

**МЕТОД РАСЧЁТА ЛОКАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИАЦИОННОГО И СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ТОПКАХ ПЕЧЕЙ И КОТЛОВ В РАМКАХ ЗОНАЛЬНОГО ПОДХОДА****О.Ю. Кулешов, В.М. Седелкин***Энгельсский технологический институт (филиал)**Саратовского государственного технического университета, г. Энгельс, Россия*

Зональный метод является классическим численным методом расчёта радиационного и сложного теплообмена в топках промышленных печей и котлов и в современных своих вариантах [1, 2] имеет существенные преимущества перед другими методами расчёта.

Однако традиционный зональный метод применяется для расчёта среднезональных характеристик теплообмена, что не всегда достаточно для анализа тепловой работы высокотемпературных установок с большой и неравномерной теплонапряжённостью поверхностей нагрева.

В то же время зональный метод, в принципе, позволяет вычислять локальные характеристики результирующего теплообмена на тепловоспринимающих поверхностях в зональной геометрической системе. Если использовать методологию современного резольвентного зонального подхода [1] то проблема заключается в вычислении локальных обобщённых угловых коэффициентов излучения (ОУК) в многозонных геометрически сложных системах, заполненных излучающей и поглощающей средой. Для вычисления среднезональных ОУК в многозонных системах в современном зональном методе используется высокоэффективный подход – статистическое моделирование излучения (приложение метода Монте-Карло). Однако напрямую этот метод не применим для определения локальных ОУК. Предложенный Ю.А. Суриновым итерационный зональный метод расчёта локальных характеристик радиационного теплообмена [3], в последствии обобщённый для поглощающей и рассеивающей среды [4], решает (в основном на постановочном уровне) задачу вычисления локальных разрешающих обобщённых угловых коэффициентов излучения (РОУК), дополнительно учитывающих многократное отражение и рассеяние излучения в системе при известных первичных локальных ОУК, вычисление которых для рассматриваемых в этих работах простых геометрических систем являлось тривиальной задачей.

Таким образом, проблема вычисления локальных характеристик радиационного и сложного теплообмена в многозонных системах в настоящее время остаётся открытой и имеется необходимость в разработке эффективного метода расчёта локального результирующего теплообмена в реальных высокотемпературных установках в рамках современного зонального подхода.

Современный зональный метод расчёта сложного теплообмена в топках печей и котлов основан на разбиении расчётной области на относительно крупные объёмные и поверхностные зоны с осреднёнными параметрами (в соответствии с особенностями топочных процессов) и записи системы нелинейных алгебраических уравнений зональных тепловых балансов, коэффициенты в которых с высокой точностью учитывают эффекты теплопереноса, поскольку они определяются с использованием современных методов анализа соответствующих процессов теплообмена. 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 объёмных и поверхностных зон в расчётной области (зональной геометрической модели топочной камеры);  $M$  – число зон, непосредственно контактирующих с  $j$ -ой зоной;  $T_i$  – средняя абсолютная температура  $i$ -ой зоны;  $P_{ij}$  – коэффициент радиационного обмена между зонами  $i$  и  $j$ ;  $\Omega_{ij}$  – коэффициент конвективно-турбулентного обмена между зонами  $i$  и  $j$ ;  $C_j = f(Q_j)$  – свободный член уравнения, учитывающий внутренний тепловой источник (за счёт горения топлива) для объёмной зоны  $j$  и внешний (по отношению к объёму топочной камеры) тепловой поток для поверхностной зоны  $j$ ;  $i, j$  – зоны источник и приёмник теплоты, соответственно.

Коэффициенты конвективно-турбулентного обмена  $\Omega_{ij}$  определяются с использованием расчётных и (или) экспериментальных данных по газодинамике и конвективной теплоотдаче в исследуемой печи.

Радиационный теплообмен рассматривается в рамках методологии современного резольвентного зонального подхода, когда оптико-геометрические характеристики излучения в зональной системе, заполненной излучающей, поглощающей и рассеивающей средой, разделяются на первичные ОУК и вторичные РОУК [1, 2].

Матрицы ОУК  $(\psi_{ij})_k$ ,  $i = j = [1, M]$ ,  $k = [0, Z]$ , где  $Z$  — число рассматриваемых полос в модели спектра излучения продуктов сгорания, рассчитываются численным методом статистических испытаний (приложение метода Монте-Карло) в многозонной излучающей и поглощающей системе без учёта отражения и рассеяния. Разработанная авторами методика позволяет эффективно определять матрицы ОУК в многозонных системах прямоугольной и цилиндрической геометрии [2].

РОУК  $(\Psi_{ij})_k$ ,  $i = j = [1, M]$ ,  $k = [0, Z]$ , дополнительно учитывают многократное диффузное отражение излучения границами и изотропную составляющую рассеяния излучения дисперсными частицами (при приближении реальной индикатрисы рассеяния комбинацией изотропной составляющей рассеяния и составляющей рассеяния в направлении излучения) и определяются на базе ОУК путём решения системы линейных алгебраических уравнений радиационного переноса в замкнутой зональной геометрической системе.

Коэффициенты радиационного обмена (КРО)  $P_{ij}$ , входящие в уравнения (1), рассчитываются на основе РОУК  $\Psi_{ij,k}$  суммированием по полосам модели спектра излучения.

Решение системы уравнений (1) даёт средние значения температур и тепловых потоков для зон расчётной области.

Для расчёта локальных характеристик сложного теплообмена авторами предложен численный метод в рамках резольвентного зонального подхода.

Пусть имеется в общем случае трёхмерная многозонная система, заполненная излучающей, поглощающей и рассеивающей средой, для которой рассчитаны среднезональные ОУК, среднезональные РОУК излучения между зонами системы и температуры зон. В расчётной области выделим элементарную площадку  $dF_M$  с центральной точкой  $M$ , расположенную на тепловоспринимающей поверхности в пределах  $j$ -ой поверхностной зоны.

В соответствии с зональным подходом выражение для локального удельного теплового потока к единичной элементарной площадке  $dF_M = 1$ ,  $dF_M \in j$  с центральной точкой  $M$  можно записать в виде:

$$q_M = \sum_{i=1}^N P_{iM} T_i^4 - \varepsilon_j \sigma_0 T_M^4 + \alpha_{iM} (T_i - T_M), \quad (2)$$

где  $\varepsilon_j$  – степень черноты поверхностной зоны  $j$ ;  $T_M$  – локальная абсолютная температура тепловоспринимающей поверхности в точке  $M$ ;  $\sigma_0$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $\alpha_{iM}$  – локальный коэффициент конвективной теплоотдачи к элементарной площадке  $dF_M$  от контактирующей объёмной зоны  $i$ ;  $P_{iM}$  – локальный КРО.

Локальные КРО с зон расчётной области на элементарную площадку  $dF_M$  с учётом модели прямоугольных полос спектра излучения продуктов сгорания будут иметь выражение:

$$P_{iM} = \begin{cases} 4V_i \sigma_0 \varepsilon_j \sum_{k=0}^Z b_{i,k} \chi_{i,k} K_{\varepsilon i,k} \Psi_{iM,k}, & i \in [1, N'], \\ F_i \sigma_0 \varepsilon_i \varepsilon_j \sum_{k=0}^Z b_{i,k} \Psi_{iM,k}, & i \in (N', N], \end{cases} \quad (3)$$

где  $N'$  – число объёмных (газовых) зон в расчётной области;  $(N - N')$  – число поверхностных зон в расчётной области;  $Z$  – число рассматриваемых полос спектра излучения;  $b_{i,k}$  – доля излучения абсолютно чёрного тела в  $k$ -ой полосе спектра при температуре  $T_i$ ;  $\chi_{i,k}$  – коэффициент поглощения продуктов сгорания в  $k$ -ой полосе спектра в объёмной зоне  $i$ ;  $\varepsilon_i$  – степень черноты поверхностной зоны  $i$ ;  $V_i$  – объём газовой зоны  $i$ ;  $F_i$  – площадь поверхностной зоны  $i$ ;  $\Psi_{iM,k}$  – локальные РОУК с зоны  $i$  на элементарную площадку  $dF_M$  в  $k$ -ой полосе спектра;  $K_{\varepsilon i}$  – поправка на нелинейность степени черноты объёмной зоны  $i$  для  $k$ -ой полосы спектра.

Локальные РОУК в полосах спектра излучения продуктов сгорания определяются через локальные ОУК и среднезональные РОУК, вычисленные на предыдущем этапе расчёта:

$$\Psi_{iM,k} = \psi_{iM,k} + \sum_{n=1}^N \Psi_{in,k} \psi_{nM,k} R_n \quad (4)$$

где  $\psi_{iM,k}$  – локальный ОУК с зоны  $i$  на элементарную площадку  $dF_M$  в  $k$ -ой полосе спектра;  $\psi_{nM,k}$  – локальные ОУК с зоны  $n$  расчётной области на элементарную площадку  $dF_M$  в  $k$ -ой полосе спектра;  $\Psi_{in,k}$  – среднезональные РОУК с зоны  $i$  на зону  $n$  расчётной области в  $k$ -ой полосе спектра;  $R_n$  – коэффициент диффузного отражения или изотропного рассеяния излучения для поверхностной или объёмной зоны  $n$  соответственно.

Локальный ОУК  $\psi_{iM,k}$  с зоны  $i$  расчётной области на элементарную площадку  $dF_M$  определяется через местный ОУК  $\psi_{Mi,k}$  с элементарной площадки  $dF_M$  на зону  $i$  расчётной области на основании соотношений взаимности.

Соотношения взаимности для ОУК излучения записываются в разной форме для поверхностной и объёмной зоны  $i$ :

– для поверхностной зоны,  $i \in (N', N]$

$$F_i \psi_{iM,k} = dF_M \psi_{Mi,k}, \quad (5)$$

– для объёмной зоны,  $i \in [1, N']$

$$4V_i \chi_{i,k} K_{\varepsilon i,k} \psi_{iM,k} = dF_M \psi_{Mi,k}. \quad (6)$$

Из соотношений (5, 6), учитывая, что  $dF_M = 1$ , получим выражение для локальных ОУК через местный ОУК:

$$\psi_{iM,k} = \begin{cases} \psi_{Mi,k} / 4V_i \chi_{i,k} K_{\varepsilon i,k}, & i \in [1, N'], \\ \psi_{Mi,k} / F_i, & i \in (N', N]. \end{cases} \quad (7)$$

Для расчёта местных ОУК  $\psi_{Mi,k}$  с элементарной площадки  $dF_M$  на все зоны трёхмерной расчётной области развит специальный численный метод статистических испытаний (модификация метода Монте-Карло), аналитически усреднённый по плотности вероятности

направлений исходящих лучей из точки  $M$  в соответствии с законом Ламберта для диффузно излучающей поверхности. Это позволяет упорядочить процесс, моделирующий лучеиспускание, и сократить число статистических испытаний.

Одним из важнейших приложений метода расчёта локальных характеристик результирующего теплообмена является расчёт локальной теплонапряжённости труб в экранированных топочных камерах, характеризующихся жёсткими условиями нагрева, часто в области предельных значений по термостойкости металла стенки труб. На базе предложенного общего метода разработана методика расчёта локальных удельных тепловых потоков по периметру труб в экранированных топках паровых котлов и технологических трубчатых печей. Методика основана на выделении в многозонной расчётной области образов реальных экранных труб в пределах эффективной плоской поверхности нагрева, используемой в среднезональных расчётах. Предложен классификатор типов трубных экранов и система параметров, однозначно определяющих положение и размеры труб в расчётной области. Расчётные точки  $M$ , являющиеся центрами элементарных площадок  $dF_M$ , располагаются по окружности экранной трубы с определённым шагом по центральному углу в сечении, задаваемом номером трубы и линейной координатой сечения. Методика позволяет рассчитывать как локальные тепловые потоки к экранным трубам при заданной температуре их наружной поверхности, так и локальные температуры стенки труб при заданных её толщине, теплопроводности и характеристиках внутреннего потока [5].

С использованием предложенной методики проведено численное исследование сложного теплообмена в технологической трубчатой печи ББ1 газовой промышленности. Конструктивная схема печи и представлены на рис. 1. Для печи ББ1 имеются подробные данные натурного обследования и измерений тепловосприятия отдельных экранных труб и локальных удельных тепловых потоков на поверхности экранных труб [2].

Проведены расчёты среднезональных характеристик теплообмена в топке печи и локальных тепловых потоков по окружности экранных труб. Профили локальных удельных тепловых потоков по окружности труб наиболее нагруженных перевальной и подового экранов приведены на рис. 2.

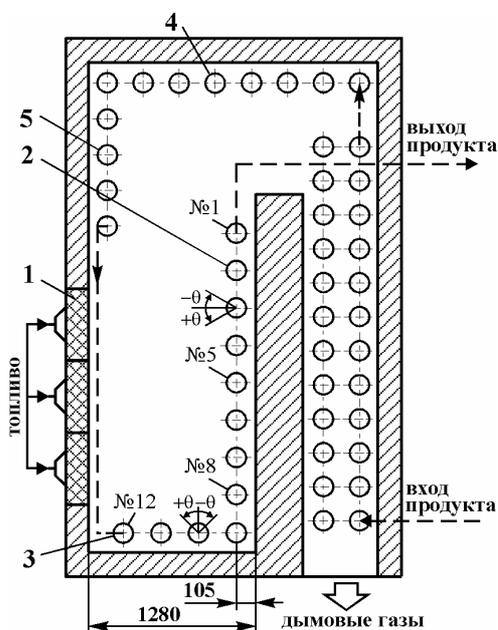


Рис.1. Конструктивная схема трубчатой печи ББ1: 1 – панельные горелки; 2 – топка; 3 – перевальный экран; 4 – подовый экран; № 1-12 – номера труб

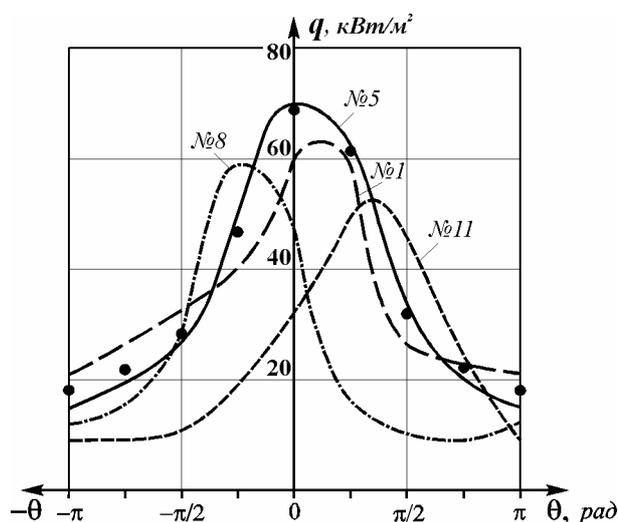


Рис.2. Локальная теплонапряжённость экранных труб по окружности: № 1, 5, 8, 11 – номера труб на рис. 1; линии – расчёт; • – эксперимент для трубы № 5 [2]

Профили локальных удельных тепловых потоков по окружности экранных труб № 1-12, указанных на рис.1, соответствуют характеру распределения лучистых тепловых потоков в топочной камере. Наибольшие тепловые потоки имеют место в лобовой части труб при  $\theta = [0, \pi/4] \cup [0, -\pi/4]$ , рад. Причём максимумы смещены в сторону излучающих горелок. Осреднённые по периметру локальные тепловые потоки соответствуют средней теплонапряжённости экранных труб. Максимальное значения коэффициента неравномерности обогрева экранных труб составляет 0,61 для трубы № 4, минимальное значение – 0,42 для трубы № 9.

Расчётные значения хорошо согласуются с экспериментальными данными по локальным удельным тепловым потокам для трубы № 5, полученными с помощью кольцевого тепломера [2]. Наибольшие отклонения (до 10%) имеют место в области относительно небольших тепловых потоков в пристенном секторе трубы  $\theta = [\pi/2, \pi] \cup [-\pi/2, -\pi]$ , что, впрочем, находится в пределах погрешности самого эксперимента.

Таким образом, разработан численный метод расчёта локальных характеристик радиационного и сложного теплообмена в рамках резольвентного зонального подхода применительно к расчёту топочных камер печей и котлов. Метод позволяет детализировать характеристики результирующего теплообмена в случае геометрически сложной, неравномерно облучаемой поверхности нагрева путём дополнительного вычисления локальных ОУК с использованием статистического моделирования излучения и соотношений взаимности.

Развитая на этой основе методика расчёта локальных тепловых потоков по периметру труб в экранированных топках паровых котлов и технологических трубчатых печей позволяет исследовать неравномерность их обогрева, а также термическое состояние стенки труб с учётом реальных конструктивных и режимных характеристик, что чрезвычайно важно для проектирования и эксплуатации этих высокотемпературных установок с большой теплонапряжённостью поверхностей нагрева.

## Литература

1. Блох, А.Г., Ю.А. Журавлёв, Л.Н. Рыжков. Теплообмен излучением. М: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
2. Седелкин В.М. Исследование и разработка методов расчёта теплообмена в трубчатых печах газовой и нефтехимической промышленности: дис. ... докт. техн. наук: 05.14.04: защищена 16.12.82: утв. 30.09.83. Саратов, 1982. 577 с.
3. Суринов Ю.А. Об итерационном зональном методе исследования и расчёта локальных характеристик лучистого теплообмена // Изв. СО АН СССР. – Сер. техн. наук. – 1971. – №13. – Вып. 3. – С. 28-36.
4. Суринов Ю.А. Обобщённый зональный метод исследования и расчёта лучистого теплообмена в поглощающей и рассеивающей среде // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1975. – №4. – С. 112-137.
5. Кулешов О.Ю., Седелкин В.М. Методика расчёта сопряжённого теплообмена в технологических трубчатых печах в рамках зонального подхода // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2011. №5-6. С. 47-54.