

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ

Г.Ф. Кузнецов

Рассмотрены свойства смеси, состоящей из твердых частиц и газа и находящейся в псевдоожигенном состоянии. Анализ движения составляющих смеси компонентов и тепловых потоков позволил оценить их влияние на теплообмен и выявить наиболее опасные точки, в которых возможен перегрев.

Для сжигания и газификации дробленых углей в настоящее время все чаще применяется псевдоожигенный слой, в котором, как показали исследования [1], возникают циркуляционные ячейки и их отдельные точки могут быть подвержены шлакованию. Очевидно, что в сложных явлениях взаимодействия потока газа и твердых частиц, существенными являются как гидродинамические, так и тепловые процессы.

Для их анализа запишем следующее выражение для потока тепла

$$Q = 2\pi c \rho \Delta T \int_0^R v \cdot r dr,$$

где  $c$  – удельная теплоемкость вещества;  $\rho$  – его плотность;  $\Delta T$  – температурный напор;  $v$  – осевая скорость течения;  $R$  – радиус ячейки.

Псевдоожигенный слой представляет смесь твердых частиц и газа, которые существенно отличаются по физическим свойствам и, соответственно с этим, полный поток тепла складывается из потоков, переносимых частицами и газом по отдельности. Скорость течения газа в ячейке  $v_1$  определяется формулой Пуазейля,

$$v_1 = \frac{\Delta P}{4\eta \ell} (R^2 - r^2), \quad 0 \leq r \leq R,$$

где  $\Delta P$  – перепад давления на длине;  $\eta$  – вязкость газа в слое;  $\ell$  – длина ячейки.

Тогда можно определить поток тепла

$$Q = \frac{\kappa_1 2\pi c_1 \rho \Delta T \Delta P R^4}{16\eta \ell}, \quad (1)$$

$$\kappa = m_1 / m_2.$$

Входящий в формулу (1)  $\kappa$  показывает весовую долю расхода газа в псевдоожигенном слое к весовой доле движущихся в направлении газа частиц (подстрочный индекс «1» относится к газу, «2» – к частицам). Последнюю можно ориентировочно оценить. Найдем скорость отдельных частиц, пользуясь динамическим уравнением и считая частицы квазикруглыми с радиусом  $r_0$ .

$$\frac{4}{3} \pi r_0^3 \rho_2 \frac{dv_2}{dt} = -\frac{4}{3} \pi r_0^3 g (\rho_2 - \rho_1) + 6\pi \eta r_0 (v_1 - v_2).$$

В этом уравнении первое слагаемое в правой части равенства – сила веса с учетом выталкивающей архимедовой силы, второе – сила сопротивления трения.

Решение этого уравнения имеет вид:

$$v_2 = (v_1 - \tau g \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2}) (1 - e^{-t/\tau}),$$

$$\text{где } \tau = \frac{2 \pi r_0^2}{9 \eta}; \quad v_1 = \frac{\Delta P}{4\pi \ell} (R^2 - r^2).$$

Это решение удовлетворяет начальному условию: в момент  $t = 0$ , скорость частицы также равна нулю. Потом происходит подъем слоя и слой находится в псевдоожигенном состоянии. Оно возникает при  $t \rightarrow \infty$  и тем быстрее, чем меньше время релаксации  $\tau$ . Последняя величина естественным образом зависит от плотности частиц  $\rho_2$ , их радиуса  $r_0$  и вязкости газа  $\eta$ .

Следовательно, в развигом псевдооживленном слое

$$v_2 = v_1 - \tau g \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2}.$$

Увеличение частиц потоком возможно лишь при условии

$$\tau g - \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} < v_1,$$

откуда следует, что градиент давления должен удовлетворять неравенству

$$\frac{\Delta P}{\ell} > \frac{\pi \rho_2 r_0^2 g}{18(R^2 - r^2)} \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \cong \frac{\pi \rho_2 r_0^2 g}{18(R^2 - r^2)}, \text{ так как } \rho_2 \gg \rho_1.$$

Исходя из очевидных соображений, можно оценить радиус, на котором частицы размера  $r_0$  не двигаются в направлении газа

$$R - r = \frac{\pi \rho_2 r_0^2 g \ell}{18 \Delta P (R + r)}.$$

Частиц, которые двигаются в обратном по отношению к скорости газа направлении, немного. Весовая их доля существенно меньше половины всех частиц слоя.

Определим тепловой поток, переносимый частицами.

$$Q_2 = \left( \frac{\kappa_2 2\pi c_2 \rho_2 \Delta T R^4}{\eta} \right) \cdot \left[ \frac{1}{16} \frac{\Delta P}{\ell} - \frac{g}{9} \frac{r_0^2}{R^2} (\rho_2 - \rho_1) \right]; \quad \kappa_2 = \frac{m_2}{m_1},$$

где  $m_2$  – весовой расход всех частиц, движущихся в направлении газового потока.

Полный поток тепла определяется суммой потоков, переносимых частицами и газом.

Очевидно, вторым слагаемым в квадратных скобках можно пренебречь, так как оно пропорционально силе тяжести, уменьшенной в  $r_0^2 / R^2$  раза, а первое слагаемое пропорционально перепаду давления на псевдооживленном слое. Как известно [2], сила тяжести слоя уравновешивается перепадом давления на нем, когда слой находится в псевдооживленном состоянии.

Поэтому отношение тепловых потоков, переносимых в псевдооживленном слое частицами и газом, примерно равно отношению

$$\frac{Q_2}{Q_1} \cong \frac{\kappa_2 c_2 \rho_2}{\kappa_1 c_1 \rho_1}.$$

Для реальных условий предтопка  $\kappa_2$  и  $\kappa_1$  сравнимы, как  $c_1$  и  $c_2$  ( $c_1 \sim 1000$  Дж/кг·К,  $c_2 \sim 600$  Дж/кг·К), но  $\rho_2$  больше  $\rho_1$  более чем на три порядка, поэтому тепловой поток в слое будет переноситься в основном частицами.

Проделанный анализ находит практическое применение. Тепловыделение в слое происходит равномерно по его площади, в основном, в прирешеточной зоне. Там же наиболее вероятно возникновение очагов шлакования, которые возникают в тех точках слоя, где теплоотвод ухудшен.

Анализ гидродинамики [1] показывает, что в отдельных точках циркуляционных ячеек скорости могут быть существенно меньше средних (примерно на 30 %). В результате в этих точках существенно ухудшен теплообмен, хотя тепловыделение, которое зависит в основном от равномерности подвода воздуха, примерно одинаковое. Таким образом, учитывая проделанный анализ, отметим, что наиболее опасные точки слоя с позиций возникновения перегрева и начала шлакования находятся в нижней части псевдооживленного слоя на периферии циркуляционных ячеек, что соответствует проведенным экспериментальным исследованиям.

В качестве вывода отметим, что для существенного повышения надежности работы сжигающих устройств, необходимо изменить гидродинамику таким образом, чтобы слой был одинаково подвижен во всех областях и особенно там, где выделяется наиболее количество тепла. Использование закрученного движения газового потока и частиц твердого топлива существенно повышает надежность работы сжигающих устройств.

### Литература

1. Торопов Е.В., Кузнецов Г.Ф., Елюхина И.В. Исследование и идентификация неустойчивых тепломассообменных процессов в кипящем слое // *Труды Минского Международного форума ММФ*. – 1996. – С. 105–111.
2. Псевдооживление. Под ред. И.Ф. Девидсона, Д. Харрисона. – М.: Химия, 1974.