

УДК 536.3.535.34

https://doi.org/10.33619/2414-2948/55/05

ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАСЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ПЛАМЕННЫХ ПЕЧАХ НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

©*Абдуллин А. М.*, ORCID: 0000-0003-1223-0535, канд. техн. наук,
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
г. Нижнекамск, Россия, amabdullin@mail.ru

INFLUENCE OF THE SPECTRAL MODEL OF RADIATION ON THE CALCULATED CHARACTERISTICS OF COMPLEX HEAT EXCHANGE IN FLAME FURNACES OF THE PETROCHEMICAL INDUSTRY

©*Abdullin A.*, ORCID: 0000-0003-1223-0535, Ph.D., Kazan National Research Technological University, Nizhnekamsk, Russia, amabdullin@mail.ru

Аннотация. Анализируется влияние спектральной модели излучения на тепловые потоки и температуру продуктов сгорания в радиантных камерах трубчатых печей нефтехимической промышленности. Рассматриваются модель широкой полосы и серая модель Хоттеля. Показано, что спектральная модель излучения топочной среды слабо влияет на расчетные характеристики суммарной теплопередачи.

Abstract. The influence of the spectral model of radiation on heat fluxes and the temperature of combustion products in the radiant chambers of tube furnaces of the petrochemical industry is analyzed. A wide-band model and a Hottel gray model are considered. It is shown that the spectral model of the combustion medium radiation weakly affects the calculated characteristics of the total heat transfer.

Ключевые слова: интенсивность излучения, лучистый поток, степень черноты, спектр, конвективный поток.

Keywords: radiation intensity, radiant flux, degree of blackness, spectrum, convective flux.

В тепловом балансе радиантных камер трубчатых печей определяющая роль принадлежит лучистому теплообмену, доля которого может быть на порядок больше по сравнению с другими механизмами теплопередачи. Точность расчета лучистого теплообмена в значительной мере определяется корректностью модели спектра излучения компонентов, заполняющих камеру сгорания. К ним относятся, в первую очередь, пары воды H_2O и двуокись углерода CO_2 , а также частицы сажи, образующиеся в результате неполного сгорания топлива. Излучение паров воды и двуокиси углерода происходит в определенных интервалах спектра, излучение частиц сажи и стенок камеры характеризуется сплошным спектром. Одним из наиболее удобных методов учета селективности излучения является модель широкой полосы, параметры которой приведены, например, в работе [1].

В данной работе излагаются результаты сравнительного анализа применимости спектральных моделей широкой полосы и «серой» модели Хоттеля для теплового расчета радиантных камер трубчатых печей. За исходную принимается ступенчатая модель,

учитывающая полосы 15; 4,3; 2,7 мкм излучения двуокиси углерода и 10; 6,3; 2,7; 1,5 мкм излучения водяного пара.

Лучистый теплообмен описывается системой двумерных дифференциальных уравнений P_1 -приближения метода сферических гармоник:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\lambda_i} \frac{\partial \varphi_{\lambda_i}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{\lambda_i} \frac{\partial \varphi_{\lambda_i}}{\partial y} \right) - \alpha_{\lambda_i} \varphi_{\lambda_i} = -4\pi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \alpha_{\lambda_i} I_{\lambda b}(T, \lambda_i) d\lambda_i ; \quad (1)$$

$$\vec{q}_{\lambda_i} = -D_{\lambda_i} \vec{\nabla} \varphi_{\lambda_i}. \quad (2)$$

Условия однозначности на ограничивающих поверхностях с учетом диффузного отражения и излучения имеет вид:

$$\frac{d\varphi_{\lambda_i}}{dn} = \frac{1}{2D_{\lambda_i}(1+r)} \left(4\pi\varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{\lambda b}(T, \lambda_i) d\lambda_i - (1-r)\varphi_{\lambda_i} \right) \quad (3)$$

Здесь \vec{q}_{λ_i} — вектор плотности потока излучения в i -той спектральной полосе; D_{λ_i} , α_{λ_i} — коэффициенты диффузии излучения и поглощения в i -той спектральной полосе; $I_{\lambda b}$ — функция Планка; ε , r — степень черноты и отражательная способность поверхности.

Распределение температуры в расчетной области определяется путем решения уравнения энергии:

$$\rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho c_p v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[(\lambda + \lambda_T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\lambda + \lambda_T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + Q - \text{div} \sum_{i=1}^{N_S} \vec{q}_{\lambda_i} \quad (4)$$

В качестве краевых условий на поверхности нагрева и входном сечении задается температура, на выходном сечении используется свойство «односторонних» координат [2]. Температура футеровки определяется из уравнения теплового баланса, составленного с учетом тепловых потерь через нее:

$$\frac{\lambda_{\phi}}{d} (T_w - T_0) = q_k + \sum_{i=1}^{N_S} \vec{q}_{\lambda_i}. \quad (5)$$

Конвективный поток тепла к стенке q_k вычисляется по методу пристеночных функций [3]. В уравнениях (4) и (5) ρ , c_p , u , v — плотность, изобарная теплоемкость и составляющие вектора скорости продуктов сгорания; λ , λ_T — коэффициенты молекулярной и турбулентной диффузии тепла; Q — объемная плотность тепловыделения в результате горения топлива; N_S — количество излучающих полос в спектральной модели; λ_{ϕ} , d — коэффициент теплопроводности и толщина футеровки, T_w , T_0 — температура внутренней и внешней поверхности футеровки.

Конечно-разностная аппроксимация уравнений (1)–(3) производится методом конечных элементов, а уравнения (4) методом интегрирования по контрольному объему [2].

Полученная в результате система алгебраических уравнений относительно узловых значений искомых величин решается методом трехдиагонального матричного алгоритма (ТДМА). Проведенные расчеты показывают, что используемая в данной работе явная схема совместного интегрирования системы уравнений (1)–(5) при тепловых нагрузках, характерных для высокотемпературных камер сгорания, является неустойчивой. Для

подавления этой неустойчивости к дивергенции лучистых потоков тепла применяется нижняя релаксация с параметром $\sigma = 0,2$.

Анализ проводился на примере прямоугольной радиантной камеры трубчатой печи конверсии углеводородов БПК-15. Топливо (природный газ) подается в камеру через горелки, расположенные на своде в одном ряду симметрично относительно поверхности нагрева, продукты сгорания отводятся через тоннель, расположенный на полу камеры. Наличие осевой симметрии позволяет рассматривать только одну половину радиантной камеры. Полагалось, что поверхности футеровки и нагрева диффузно излучающие и отражающие со степенями черноты 0,6 и 0,87 соответственно. Для получения замкнутой системы уравнений в расчетах входное и выходное сечения заменяются полностью отражающими поверхностями. Поля скоростей и коэффициентов турбулентного обмена определяются из решения уравнений газовой динамики и (k-ε) — модели турбулентности [4].

В модели спектра интервалы, где происходит перекрытие полос излучения водяного пара и двуокиси углерода, выделялись как отдельные полосы с суммарным коэффициентом поглощения:

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_w P_w + \alpha_c P_c, \quad (6)$$

где α_w , α_c — коэффициенты поглощения водяного пара и двуокиси углерода в данном интервале спектра, соответственно, P_w , P_c — парциальные давления каждой из компонент. Учитывалось перекрытие спектральных полос 2,7 мкм; 10 и 15 мкм.

Спектральный коэффициент поглощения частиц сажи вычислялся по формуле [5]:

$$\alpha_{\lambda,s} = \frac{3\pi\Phi(\lambda)}{2\lambda} f_V \quad (7)$$

где функция $\Phi(\lambda)$, описывающая дисперсию оптических констант сажи, по данным работы [6] в интервале спектра до 10 мкм может быть описана зависимостью:

$$\Phi(\lambda) = \frac{1,75}{1 + 0,3\lambda} \quad (8)$$

Так называемая объемная фракция сажи определялась по эмпирической формуле [7]:

$$f_V = 0,068(2 - \alpha_T) \frac{C_p}{H_p}. \quad (9)$$

Здесь α_T — коэффициент избытка воздуха; C_p/H_p — относительный вес углерода в топливном газе.

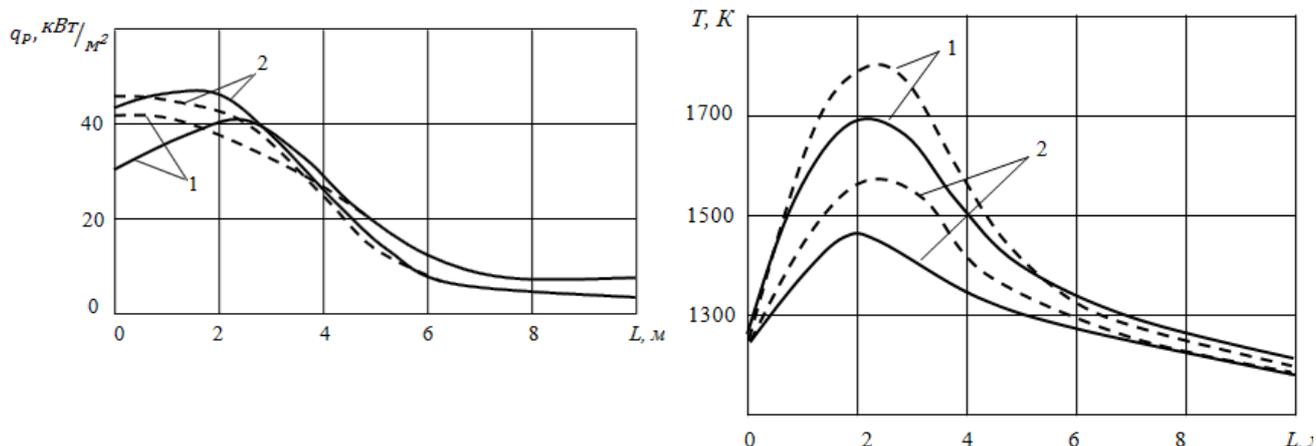
Для вычисления интегральной степени черноты топочной среды использовалась модель Хоттеля набором четырех серых газов [6]:

$$\varepsilon = \sum_{n=0}^3 a_n(T) \{1 - \exp[-(\alpha_n P_{\Sigma} + \alpha_S) l_{\text{эф}}]\} \quad (10)$$

где $l_{\text{эф}}$ — эффективная толщина топочной среды, P_{Σ} (атм.) — суммарное давление водяного пара и двуокиси углерода, интегральный коэффициент поглощения частиц сажи определяется по зависимости [6]:

$$\alpha_S = 0,03(0,016T - 0,5)(2 - \alpha_T) \frac{C_p}{H_p}. \quad (11)$$

На Рисунках 1–2 приведены расчетное распределение плотности интегральных по спектру лучистых потоков тепла к поверхности нагрева по длине труб и профиль температуры на оси потока по высоте радиантной камеры, определенные с использованием спектральных моделей широкой полосы и Хоттеля. Наибольшее отличие в распределениях лучистых потоков, рассчитанных по модели Хоттеля и полосовой модели без учета влияния сажи, имеет место на начальном участке течения, что можно объяснить существенной неизотермичностью потока, а также наличием «окон» прозрачности в полосовой модели. Ниже по течению, где поперечный градиент температуры становится незначительным, расчет по модели Хоттеля хорошо согласуется с результатами расчета по полосовой модели. Учет излучения частиц сажи приводит к увеличению лучистых потоков тепла и соответственно уменьшению максимальной температуры газов в топке и ее поперечного градиента. В этом случае распределение лучистых потоков, определенное по модели Хоттеля, удовлетворительно согласуется с результатами расчетов, сделанными по модели широкой полосы с учетом трех «окон» прозрачности, в которых лучистая теплопередача происходит в основном за счет излучения частиц сажи.



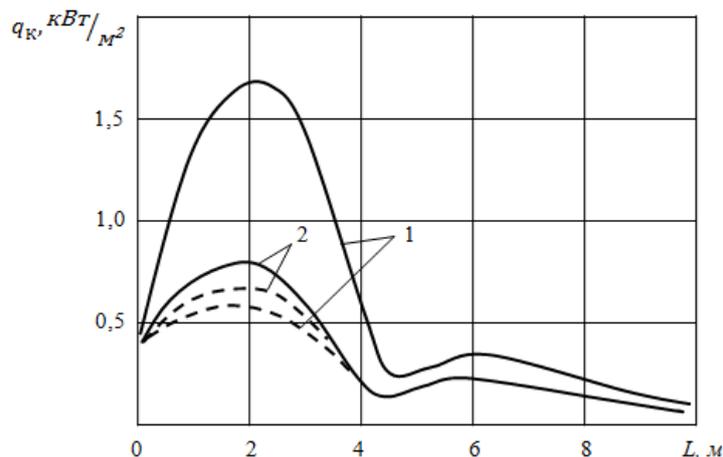
1 — расчет без учета, 2 — с учетом излучения сажи, сплошная линия — модель широкой полосы, пунктиром — серая модель Хоттеля.

Рисунок 1. Распределение плотности лучистых потоков тепла к поверхности нагрева по длине труб.

Рисунок 2. Профиль температуры продуктов сгорания по высоте радиальной камеры.

Наибольшее влияние спектральная модель излучения оказывает на профиль температуры дымовых газов в объеме радиантной камеры. В то же время это влияние на температуру газов, покидающих топку, незначительно. Наличие частиц сажи в составе продуктов сгорания снижает температуру газов на выходе из топки на 16%.

Учет излучения сажи приводит к уменьшению расчетных значений конвективных потоков тепла (Рисунок 3). Сплошной спектр излучения интенсифицирует теплообмен между стенкой и средой, вследствие чего градиент температуры вблизи стенки уменьшается. Расчеты также показывают, что в месте присоединения рециркуляционного и основного течений коэффициент конвективной теплоотдачи α_K имеет минимум. Ниже по течению вблизи выходного сечения α_K увеличивается, что вызвано сужением основного потока и его ускорением.



1 — расчет без учета, 2 — с учетом излучения сажи,
сплошная линия — модель широкой полосы, пунктиром — серая модель Хоттеля.

Рисунок 3. Распределение плотности конвективных потоков тепла к поверхности нагрева по длине труб.

Анализ суммарной теплопередачи показывает, что интегральное тепловосприятие поверхностью нагрева, рассчитанное по модели Хоттеля, на 13% выше по сравнению с рассчитанным по модели широкой полосы. Этому соответствует снижение температуры дымовых газов на выходе из топки, что качественно согласуется и с данными других авторов [7]. Вместе с тем следует заметить, что спектральная модель излучения топочной среды слабо влияет на расчетные характеристики суммарной теплопередачи в радиантной камере рассмотренной трубчатой печи.

Список литературы:

1. Абдуллин А. М. Анализ спектра излучения продуктов сгорания газообразного топлива // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. №12. С. 67-70.
2. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
3. Белов И. А., Кудрявцев Н. А. Теплоотдача и сопротивление пакетов труб. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 223 с.
4. Абдуллин А. М. Численный метод определения температуры излучающей стенки в трубчатых печах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2011. №11-12. С. 30-39.
5. Hubbard G. L., Tien C. L. Infrared mean absorption coefficients of luminous flames and smoke. 1978. <https://doi.org/10.1115/1.3450788>
6. Руководящий технический материал 26-02-40-77. Нормативная методика теплового расчета трубчатых печей. Введена 01.01.78. 360 с.
7. Блох А. Г. Теплообмен в топках паровых котлов. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.

References:

1. Abdullin, A. M. (2013). Analiz spektra izlucheniya produktov sgoraniya gazoobraznogo topliva. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 16(12), 67-70. (in Russian).
2. Patankar, S. (1984). *Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti*. Moscow, Energoatomizdat, 152. (in Russian).

3. Belov, I. A., & Kudryavtsev, N. A. (1987). Teplootdacha i soprotivlenie paketov trub. Leningrad, Energoatomizdat, 223. (in Russian).

4. Abdullin, A.M. (2011). Numerical method for determining the temperature of radiating wall in tube furnaces. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*, (11-12), 30-39. (in Russian).

5. Hubbard, G. L., & Tien, C. L. (1978). Infrared mean absorption coefficients of luminous flames and smoke. (in Russian). <https://doi.org/10.1115/1.3450788>

6. Rukovodyashchii tekhnicheskii material 26-02-40-77. Normativnaya metodika teplovogo rascheta trubchatykh pechei. Vvedena 01.01.78. (in Russian).

7. Blokh, A. G. (1984). Teploobmen v topkakh parovykh kotlov. Leningrad, Energoatomizdat, 240. (in Russian).

*Работа поступила
в редакцию 08.05.2020 г.*

*Принята к публикации
11.05.2020 г.*

Ссылка для цитирования:

Абдуллин А. М. Влияние спектральной модели излучения на расчетные характеристики сложного теплообмена в пламенных печах нефтехимической промышленности // Бюллетень науки и практики. 2020. Т. 6. №6. С. 42-47. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/55/05>

Cite as (APA):

Abdullin, A. (2020). Influence of the Spectral Model of Radiation on the Calculated Characteristics of Complex Heat Exchange in Flame Furnaces of the Petrochemical Industry. *Bulletin of Science and Practice*, 6(6), 42-47. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/55/05>