УДК 682.765

СЖИГАНИЕ НИЗКОСОРТНЫХ ТОПЛИВ И БИОМАССЫ В ПУЛЬСИРУЮЩЕМ СЛОЕ

Докт. техн. наук, проф. БОКУН И. А.

Белорусский национальный технический университет

В настоящее время для сжигания различных топлив, в том числе и биомассы, широко используется псевдоожиженный слой, в котором все процессы протекают значительно интенсивнее, чем в неподвижном слое или камерных топках с факельным сжиганием. При этом нужно отметить, что применение псевдоожиженного слоя в топочной технике при сжигании некоторых видов низкосортного топлива, в том числе и биомассы, сопровождается значительными трудностями. В слое возникает разделение смеси, что значительно усложняет эксплуатацию топочных устройств. При увеличении нагрузки скорость фильтрации также повышается, что способствует увеличению уноса, а при снижении нагрузки крупные частицы оседают на решетке, что ведет к ее шлакованию и образованию агломератов.

Для устранения перечисленных недостатков разрабатываются различные методы сжигания. Вместо равномерного стационарного нижнего дутья под решетку подается пульсирующий (прерывистый) поток. При этом необходимо предусмотреть возможность осуществления работы топки как с равномерным, так и пульсирующим дутьем. Благодаря такому мероприятию значительно расширяется область регулирования нагрузки.

При сжигании топлив с низкой температурой плавления золы и с целью предотвращения уноса, а также уменьшения разделения смеси топлива целесообразно работать с трапециевидным, расширенным кверху слоем.

Отличительной особенностью котлов со сжиганием биомассы и других видов твердых топлив в пульсирующем слое следует считать:

- более интенсивное перемешивание горящего слоя;
- сглаженные поля температур по сечению слоя;
- интенсификацию процесса тепло- и массообмена.

Основой горения топлива в пульсирующем слое является химическое реагирование горючих веществ, содержащихся в топливе, с кислородом воздуха. В пульсирующем слое вследствие продувания его прерывистым восходящим потоком воздуха со скоростью, достаточной для придания слою движения, твердое топливо периодически находится во взвешенном, падающем и неподвижном состояниях. Такой характер взаимодействия топлива с воздухом оказывает влияние как на особенность газодинамических процессов в слое, так и на характер физико-химического взаимодействия окислителя с твердым топливом. Процесс горения твердого топлива в пульсирующем слое состоит из следующих этапов: подвода кислорода к поверхности топлива турбулентной молекулярной диффузией, химической реакции между топливом и кислородом. При сжигании топлива в пульсирующем слое концентрация кислорода по всей поверхности частицы

Репозиторий БНТУ

одинаковая; скорость реагирования кислорода с углеродом пропорциональна концентрации кислорода у поверхности частицы топлива; реакция протекает на поверхности частицы с образованием конечных продуктов сгорания. Поэтому можно допустить, что скорость горения зависит от скорости подвода кислорода к межфазовой поверхности и от скорости самой химической реакции. В результате взаимодействия этих процессов наступает равновесное состояние, при котором количество доставляемого и расходуемого на химическое реагирование кислорода становится одинаковым, т. е. когда в стехиометрическом равенстве реагирующие вещества участвуют одинаковым числом молекул, а в результате реакции возникает такое же одинаковое число молекул в виде продуктов реакции и, следовательно (в случае сохранения одного и того же фазового состояния), реакция идет без изменения объема [1]

$$A_1 + B_1 \rightleftarrows A_2 + B_2.$$

Скорости прямой и обратной реакций будут равны:

$$W_1 = k_1 C_{A_1} C_{B_1};$$

$$W_2 = k_2 C_{A_2} C_{B_2},$$

где C_{A_1} (C_{A_2}), C_{B_1} (C_{B_2}) – концентрация (число молекул в единице объема) реагирующих веществ в стехиометрической смеси; k_1 и k_2 – константы скоростей прямой и обратной реакций, определяемые по закону Аррениуса.

Рассмотрим процесс массообмена частицы топлива, окруженной окислителем, концентрация которого изменяется по закону

$$C(0,\tau) = C_0 + C_m \cos \omega\tau, \tag{1}$$

где C_0 – начальная концентрация окислителя; C_m – амплитуда пульсации концентрации окислителя; ω – круговая частота пульсации; τ – время.

Считая, что процесс изменения концентрации окислителя в частице топлива, находящейся в пульсирующем слое, происходит в соответствии с распространением температуры в шаре при периодическом ее изменении на поверхности, характер взаимодействия кислорода с шаровой частицей опишется уравнением [2]

$$\frac{dC(r,\tau)}{d\tau} = D\left[\frac{d^2C(r,\tau)}{dr^2} + \frac{2}{r}\frac{dC(r,\tau)}{dr}\right], \tag{2}$$

где D – коэффициент диффузии; r – текущий радиус.

Решение задачи при граничных условиях:

$$C(R,0) = C_0; \tag{3}$$

$$\frac{dC(0,\tau)}{d\tau} = 0; \tag{4}$$

$$\frac{dC(r,\tau)}{d\tau} = \frac{\alpha_m}{D}\left(C_0 + C_m \cos \omega\tau - C(r,\tau)\right) \tag{5}$$

Репозиторий БНТУ

приведено в [2] и имеет вид

$$\frac{C(r,\tau)-C_0}{C_m}=\frac{1}{2}\ N_i\exp(iP_{dm}F_{om})-N_{-i}\exp(-iPd_mF_{om})\ -$$
$$-\sum_{i=1}^{\infty}\frac{M_n^{y}}{M_n^{y}+Pd_m}A_n\frac{R\sin M_n\dfrac{r}{R}}{RM_n}\exp(-M_n^2F_{om}), \tag{6}$$

где $F_{om}=\dfrac{a_m\tau}{R^2}$ – массообменный критерий Фурье;

$$N_i=\frac{RBi_m\mathrm{sh}\sqrt{-iP_{dm}}\dfrac{r}{R}}{r\left[(Bi_m-1)\mathrm{sh}\sqrt{iP_{dm}}+\sqrt{iP_{dm}}\mathrm{ch}\sqrt{iP_{dm}}\right]}; \tag{7}$$

$$N_{-i}=\frac{RBi_m\mathrm{sh}\sqrt{-iP_{dm}}\dfrac{r}{R}}{r\left[(Bi_m-1)\mathrm{sh}\sqrt{-iP_{dm}}+\sqrt{-iP_{dm}}\mathrm{ch}\sqrt{-iP_{dm}}\right]}; \tag{8}$$

$P_{dm}=\dfrac{\omega R^2}{D}$ – массообменный критерий Предводителева; $B_{im}=\dfrac{a_mR}{D}$ – массообменный критерий Био; a_m – коэффициент массообмена между частицей и газом; R – начальный радиус частицы; ω – круговая частота; M_n – корни характеристических уравнений;

$$A_n=(-1)^{n+1}\frac{Bi_m\sqrt{M_n^2+(Bi_m-1)}}{M_n^2+Bi_m^2-Bi_m}.$$

Таким образом, из уравнения (6) видно, что концентрация кислорода в частице топлива является периодической функцией времени, зависящей от частоты пульсаций потока окислителя.

Как было отмечено ранее, для сжигания растительной биомассы, древесных отходов, торфа целесообразно применить метод низкочастотного пульсирующего слоя, образующегося в результате воздействия кратковременных прерывистых газодинамических импульсов с силой, достаточной для придания слою движения. Такое состояние наступает при условии [3]

$$\frac{\Delta p}{h_0}=150\frac{(1-\varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^3}\frac{\mu w_0}{d^2}+1{,}75\frac{(1-\varepsilon_0)}{\varepsilon_0^3}\frac{\rho_r w_0^2}{d_э}\geq(\rho_m-\rho_r)(1-\varepsilon_0), \tag{9}$$

где Δp – сопротивление слоя; h_0 – высота неподвижного слоя; $d_э$ – эквивалентный диаметр частиц топлива; w – скорость фильтрации; ρ_m, ρ_r – плотность топлива и газа; μ – коэффициент вязкости; ε_0 – порозность неподвижного слоя.

Репозиторий БНТУ

Первое слагаемое в левой части (9) отражает потери давления за счет трения, а второе – за счет динамического воздействия.

Прерывистая подача в слой дисперсного материала газодинамических импульсов – принципиальная основа пульсирующего слоя. Характерными особенностями таких импульсов являются амплитуда давления, форма и продолжительность пульсаций.

Газодинамический процесс в активной фазе, когда сквозь каналы, образованные частицами топлива, фильтруется газ, может быть описан системой уравнений [4]:

$$-\frac{dp}{dx} = p_r\left(\frac{dw}{d\tau} + 2\alpha w\right); \tag{10}$$

$$-\frac{dp}{d\tau} = p_r c^2 \frac{dw}{dx},$$

при условиях:

$$\begin{aligned} &\tau > 0; \quad w = w(\tau); \\ &\tau < 0; \quad w = 0; \\ &\tau > 0; \quad p = \Delta p; \\ &\tau < 0; \quad p = 0, \end{aligned} \tag{11}$$

где $x = h - h_0$ – расширение слоя; h – высота расширенного слоя; α – условный коэффициент линейного трения; $c = \sqrt{\dfrac{\bar{p}_0}{(\rho_1\varepsilon_1 + \rho_2\varepsilon_2)\varepsilon_1}}$ – скорость звука в слое зернистого материала [5]; $\bar{p}_0$ – давление газа в невозмущенном слое; ρ_1 – плотность газа; ρ_2 – плотность частиц; ε_1, ε_2 – объемная доля газа и частиц соответственно.

Анализ уравнений (10) и (11) позволяет допустить, что характер изменения давления на фронте импульса в системе «пульсатор – промежуточная зона – слой» будет равен [6]

$$\Delta p_{\text{ср}} = \Delta p_0\left[1 - \exp\left(-\frac{t_\phi}{t}\right)\right], \tag{12}$$

где t_ϕ – продолжительность фронта импульса; $t = \lambda_э c$ – постоянная времени заполнения объема «пульсатор – слой»; $\lambda_э$ – коэффициент гидравлического сопротивления [7].

Особенностью котельных установок с псевдоожиженными и пульсирующими слоями является ведение процесса сжигания топлива при температурах, не превышающих 750–900 °С, что способствует снижению оксидов азота в отходящих дымовых газах. Такой предел температурного уровня обеспечивается за счет размещения в слое поверхностей нагрева и интенсивного теплообмена между горящим слоем и поверхностью нагрева.

Репозиторий БНТУ

В процессе сжигания топлива в пульсирующем слое происходит интенсивное выделение летучих веществ, которые, не успев сгореть в слое, поступают в надслоевое пространство, где происходит их дожигание за счет вторичного дутья [8].

На рис. 1 представлена камера сгорания с пульсирующим слоем [8]. В камере сгорания 1 на газораспределительной решетке 2 размещен слой топлива 3. Над этим слоем смонтированы встречно направленные короба 4 встречного воздуха. Подрешеточное пространство 5 связано воздухом с пульсатором 7, имеющим поворотную лопасть 8. Короба 4 вторичного воздуха также связаны своим воздуховодом 9 с пульсатором. На стенках камеры, а также в слое 3 размещены топливопринимающие поверхности нагрева 10.

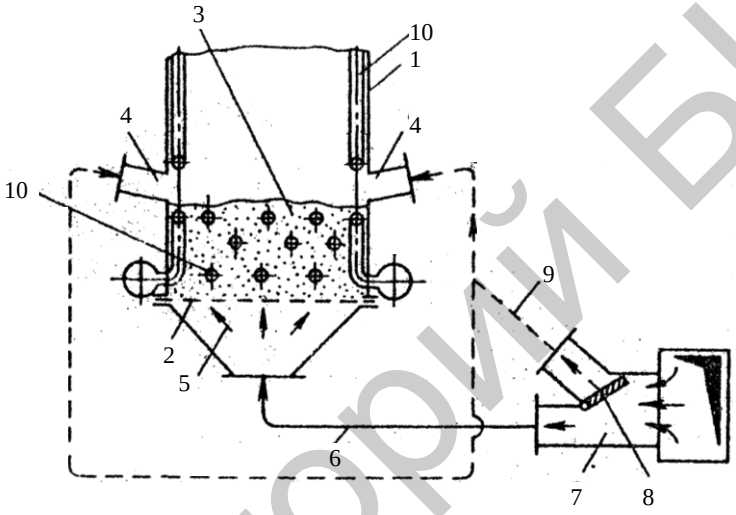

Рис. 1

Процесс сжигания топлива в пульсирующем слое осуществляется следующим образом. Воздух перед подачей в слой 3 разделяют на два потока, идущих по воздуховодам 6 и 9, и поочередными прерывистыми порциями вводят в слой 3. Затем поток, идущий по воздуховоду 6 (первичный воздух), вводят в слой снизу со скоростью, достаточной для придания слою движения, а другой поток воздуха (вторичный), идущий по воздуховоду 9, дополнительно делят на части и вводят в надслоевое пространство боковыми встречно направленными струями из коробов.

Пульсация топлива осуществляется следующим образом. При размещении поворотной лопасти пульсатора, например в верхнем положении, первичный воздух по воздуховоду 6 попадает под слой 3 горящего твердого топлива вместе с золой или инертным материалом и приводит его во взвешенное состояние. Затем поворотную лопасть переводят в нижнее положение и осуществляют подачу вторичного воздуха встречно направленными струями в псевдоожиженный слой горящего топлива, что предотвращает недожог летучих веществ при небольших коэффициентах избытка воздуха, подаваемого в топочное устройство. Возможность снижения коэффициента избытка воздуха также повышает эффективность работы топочного устройства.

Репозиторий БНТУ

Затем при очередном повороте лопасти пульсатора вверх осуществляется горение топлива при его вертикальном перемешивании. Отвод теплоты из слоя 3 и из камеры происходит с помощью теплообменных поверхностей, выполненных в виде труб, по которым прокачивается вода. При этом в указанных теплообменных поверхностях осуществляется генерирование водяного пара. Предусмотрена также работа пульсатора в таком режиме, когда поворотная лопасть не доходит до его крайнего положения (нижнего или верхнего). Таким образом, при повороте лопасти вниз и пульсирующей подаче вторичного воздуха через встречно направленные короба осуществляется также подача первичного воздуха под слой 3 горячего топлива (например, в количестве 10–20 % от общего расхода воздуха). При этом повышается эффективность сжигания топлива, так как предотвращается затухание топлива в прирешеточной зоне, а в слое под коробами в это время образуются зоны с повышенной температурой, в которой и происходит газификация частиц твердого топлива. Продукты газификации эффективно сгорают в надслоевой зоне действия встречно направленных импульсных струй встречного воздуха.

В Ы В О Д Ы

1. Предложена модель горения низкосортных топлив и твердой растительной биомассы в пульсирующем слое.

2. Показаны преимущества сжигания топлива в пульсирующем слое.

3. Предложена конструкция топочного устройства для сжигания низкосортных топлив и твердой растительной биомассы в пульсирующем слое.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. К н о р р е, Г. Ф. Топочные процессы / Г. Ф. Кнорре. – М.: ГЭИ, 1959. – 396 с.

2. Л ы к о в, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 600 с.

3. E r g u n, S. Ind. Eng. Chem / S. Ergun. – 1949. – Vol. 41. – P. 1179–1184.

4. Ч а р н ы й, И. А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах / И. А. Чарный. – М.: Недра, 1975.

5. О с т р о в с к и й, Г. М. Псевдоожижение порошкообразных материалов при колебательном изменении давления газа / Г. М. Островский // ТОХТ. – 1997. – Т. 31, № 1. – С. 5–10.

6. Б о к у н, И. А. Особенности протекания газодинамических процессов в пульсирующем слое / И. А. Бокун, В. И. Чернышевич // Энергетика… (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2009. – № 1. – С. 68–73.

7. З а б р о д с к и й, С. С. Гидродинамика и теплообмен в псевдоожиженном (кипящем) слое / С. С. Забродский. – М.; Л.: ГЭИ, 1963. – С. 488.

8. С п о с о б ы сжигания топлива в кипящем слое: а. с. № 1511527 БИ 1989, № 36 / И. А. Бокун, В. М. Богданов.

Представлена кафедрой экономики
и организации энергетики

Поступила 30.05.2013

Репозиторий БНТУ