

УДК 536.46;536.3

МЕТОД РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕНА ИЗЛУЧЕНИЕМ В ТОПКЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ КОМПОНЕНТ СУММАРНОГО ВЕКТОРА ПОТОКА ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ. ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА

В.П. Бушланов, И.В. Бушланов

Белгородский государственный университет

E-mail: bvp@ngs.ru

На основе системы уравнений первой части статьи, получены разностные уравнения квазиодномерного метода расчета теплообмена излучением в топке котла осесимметричной конфигурации. Записаны уравнения и разностные формулы метода инженерного расчета теплообмена излучением при наличии экранной сетки около поверхности горелки. Методика пригодна для использования в инженерных расчетах при определении оптимальной конфигурации топки и определении оптимального расстояния экранной сетки до поверхности горелки.

Инженерная методика расчета

Для расчетов, не требующих высокой точности учета теплообмена излучением, желательно иметь инженерный метод расчета, который занимает меньше расчетного времени, что позволяет рассчитывать теплообмен в котле с более сложной конфигурацией за меньшее время (например, с экранной сеткой перед поверхностью горелки). Инженерный метод расчета выгодно использовать и при отработке новой конструкции котла, когда приходится проводить много оценочных расчетов [1, 2].

Для расчета теплообмена излучением в топке котла получим уравнения приближенной квазиодномерной методики на основе системы уравнений для осесимметричного котла [3]. Конфигурация осесимметричных топки и горелки, использующаяся в инженерной методике, изображена на рисунке.

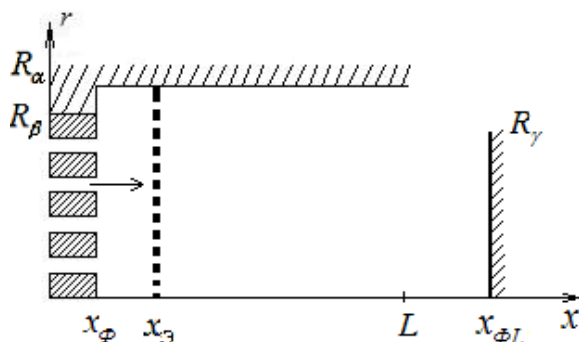


Рисунок. Схема котла в инженерной методике

где $x = x_э$ — координата экранной сетки, $x = L$ — координата конца топки. На левом торце топки радиуса $R_φ$ при $x = x_φ$ расположена пористая горелка $0 < r < R_φ$, где $R_φ < R_α$, из которой поступает однородная горючая смесь в топку. Часть левого торца $R_φ \leq r \leq R_α$ — заглушка, на которой все параметры будем снабжать нижним индексом $α0$. На правом конце топки, при $x = x_φL$, где $x_φL \geq L$, расположен торец $0 \leq r_{φL} \leq R_φ$, где $R_φ \leq R_α$. Конфигурация топки выбрана так, чтобы имелась возможность изменения параметров $R_φ$, $R_φL$, $x_φL$, L . Например, изменяя $x_φL$, можно сместить влево правый торец до $x_φL = L$ или вынести его вправо по оси x . Изменяя $R_φ$, можно менять радиус право-

го торца; изменяя радиус горелки $R_φ$, можно регулировать скорость подачи смеси, при выбранном расходе смеси. Отметим, что на основании полученных выражений для суммарного вектора потока лучистой энергии (далее СВПЛЭ) легко получить аналогичные формулы для случая, когда поверхность горелки цилиндрическая, коаксиальная цилиндрической поверхности топки.

Коэффициент поглощения $a(ω, T)$ в частном случае закона Бера [1] пропорционален парциальному давлению газа P , адсорбирующего излучение частотой $ω$. Закон Бера выполняется для давлений больше 1 атм, а поглощение существенно для паров воды, углекислого газа и частиц сажи [1]. Индуцированное излучение распространяется в направлении первоначального и имеет ту же частоту [2], что приводит к уменьшению коэффициента поглощения. Примем в инженерной методике коэффициент поглощения в газе равным некоторой средней величине в топке, а именно

$$a(ω, T) = \tilde{a}(ω, T) = a = \text{const.} \quad (1)$$

Выберем в инженерной методике функции распределения излучения по углу изотропной, тогда

$$\chi_f = \chi_{fl} = 1, \quad \chi_u = 1. \quad (2)$$

Температуру газа внутри топки будем рассчитывать как среднюю по радиальным сечениям топки величину. Параметры на правом торце будем обозначать нижним индексом $φL$. Лучистый поток с правого торца $x = x_φL$ вычислим по аналогии с вычислениями для левого торца. Интеграл по правому торцу в выражении для лучистых потоков аналогичных уравнениям (30), (32), (33) статьи [3] будет иметь такой же вид как интеграл по левому торцу, но все нижние индексы должны быть заменены на $φL$, предел интегрирования $R_α$ — заменен на $R_φL$. Температуру поверхности горелки на левом торце зададим постоянной $T_φ = \text{const}$, температуру заглушки на левом торце — $T_{α0} = \text{const}$, температуру правого торца — $T_{φL} = \text{const}$. Сначала рассмотрим случай без экранной сетки. Тогда усредняя по радиальному сечению ур. (30) статьи [3] (только компоненту F), с учетом упрощений (1)–(2) и заменяя

интегрирования суммированием, запишем указанное уравнение в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 I_k^x &= \frac{2}{R_\alpha^2} \int_0^{R_\alpha} I^x(x_k, r) r dr = \\
 &= \frac{2L}{I_L R_\alpha^2} \sum_{i=0}^{I_L} \left[\rho_{ai} \frac{(\varepsilon_{ai} \sigma T_{ai}^4 - I_{ai}^x)}{1 - \rho_{ai}} \int_0^{R_\alpha} \gamma_\alpha^{-x}(x_k - x_{ai}, x_{ai}, r) r dr \right] + \\
 &+ \frac{2}{J R_\alpha} \sum_{j=0}^{J_\beta} \left[\rho_\phi \frac{(\varepsilon_\phi \sigma T_\phi^4 - I_{\phi j}^x)}{1 - \rho_\phi} \int_0^{R_\beta} \gamma_\phi^{-x}(x_k - x_\phi, r, r_{\phi j}) r dr \right] + \\
 &+ \frac{2}{J R_\alpha} \sum_{j=0}^{J_\alpha} \left[\rho_{\alpha 0} \frac{(\varepsilon_{\alpha 0} \sigma T_{\alpha 0}^4 - I_{\alpha 0}^x)}{1 - \rho_{\alpha 0}} \int_{R_\beta}^{R_\alpha} \gamma_\phi^{-x}(x_k - x_\phi, r, r_{\phi j}) r dr \right] + \\
 &+ \frac{2}{J R_\alpha} \sum_{j=0}^{J_\beta} \left[\rho_\phi \frac{(\varepsilon_\phi \sigma T_\phi^4 - I_{\phi j}^x)}{1 - \rho_\phi} \int_0^{R_\beta} \gamma_\phi^{-x}(x_k - x_\phi, r, r_{\phi j}) r dr \right] + \\
 &+ \frac{2}{J R_\alpha} \sum_{j=0}^{J_\alpha} \left[\rho_{\alpha 0} \frac{(\varepsilon_{\alpha 0} \sigma T_{\alpha 0}^4 - I_{\alpha 0}^x)}{1 - \rho_{\alpha 0}} \int_{R_\beta}^{R_\alpha} \gamma_\phi^{-x}(x_k - x_\phi, r, r_{\phi j}) r dr \right] + \\
 &+ \frac{2L}{I_L R_\alpha^2} \sum_{i=0}^{I_{\phi L}} \left[\sigma T_i^4 \int_0^{R_\alpha} \left(\int_0^{R_\beta} \gamma_1^x(x_k - x_\phi, r, r_1) dr_1 \right) r dr \right]. \quad (3)
 \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
 T_{ai} &= T_\alpha(x_i), \quad T_i = \frac{1}{R_\alpha^2} \int_0^{R_\alpha} T(x_i, r) r dr, \\
 T_\phi &= \text{const}, \quad I_{ai}^r = I_\alpha^r(x_i), \\
 I_{\phi j}^x &= I_\phi^x(r_j), \quad I_{\phi L j}^x = I_{\phi L}^x(r_j), \quad T_{\phi L} = \text{const}, \quad T_{\alpha 0} = \text{const}, \\
 I_L &= \frac{L}{\Delta x}, \quad I_{\phi L} = \frac{x_{\phi L}}{\Delta x}, \quad J_\alpha = \frac{R_\alpha}{\Delta r}, \quad J_\beta = \frac{R_\beta}{\Delta r}, \quad J_\gamma = \frac{R_\gamma}{\Delta r}, \\
 x_0 &= x_\phi, \quad w_f = \exp(-al_f),
 \end{aligned}$$

Δx и Δr — шаги по осям x и r ,

$$l_{aik} = l(x_k, x_{ai}), \quad l_{aik}^r = l_\alpha^r(x_k, x_{ai}), \quad l_{\phi jk} = l(x_k, x_{\phi j}),$$

$$l_{\phi jk}^r = l_\phi^r(x_k, x_{\phi j}), \quad l_{\phi k} = l(x_k, x_\phi), \quad l_{ik} = l_1(x_k, x_i), \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 x_k &= \{x_k, r \cos \phi, r \sin \phi\}, \\
 \gamma_1^x(x_k - x_{1i}, r, r_1) &= \\
 &= \frac{a}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(-al_{1ik}) \frac{[r_1 - r \cos(\phi - \phi_1)](x_k - x_{1i})}{l_{1ik}^4} d\phi, \\
 x_{ai} &= \{x_i, R_\alpha \cos \phi_\alpha, R_\alpha \sin \phi_\alpha\}, \\
 x_{1i} &= \{x_i, r_1 \cos \phi_1, r_1 \sin \phi_1\}, \\
 \gamma_\phi^{-x}(x_k - x_\phi, r, r_\phi) &= \\
 &= \frac{(x_k - x_\phi)^3}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(-al_{\phi jk}) \frac{[r_{\phi j} - r \cos(\phi - \phi_\phi)]}{l_{\phi jk}^5 l_{\phi jk}^r} d\phi, \\
 \gamma_1^x(x_k - x_{1i}, r, r_1) &= \\
 &= \frac{a}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(-al_{1ik}) \frac{[r_1 - r \cos(\phi - \phi_1)](x_k - x_{1i})}{l_{1ik}} d\phi.
 \end{aligned}$$

Лучистые потоки (32)–(33) статьи [3] на стенках для выбранной конфигурации топки запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned}
 I_{\alpha k}^r &= I^r(x_k, R_\alpha) = \frac{L}{I_L} \sum_{i=0}^{I_{\phi L}} \left[\sigma T_i^4 \int_0^{R_\alpha} \gamma_1^r(x_k - x_{1i}, R_\alpha, r_1) r_1 dr_1 \right] + \\
 &+ \frac{L}{I_L} \sum_{i=0}^{I_L} \left[\rho_{ai} \frac{(\varepsilon_{ai} \sigma T_{ai}^4 - I_{ai}^r)}{1 - \rho_{ai}} \gamma_\alpha^{-r}(x_k - x_{ai}, x_{ai}, R_\alpha) \right] + \\
 &+ \frac{R_\alpha}{J_\alpha} \sum_{j=0}^{J_\beta} \rho_\phi \left[\left(\frac{\varepsilon_\phi \sigma T_\phi^4}{1 - \rho_\phi} - \frac{I_{\phi j}^x}{1 - \rho_\phi} \right) \gamma_\phi^{-r}(x_k - x_\phi, R_\alpha, r_{\phi j}) \right] + \\
 &+ \frac{R_\alpha}{J_\alpha} \sum_{j=0}^{J_\alpha} \rho_{\alpha 0} \left[\left(\frac{\varepsilon_{\alpha 0} \sigma T_{\alpha 0}^4}{1 - \rho_{\alpha 0}} - \frac{I_{\alpha 0}^x}{1 - \rho_{\alpha 0}} \right) \gamma_\phi^{-r}(x_k - x_\phi, R_\alpha, r_{\phi j}) \right] + \\
 &+ \frac{R_\alpha}{J_\alpha} \sum_{j=0}^{J_\gamma} \rho_{\phi L} \left[\left(\frac{\varepsilon_{\phi L} \sigma T_{\phi L}^4}{1 - \rho_{\phi L}} - \frac{I_{\phi L j}^x}{1 - \rho_{\phi L}} \right) \gamma_\phi^{-r}(x_k - x_{\phi L}, R_\alpha, r_{\phi L j}) \right], \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{\phi k}^x &= I^x(x_\phi, r_k) = \\
 &= \frac{L}{I} \sum_{i=0}^{I_L} \left[\rho_{ai} \frac{(\varepsilon_{ai} \sigma T_{ai}^4 - I_{ai}^r)}{1 - \rho_{ai}} \gamma_\alpha^{-x}(x_\phi - x_{ai}, x_{ai}, r_k) \right] + \\
 &+ \frac{R_\alpha}{J_\alpha} \sum_{j=0}^{J_\beta} \left[\rho_{\phi L} \frac{(\varepsilon_{\phi L} \sigma T_{\phi L}^4 - I_{\phi L j}^x)}{1 - \rho_{\phi L}} r_{\phi L j} \gamma_\phi^{-x}(x_\phi - x_{\phi L}, r_k, r_{\phi L j}) \right] + \\
 &+ \frac{L}{I} \sum_{i=0}^{I_{\phi L}} \left[\sigma T_i^4 \int_0^{R_\alpha} \gamma_1^x(x_\phi - x_{1i}, r_k, r_1) r_1 dr_1 \right], \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{\phi L k}^x &= I^x(x_{\phi L}, r_k) = \\
 &= \frac{L}{I} \sum_{i=0}^{I_L} \rho_{ai} \left[\frac{(\varepsilon_{ai} \sigma T_{ai}^4 - I_{ai}^r)}{1 - \rho_{ai}} \gamma_\alpha^{-x}(x_{\phi L} - x_{ai}, x_{ai}, r_k) \right] + \\
 &+ \frac{R_\alpha}{J_\alpha} \sum_{j=0}^{J_\beta} \rho_\phi \left[\frac{(\varepsilon_\phi \sigma T_\phi^4 - I_{\phi j}^x)}{1 - \rho_\phi} r_{\phi j} \gamma_\phi^{-x}(x_{\phi L} - x_\phi, r_k, r_{\phi j}) \right] + \\
 &+ \frac{R_\alpha}{J_\alpha} \sum_{j=0}^{J_\alpha} \left[\frac{(\varepsilon_{\alpha 0} \sigma T_{\alpha 0}^4 - I_{\alpha 0}^x)}{1 - \rho_{\alpha 0}} r_{\phi j} \gamma_\phi^{-x}(x_{\phi L} - x_\phi, r_k, r_{\phi j}) \right] - \\
 &- \frac{L}{I} \sum_{i=0}^{I_{\phi L}} \sigma T_i^4 \left[\int_0^{R_\alpha} \gamma_1^x(x_{\phi L} - x_{1i}, r_k, r_1) r_1 dr_1 \right], \quad (7)
 \end{aligned}$$

$$\text{где } \gamma_\alpha^{-r}(x - x_\alpha, x_\alpha, r) = \int_0^{2\pi} \exp(-al_\alpha) \frac{l_\alpha^3}{l_\alpha^4} \cos(\phi - \phi_\alpha) d\phi,$$

$$\begin{aligned}
 \gamma_\phi^{-r}(x - x_\phi, r, r_\phi) &= \\
 &= (x - x_\phi)^2 \times \\
 &\times \int_0^{2\pi} \exp(-al_\phi) \frac{(x - x_\phi)^2 l_\phi^r [r_\phi - r \cos(\phi - \phi_\phi)]}{l_\phi^5} d\phi, \quad (8) \\
 \gamma_1^{-r}(x - x_1, x_1, r, r_1) &= \\
 &= \int_0^{2\pi} \exp(-al_1) \frac{l_1^r}{l_1} [r_1 - r \cos(\phi - \phi_1)] d\phi.
 \end{aligned}$$

Учет экранной сетки, установленной около поверхности горелки

Иногда вблизи горелки устанавливают экранную сетку. Используя формулы (3)–(8) запишем аналогичные формулы для расчета лучистого потока в области между поверхностью горелки и экранной сеткой. Пусть L_9 — расстояние от поверхности горелки до сетки. Обычно $L_9 < 1$ см и поэтому

$L_3 \ll L_a$ – длины топки. Обозначим $L_3(x)$ лучистый поток в области $\mathcal{A} = (x_\phi \leq x \leq x_\phi + L_3, 0 \leq r \leq R_a)$ – расстояние между поверхностью горелки и экранной сеткой, а $I(x)$ – лучистый поток в остальной области топки. Формулы для потока $I_3(x)$ можно получить из формул (3)–(8), в которых нужно убрать интегралы по цилиндрической стенке, и считать $R_a = R_\beta$, $L = L_3$, $x_{\phi L} = x_\phi + L_3$, индекс ΦL заменить индексом $\Phi \mathcal{A}$. Общий поток излучения от единицы поверхности экранной сетки в область $\mathcal{A}$ будет равен

$$I_3^- = (1 - \alpha_3)(\varepsilon_3 \sigma T_3^4 + \rho_3 I_3^+) + \alpha_3 I^+, \quad (9)$$

где первое слагаемое аналогично случаю стенки без пор, а коэффициент $(1 - \alpha_3)$ учитывает тот факт, что вещество сетки занимает не всю единицу площади, а только ее часть без пор, где α_3 – пористость. Второе слагаемое равно проникающему сквозь поры потоку излучения из области топки. Аналогично общий поток от единицы поверхности экранной сетки в область топки будет равен

$$I^- = (1 - \alpha_3)(\varepsilon_3 \sigma T_3^4 + \rho_3 I^+) + \alpha_3 I_3^+. \quad (10)$$

Для суммарных потоков излучения по обе стороны экранной сетки имеем следующие уравнения:

$$I = I^- - I^+, \quad I_3 = I_3^- - I_3^+. \quad (11)$$

Из уравнений (9)–(11) получим

$$\begin{aligned} I^- &= F(I_3, I) + I, \quad I_3^- = F(I, I_3) + I_3, \\ I^+ &= F(I_3, I), \quad I_3^+ = F(I, I_3). \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} F(I_3, I) &= \frac{\varepsilon_3 \sigma T_3^4}{1 - \rho_3} - \frac{\alpha_3}{\Delta} I_3 - \frac{1 - \rho_3 (1 - \alpha_3)}{\Delta} I, \\ \Delta &= (1 - \alpha_3)(1 - \rho_3)[1 + \alpha_3 - \rho_3 (1 - \alpha_3)]. \end{aligned} \quad (13)$$

На основании формул (3)–(8) и приведенных выше рассуждений и учитывая (12) запишем в области следующую систему трех уравнений для определения x – компоненты осредненного потока излучения I_{3k} , и x – компонент потоков излучения – на поверхности горелки – $I_{\phi k}$, и на левой поверхности сетки – $I_{\phi 3k}$:

$$\begin{aligned} I_{3k}^x &= \frac{2}{R_\beta^2} \int_0^{R_\beta} I_3^x(x_k, r) r dr = \\ &= \frac{2}{J_\beta R_\beta} \sum_{j=0}^{J_\beta} \left[\rho_\phi \frac{(\varepsilon_\phi \sigma T_\phi^4 - I_{\phi j}^x)}{1 - \rho_\phi} \int_0^{R_\beta} \gamma_\phi^{-x}(x_k - x_\phi, r, r_{\phi j}) r dr \right] + \\ &\quad + \frac{2}{J_\beta R_\beta} \times \\ &\quad \times \sum_{j=0}^{J_\beta} \left[\left(\frac{\varepsilon_3 \sigma T_3^4}{1 - \rho_3} - \frac{\alpha_3 I_{\phi j}^x + [1 - \rho_3 (1 - \alpha_3)] I_{\phi j}^x}{(1 - \alpha_3)(1 - \rho_3)[1 + \alpha_3 - \rho_3 (1 - \alpha_3)]} + I_{\phi j}^x \right) \times \right. \\ &\quad \times \left. \int_0^{R_\beta} \gamma_\phi^{-x}(x_k - x_\phi - L_3, r, r_{\phi j}) r dr \right] + \\ &\quad + \frac{2L}{I_L R_\beta^2} \sum_{i=0}^{I_3} \left[\sigma T_{3i}^4 \int_0^{R_\beta} \int_0^{R_\beta} \gamma_1^x(x_k - x_{\phi i}, r, r_i) dr_i r dr \right], \end{aligned} \quad (14)$$

$$\text{где } I_{\phi 3j}^x = I_3^x(x_\phi + L_3, r_j), I_{\phi j}^x = I_3^x(x_\phi + L_3, r_j). \quad (15)$$

$$\begin{aligned} I_{\phi k}^x &= I_3^x(x_\phi, r_k) = \\ &= \frac{L}{I_L} \sum_{i=0}^{I_3} \sigma T_{3i}^4 \left[\int_0^{R_\beta} \gamma_1^x(x_\phi - x_{\phi i}, r_k, r_i) r_i dr_i \right] + \\ &\quad + \frac{R_\beta}{J_\beta} + \\ &\quad + \sum_{j=0}^{J_\beta} \left[\left(\frac{\varepsilon_3 \sigma T_3^4}{1 - \rho_3} - \frac{\alpha_3 I_{\phi 3j}^x + [1 - \rho_3 (1 - \alpha_3)] I_{\phi j}^x}{(1 - \alpha_3)(1 - \rho_3)[1 + \alpha_3 - \rho_3 (1 - \alpha_3)]} + I_{\phi 3j}^x \right) \times \right. \\ &\quad \times \left. \gamma_\phi^{-x}(x_\phi - L_3, r_k, r_j) \right] \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} I_{\phi 3k}^x &= I_3^x(x_\phi + L_3, r_k) = \\ &= \frac{R_\beta}{J_\beta} \sum_{j=0}^{J_\beta} \left[\rho_\phi \frac{(\varepsilon_\phi \sigma T_\phi^4 - I_{\phi j}^x)}{1 - \rho_\phi} r_{\phi j} \gamma_\phi^{-x}(L_3, r_k, r_{\phi j}) \right] + \\ &\quad + \frac{L}{I_L} \sum_{i=0}^{I_3} \sigma T_{3i}^4 \left[\int_0^{R_\beta} \gamma_1^x(x_\phi + L_3 - x_{\phi i}, r_k, r_i) r_i dr_i \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

Формулы расчета лучистого потока в области топки при наличии экранной сетки

Получим инженерные формулы расчета в топке, вне области также используя уравнения (3)–(8). Заменяем в указанных формулах интегралы по левому торцу $x = x_\phi$ на такого же вида интегралы по правой поверхности экранной сетки при значениях $x = x_\phi + L_3$ и учтем ур. (12) для потока излучения I . В уравнении (3) заменим четвертую сумму – лучистый поток с торца горелки на следующий лучистый поток с поверхности экранной сетки:

$$\begin{aligned} &\left[\left(\frac{\varepsilon_3 \sigma T_3^4}{1 - \rho_3} - \frac{\alpha_3 I_{\phi j}^x + [1 - \rho_3 (1 - \alpha_3)] I_{\phi 3j}^x}{(1 - \alpha_3)(1 - \rho_3)[1 + \alpha_3 - \rho_3 (1 - \alpha_3)]} + I_{\phi j}^x \right) \times \right. \\ &\quad \times \left. \int_0^{R_\beta} \gamma_\phi^{-x}(x_k - x_\phi - L_3, r, r_{\phi j}) r dr \right] \end{aligned} \quad (18)$$

где $K = 2/J_\beta R_\beta$. В ур. (5) третью сумму – лучистый поток с левого торца (горелки) заменим лучистым потоком с поверхности экранной сетки:

$$\begin{aligned} &\left[\left(\frac{\varepsilon_3 \sigma T_3^4}{1 - \rho_3} - \frac{\alpha_3 I_{\phi j}^x + [1 - \rho_3 (1 - \alpha_3)] I_{\phi 3j}^x}{(1 - \alpha_3)(1 - \rho_3)[1 + \alpha_3 - \rho_3 (1 - \alpha_3)]} + I_{\phi j}^x \right) \times \right. \\ &\quad \times \left. \gamma_\phi^{-x}(x_k - x_\phi - L_3, R_a, r_{\phi j}) \right] \end{aligned} \quad (19)$$

где $M = R_a/J_\beta$. В ур. (6) для лучистого потока на экранной сетке в последней сумме заменим координату x_ϕ координатой $x_\phi + L_3$, после этого указанная сумма примет следующий вид:

$$\frac{L}{I_L} \sum_{i=0}^{I_{\phi k}} \sigma T_{3i}^4 \left[\int_0^{R_a} \gamma_1^x(x_\phi + L_3 - x_{\phi i}, r_k, r_i) r_i dr_i \right].$$

В ур. (7) вторую сумму для лучистого потока на поверхности горелки заменим аналогичной суммой для лучистого потока с правой поверхности экранной сетки, а координату x_ϕ координатой $x_\phi + L_\phi$, после этого указанную сумму запишем следующим образом:

$$\frac{R_\alpha}{J_\alpha} \sum_{j=0}^{J_\alpha} \left[\frac{\varepsilon_\phi \sigma T_\phi^4}{1 - \rho_\phi} - \frac{\alpha_\phi I_{\phi j}^x + [1 - \rho_\phi (1 - \alpha_\phi)] F_{\phi \phi j}^x}{(1 - \alpha_\phi)(1 - \rho_\phi)[1 + \alpha_\phi - \rho_\phi(1 - \alpha_\phi)]} + I_{\phi j}^x \right] \times \\ \times r_{\phi j} \gamma_\phi^x (x_{\phi L} - x_\phi - L_\phi, r_k, r_{\phi j})$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эккерт Э.Р. Теория тепло и массообмена. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. — 680 с.
2. Зигель Р., Хауэл Дж. Теплообмен излучением. — М.: Мир, 1975. — 934 с.
3. Бушланов В.П., Бушланов И.В. Метод расчета теплообмена излучением в топке осесимметричной конфигурации на осно-

Выводы

На примере приближенной инженерной квазиодномерной методики расчета излучения показан способ построения формул для вычисления суммарного вектора потока лучистой энергии на основе уравнений (30)–(33) статьи [3]. Уравнения инженерного метода с предложенной конфигурацией топки пригодны для оптимизации размеров топки и горелки; добавляется правый торец; или ставится экранная сетка перед поверхностью горелки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований — грант РФФИ 06-08-00357-а.

ве уравнений для компонент суммарного вектора потока лучистой энергии. Система уравнений // Известия Томского политехнического университета. — 2007. — Т. 311. — № 4. — С. 20–23.

Поступила 9.07.2007 г.

УДК 536.46+533.2

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ГОРЕНИЯ ПРИ УТИЛИЗАЦИИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ КОКСУЮЩИХСЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

А.Н. Субботин

Томский политехнический университет
E-mail: subbot@inbox.ru

Рассмотрена двумерная осесимметричная нестационарная математическая модель взаимодействия высокотемпературного потока газообразного окислителя с пористым твердым коксующимся топливом. Исследовано влияние параметров вдуваемого газа-окислителя, влагосодержания и пористости горючего на формирование режимов физико-химических превращений и распространение в виде волны горения. Получено, что с помощью предложенной модели можно моделировать высоко-, низкотемпературный режимы горения и режим тления.

Введение

Тепломассообменные процессы при физико-химических превращениях в пористом твердом горючем несут основную ответственность за образование в продуктах сгорания токсичных веществ, выбрасываемых в атмосферу (например, при утилизации отходов [1, 2], при низовых и подземных пожарах [3, 4]). Наиболее рациональным и экологически выгодным инструментом при решении практически важных задач является разработка и численное экспериментирование с физически обоснованными математическими моделями [2–6]. Одна из наиболее развитых в этом плане моделей рассмотрена в [6], однако ее одномерность не позволяет проанализировать радиальную составляющую исследуемых характеристик тепломассопереноса. В связи с этим применение двумерной осесимметричной нестационарной модели является обоснованным.

В данной работе, на примере утилизации отходов деревообработки в вертикальном цилиндрическом реакторе заданных размеров, представлены результаты компьютерного моделирования высокотемпературных процессов тепломассопереноса при физико-химических превращениях в пористых коксующихся материалах.

Физико-математическая модель

Рассматривается пористое топливо (отходы деревообработки) помещенное в расположенную вертикально цилиндрическую печь, высота слоя топлива h , радиус основания R . После загрузки начинается продувка печи высокотемпературным газовым потоком. Предполагается, что стенка печи металлическая, тонкая, температура стенки равна температуре соприкасающегося со стенкой топлива, так как теплопроводность стали значительно выше теплопроводности топлива.