

КОРРЕКЦИОННЫЙ ЗОНАЛЬНЫЙ МЕТОД РАСЧЁТА РАДИАЦИОННОГО И СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

О.Ю. Кулешов, В.М. Седелкин

Энгельсский технологический институт (филиал)

Саратовского государственного технического университета, г. Энгельс, Россия

Наиболее эффективным и физически обоснованным численным методом решения прикладных задач радиационного и сложного теплообмена в энергетических установках, таких как топочные камеры печей и котлов, является зональный метод в сочетании с имитационным моделированием излучения, который объединяет в себе преимущества высокой (принципиально неограниченной) точности расчёта радиационного переноса и универсальности применения.

Однако современный зональный метод [1, 2] обладает довольно сложным расчётным алгоритмом, что связано с вычислением оптико-геометрических характеристик излучения (ОГХИ) в сложных многозонных системах методом статистических испытаний Монте-Карло. Сложность расчётного алгоритма и большой набор исходных геометрических параметров затрудняют инженерное использование зонального метода.

В ранних работах Х.С. Хоттеля [3] для аппроксимации интегральных излучательной и поглощательной способностей газообразных продуктов сгорания была использована псевдоспектральная модель взвешенной суммы серых газов с постоянными коэффициентами поглощения, которая позволяла в зональных расчётах обойтись без многократного вычисления ОГХИ при изменении оптических свойств системы путём выбора соответствующих весовых множителей для независимых ОГХИ «серых газов». Это делало зональный метод Х.С. Хоттеля весьма экономичным. Однако он имел принципиальные недостатки, связанные с не учётом реального спектрального состава излучения.

Современный зональный метод (во всех его вариантах) использует спектральные модели прямоугольных полос, привязанные к реальному спектру излучения продуктов сгорания. Такой подход предполагает прямую зависимость ОГХИ от оптических свойств системы (т.е. опосредованно от температурного и концентрационного полей), а следовательно, предполагает и многократное вычисление ОГХИ в процессе итерационного решения нелинейной тепловой задачи.

В данной работе предложен новый подход – коррекционный зональный метод, который предусматривает однократное вычисление базовых ОГХИ для рассматриваемой зональной геометрической модели установки для какого-то возможного (в первом приближении) распределения температурного и концентрационного полей с последующей коррекцией базовых ОГХИ путём внесения поправок при изменении оптических свойств зональной системы. В этом случае базовые ОГХИ являются независимыми и их расчёт представляет собой самостоятельную задачу. Далее базовые ОГХИ используются как исходные данные для решения различных по постановке тепловых задач в рассматриваемой зональной расчётной области. Такой подход радикально упрощает расчётный алгоритм зонального метода и его инженерное применение.

Зональный метод расчёта сложного теплообмена в энергетических установках основан на разбиении расчётной области на однородные объёмные и поверхностные зоны (в соответствии с особенностями тепломассообменных процессов в рабочей камере) и записи системы нелинейных алгебраических уравнений зональных тепловых балансов, коэффициенты в которых точно учитывают эффекты теплопереноса, поскольку они

определяются на основе современных методов анализа соответствующих процессов теплообмена и газовой динамики. В общем виде система зональных уравнений записывается следующим образом [2]:

$$\sum_{i=1}^N P_{ij} T_i^4 + \sum_{i=1}^M \Omega_{ij} T_i + C_j = 0, \quad j = 1, 2, \dots, N; \quad (1)$$

где N – общее число зон в расчётной области; M – число зон, непосредственно контактирующих с j -ой зоной; T_i – абсолютная температура i -ой зоны; P_{ij} – коэффициенты радиационного обмена между зонами i и j ; Ω_{ij} – коэффициенты конвективно-турбулентного обмена между контактирующими объёмными или объёмной и поверхностной зонами i и j расчётной области; $C_j = f(Q_j)$ – свободный член уравнения, включающий в себя внутренний тепловой источник (за счёт горения топлива) для объёмной зоны j или внешний тепловой поток (по отношению к объёму рабочей камеры) для поверхностной зоны j ; i, j – зоны источник и приёмник теплоты соответственно.

Уравнения системы (1) учитывают радиационно-конвективный (сложный) теплообмен в рабочей камере установки, однако традиционно, особое внимание в зональных методах уделяется лучистой составляющей теплообмена, выражаемой первым членом уравнений (1).

Коэффициенты радиационного обмена P_{ij} рассчитываются на основе разрешающих обобщённых угловых коэффициентов излучения (РОУК) $\Psi_{ij,k}$, которые вычисляются с использованием модели прямоугольных полос спектра излучения продуктов сгорания [2]:

$$P_{ij} = \begin{cases} 4V_i \sigma_0 \sum_{k=0}^Z b_{i,k} \chi_{i,k} K_{\varepsilon i,k} \Psi_{ij,k}^*, & i \in [1, N']; \\ \varepsilon_i F_i \sigma_0 \sum_{k=0}^Z b_{i,k} \Psi_{ij,k}^*, & i \in (N', N]; \end{cases} \quad (2)$$

где N' – число объёмных (газовых) зон в расчётной области; $(N-N')$ – число поверхностных зон в расчётной области; F_i – площадь поверхностной зоны; V_i – объём газовой зоны; σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана; Z – число рассматриваемых полос спектра излучения газов; $b_{i,k}$ – доля излучения абсолютно чёрного тела в k -ой полосе спектра при температуре i -ой зоны; $\chi_{i,k}$ – коэффициент поглощения газов в k -ой полосе спектра для i -ой зоны; $K_{\varepsilon i,k}$ – поправка на нелинейность степени черноты i -ой объёмной зоны для k -ой полосе спектра излучения; ε_i – степень черноты i -ой поверхностной зоны – источника излучения; $\Psi_{ij,k}^*$ – приведённые РОУК между зонами i и j в k -ой полосе спектра, $\Psi_{ij,k}^* = \Psi_{ij,k}$ при $j \in [1, N']$, $\Psi_{ij,k}^* = \varepsilon_j \Psi_{ij,k}$ при $j \in (N', N]$; ε_j – степень черноты j -ой поверхностной зоны – приёмника излучения.

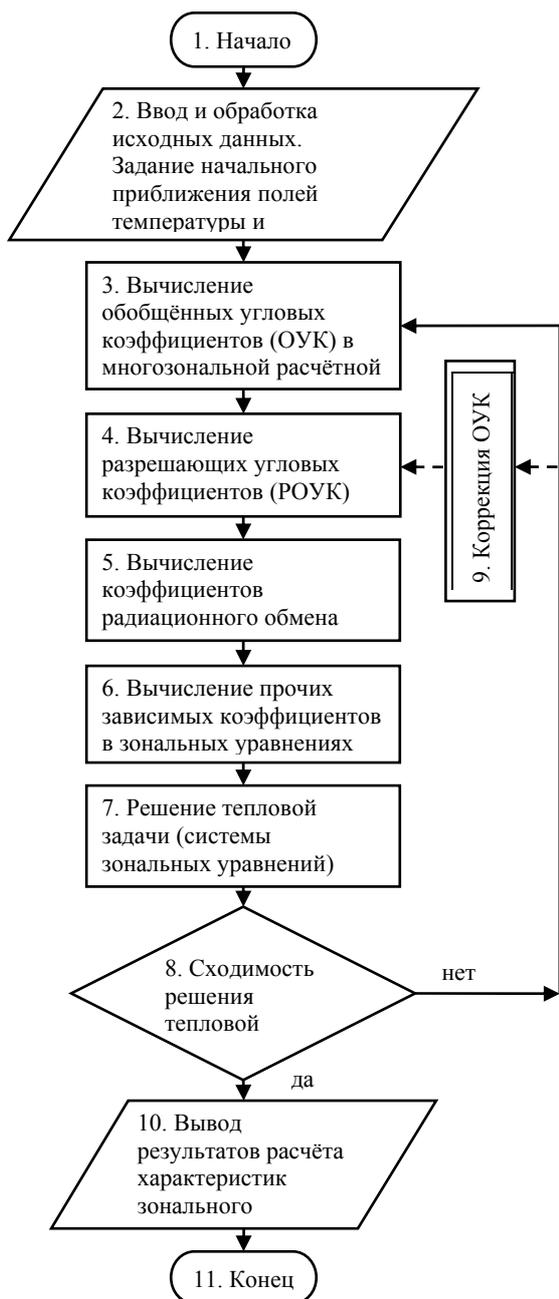
При расчёте ОГХИ используется резольвентный зональный подход, когда РОУК вычисляются на основе первичных обобщённых угловых коэффициентов (ОУК) [1, 2].

Матрицы ОУК $(\psi_{ij})_k$, $i = j = [1, N]$, $k = [0, Z]$, в общем случае рассчитываются численным методом статистических испытаний Монте-Карло в многозонной излучающей и поглощающей системе без учёта отражения и рассеяния излучения. Реализация метода имитационного моделирования излучения с целью определения матриц ОУК очень трудоёмка и составляет основную часть всех зональных расчётов.

РОУК $\Psi_{ij,k}$ между зонами i и j в k -ой полосе спектра дополнительно учитывают многократное отражение и рассеяние излучения в расчётной области и определяются на базе матриц ОУК $(\psi_{ij})_k$ путём решения системы линейных алгебраических уравнений баланса лучистой энергии в замкнутой геометрической системе.

Общая тепловая задача, задаваемая системой уравнений (1), является нелинейной. Параметры задачи (1) зависят от её решения, в том числе и ОГХИ – через температурное и

концентрационные поля, определяющие оптические свойства среды. Все расчётные процедуры включены в главный итерационный процесс решения нелинейной тепловой задачи (сплошные линии на рисунке). Анализ алгоритма зонального метода показывает, что ОУК являются первичными и наиболее трудоёмкими ОГХИ в зональных расчётах. Поэтому, для радикального упрощения расчётного алгоритма зонального метода, необходимо ослабить зависимость ОУК от решения тепловой задачи и таким образом вынести процедуру статистического расчёта ОУК из главного итерационного процесса. Это реализуется применением процедуры коррекции предварительно вычисленных базовых ОУК (пунктирная линия на рисунке) путём внесения поправок на изменение оптических свойств среды. При этом достигается разделение тепловой и оптико-геометрической задач.



Матрицы базовых ОУК $(\psi_{ij}^0)_k$, $i = j = [1, M]$, $k = [0, Z]$, вычисляются однократно для определённой зональной геометрической модели рабочей камеры установки для базового режима её работы при заданном распределении поглотительных свойств среды в расчётной области (в каком-то вероятном приближении) и являются исходными данными для дальнейших тепловых расчётов.

Для вывода формул коррекции базовых ОУК рассмотрим соотношения, связывающие их с геометрическими угловыми коэффициентами, независимыми от оптических свойств среды:

– для поверхностной зоны-приёмника излучения

$$\Psi_{ij,k} = \Phi_{ij} D_{ij,k} \quad \text{или} \quad \Phi_{ij} = \frac{\Psi_{ij,k}}{D_{ij,k}}; \quad (3)$$

– для объёмной зоны-приёмника излучения

$$\Psi_{ij,k} = \Phi_{ij} D_{ij,k} \varepsilon_{j,k} \quad \text{или} \quad \Phi_{ij} = \frac{\Psi_{ij,k}}{D_{ij,k} \varepsilon_{j,k}}; \quad (4)$$

где Φ_{ij} – геометрический угловой коэффициент излучения – доля прямого излучения зоны i , которая падает на поверхностную или объёмную зону j , при этом разделяющая среда считается абсолютно прозрачной; $D_{ij,k}$ – среднегеометрическая пропускательная способность среды между зонами i и j ; $\varepsilon_{j,k}$ – степень черноты объёмной зоны-приёмника j . Нижний индекс k указывает на принадлежность физической величины к полосе спектра излучения.

При изменении оптических свойств среды в зональной расчётной области относительно базового режима геометрические угловые коэффициенты остаются постоянными, т.е. $\Phi_{ij} = \text{const}$. Поэтому, с учётом выражений (3) и (4), можно записать соотношения между ОУК для базового (нулевого) режима $\psi_{ij,k}^0$ и другого режима, отличного от нулевого $\psi_{ij,k}$:

Рис. Схема расчётного алгоритма зонального метода

– для поверхностной зоны-приёмника излучения

$$\frac{\Psi_{ij,k}^0}{D_{ij,k}^0} = \frac{\Psi_{ij,k}}{D_{ij,k}} \quad \text{или} \quad \Psi_{ij,k} = \Psi_{ij,k}^0 \frac{D_{ij,k}}{D_{ij,k}^0}; \quad (5)$$

– для объёмной зоны-приёмника излучения

$$\frac{\Psi_{ij,k}^0}{D_{ij,k}^0 \varepsilon_{j,k}^0} = \frac{\Psi_{ij,k}}{D_{ij,k} \varepsilon_{j,k}} \quad \text{или} \quad \Psi_{ij,k} = \Psi_{ij,k}^0 \frac{D_{ij,k}}{D_{ij,k}^0} \times \frac{\varepsilon_{j,k}}{\varepsilon_{j,k}^0}, \quad (6)$$

где верхний индекс «0» означает величины, взятые для базового режима.

В соответствии с зональным подходом выражение для спектральной степени черноты объёмной (газовой) зоны записывается в виде [1, 2]:

$$\varepsilon_{j,k} = \frac{4V_j}{F_j} \chi_{j,k} K_{\varepsilon_{j,k}}, \quad (7)$$

где $4V_j / F_j$ – средняя длина пути излучения в объёмной зоне j ; V_j и F_j – объём и площадь ограничивающей поверхности газовой зоны j ; $K_{\varepsilon_{i,k}}$ – поправка на нелинейность степени черноты i -ой объёмной зоны для k -ой полосы спектра излучения; $\chi_j = \chi_{\text{г}} + \chi_{\text{ч}}$ – коэффициент поглощения среды в объёмной зоне j ; $\chi_{\text{г}}$ и $\chi_{\text{ч}}$ – коэффициенты поглощения газа и дисперсных частиц.

Среднегеометрическая пропускательная способность среды между зонами i и j описывается интегральным выражением:

$$D_{ij,k} = \exp\left(-\int_{L_{ij}} \chi_k dl\right), \quad (8)$$

где l – переменная интегрирования; L_{ij} – среднегеометрическое оптическое расстояние между зонами i и j , которое определяется усреднением длин пути лучей, исходящих из зоны i и попадающих в зону j при имитационном моделировании излучения.

Приближённо для относительно небольших компактных зон величину L_{ij} можно принять равной расстоянию между геометрическими центрами рассматриваемых объёмных и поверхностных зон, тем более что в расчётных формулах для пересчёта ОУК (5), (6) стоит отношение пропускательных способностей вдоль одного и того же пути излучения L_{ij} и это нивелирует некоторую погрешность определения величины L_{ij} .

Используя ступенчатую аппроксимацию коэффициента поглощения χ_k по всем пересекаемым объёмным зонам n на отрезке L_{ij} , интегральное выражение (8) заменим алгебраическим выражением:

$$D_{ij,z} = \exp\left(-\sum_n \chi_{n,k} l_n\right),$$

$$\frac{D_{ij,k}}{D_{ij,k}^0} = \exp\left\{-\sum_n (\chi_{n,k}^0 - \chi_{n,k}) \times l_n\right\}, \quad (9)$$

где нижний индекс n указывает на принадлежность к зоне на отрезке L_{ij} .

Вычисление новых матриц ОУК $(\psi_{ij})_k$ проводится на основе базовых матриц $(\psi_{ij}^0)_k$ по формулам (5) – (7), (9).

Для расчёта по формуле (9) необходимо знание всего пути излучения вдоль отрезков L_{ij} , включая последовательность номеров пересекаемых зон и длин пути излучения в них. Перечисленные дополнительные характеристики являются чисто геометрическими и вычисляются один раз для данной зональной геометрической модели установки.

При коррекции ОУК должны сохраняться геометрические свойства лучистых потоков:

1) Свойство замыкаемости. В связи с некоторой погрешностью метода необходимо введение поправочных множителей в виде

$$a_{i,k} \sum_{j=1}^N \Psi_{ij,k} = 1, \quad i = [1, N], k = [0, Z],$$

тогда с учётом поправки запишем приведённые ОУК

$$\Psi_{ij,k}^* = a_{i,k} \times \Psi_{ij,k}, \quad (10)$$

2) Свойство затеняемости. Когда на пути излучения между зонами i и j находится непрозрачное тело, то $\Psi_{ij,k}^0 = 0$. Следовательно, и после коррекции должно сохраниться $\Psi_{ij,k}^* = 0$.

Апробация коррекционного зонального метода расчёта на примере промышленных топливных печей показала его высокую точность при вычислении характеристик радиационного и сложного теплообмена. Так по сравнению с обычным зональным методом [2] погрешность вычисления ОУК излучения не превышает 5%, при расчёте сложного теплообмена расхождение значений температуры незначительно, а максимальное расхождение значений результирующих тепловых потоков составляет те же 5%.

Таким образом, предложен новый коррекционный зональный метод расчёта радиационного и сложного теплообмена в энергетических установках, таких как топки печей и котлов, обладающий повышенной эффективностью расчётного алгоритма по сравнению с обычным зональным методом за счёт использования независимых от решения тепловой задачи базовых ОУК и их последующей коррекции при изменении оптических свойств системы. Такой подход позволяет разделить тепловую и оптико-геометрическую задачи. При этом базовые ОУК принимаются в качестве исходных данных для решения тепловых задач в рассматриваемой зональной расчётной области. Предложенный подход радикально упрощает расчётный алгоритм зонального метода и его инженерное применение для широких параметрических исследований теплообмена, том числе сопряжённого в энергетических установках с целью совершенствования тепловых режимов их работы.

Литература

1. Блох А.Г., Журавлёв Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением. М: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
2. Кулешов О.Ю. Математическое моделирование сложного теплообмена в огнетехнических установках газовой и нефтехимической промышленности : дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04: защищена 27.06.96: утв. 11.10.96. Саратов, 1996. 197 с.
3. Hottel H.C., Sarofim A.F. Radiative transfer. N.Y.: McGraw-Hill Book Company, 1967. 519 с.