

УДК 661.181.7

А.А. Тринченко, асп. каф. РиПГС

ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ КАРТИНЫ ТЕЧЕНИЙ В НТВ–ТОПКЕ

Исследования работы котла ПК-24 ИТЭЦ-10 и БКЗ-420-140-9 УИТЭЦ на дробленом топливе показали, что схема ЛПИ-ИТЭЦ-10 обладает существенными преимуществами, прежде всего связанными с приемлемыми экологическими показателями [1]. Положительные результаты, достигнутые на котле ПК-24, в значительной степени снижаются вследствие двух основных недостатков, а именно: высокого значения $q_4^{yh}=3...6\%$ и локального износа труб фронтального экрана в нижней вихревой зоне. Оба эти недостатка в той или иной мере связаны с закономерностями движения твердой фазы в топочной камере. Выявление таких закономерностей должно позволить найти пути решения выше названных проблем.

Движение твердой фазы в топочной камере промышленного котлоагрегата определяется как аэродинамикой всей топочной камеры в целом, так и аэродинамикой ее отдельных зон. Вид поля скоростей газового потока в значительной степени влияет на условия воспламенения и выгорания топлива, на теплообмен между горящими частицами топлива и потоком газа, на теплопередачу от факела к ограждающим топку поверхностям нагрева. В настоящее время практически все мощные паровые котлы сжигают твердое топливо в пылевидном состоянии, что позволяет рассматривать движение только газовых потоков с равномерно распределенной в них твердой мелкодисперсной фазой, имеющей малую объемную концентрацию ($\mu < 10^{-4}$). В этом случае считается, что траектории частиц совпадают с траекториями газовых потоков, и наличие второй фазы учитывается увеличением плотности газового потока. Однако такой подход оказывается неприемлемым при расчете аэродинамики низкотемпературных вихревых (НТВ) топков, в которых траектории частиц топлива пересекают друг друга и не совпадают с траекториями (линиями тока) газового потока, и фракционный состав топлива определяет вид течения в нижней вихревой зоне (НВЗ). Сложность аэродинамической картины течений в НТВ-топке не позволяет описать ее с помощью существующих методик.

Таблица 1. Характеристики струи нижнего дутья

Наименование	Обозначение	Для настильного режима
Изменение максимальной относительной скорости вдоль оси струи	$\ln \bar{W}_m$	$-0,142(\ln \bar{W}_m)^{0,546}$
Координата максимума скорости	Y_{Wm}/b_0	$0,16x-2,9$
Полутолщина наружной части струи	$(Y_{0,5Wm}^{нар} - Y_{Wm})/b_0$	$0,14x-1,5$
Полутолщина внутренней части струи	$(Y_{0,5Wm}^{вн} - Y_{Wm})/b_0$	$0,11x-2,5$
Общая толщина восходящего потока НВЗ	$\bar{\delta}$	$0,43x-1,3$
Профиль скорости наружной части полуограниченной струи НД (теория Прандтля-Шлихтинга)	$\frac{\bar{w}_{нар}}{\bar{W}_m} = \left[1 - \left(\frac{Y - Y_{Wm}}{Y^H - Y_{Wm}} \right)^{3/2} \right]^2$	
Внутренняя часть струи НД	$\frac{\bar{w}_{вн}}{\bar{W}_m} = 1 - 0,5 \left(\frac{Y - Y_{Wm}}{Y_{0,5Wm} - Y_{Wm}} \right)^{2,3}$	

В настоящей работе предпринята попытка разработки приближенной методики расчета аэродинамической картины течения в НТВ-топочной камере без учета влияния твердой фазы. При разработке методики принималась плоская картина течения. Такое допущение вполне допустимо, т.к. нижнее дутье расположено по всей ширине топочной камеры, а горелки котла ПК-24 занимают более 85 % фронта котла. Для решения задачи НТВ-топка разбивалась на ряд характерных зон (рис. 1), каждая из которых может быть описана своими закономерностями движения аэродинамических потоков: например, зона развития полуограниченной струи нижнего дутья (НД), зона движения системы горелочных струй в сносном потоке НД, зона осесимметричного вихря НВЗ и т.д. Далее приводятся расчетные зависимости для описания течения в характерных зонах.

I - Зона струи нижнего дутья. Будем рассматривать полуограниченную струю НД. Для расчета используем зависимости (см. табл. 1), полученные Шестаковым С.М. и Усиком Б.В. [1] для случая настильного режима течения при исследованиях горячей аэродинамики топки котла ПК-24.

II – Нижняя вихревая зона - НВЗ. Примем для ее расчета модель квазитвердого тела: $\omega R = \text{const}$.

III – Зону развития горелочной струи будем рассматривать как систему плоских струй в сносном потоке, траектория оси которых (для прямоугольных сопел с соотношением сторон $H/b_0 > 30$, H – высота щели) в декартовой системе координат описывается уравнением [2]:

$$\frac{a \cdot y}{b_0} = 1,9 \cdot \left(\frac{\rho_c \cdot (273 / T_c) \cdot W_c^2}{\rho_0 \cdot (273 / T_0) \cdot W_0^2} \right) \cdot \left(\frac{a \cdot x}{b_0} \right)^{2,5} + \frac{a \cdot x}{b_0} \cdot \text{ctg} \alpha \quad (1)$$

где: a – коэффициент, характеризующий структуру струи, ее начальную турбулентность и неравномерность поля скоростей на выходе из сопла (при равномерном поле на выходе из сопла $a=0,10 \dots 0,12$); ρ_0 и ρ_c – соответственно плотность струи и сносного потока; w_0 и w_c – начальные скорости струи и сносного потока; b_0 – ширина щели; x – расстояние по оси струи от среза сопла; α – угол атаки. Уравнение (1) справедливо при $45^\circ \leq \alpha \leq 135^\circ$, и при $0,0025 \leq \rho_c \cdot W_c^2 / \rho_0 \cdot W_0^2 \leq 0,08$.

Относительная дальнобойность системы плоских струй оценивалась по формуле:

$$\frac{al}{b_0} = k_2 \frac{W_0}{W_n} \sqrt{\frac{\rho_0 \cdot (273 / T_0)}{\rho_n \cdot (273 / T_n)}} \quad (2)$$

где: $k_2=1,2$ при $\alpha=90^\circ$, $k_2=1,1$ при $\alpha=60$ и 120° .

IV – Верхняя вихревая зона (ВВЗ). Модель квазитвердого тела: $\omega R = \text{const}$.

V – Вихревая зона под верхним козырьком. Модель квазитвердого тела: $\omega R = \text{const}$.

Расчет прочих характеристик струи (таких как толщина внешней по отношению к набегающему потоку части струи, толщина внутренней половины струи, скорость на оси и на границе струи и др.) проводился по зависимостям, рекомендованным в [3]; они здесь не приводятся.

Для анализа развития горелочной струи в сносном потоке, проведена серия расчетов при различных температурах, плотностях и скоростях истечения струи и сносного потока. На рис. 2 для примера показаны расчетные траектория и границы горелочной струи котла ПК-24 при следующих началь-

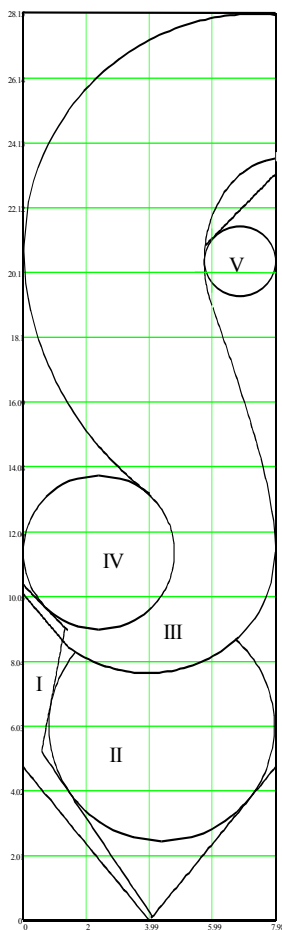


Рис. 1. Зоны течения потоков в НТВ-топочной камере котла ПК-24 ИТЭЦ-10:

- I – струя нижнего дутья;
- II – нижняя вихревая зона;
- III – горелочная струя;
- IV – верхняя вихревая зона;
- V – вихрь под верхним козырьком.

ных условиях: $T_0 = 635 \text{ K}$, $W_0 = 15 \text{ м/с}$, ($b_0 = 0,15$); $T_{\text{п}} = 1700 \text{ K}$. Вариантные расчеты показали, что с увеличением начальной скорости струи, ее дальность повышается, (дальность так же повышается при уменьшении скорости сносящего потока); увеличение температуры набегающего потока (или уменьшение плотности) или уменьшение начальной температуры струи (увеличение плотности), при прочих равных условиях приводят к увеличению дальности струй. При увеличении скорости истечения возрастает протяженность начального участка струи. Далее скорость по оси струи уменьшается и становится равной скорости сносящего потока.

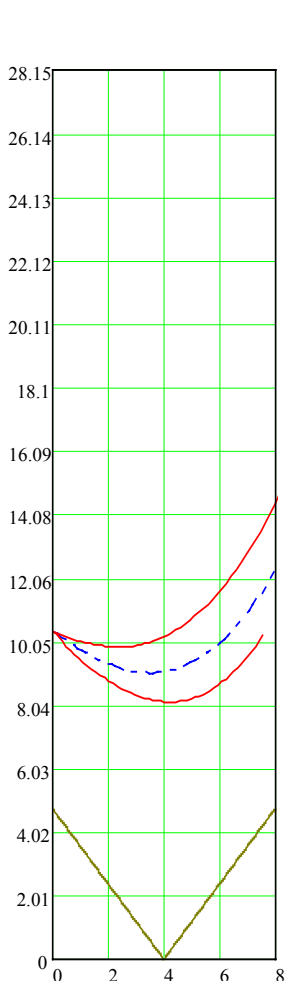


Рис. 2. Горелочная струя котла ПК-24 в сносящем потоке при $T_0=635 \text{ K}$, $W_0=15 \text{ м/с}$, ($b_0=0,15$).

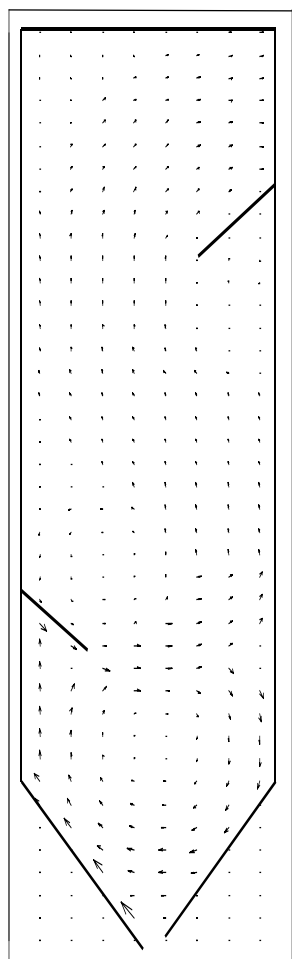


Рис. 3. Расчетное поле скорости в НТВ-топке котла ПК-24 ИТЭЦ-10:
 $W_{\text{гор}} = 15 \text{ м/с}$,
 $W_{\text{нд}} = 50 \text{ м/с}$.

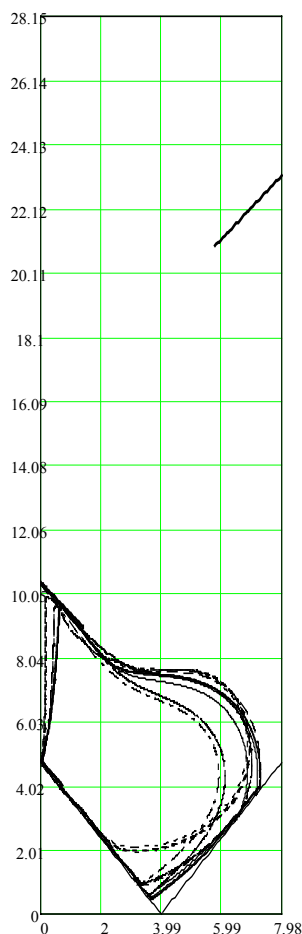


Рис. 4. Расчетные траектории движения не реагирующих шаровых частиц в нижней вихревой зоне топке котла ПК-24 ИТЭЦ-10:
 - $\delta_1 = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}$;
 ---- - $\delta_2 = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$;
 ——— - $\delta_3 = 6,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$;
 - · - · - · - $\delta_4 = 8,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}$;
 $\rho_{\text{частиц}} = 1200 \text{ кг/м}^3$;
 $\tau_{\text{дв}} = 10 \text{ с}$.

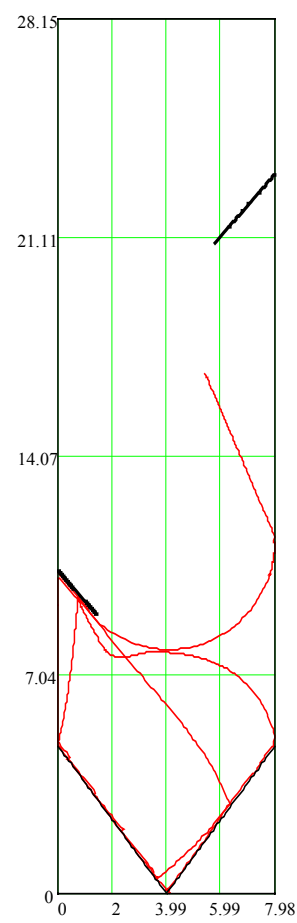


Рис. 5. Расчетная траектория движения реагирующей частицы ($\delta = 1,297 \cdot 10^{-3} \text{ м}$) до полного сгорания в НТВ топке котла ПК-24 ИТЭЦ-10.

По изложенной методике составлен алгоритм и программа расчета, проведены ее отладка, тестирование и расчеты, которые позволили получить поле скоростей в НТВ-топке котла ПК-24 (рис.3).

Для апробации методики произведены расчеты траекторий движения частиц путем численного решения уравнения движения, записанного в декартовой системе координат:

$$\left. \begin{aligned} m \frac{dv_x}{d\tau} &= \frac{cf\rho_g}{2} (w_x - v_x) \sqrt{(w_x - v_x)^2 + (w_y - v_y)^2} \\ m \frac{dv_y}{d\tau} &= \frac{cf\rho_g}{2} (w_y - v_y) \sqrt{(w_x - v_x)^2 + (w_y - v_y)^2} + mg \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где: v и w - скорость частицы и газового потока; $c = f(\text{Re}) / 2$; m , f – соответственно масса и площадь миделева сечения частицы; ρ_g – плотность газового потока.

Расчеты проводились для следующих начальных скоростей горелочной струи и струи НД: $W_{\text{гор}} = 15$ м/с, $W_{\text{нд}} = 50$ м/с.

В результате расчета получены траектории движения как не реагирующих (рис. 4) так и горящих частиц топлива (рис. 5) в заданном поле концентраций газовых компонентов (O_2 , CO_2 , H_2O) и температуры.

Следующим этапом работы будет расчет количества оксидов азота, разлагающихся в НТВ-топке по реакции:



для выявления путей повышения экологических показателей НТВ-топочных камер.

Разработанная методика позволяет провести расчеты:

1. Сепарации частиц в первичной (разворот горелочной струи вдоль заднего экрана) и вторичной (аэродинамические козырьки) зонах сепарации для снижения величины механического недожога топлива.

2. Горения частиц твердого топлива с целью оптимизации топочного процесса и уменьшению вредных выбросов в атмосферу.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Шестаков С.М. Низкотемпературная вихревая технология сжигания дробленого топлива в котлах как метод защиты окружающей среды: Автореф. дис... докт. техн. наук / СПбГТУ.-СПб., 1999.– 40 с.
2. Основы практической теории горения: Учеб. пособие для вузов / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др.; Под ред. В.В. Померанцева. 2-е изд., перераб. и доп. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние. 1986. - 312 с.
3. Теория турбулентных струй / Абрамович Г.Н., Гиршович Т.А., Крашенинников С.Ю., Секундов А.Н., Смирнов И.П. Изд. 2-е, переработ. и доп. / Под ред. Г.Н. Абрамовича. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1984. - 716 с.