

УДК 536.331

Простая аппроксимация степени черноты смеси $\text{CO}_2\text{--H}_2\text{O}$, используемая в зональном методе расчета теплообмена излучением

В.Г. Лисиенко, Г.К. Маликов, А.А. Титаев

Уральский федеральный университет им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина, Екатеринбург

E-mail: alexander.titaev@gmail.com

В работе представлено новое простое в применении выражение для расчета степени черноты смеси газов CO_2 и H_2O , используемое для моделирования теплообмена излучением в промышленных печах. Точность данного выражения оценена с помощью широкополосной экспоненциальной модели. Установлено, что время вычисления степени черноты по данному выражению меньше в 1,5 раза по сравнению с другими аппроксимирующими методами.

Ключевые слова: теплообмен излучением, математическое моделирование, зональный метод, аппроксимация степени черноты.

Моделирование теплообмена излучением в промышленных печах требует учета влияния смеси газовых продуктов сгорания, заполняющих объем печи. В общем случае эта смесь состоит в различных пропорциях из водяного пара, диоксида углерода и азота, не участвующего в теплообмене. Влияние данных продуктов сгорания учитывается путем введения степени черноты и коэффициента поглощения газовой смеси.

В настоящее время существует ряд методов вычисления степени черноты смеси продуктов сгорания: графические методы (диаграммы Хоттеля [1]), спектральные модели, модели линейчатого спектра, узкополосные и широкополосные (EWBM) модели [2], аппроксимирующие модели [3], [4] и др.

Одним из наиболее эффективных методов, используемых сегодня в коммерческих CFD продуктах, является аппроксимирующий метод, предложенный в работе [4]. В нем выражение для степени черноты смеси газов представлено в полиномиальной форме:

$$\varepsilon = \sum_{i=0}^I \left(\sum_{j=1}^J b_{\varepsilon,i,j} T^{j-1} \right) \left(1 - e^{-k_i PL} \right), \quad (1)$$

где P — сумма парциальных давлений продуктов сгорания, поглощающих излучение, L — эффективная длина луча, $I = 3$, $J = 4$ — параметры метода, T — температура смеси газов. Коэффициенты $b_{\varepsilon,i,j}$, k_i определяются по эталонному набору значений и вычисляются одним из методов численной оптимизации. Основное преимущество данного метода —

его вычислительная простота в случае, когда не требуется частое перевычисление набора коэффициентов, зависящих от состава смеси.

В случае пламенных печей условия теплообмена излучением ограничены температурами смеси газов от 1000 до 2000 К, эффективной длиной луча от 0,1 до 5 м, давлениями диоксида углерода и водяных паров от 0 до 0,35 атм и общим давлением продуктов сгорания в печи, равным 1 атм. Для случая сжигания природного газа была предложена простая аппроксимирующая формула [5]:

$$\varepsilon = 1 - e^{-\alpha_{\Sigma} PL}, \quad (2)$$

$$\text{где } \alpha_{\Sigma} = \left((0,78 + 1,6 p_{\text{H}_2\text{O}}) / \sqrt{PL} - 0,1 \right) (1 - 3,7 \cdot 10^{-4} T), \quad (3)$$

$$0,012 \leq PL \leq 2 \text{ атм}\cdot\text{м}, \quad 700 \leq T \leq 1800 \text{ К}, \quad 0,2 \leq \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{CO}_2}} \leq 2.$$

Последнее ограничение делает данный метод неприменимым для смеси газов, содержащих парциальные давления $p_{\text{H}_2\text{O}}$ или p_{CO_2} , близкие к нулю (как, например, в продуктах сгорания коксового газа).

Более точное значение степени черноты смеси газов вычислялось авторами с помощью приведения формулы (3) к виду:

$$\alpha_{\Sigma} = \left[(0,78 + 1,6 p_{\text{H}_2\text{O}}) / \sqrt{PL} - C \right] (1 - DT), \quad (4)$$

где

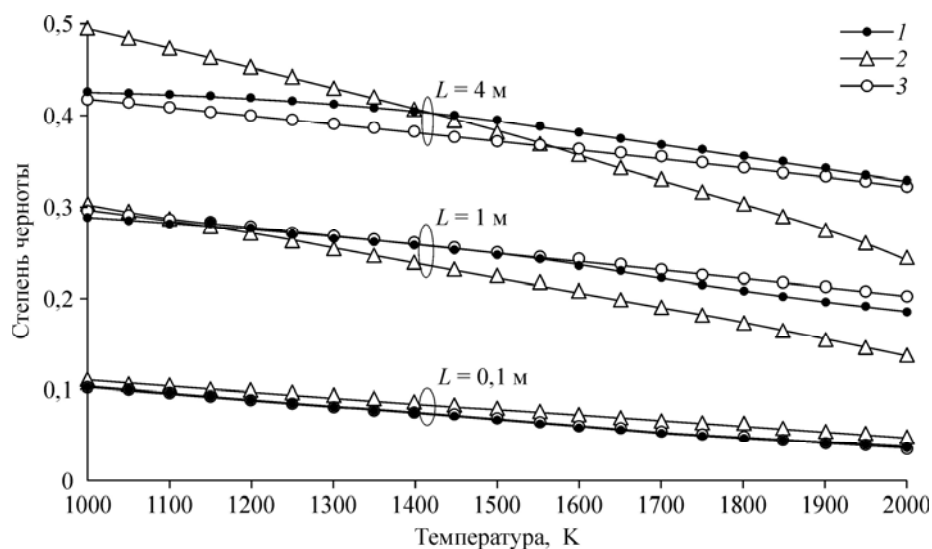
$$D = 2,15 \cdot 10^{-4} \left(1 + e^{-PL/0,2} \right), \quad C = (a_i / L) + b_i. \quad (5)$$

Значения коэффициентов a_i , b_i определялись в процессе численной оптимизации формул (4)–(5) с помощью эталонного набора данных, полученного методом EWBМ [2]. Данная оптимизация представляет собой численную минимизацию целевой функции ошибки. В качестве эталонного набора значений был сформирован набор из 36 значений степени черноты для условий газовой смеси, типичных при работе пламенных печей: диапазон температур $T = 1000\text{--}2000$ К с шагом 200 К (таким образом, количество различных значений температур составило $M = 6$), диапазон эффективных длин луча $L = 0,1\text{--}5,0$ м с выборкой по значениям 0,1, 0,5, 1, 2, 3, 4 (количество различных значений $N = 6$). Полученные коэффициенты для нескольких часто встречающихся в промышленности составов газовой смеси представлены в табл. 1, а на рисунке приведено сравнение данного метода с эталонным набором значений, а также с набором значений, полученным по формулам (2)–(3).

Таблица 1

Значения коэффициентов в формулах (4)–(5) для нескольких часто встречающихся в промышленности составов газовой смеси

Вид топлива и соответствующие ему парциальные давления продуктов сгорания	a_i	b_i
Природный газ: $p_{\text{H}_2\text{O}} = 0,18$ атм, $p_{\text{CO}_2} = 9,09$ атм	–0,0286	0,4189
Коксовый газ: $p_{\text{H}_2\text{O}} = 0,16$ атм, $p_{\text{CO}_2} = 0,05$ атм	–0,0346	0,3757
Коксодоменный газ: $p_{\text{H}_2\text{O}} = 0,08$ атм, $p_{\text{CO}_2} = 0,26$ атм,	–0,0196	0,3997



Степень черноты смеси водяного пара и диоксида углерода при $p_{\text{H}_2\text{O}} = 0,2$ атм, $p_{\text{CO}_2} = 0,1$ атм и различных значениях L .

1 — метод EWBM [2], 2 — формулы (2), (3), 3 — формулы (4), (5).

Таблица 2

Сравнение результатов вычисления для различных методов получения степени черноты газовой смеси

Метод вычисления степени черноты газовой смеси	Среднее время вычисления одного значения, мкс
EWBM [2]	30,5
Выражение (1) без учета вычисления коэффициентов	0,240
Выражения (4)–(5) без учета вычисления коэффициентов	0,157

Сравнение времени вычисления степени черноты газовой смеси проводилось на ЭВМ Intel Core i5-2500, 3.3 Гц. Результаты сравнения представлены в табл. 2.

В тех случаях, когда диапазон условий позволяет применить формулы (2)–(3), их использование предпочтительнее остальных методов ввиду их простоты. Если же данные формулы неприменимы, авторы рекомендуют использовать модифицированные формулы (4)–(5). Применение этих формул за пределами заявленных условий нуждается в дополнительном исследовании.

Основное преимущество формул (4)–(5) (для любых сочетаний H_2O и CO_2) по сравнению с широко используемым методом аппроксимации по формуле (1) состоит в более быстром вычислении значений степени черноты, а также в том, что для их использования необходимо вычисление только двух вспомогательных коэффициентов, а не пятнадцати.

Моделирование печей для нагрева металлической заготовки или плавления меди требует многократного вычисления значений степени черноты смеси газов для получения прямых взаимных поверхностей для поверхностных и объемных зон [6]. Следовательно, для зонального метода предложенный вариант получения степени черноты газовой смеси даст значительный выигрыш времени расчета.

Список литературы

1. **Hottel Н.С., Sarofim А.Ф.** Radiative transfer. N. Y.: McGraw-Hill, 1967. 520 p.
2. **Modest М.Ф.** Radiative heat transfer. Second Edition. N. Y.: Academic Press, 2003. 822 p.
3. **Leckner В.** Spectral and total emissivity of water vapor and carbon dioxide // Combustion and Flame. 1972. Vol. 19. P. 33–48.
4. **Smith Т.Ф., Shen Z.Ф., Friedman J.Н.** Evaluation of coefficients for the weighted sum of gray gases model // ASME J. Heat Transfer. 1982. Vol. 104. P. 602–608.
5. **Блох А.Г.** Теплообмен в топках паровых котлов. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
6. **Лисиенко В.Г., Волков В.В., Гончаров А.П.** Математическое моделирование теплообмена в печах и агрегатах. Киев: Наукова думка, 1984. 232 с.

Статья поступила в редакцию 27 марта 2014 г.