

## ГАЗИФИКАЦИЯ НИЗКОСОРТНЫХ ТОПЛИВ В ПУЛЬСИРУЮЩЕМ СЛОЕ

Докт. техн. наук, проф. БОКУН И. А., канд. техн. наук, доц. ЧЕРНЫШЕВИЧ В. И.

*Белорусский национальный технический университет*

Газификация твердого топлива – одна из старейших технологий, обеспечивающих повышение эффективности топливоиспользования. Цель газификации низкосортных топлив состоит в превращении их в горючий генераторный газ посредством окисления воздухом (кислородом, водяным паром) и последующего его использования для получения как энергии, так и химического сырья.

Преимущества предварительной газификации низкосортных топлив по сравнению с прямым сжиганием состоят в следующем: удаление сернистых соединений из газа проще, чем очистка продуктов сгорания от оксидов серы, так как масса генераторного газа меньше, чем продуктов сгорания; наличие балластных компонентов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ) снижает его взрывоопасность; максимальная температура горения генераторного газа на несколько сот градусов ниже максимальной температуры горения природного газа, что способствует снижению образования концентрации азота; образовавшаяся крупнодисперсная зола может служить товарной продукцией.

К настоящему времени известно много разработанных различных технологий газификации топлив. Наиболее широкое распространение получили технологии газификации в неподвижном слое (метод Лурги), в псевдооживленном слое (метод Винклера), в потоке (метод Копперс-Тотцека) и др. [1].

Оптимальным вариантом метода газификации твердых топлив можно считать применение технологий газификации в псевдооживленном слое, в котором газифицируется топливо с зольностью свыше 30 % и обеспечивается 100%-е превращение органической части топлива в химическую энергию горючего газа. Процесс газификации низкосортных топлив протекает устойчиво в псевдооживленном слое при малых концентрациях (около 10 %) горючих веществ, что позволяет газифицировать дешевые высокозольные топлива.

Однако не все виды топлива могут легко переходить в состояние псевдооживления, так как в слое могут образовываться каналы, через которые уходит окислитель, не вступая в контакт со слоем, ухудшается перемешивание слоя.

Кроме того, в процессе псевдооживления некоторых видов слоя могут образовываться спеченные агломераты, что интенсифицирует процесс шлакования и нарушает режим газификации и псевдооживления. Поэтому в настоящее время с целью повышения энергетического КПД, а также интенсификации процессов газификации и повышения производительности газогенераторов технологии газификации топлив постоянно совершенствуются. Среди сравнительно новых технологий воздушной газификации твердого топлива заслуживает внимания процесс газификации пылевидно-

го топлива в пульсирующем потоке [1], в котором создаются колебания газового столба, содержащего угольную пыль, и приводит к возникновению больших относительных скоростей газа и твердых частиц. В результате создаются благоприятные условия для ускоренного подвода реакционных газов к поверхности частиц твердого топлива, улучшаются тепло- и массообмен, что позволяет интенсифицировать процесс газификации. Однако этот метод характеризуется такими недостатками, как неравномерность подачи аэросмеси, неудачная работа аэродинамических клапанов и др.

К новым процессам газификации твердого топлива можно отнести процесс газификации в пульсирующем слое [2]. На рис. 1 представлена схема газогенератора с пульсирующим слоем.

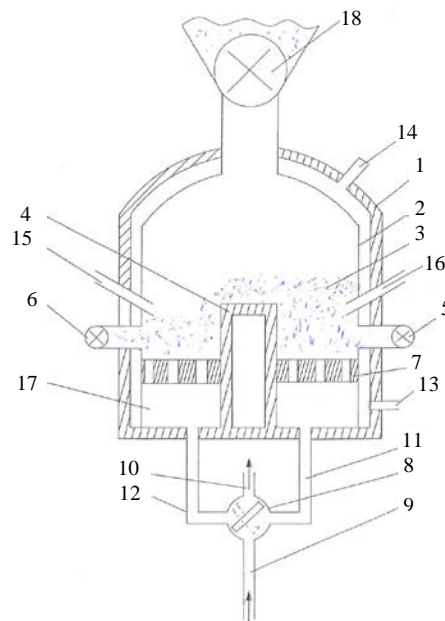


Рис. 1. Газогенератор с пульсирующим слоем

Газогенератор включает в себя: наружный 1 и внутренний 2 корпуса; пульсирующий слой 3; водоохлаждаемую разделительную перегородку 4; золоотводящие трубопроводы 5 и 6; газораспределительную решетку 7; пульсатор 8; трубопровод 9 подвода воздуха, трубопровод 10 отвода газа, трубопроводы 11 и 12, поочередно служащие для подвода воздуха и отвода газа; штуцеры подвода 13, и отвода 14 воды; горелки 15 и 16 для розжига, подрешеточную камеру 17, устройство 18 для подачи топлива. Полость 7 разделительной перегородки подключается к штуцеру подвода воды 13 и отвода воды 14.

Газогенератор работает следующим образом. После включения пульсатора подают в одну из частей подрешеточной камеры воздух со скоростью, достаточной для придания слою кипения, включают устройство подачи топлива и подают его в камеру газификации на слой, размещенный на газораспределительной решетке, после чего включаются горелки, с помощью штуцера 13 подают воду в водоохлаждаемую рубашку, образованную корпусами, а также в полость разделительной перегородки.

Образующийся в слое и надслоевом пространстве газ благодаря разделительной перегородке изменяет направление движения и проходит через неподвижную часть слоя, газораспределительную решетку, подрешеточную камеру, трубопроводы, пульсатор, трубопровод для отвода газа. Вода из водоохлаждаемого пространства отводится с помощью штуцера 14.

Преимущество рассматриваемого газогенератора состоит в следующем: благодаря разделению подрешеточной камеры, газораспределительной решетки, нижней части камеры газификации разделительной перегородкой обеспечивается чередование изменения подвода воздуха в слой и отвода газа, вследствие чего интенсифицируется перемешивание зернистого материала в одной из частей слоя, так как при каждом цикле происходит чередование состояний: взвешенный слой, подающий, неподвижный, а во второй части камеры газификации слой остается неподвижным, и благодаря этому в нем происходит очистка газа от пыли при его фильтрации через неподвижный слой. Кроме того, и при обратном дутье протекают процессы газификации. Поочередное изменение состояний слоя и режима дутья – прямое и обратное – предотвращает образование агломератов, каналов и интенсифицирует процессы тепло- и массообмена в слое, а также переводит в состояние движения даже плохосыпучие материалы.

При рассмотрении эффективности процесса газификации твердого топлива в пульсирующем слое необходимо учитывать влияние пульсации на гидродинамический характер взаимодействия газового потока со слоем, тепло- и массообмен в нем и на особенности протекания химических реакций газообразования.

Для организации пульсирующего состояния слоя зернистого материала требуется периодический обмен энергией между газовым потоком и частями слоя.

Энергия прерывистого потока газа затрачивается на преодоление трения частиц друг с другом, на трение слоя со стенкой аппарата, на трение газового потока со слоем зернистого материала, на изменение кинетической энергии газа и расширение слоя. Эти составляющие суммарной затраты энергии неравноценны. По-видимому, наибольшей является затрата энергии на преодоление трения газа о поверхность частиц.

Общая затрата энергии газового потока в единицу времени составит

$$E = \int_{\Delta p} w F dp, \quad (1)$$

где  $\Delta p$  – перепад давления на элементарном участке в направлении движения газового потока;  $F$  – площадь поперечного сечения слоя;  $w$  – скорость газового потока.

Для пульсирующего слоя при восходящем прерывистом движении газа через слой твердых частиц перепад давления  $\Delta p_v$  с увеличением скорости газа растет и достигает максимума, при котором гидравлическое сопротивление становится равным весу твердых частиц, приходящихся на единицу площади поперечного сечения. Дальнейшее повышение скорости вызывает перемещение частиц слоя, и сопротивление слоя почти не изменяется, оставаясь меньшей, чем для псевдооживленного слоя.

Течение пульсирующего прерывистого потока газа через слой зернистого материала при прямоугольной форме пульсации рассматривается как периодически возникающие гидравлические удары на участке пульсатор – слой, тогда неустановившееся движение газа в активной фазе опишем уравнением [3]

$$\frac{\partial^2 p}{\partial h^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \tau^2} + \frac{2a}{c^2} \frac{\partial p}{\partial \tau}, \quad (2)$$

где  $p$  – давление газового потока;  $h$  – высота слоя;  $a$  – коэффициент, учитывающий трение потока газа о слой;  $c$  – критическая скорость звука в слое зернистого материала [4],

$$c = \sqrt{\frac{k}{k+1} gh_0}, \quad (3)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести;  $k$  – показатель адиабаты;  $h_0$  – высота неподвижного слоя.

Рассматривая уравнение (2), можно выделить несколько случаев, которые отличаются характером течения газа через слой.

1. Пульсатор только открылся:  $\tau_1 = 0$ ;  $p(h_0) = p_{\max}$ .

В этом случае зависимость (2) будет представлять волновое уравнение с множителем  $1/c^2$ . Допустим, что волна давления совпадает с направлением движения газа, тогда давление перед слоем снизится на величину  $\rho c w$  и будет равно

$$p_1 = p_{\max} - \rho c w. \quad (4)$$

Максимальное давление перед слоем в момент перехода во взвешенное состояние может быть определено из уравнения Эргана [6]

$$p_{\max} = (\rho_m - \rho_g)(1 - \varepsilon_0) gh_0. \quad (5)$$

2. Слой перешел во взвешенное состояние, но еще осуществляется фильтрация газа в течение какого-то времени  $\tau_2$ .

Учитывая силы трения и пренебрегая влиянием инерционного слагаемого со множителем  $1/c^2$ , получим, что давление перед слоем описывается уравнением

$$p_2 = p_1 \left( 1 - \operatorname{erf}_i \frac{h\sqrt{a}}{2c\sqrt{\tau_2}} \right). \quad (6)$$

3. Пульсатор закрыт, подача газа в слой отсутствует.

Изменение давления газа перед слоем можно представить в виде

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = -\alpha p, \quad (7)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий упругость газа, находящегося в объеме слоя, определяемый экспериментальным путем.

Решение уравнения (7) при  $p = p_2$ ;  $\tau = \tau_3$  будет иметь вид

$$p_3 = p_2 \exp(-\alpha\tau_3). \quad (8)$$

Считая, что каждый из рассмотренных выше случаев начинается при  $\tau = 0$ , суммируем их значения за цикл и получим

$$\Delta p_{n \max} = \frac{p_1\tau_1 + p_2\tau_2 + p_3\tau_3}{\sum \tau}. \quad (9)$$

Таким образом, усредненное сопротивление слоя в активной фазе зависит от режима пульсаций и определяется экспериментальным путем. Тогда

$$\Delta p_{n \max} = [(\rho_2 - \rho_1)(1 - \varepsilon_0)gh_0 - \rho_1 c w][1 - \exp(-0,8 - f\theta)], \quad (10)$$

где  $\theta$  – волновой коэффициент;  $f$  – частота пульсаций.

Сопротивление неподвижного слоя продуваемого сверху вниз пульсирующим потоком газа определяется по (5).

Гидравлическое сопротивление неподвижного слоя при продувании его сверху вниз потоком газа определяем по формуле [5, 7]

$$\Delta p_{nc} = f_3 \frac{h}{d_{\text{эг}}} \rho w^2, \quad (11)$$

где  $h$  – высота слоя;  $\rho$  – плотность газа;  $w = \frac{w_\phi}{\varepsilon_0}$  – средняя скорость фильтрации потока в промежутках между частицами;  $w_\phi$  – скорость фильтрации (скорость потока перед входом в слой);  $\varepsilon_0$  – порозность плотного слоя;

$d_{\text{эг}} = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon_0}{(1 - \varepsilon_0)} \varphi_1 d_3$  – эффективный гидравлический диаметр каналов, образованных частицами;  $d_3$  – диаметр частиц;  $\varphi_1 = \sqrt{0,205F / V^{2/3}}$  – коэффициент формы частицы;  $F$  – поверхность частицы;  $V$  – объем частицы;  $f_3$  – коэффициент сопротивления.

Для  $Re_3 < 4$  величина  $f_3 = \frac{34}{Re_3}$ , а для  $4 < Re_3 < 80$

$$f_3 = \frac{27,8}{Re_3} + 0,8, \quad (12)$$

где  $Re_3 = \frac{w d_{\text{эг}}}{\nu}$ ,  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости газа.

Таким образом, полное гидравлическое сопротивление слоя газифицируемого топлива

$$\Delta P_\Sigma = \Delta P_{n \max} + \Delta P_{nc}. \quad (13)$$

Пульсации давления и скорости газового потока вызывают также пульсации межфазового коэффициента теплообмена. Тогда среднее значение коэффициента

$$\alpha_{\text{пср}} = \frac{\alpha_a \tau_a + \alpha_{\text{ма}} \tau_{\text{ма}}}{\tau_a + \tau_{\text{ма}}}, \quad (14)$$

где  $\alpha_a$  – коэффициент межфазового теплообмена в активной фазе цикла, т. е. во время продувания слоя снизу вверх;  $\alpha_{ма}$  – коэффициент межфазового теплообмена в неподвижном слое в малоактивной фазе цикла, т. е. во время продувания неподвижного слоя сверху вниз;  $\tau_a$ ,  $\tau_{ма}$  – длительность активной и малоактивной фаз цикла.

Коэффициент теплообмена в активной фазе цикла может быть определен по формуле, используемой для псевдооживленного слоя [8]:

$$Nu = 1,25 \cdot 10^{-3} Re_3^{1,46}, \quad (15)$$

где  $Nu = \frac{\alpha d}{\lambda_r}$  – критерий Нуссельта;  $\alpha_{эф}$  – эффективный коэффициент межфазового теплообмена;  $d$  – диаметр частиц;  $\lambda_r$  – коэффициент теплопроводности газа.

Для определения коэффициента теплообмена между потоком газа и неподвижным слоем, продуваемым сверху вниз, можно использовать эмпирическую зависимость [9]:

$$Nu = 0,123 Re_3^{0,83} \text{ при } Re_3 \text{ от } 50 \text{ до } 2000. \quad (16)$$

## ВЫВОДЫ

1. Приведено описание газогенератора с пульсирующим слоем.
2. Показаны некоторые гидродинамические и теплообменные особенности процессов, протекающих в газогенераторе пульсирующего слоя.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Альтшулер, В. С. Новые процессы газификации твердого топлива / В. С. Альтшулер. – М.: Недра, 1976 – 279 с.
2. Газогенератор: пат. 12910 от 24.11.2009 / И. А. Бокун.
3. Чарный, И. А. Основы газовой динамики / И. А. Чарный. – М.: Гостоптехиздат, 1961. – 199 с.
4. Торгге, С. Die Theorie des Fließbettes. – Ostern Ing. Z 1964. Bd. 7. № 5.
5. Жаворонков, Н. М. Гидравлические основы скрубберного процесса и теплопередача в скрубберах / Н. М. Жаворонков. – М.: Советская наука, 1944.
6. Ergun S., Orning A.A. // Ing. Eng. Chem. – 1949. – Vol. 41. – P. 1179.
7. Ergun S. Fluid flow through packed columns / S. Ergun // Chem. Eng. Progr., 1952. – Vol. 48, № 2. – P. 89–94.
8. Забродский, С. С. Гидродинамика и теплообмен в псевдооживленном слое / С. С. Забродский. – М.; Л.: ГЭИ, 1963. – С. 488.
9. Чечеткин, А. В. Высокотемпературные теплоносители / А. В. Чечеткин. – М.: ГЭИ, 1957.

Представлена кафедрой экономики  
и организации энергетики

Поступила 14.12.2010