико-технологический институт (филиал)
Казанского национального исследовательского технологического
университета, Нижнекамск

Аннотация. Выполнен расчет сложного теплообмена и поля течения в плоском канале, приближенно моделирующем радиантную камеру трубчатых печей. Математическая модель основана на численном решении системы интегро-дифференциальных уравнений радиационной газовой динамики. Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными.

Ключевые слова: излучение, конвекция, теплообмен, турбулентность.

CALCULATION OF A COMPLEX HEAT EXCHANGE IN A PLANE CHANNEL WITH A TURBULENT FLOW

Abdullin Ayrat Mahmutovich

candidate of technical sciences
Nizhnekamsk Chemical Technological Institute (branch)
of Kazan National Research Technological University, Nizhnekamsk

Abstract. Calculation of complex heat transfer and flow field in a plane channel, approximately simulating a radiant chamber of tubular furnaces, is performed. The mathematical model is based on a numerical solution of the system of integro-differential equations of radiation gas dynamics. The results of the calculations are compared with the experimental data.

Keywords: radiation, convection, heat exchange, turbulence.

Дифференциальные методы расчета сложного теплообмена в высокотемпературных теплоэнергетических установках основаны на численном решении системы интегро-дифференциальных уравнений переноса излучения, дифференциальных уравнений энергии и газовой динамики для турбулентного течения продуктов сгорания топлива. Применительно к топкам трубчатых печей разработан пакет прикладных программ, реализующий этот метод, который применялся для исследования некоторых закономерностей сложного теплообмена [1; 2].

Уравнение переноса лучистой энергии в прямоугольной области, заполненной селективно излучающей, поглощающей и изотропно рассеивающей средой, при локальном термодинамическом равновесии имеет вид:

$$\mu \frac{\partial I_{\lambda s}}{\partial x} + \xi \frac{\partial I_{\lambda s}}{\partial y} = \alpha_{\lambda} I_{b\lambda} - (\alpha_{\lambda} + \beta) I_{\lambda s} + \frac{\beta}{4\pi} \int_{4\pi} I_{\lambda s'} d\Omega_{s'} \quad (1)$$

Здесь μ , ξ – направляющие косинусы, $I_{\lambda s}$ – спектральная интенсивность излучения в направлении вектора \vec{s} , $I_{b\lambda}$ – спектральная интенсивность излучения абсолютно черного тела, α_{λ} – спектральный коэффициент поглощения, β – коэффициент рассеяния среды.

Граничное условие к уравнению (1) при диффузном излучении и отражении от стенок имеет вид:

$$I_{\lambda s} = \varepsilon I_{b\lambda} + \frac{r}{\pi} \int_{(\vec{s}' \cdot \vec{n}) \leq 0} I_{\lambda s'} \cos(\vec{s}' \cdot \vec{n}) d\Omega_{s'} \quad (2)$$

где ε , r – интегральная степень черноты и отражательная способность граничной поверхности.

Распределение температуры в расчетной области определяется в результате решения уравнения энергии:

$$c_p \rho u \frac{\partial T}{\partial x} + c_p \rho v \frac{\partial T}{\partial y} = \text{div} \left[(\lambda_M + \lambda_T) \text{grad } T \right] + \text{div} \bar{q}_p. \quad (3)$$

Здесь u, v – составляющие вектора скорости движения продуктов сгорания, c_p, ρ – теплоемкость и плотность продуктов сгорания, λ_M, λ_T – коэффициенты молекулярной и турбулентной теплопроводности, \bar{q}_p – вектор плотности интегрального по спектру потока лучистой энергии. Дивергенция лучистых потоков тепла определяется по формуле:

$$\text{div} \bar{q}_p = \int_0^{\infty} (4\pi I_{b\lambda} - \int_{4\pi} I_{\lambda s} d\Omega_s) d\lambda. \quad (4)$$

Поля скоростей и коэффициентов турбулентного переноса определяются в результате решения уравнений неразрывности, Навье-Стокса и (k-ε) модели турбулентности, которые формально можно объединить в одно обобщенное уравнение:

$$\rho u \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \Phi}{\partial y} = \text{div} \left[\Gamma_\Phi \text{grad} \Phi \right] + S_\Phi, \quad (5)$$

где обобщенная переменная $\Phi = (u, v, k, \varepsilon)$. Здесь k – кинетическая энергия турбулентных пульсаций, ε – скорость диссипации турбулентных пульсаций, Γ_Φ – обобщенный коэффициент переноса.

Источниковые члены в уравнениях модели турбулентности имеют вид:

$$S_k = G - \rho \varepsilon; \quad S_\varepsilon = C_{\varepsilon_1} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{\varepsilon_2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (6)$$

Величина G , характеризующая генерацию энергии турбулентности, определяется выражением:

$$G = \mu_T \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\}. \quad (7)$$

Коэффициенты турбулентной вязкости и теплопроводности вычисляются по формулам:

$$\mu_T = C_\mu f_{\mu_1} \rho \frac{k^2}{\varepsilon}; \quad \lambda_T = \frac{C_p \mu_T}{Pr_T}. \quad (8)$$

Здесь Pr_T – турбулентное число Прандтля, функция f_{μ_1} учитывает влияние турбулентного числа Рейнольдса Re_T на турбулентную теплопроводность вблизи стенки. Эмпирические постоянные в модели турбулентности приняты равными [3]:

$$C_\mu = 0,09; \quad C_{\varepsilon_1} = 1,44; \quad C_{\varepsilon_2} = 1,92; \quad Pr_T = 0,9.$$

Система уравнений (1) – (5) дополняется соответствующими условиями однозначности. Параметры течения на входном сечении считаются известными, поэтому на нем ставится граничное условие первого рода. На выходном сечении используется метод «односторонних» координат [4], позволяющий замкнуть исходные дифференциальные уравне-

ния. Температура футерованной поверхности определяется из решения уравнения теплового баланса:

$$q_p + q_k = \frac{T_w - T_0}{R_{\phi}}, \quad (9)$$

где $T_w - T_0$ – перепад температуры поперек футеровки, R_{ϕ} – термическое сопротивление футеровки, q_p, q_k – соответственно плотности лучистого и конвективного потоков тепла к поверхности.

Граничные условия для продольной составляющей скорости, температуры и характеристик турбулентности на твердой границе ставятся по методу пристеночных функции [3].

Система уравнений (1) – (5) с соответствующими граничными условиями решается численно. Уравнение переноса излучения (1) решается в S_n – приближении метода дискретных ординат. Решение дифференциальных уравнений (3), (5), описывающих поля температуры и характеристик турбулентного течения, выполняется по известному алгоритму SIMPLER [4].

В работе [5] опубликованы результаты экспериментального исследования сложного теплообмена в плоском горизонтальном канале сечением 800×200 мм, длиной 2100 мм. Канал, кроме верхней стенки, футерован огнеупорным бетоном. Верхняя стенка образована поверхностью водоохлаждаемых калориметров. Продукты полного сгорания природного газа поступают в канал через водоохлаждаемое сопло с плавным входом, расположенном в центре канала. Однако наблюдаемое течение было несимметричным и плоская струя всегда прижималась к нижней стенке канала. Поэтому в расчетах было принято, что входная щель шириной 28 мм расположена у нижней стенки канала.

В расчетах учитывалась зависимость теплофизических свойств продуктов сгорания от температуры, при определении спектральных коэффициентов поглощения продуктов сгорания использовалась шести-полосная модель, составленная из основных полос поглощения H_2O и CO_2 [6]. Степень черноты образующих канал поверхностей принята равной 0,8.

В качестве граничных условий задавались температура верхней водоохлаждаемой поверхности (400K) и равенство нулю теплового потока через футеровку. Для того чтобы замкнуть излучающую систему, границы на входе и выходе из канала считались непрозрачными, диффузно отражающими все падающее на них излучение. Задача лучистого переноса тепла решалась в S_2 -приближении метода дискретных ординат.

Рассматривались два режима течения и теплообмена, отличающихся скоростью (62-113 м/с) и температурой газов на входе в канал (1370-1823 K). При этих условиях температурный уровень и число Рейнольдса имеют характерные для топочных камер трубчатых печей значения ($Re = 14800-18700$ соответственно). Система уравнений радиационной газовой динамики совместно с уравнениями (k- ϵ) модели турбулентности решалась на конечно-разностной сетке с 17×11 узловыми точками и сходилась за 10 (первый режим) и 6 (второй режим) итерационных циклов.

На рисунках 1-2 представлены экспериментальные и расчетные значения плотностей полных, лучистых и конвективных потоков тепла к водоохлаждаемому своду, профили температуры и динамического напора на расстоянии $x = 0,87$ м от входа для двух режимов течения и теплообмена. Результаты расчетов в пределах погрешности измерений согласуются с экспериментальными данными.

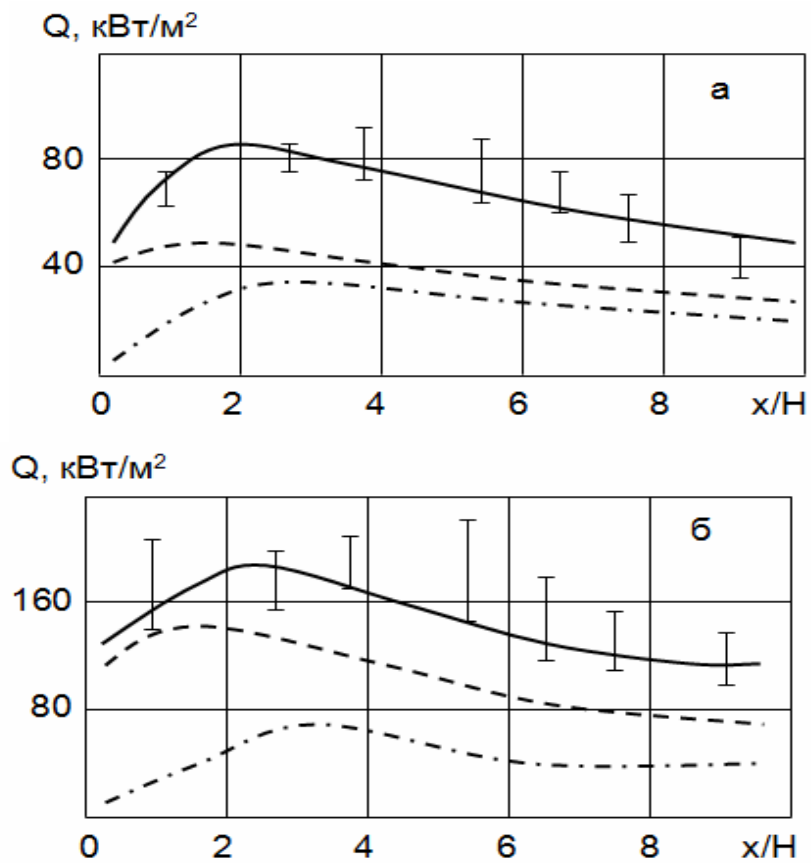


Рис.1. Распределения плотностей тепловых потоков по длине охлаждаемой поверхности (сплошная – суммарная, пунктирная – лучистая, штрихпунктирная – конвективная составляющие); а – первый, б – второй режим. —|— — разброс экспериментальных данных

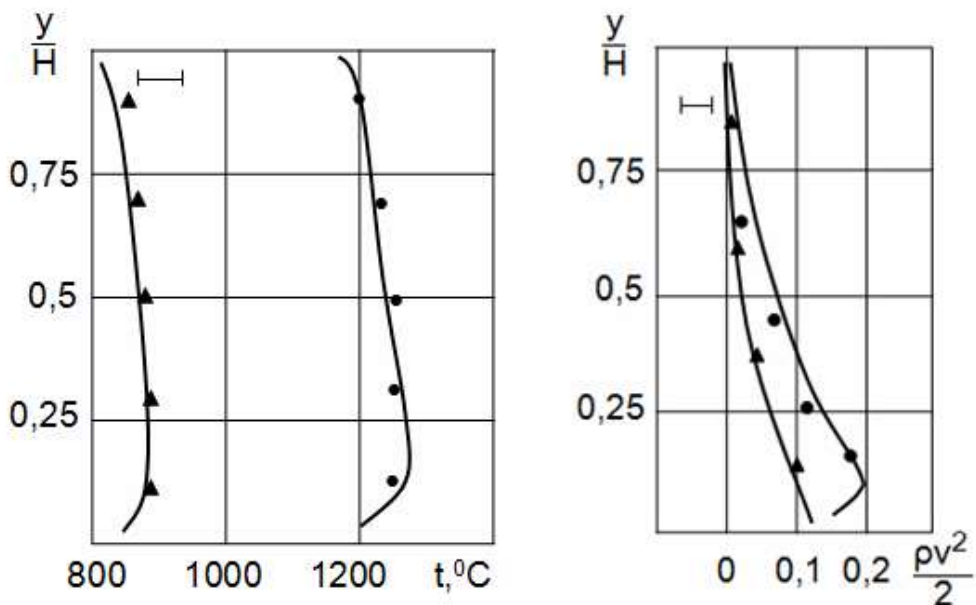


Рис.2. Профиль температуры и динамического напора по высоте канала. ▲, ● – первый и второй режимы (эксперимент)

Список использованных источников

1. Абдуллин А.М., Вафин Д.Б. Численное моделирование локального теплообмена в топках трубчатых печей на основе дифференциальных приближений для лучистого переноса тепла // Инж.-физический журн. 1991. Т. 60. № 2. С. 291-297.
2. Вафин Д.Б., Абдуллин А.М. Анализ эффективности работы технологических трубчатых печей при разных режимах сжигания топлива // Известия вузов: Проблемы энергетики. Казань. 2009. № 3-4. С. 54-58.
3. Белов И.А., Кудрявцев Н.А. Теплоотдача и сопротивление пакетов труб. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. 223 с.
4. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
5. Щербинин В.И., Шлеймович Б.М. Экспериментальное исследование сложного теплообмена и гидродинамики при отрывном течении излучающего газа в плоском канале // Совершенствование тепловой работы и конструкций металлургических агрегатов: Сборник научных трудов ВНИИМТ. М., 1982. С. 74-77.
6. Абдуллин А.М. Анализ спектра излучения продуктов сгорания газообразного топлива // Вестник КТУ. Казань. 2013. № 12. С. 67-70.