

# РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПЕЧИ с использованием разных методов решения уравнения переноса излучения

А.В. САДЫКОВ

Нижекамский химико-технологический институт (филиал)  
Казанского национального исследовательского технологического университета,  
г. Нижнекамск

*Приведены результаты анализа влияния методов решения уравнения переноса излучения на расчетные тепловые характеристики цилиндрических печей. Процессы, протекающие в топке, моделируются двумерными уравнениями энергии, переноса излучения, движения,  $k$ - $\epsilon$  модели турбулентности и модели горения природного газа. Для решения уравнения переноса излучения использованы метод сферических гармоник и метод дискретных ординат. Приведено сравнение расчетных значений температуры топочных газов с экспериментальными данными.*

**Ключевые слова:** *трубчатая печь, теплообмен, излучение, горение, турбулентность.*

Распространенными методами решения уравнения переноса излучения (УПИ) являются метод дискретных ординат (МДО) и метод сферических гармоник (МСГ). При практической реализации удобны низшие приближения этих методов. Поэтому нужно знать пределы их применимости в тепловых расчетах трубчатых печей. С целью ответа на этот вопрос выполнены расчеты тепловых характеристик технологической трубчатой печи цилиндрического типа с применением различных приближений указанных методов. Упрощенная схема топочной камеры технологической печи типа ВА-301 показана на рис. 1. По периметру камеры радиации печи установлен однорядный трубчатый экран. В поду печи расположены восемь одинаковых горелок диффузионного горения. Такие печи применяются на нефтеперерабатывающих заводах для нагрева сырья реактора.

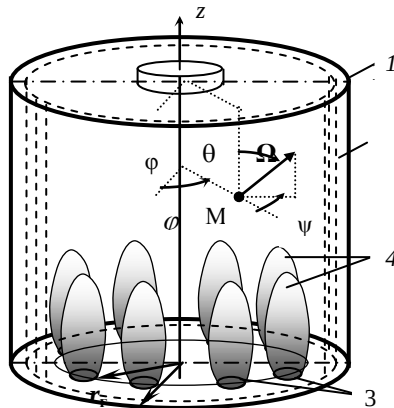


Рис. 1. Упрощенная схема топочной камеры и система координат: 1 – футеровка; 2 – трубчатый экран; 3 – горелки; 4 – факел

Симметричное расположение горелок, наличие осевой симметрии позволяют рассматривать задачу в двухмерной постановке. Трубчатый экран печи заменяется сплошной непрозрачной для излучения поверхностью, а отдельно расположенные горелки заменяются кольцевой щелью, ширина которой рассчитывается из условия равенства площади щели и суммарной площади выходных амбразур 8 проектных горелок.

Математическая модель задачи содержит стационарные уравнения энергии, движения, неразрывности, модели турбулентности, модели горения, УПИ.

Поле температур находится решением уравнения энергии:

$$c_p \rho u \frac{\partial T}{\partial z} + c_p \rho v \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ (\lambda + \lambda_T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ (\lambda + \lambda_T) r \frac{\partial T}{\partial r} \right] + Q_V - \text{div} \vec{q}_p. \quad (1)$$

Здесь  $u$ ,  $v$  – компоненты вектора скорости по осям  $z$ ,  $r$  соответственно;  $\rho$  – плотность продуктов сгорания;  $c_p$  – изобарная теплоемкость;  $\lambda$ ,  $\lambda_T$  – коэффициенты молекулярной и турбулентной теплопроводности;  $T(r)$  – температура в точке  $M$  с координатами  $z$ ,  $r$ ;  $Q_V$  – объемная плотность тепловыделения в результате горения топлива;  $\vec{q}_p$  – вектор плотности интегрального по спектру лучистого потока тепла. Дивергенция лучистых потоков находится путем решения УПИ:

$$\begin{aligned} & \sin \theta \left[ \cos \psi \frac{\partial I_\lambda(\vec{M}, \vec{\Omega})}{\partial r} - \frac{\sin \psi}{r} \frac{\partial I_\lambda(\vec{M}, \vec{\Omega})}{\partial \psi} \right] + \cos \theta \frac{\partial I_\lambda(\vec{M}, \vec{\Omega})}{\partial z} + \\ & + k_\lambda I_\lambda(\vec{M}, \vec{\Omega}) = \frac{k_{p\lambda}}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\psi' \int_0^\pi I_\lambda(\vec{M}, \vec{\Omega}') g(\mu) \sin \theta' d\theta' + k_{п\lambda} I_{b\lambda}(T). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $\vec{\Omega}$  – направление луча с угловыми координатами  $\theta$  и  $\psi$  (рис.1);  $k_\lambda = k_{п\lambda} + k_{р\lambda}$ ,  $k_{п\lambda}$ ,  $k_{р\lambda}$  – спектральные коэффициенты ослабления, поглощения, рассеяния соответственно;  $I_{b\lambda}(T)$  – функция Планка;  $I_\lambda(\vec{M}, \vec{\Omega})$  – спектральная интенсивность излучения;  $g(\mu)$  – индикатриса рассеяния.

Поле скоростей находится путем решения уравнений движения и неразрывности совместно с уравнением состояния. Состояние дымовых газов рассматривается в приближении идеального газа. Для замыкания уравнений движения используется  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности. Горение рассматривается в рамках модели простой одноступенчатой экзотермической реакции. Скорость химической реакции определяется моделью вихревой диссипации. Более подробная математическая модель приведена в работе [1].

Для уравнения энергии, уравнений модели турбулентности, модели горения на входном участке ставится граничное условие 1 рода. На оси топочной камеры ( $0z$ ) задается условие симметрии. Для уравнений движения на твердой границе ставятся условия прилипания и непроницаемости. На твердой границе диффузионный поток кинетической энергии турбулентности полагается равным нулю. На жесткой стенке для уравнений модели горения задается условие отсутствия потока. Для уравнения энергии на жесткой стенке ставятся граничные условия 3 рода. На выходе из топки для параметров задается условие нулевого градиента.

Граничные условия для интенсивности излучения  $I_\lambda(\vec{M}, \vec{\Omega})$  на тепловоспринимающей поверхности, на футеровке свода и пода ставятся с учетом диффузного излучения и отражения. На оси симметрии ставится условие симметрии решения относительно оси  $z$ .

Для решения задачи радиационно-конвективного теплообмена, так же как в [1], применен дифференциальный метод. Решение задачи проводится по итерационной схеме. В каждой итерации последовательно решаются газодинамическая и тепловая задачи. При этом учитывается переменность теплофизических свойств продуктов сгорания. При получении дискретных аналогов уравнений сохранения использован метод контрольных объемов в сочетании с методом конечных разностей.

При использовании МДО УПИ (2) заменяется системой дифференциальных уравнений относительно интенсивности излучения вдоль ограниченного количества выделенных направлений  $\bar{S}_m$   $\{m = 1, 2, \dots, N_0\}$  [2]. Эти направления задаются угловыми координатами  $\{\mu_m, \xi_m; m = 1, 2, \dots, N_0\}$ , равными величине проекции единичного вектора направления  $\bar{S}_m$  на оси координат. Исходя из числа выделенных направлений, различают  $S_2$  – приближение ( $N_0 = 4$ ),  $S_4$  – приближение ( $N_0 = 12$ ) и другие. В результате УПИ заменяется системой дифференциальных уравнений относительно интенсивности излучения  $I_m$  вдоль каждого из этих направлений.

В МСГ решение УПИ ищется в виде разложения спектральной интенсивности излучения в ряд по сферическим функциям [3]. В  $P_1$ -приближении ограничиваются двумя членами разложения. Из системы трех дифференциальных уравнений  $P_1$ -приближения МСГ для первых трех моментов сферических функций можно получить уравнение диффузионного типа для нулевого момента  $\phi_{00}$ :

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial \phi_{00}}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r D \frac{\partial \phi_{00}}{\partial r} \right) - k_{\text{пл}} \phi_{00} = -k_{\text{пл}} I_{b\lambda}(T),$$

где  $D = 1/(3(k_\lambda - g_1 k_{\text{пл}}))$  – коэффициент радиационной диффузии;  $g_1$  – первый коэффициент разложения индикатрисы рассеяния по полиномам Лежандра. Это уравнение решается методом конечных разностей.

Вопросы практической реализации МДО подробно рассмотрены в работе [4]. Вопросы реализации  $P_1$  – приближения МСГ, а также совместного решения с уравнением энергии рассмотрены в [5].

В топочной камере в основном излучают и поглощают лучистую энергию  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и частицы сажи. Интегральный по спектру коэффициент поглощения газообразных продуктов сгорания вычисляется с использованием модели взвешенной суммы серых газов [6]. В работе [7] отмечается, что эффективный коэффициент поглощения, вычисленный по МВССГ с использованием данных [6], хорошо согласуется с результатами более точного спектрального расчета по модели широкой полосы. Эффективная степень черноты поверхности нагрева, определенная по предложенной в [8] методике, равна 0,65. В качестве окислителя используется воздух, а в качестве топлива – природный газ, 98% которого составляет метан. Массовый расход горючей смеси равен 4,797 кг/с.

Численные исследования проведены с использованием  $S_2$ ,  $S_4$ -приближений МДО, а также  $P_1$ -приближения МСГ. На рис. 2 показаны распределения плотностей лучистых тепловых потоков  $q_p$  к поверхности нагрева, полученные с помощью МСГ и МДО ( $S_2$ ,  $S_4$ -приближения). Определенные отличия значений  $q_p$  наблюдаются только на начальном участке в области факела. Распределения температур топочных газов на оси топки, полученные в разных приближениях, почти одинаковы (рис. 3). При этом  $S$ -приближение дает чуть завышенные значения по сравнению с  $S_4$ -приближением.

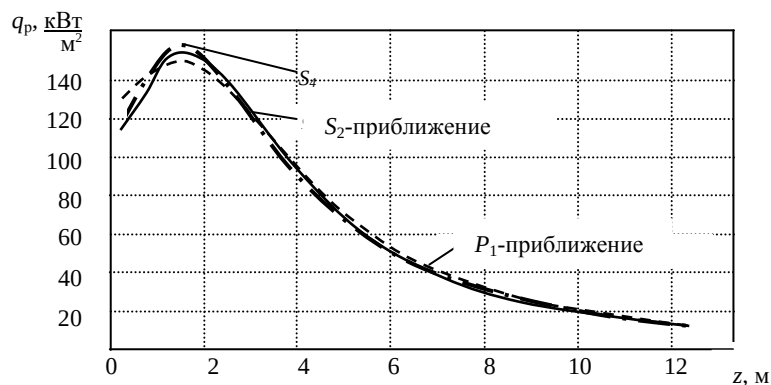


Рис. 2. Распределения поверхностных плотностей лучистых тепловых потоков вдоль трубчатого экрана, полученные в разных приближениях

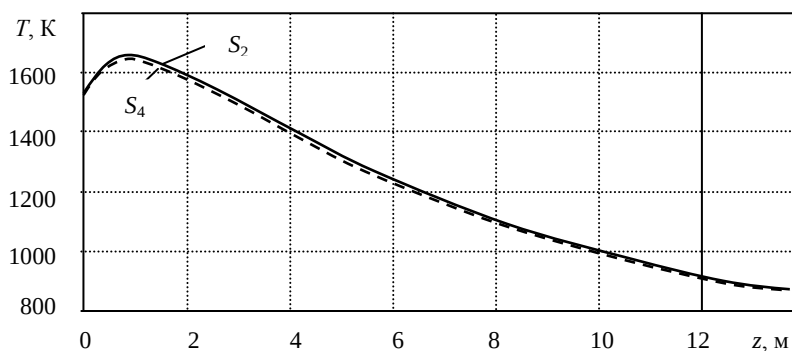


Рис. 3. Распределения температур топочных газов на оси топки

На рис. 4 показаны распределения температур топочных газов вблизи поверхности нагрева, полученные с использованием  $S_2$  – приближения МДО и  $P_1$ -приближения МСГ. На этом рис. приведены также экспериментальные данные (показания датчиков), полученные с НПЗ ОАО «ТАИФ-НК». Полученные расчетные значения температур удовлетворительно согласуются с имеющимися экспериментальными данными. При использовании  $P_1$ -приближения относительная погрешность составляет 2%, а при использовании  $S_2$ -приближения – 3,3%.

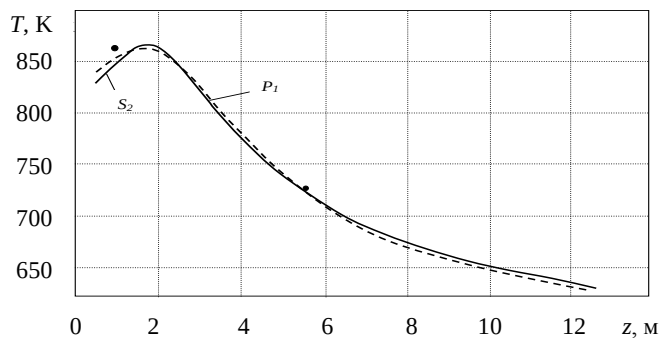


Рис. 4. Температура вблизи поверхности нагрева: ● – экспериментальные данные

Таким образом, поверхностные плотности лучистых тепловых потоков к поверхности нагрева и поля температур, полученные с использованием  $P_1$ -приближения МСТ и  $S_2$ -приближения МДО незначительно отличаются от аналогичных значений, полученных в  $S_4$ -приближении. При этом расчетные значения температур топочных газов вблизи поверхности нагрева удовлетворительно согласуются с имеющимися экспериментальными данными. Поэтому можно сделать вывод, что низшие приближения рассмотренных методов можно использовать при расчетах сложного теплообмена в цилиндрических топках рассмотренного типа.

### Summary

*Results of the analysis of influence of methods for solving the equation of transferring of radiation on calculation thermal characteristics of cylindrical furnaces are given. The processes proceeding in a fire chamber are modelled by the two-dimensional equations of energy, transfer of radiation, the movement,  $k$ - $\varepsilon$  model of turbulence and model of burning of natural gas. For the solution of the equation of transfer of radiation the method of spherical harmonics and a method of discrete ordinates are used. Comparison of calculated values of temperature of furnace gases with experimental data is given.*

**Keywords:** *tubular furnace, heat exchange, radiation, burning, turbulence.*

### Литература

1. Садыков А.В., Валеев И.М., Вафин Д.Б. Влияние расположения горелок на тепловые характеристики цилиндрических трубчатых печей // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2011. №11-12. С. 46–52.
2. Чандрасекар С. Перенос лучистой энергии. М.: ИЛ, 1953. 431 с.
3. Марчук Г.И., Лебедев В.И. Численные методы в теории переноса нейтронов. М.: Атомиздат, 1981. 436 с.
4. Садыков А.В. К расчету лучистых тепловых потоков в прямоугольных областях методом дискретных ординат // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2016. №3–4. С.14–22.
5. Садыков А.В. Разработка численного метода расчета топочных камер трубчатых печей: дис... канд. техн. наук. Казань: КХТИ, 1989. 169 с.
6. Smith T. F., Shen Z.F., Friedman J.N. Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model // J. Heat Transfer. 1982. №104. P. 602–608.
7. Lallemant N., Sayre A., Weber R. // Progr. Energy Combust. Sci. 1996. Vol.22. Pp.543-574.
8. Гориславец С.П., Тменов Д.Н., Майоров В.И. Пиролиз углеводородного сырья. Киев: Наукова думка, 1977. 305 с.

*Поступила в редакцию*

*13 сентября 2016 г.*

**Садыков Айдар Вагизович** – канд. техн. наук, доцент, декан факультета управления и автоматизации Нижнекамского химико-технологического института (НХТИ) филиала «КНИТУ». Тел.: 8(8555)39-23-14; 8(917)862-41-62. E-mail: sadykov\_av@mail.ru; sadykov@land.ru.