

## УЧЕТ СПЕКТРАЛЬНЫХ РАДИАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В ЗОНАЛЬНЫХ РАСЧЕТАХ ТЕПЛООБМЕНА В ОГNETЕХНИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Е.И. Муслимов\*, О.Ю. Кулешов\*\*

\* Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,  
Россия, Саратов, post.pt@yandex.ru

\*\* Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,  
Россия, Саратов, o-yu-kul@yandex.ru

*Аннотация.* Предложена эффективная математическая модель спектральных радиационных свойств продуктов сгорания для зонального метода расчета теплообмена в огнетехнических установках. Отличительной особенностью модели является корреляция спектральных оптических характеристик с экспериментальными значениями интегральной степени черноты однородных газовых объемов.

*Ключевые слова:* топочная камера, сложный теплообмен, зональный метод, продукты сгорания, радиационные свойства.

## INTEGRATION OF SPECTRAL RADIATION PROPERTIES OF COMBUSTION PRODUCTS IN THE ZONAL HEAT TRANSFER CALCULATIONS IN FIRE-TECHNICAL PLANTS

E.I. Muslimov\*, O.Yu. Kuleshov\*\*

\* Yuri Gagarin state technical university of Saratov,  
Saratov, Russia, post.pt@yandex.ru

\*\* Yuri Gagarin state technical university of Saratov,  
Saratov, Russia, o-yu-kul@yandex.ru

*Abstract.* The mathematical model of radiative properties of combustion products for zoning method of calculation of heat transfer in fire-technic units is proposed. Correlation spectral optical characteristics with empirical values of integral radiosity of uniform gas volumes is distinguishing feature of the model.

*Keywords:* combustion chamber, combined heat transfer, zoning method, combustion products, radiative properties.

Прикладной зональный метод является классическим численным методом расчета сложного теплообмена в топках огнетехнических установок, таких как промышленные печи и котельные агрегаты.

Зональный метод расчета сложного теплообмена в печах и котельных агрегатах основан на разбиении расчетной области на однородные объемные и поверхностные зоны (в соответствии с особенностями топочных процессов) и записи системы нелинейных алгебраических уравнений зональных тепловых балансов, коэффициенты в которых учитывают эффекты теплопереноса.

Описание лучистого переноса в современном резольвентном зональном методе [1,2] основано на оптико-геометрических характеристиках излучения, которые представляют собой разные виды угловых коэффициентов излучения с зоны  $i$  на зону  $j$ : 1) первичные спектральные обобщенные угловые коэффициенты (ОУК)  $\psi_{ij}$ , которые учитывают только поглощение (ослабление) разделяющей среды и в многозонных системах вычисляются с использованием метода статистических испытаний (Монте-Карло); 2) спектральные разрешающие обобщенные угловые коэффициенты (РОУК)  $\Psi_{ij}$ , которые дополнительно учитывают многократное диффузное отражение и изотропное рассеяние излучения в системе и вычисляются на базе ОУК путем решения системы зональных уравнений баланса лучистой энергии; 3) интегральные по спектру коэффициенты радиационного обмена (КРО)  $P_{ij}$ , которые вычисляются на базе спектральных РОУК и включают в себя дополнительные комплексы переменных из из-

вестного выражения зонального метода [2] для падающего лучистого потока  $Q_{pj}=P_{ij}T_i^4$ .

В силу специфики оптико-геометрических характеристик излучения зональный метод использует спектральные модели прямоугольных полос с фиксированной шириной в интервалах длин волн излучения продуктов сгорания (квазисерое приближение) [2]. Эффективные средние коэффициенты поглощения для прямоугольных полос зависят от параметров среды и косвенно учитывают эффекты изменения характеристик полос реального спектра излучения компонентов продуктов сгорания. Тем не менее, в отсутствии точного описания спектральных механизмов излучения, необходимо коррелировать параметры модели спектра с интегральными степенями черноты компонентов продуктов сгорания, полученными экспериментальным путем и являющимися наиболее достоверными [2]. Эта проблема и решается в данной работе.

С целью упрощения (линеаризации) экспоненциального выражения для спектральной степени черноты (излучательной способности) объемных зон введем поправочный коэффициент для  $K_{\varepsilon,i}$ , учитывающий ее нелинейность:

$$\varepsilon_{i,k}^{об} = l_i \chi_{i,k} K_{\varepsilon,i,k} = 4 \frac{V_i}{F_i^{об}} \chi_{i,k} K_{\varepsilon,i,k}, \quad (1)$$

где  $l_i = 4V_i / F_i^{об}$  – среднегеометрическая длина пути луча в объемной  $i$ -ой зоне;  $V_i$  и  $F_i^{об}$  – объем зоны и площадь ограничивающих плоскостей для газовой зоны  $i$ , соответственно;  $\chi_{i,k}$  – коэффициент поглощения излучения продуктов сгорания в объемной зоне  $i$  в  $k$ -ой полосе спектра;  $K_{\varepsilon,i,k}$  – поправочный коэффициент для степени черноты объемной зоны  $i$  в  $k$ -ой полосе спектра.

Тогда выражения КРО для объемных (газовых) зон-источников можно записать с учетом (1):

$$P_{ij} = 4V_i \sigma_0 \sum_{k=0}^Z K_{\varepsilon,i,k} \chi_{i,k} b_{i,k} \Psi_{j,k}, \quad i = [1, N'], \quad (2)$$

где  $N'$  – число объемных зон в расчетной области;  $\sigma_0$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $Z$  – число прямоугольных полос в модели спектра излучения продуктов сгорания;  $b_{i,k}$  – доля излучения абсолютно черного тела в  $k$ -ой полосе спектра при температуре  $i$ -ой зоны;  $\chi_{i,k}$  – коэффициент поглощения продуктов сгорания в  $k$ -ой полосе спектра при физических условиях в  $i$ -ой зоне;  $\Psi_{ij,k}$  – РОУК с зоны  $i$  на зону  $j$  в  $k$ -ой полосе спектра излучения.

КРО для зоны-источника  $i$  и зоны-приемника  $j$  представляет собой сумму (по полосам спектра) произведений РОУК в  $k$ -ой полосе  $b_{i,k} \Psi_{ij,k}$  и соответствующей спектральной степени черноты  $\varepsilon_{i,k}$  (газового объема для объемной зоны-источника или поверхности для поверхностной зоны-источника). Таким образом, КРО для объемной зоны-источника (2) включают в себя излучательную способность среды, а также поглощательную способность (опосредованно через РОУК) с учетом спектра излучения.

Поправочный коэффициент  $K_{\varepsilon,i,k}$  в (1), (2) определим, аппроксимируя экспоненциальное выражение для степени черноты газовой зоны  $i$ , вытекающее из закона Бугера

$$\varepsilon_i^{об} = 1 - \exp(-l_i \chi_i), \quad (3)$$

степенным выражением

$$\varepsilon_i^{об} = \frac{C(l_i \chi_i)^n}{1 + C(l_i \chi_i)^n}, \quad (4)$$

где  $C = 1,717$ ;  $n = 1,3$ ; индексы спектральных величин опущены для простоты записи.

Приближенное выражение (4) аппроксимирует исходное выражение (3) с высокой точностью (погрешность менее 3%) в интервале значений  $l_i\chi_i = [0, 1]$ , который соответствует возможным значениям оптической толщины объемных зон геометрических моделей различных огнетехнических установок.

Преобразуем выражение (4) к виду:

$$\varepsilon_i^{\text{об}} = l_i\chi_i \cdot \frac{(l_i\chi_i)^{n-1}}{C_1 + (l_i\chi_i)^n}, \quad (5)$$

Сравнивая (5) с (1) получим выражение для поправочного коэффициента

$$K_{\varepsilon,i} = \frac{(l_i\chi_i)^{n-1}}{C_1 + (l_i\chi_i)^n} = \frac{(l_i\chi_i)^{0,3}}{0,582 + (l_i\chi_i)^{1,3}}. \quad (6)$$

Для корреляции спектральных оптических характеристик с интегральной степенью черноты объемной зоны проведем дальнейшие преобразования выражения (2) для КРО. При этом будем считать поправочный коэффициент для степени черноты объемных зон  $K_{\varepsilon,i}$  (6) независимым от длины волны излучения. Это предположение в значительной мере верно при относительно небольшом числе рассматриваемых спектральных интервалов (широких полос), а в предельном случае селективно-серой аппроксимации – абсолютно верно.

Полагая  $K_{\varepsilon,i,k} \approx K_{\varepsilon,i}$ , умножим и разделим правую часть уравнения (2) на комплекс  $\bar{\chi}_i / F_i^{\text{об}}$ , где  $\bar{\chi}_i = \sum_{k=0}^Z b_{i,k}\chi_{i,k}$  – средний коэффициент поглощения среды в ИК-области спектра. С учетом (1) в результате преобразований выражение (2) примет вид:

$$P_{ij} = F_i^{\text{об}} \sigma_0 \varepsilon_i^{\text{об}} \sum_{k=0}^Z \delta(\chi_{i,k}) b_{i,k} \Psi_{ij,k}, \quad i = [1, N'], \quad (7)$$

где  $\varepsilon_i^{\text{об}}$  – интегральная степень черноты  $i$ -ой объемной зоны, которую будем принимать по экспериментальным данным для соответствующего однородного слоя продуктов сгорания;  $\delta(\chi_{i,k}) = \chi_{i,k} / \bar{\chi}_i$  – относительный коэффициент поглощения в  $k$ -ой полосе спектра,  $0 < \delta(\chi_{i,k}) < 1$ ,  $\sum_{k=0}^Z \delta(\chi_{i,k}) b_{i,k} = 1$ .

Выражение (7) для КРО объемной зоны-источника, являющегося основной оптико-геометрической характеристикой зонального метода, записано с учетом корреляции спектральных оптических характеристик с интегральной степенью черноты газового объема, определенной экспериментальным путем.

На основании выражения (7) можно записать уточненную спектральную степень черноты (излучательную способность) среды в  $k$ -ой полосе спектра для условий в  $i$ -ой объемной зоне:

$$\varepsilon_{i,k}^{\text{об}} = \varepsilon_i^{\text{об}} \delta(\chi_{i,k}). \quad (8)$$

Для расчета поглощательной способности среды найдем значения уточненных спектральных коэффициентов поглощения в полосах спектра, для чего приравняем правые части выражений (3) и (8)

$$1 - \exp(-\chi_{i,k} l_i) = \varepsilon_i^{\text{об}} \delta(\chi_{i,k}),$$

откуда получим

$$\chi_{i,k} = -\ln[1 - \varepsilon_i^{\text{об}} \delta(\chi_{i,k})] / l_i, \quad (9)$$

где  $l_i$  – среднегеометрическая длина пути луча в  $i$ -ой объемной зоне.

Выражение (9) может быть использовано для коррекции абсолютных значений спектральных коэффициентов поглощения газовой среды на основании эмпирических данных по интегральной степени черноты газового объема.

В общем случае газообразных продуктов сгорания с дисперсными частицами коэффициент поглощения вычисляется как сумма соответствующих коэффициентов:

$$\chi = \chi_r + \chi_c.$$

Интегральную степень черноты объемных зон, заполненных газообразными продуктами сгорания и дисперсными частицами, можно записать с учетом их взаимного влияния:

$$\varepsilon_i^{ob} = 1 - (1 - \varepsilon_r)(1 - \varepsilon_c),$$

где  $\varepsilon_r$  – степень черноты изотермического объема газообразных продуктов сгорания;  $\varepsilon_c$  – степень черноты однородного объема дисперсных частиц.

По спектральным коэффициентам поглощения и интегральным степеням черноты газообразной и дисперсной фаз продуктов сгорания имеются обширные экспериментальные данные, которые обобщены в виде аналитических зависимостей от состава и параметров среды и приведены в [2-4]. Эти зависимости могут быть использованы для настройки эффективной спектральной модели излучения продуктов сгорания в топочных зональных системах.

#### Библиографический список

1. Кулешов О.Ю. Зональная математическая модель и методика расчета сопряженного теплообмена в радиантной секции трубчатых печей / О.Ю. Кулешов, В.М. Седелкин // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. №1(52). Выпуск 1. С. 181-187.
2. Блох А.Г. Теплообмен излучением / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков. М: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
3. Handbook of infrared radiation from combustion gases / C.B. Ludwig, W. Malkmus, J.E. Reardon, J.A.L. Thomson. Washington, NASA 8p-3080, 1973. 486 p.
4. Яндер Х. Образование ионов, кластеров, нанотрубок и частиц сажи в углеводородном пламени / Х. Яндер, Г. Дж. Вангер // Физика горения и взрыва. 2006. Т. 42, №1. С. 81-88.