РАЗДЕЛ VIII. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Абдуллин А.М.

Влияние модели излучения и численной диффузии на расчетные характеристики сложного теплообмена в пламенных печах нефтехимической промышленности*Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) КНИТУ
(Россия, Нижнекамск)*

doi: 10.18411/trnio-12-2021-143

Аннотация

Анализируется влияние численной диффузии и модели излучения на тепловые потоки и температуру продуктов сгорания в радиантных камерах трубчатых печей нефтехимической промышленности. Метод основан на численном решении интегро-дифференциальных уравнений радиационной газовой динамики и модели турбулентности. Показано, что расчет сложного теплообмена в камерах сгорания пламенных технологических печей с достаточной для практики точностью можно выполнять в S_2 –приближении метода дискретных ординат с использованием неравномерной адаптированной конечно-разностной сетки с приемлемым количеством узловых точек.

Ключевые слова: конечно-разностная сетка, градиент температуры, радиантная камера, лучистый поток, конвективный поток.

Abstract

The influence of radiation model and numerical diffusion on heat fluxes and temperature of combustion products in radiant chambers of tubular furnaces of the petrochemical industry is analyzed. The method is based on the numerical solution of integro-differential equations of radiation gas dynamics and a turbulence model. It is shown that the calculation of complex heat transfer in combustion chambers of flame technological furnaces with sufficient accuracy for practice can be performed in S_2 - approximation of the method of discrete ordinates using an irregular adapted finite-difference mesh with an acceptable number of nodal points.

Keywords: finite difference mesh, temperature gradient, radiant chamber, radiant flux, convective flux.

При численном интегрировании дифференциальных уравнений, описывающих теплообмен и газовую динамику в камерах сгорания технологических печей [1], всегда возникает погрешность, обусловленная приближенным характером процедуры решения этой задачи. Конвективные члены в обобщенном уравнении переноса (1) аппроксимируются конечными разностями первого порядка малости, при этом появляется остаточный член, пропорциональный второй производной от искомой величины.

$$\rho u \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \Phi}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right] + S_{\Phi}. \quad (1)$$

Здесь ρ, u, v – плотность и составляющие вектора скорости продуктов сгорания топлива; Γ_{Φ} – обобщенный коэффициент диффузионного переноса; S_{Φ} – источниковый член; Φ – обобщенная переменная.

Таким образом, к истинной диффузии искомой величины добавляется так называемая численная диффузия. Существует много способов уменьшения численной диффузии, среди которых наиболее известны применение криволинейной адаптированной к полю течения конечно-разностной сетки, применение разностных схем более высокого порядка. Считается также, что при сгущении конечно-разностной сетки численная диффузия уменьшается и в пределе стремится к нулю.

Рисунок 1. Система координат и неравномерные конечно-разностные сетки с количеством узловых точек 11x17 и 11x27

Рисунок 2. Влияние численной диффузии и модели излучения на расчетные плотности лучистых (1) и конвективных (2) потоков к поверхности нагрева. Обозначения:

Сетка 11x17

Сетка 11x27

Расчет в S4 – приближения

Рисунок 3. Влияние численной диффузии на профиль температуры продуктов сгорания в радиантной камере.

Обозначения:

— сетка 11x17

--- сетка 11x27

- · - · - · профиль температуры поверхности нагрева

Для оценки влияния численной диффузии выполнены расчеты радиационно-конвективного теплообмена и поля течения продуктов сгорания на двух неравномерных конечно-разностных сетках с количеством узловых точек 11×17 и 11×27 (рис.1).

Рассмотрена радиантная секция трубчатой печи со сводовым режимом сжигания газообразного топлива [2]. Излучение продуктов сгорания и ограничивающих поверхностей моделировалось в S_n -приближении метода дискретных ординат [3], учитывалась зависимость теплофизических свойств продуктов сгорания от температуры.

При построении неравномерной конечно-разностной сетки использовалась эмпирическая информация об особенностях пространственного распределения характеристик теплообмена и поля течения продуктов сгорания. Вблизи твердых границ, на начальном участке течения и в зоне факела, где имеют место большие градиенты температуры, скорости и других характеристик, соответствующие им уравнения аппроксимировались на конечно-разностной сетке с более плотным расположением узловых точек.

Конвективные потоки и касательное напряжение τ_w на твердой поверхности вычислялись по методу «пристеночных» функций:

$$\tau_w = \frac{\chi C_\mu^{0,25} k_1 v_1}{\ln(E x_p^+)} \quad (2)$$

Здесь постоянная Кармана $\chi = 0,41$; эмпирические коэффициенты $E = 8,8$; $C_\mu = 0,09$.

Продольная скорость v_1 и кинетическая энергия турбулентных пульсаций k_1 в первой от стенки узловой точке определяются путем решения соответствующих уравнений газовой динамики и (k-ε) модели турбулентности.

Для реализации данного метода необходимо, чтобы безразмерное расстояние x_p^+ между стенкой и отстоящей от нее первой узловой точкой удовлетворяло условию $x_p^+ > 12$. Предварительное вычисление x_p^+ невозможно, поэтому для удовлетворения вышеуказанному условию применялся метод пробных расчетов. Установлено, что для характерных топкам

трубчатых печей условий первая от стенки узловая точка должна располагаться на расстоянии $x_p = 4 - 8$ см.

На рисунках 2 и 3 представлены расчетные распределения плотностей лучистых, конвективных потоков тепла к поверхности нагрева и профиль температуры продуктов сгорания по высоте камеры радиации, определенные в S_2 -приближении метода дискретных ординат на неравномерных конечно-разностных сетках 11×17 и 11×27 . Следует отметить, что использование более подробной сетки 11×27 не вносит существенную поправку в результаты расчета. Расхождение по интегральному тепловосприятию поверхностью нагрева составляет 1,6%, в распределении температуры продуктов сгорания не превышает 12°C . В большей степени сгущение конечно-разностной сетки влияет на тепловые потоки конвекцией к поверхности нагрева, для которых отличие составляет 9,8%. Доля конвекции в тепловом балансе радиантной камеры невелика, поэтому погрешность в расчетах конвективной составляющей не оказывает существенного влияния на точность суммарных (излучение плюс конвекция) тепловых потоков.

На рисунке 3 представлено также распределение плотности лучистых потоков тепла, определенное в S_4 -приближении метода дискретных ординат на конечно-разностной сетке 11×17 . Модель излучения оказывает большее влияние на точность результатов по сравнению с численной диффузией. Расхождение значений плотности лучистых потоков по сравнению с S_2 -приближением составляет 8%.

Применение в расчетах S_n -приближения более высоких порядков в сочетании со спектральной моделью излучения продуктов сгорания и ограждающих поверхностей не представляется возможным. Например, при выполнении расчетов в S_4 -приближении в сочетании с шестиполосной моделью спектра излучения для определения дивергенции лучистых потоков необходимо решить систему из 72 нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка, что неприемлемо с точки зрения вычислительной экономичности метода. Использование более подробной сетки также приводит к резкому увеличению времени решения задачи. Отклонения результатов расчета, обусловленные численной диффузией и приближенным характером модели излучения, находятся в пределах погрешности метода. Поэтому расчет сложного теплообмена в камерах сгорания пламенных технологических печей с достаточной для практики точностью можно выполнять в S_2 -приближении с использованием неравномерной адаптированной конечно-разностной сетки с приемлемым количеством узловых точек.

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. Абдуллин А.М. Численный метод определения температуры излучающей стенки в трубчатых печах // Известия вузов: Проблемы энергетики. Казань: КГЭУ, 2011, №11 –12. С.30-39.
3. Абдуллин А. М. Расчет лучистого теплообмена в трубчатой печи методом дискретных ординат // Бюллетень науки и практики. 2018. Т. 4. №10. С. 13-17. Режим доступа: <http://www.bulletennauki.com/abdullin-a> (дата обращения 15.10.2018). DOI:10.5281/zenodo.1461827.

Аносов М.С., Шатагин Д.А., Мансуров Р.Ш., Ключкова Н.С.

Исследование особенностей деформации и разрушения стали 07X25H13, полученной путем аддитивного электродугового выращивания с регистрацией сигнала акустической эмиссии

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
(Россия, Нижний Новгород)*

doi: 10.18411/trnio-12-2021-144

Аннотация

Исследованы особенности деформации и разрушения стали 07X25H13, полученной с использованием аддитивного электродугового выращивания на основе регистрации сигнала