

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН В ПРОЦЕССЕ СУШКИ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ В ПУЛЬСИРУЮЩЕМ СЛОЕ

Докт. техн. наук, проф. БОКУН И. А.

Белорусский национальный технический университет

В настоящее время использование древесных отходов (опилок) с целью производства тепловой и электрической энергии является актуальным для многих стран. Для переработки древесных отходов эффективной является технология с псевдооживленным слоем, в котором твердые частицы, омываемые газовым потоком, находятся во взвешенном состоянии. Такая технология обеспечивает высокую эффективность теплообмена.

При производстве пеллет одним из основных этапов является сушка древесных опилок, которую с успехом можно реализовать в установках с пульсирующим слоем, при прерывистой подаче воздуха [1]. В низкочастотном пульсирующем слое происходит чередование состояний слоя взвешенного, падающего и неподвижного. Прерывистая подача воздуха при определенных среднесинтервальных скоростях фильтрации изменяет укладку частиц. Исследование выполнено по результатам данных, полученных в [1–6].

При сушке древесных опилок в пульсирующем слое основное количество теплоты подводится от поверхности нагрева, размещенной в слое. Чередование состояний слоя при прерывистой подаче воздуха вызывает пульсацию коэффициента теплообмена. Поэтому в низкочастотном пульсирующем слое отчетливо проявляются активные и малоактивные стадии теплообмена. Контакт взвешенного и падающего слоев с поверхностью нагрева считается активной стадией, а контакт неподвижного слоя и воздушного пузыря (возникающего во взвешенном слое) с поверхностью нагрева – малоактивной стадией. Такой характер контакта пульсирующего слоя с поверхностью нагрева позволяет представить величину суммарного коэффициента теплообмена между пульсирующим слоем и поверхностью нагрева в виде

$$\alpha_{\text{сп}} = \alpha_a \frac{\tau_a}{\tau} + \alpha_{\text{ма}} \frac{\tau_{\text{ма}}}{\tau}. \quad (1)$$

Таким образом, в пульсирующем слое наглядно проявляется большее разнообразие малоактивных стадий в процессе теплообмена слоя с поверхностью нагрева, чем в псевдооживленном слое. Однако следует отметить, что даже в псевдооживленном слое величина $\alpha_{\text{спмакс}}$ достигается не при $\tau_{\text{ма}} \rightarrow 0$, а при числах псевдооживления $N > 1$, когда $\tau_{\text{ма}} \gg 0$. Кроме того, кратковременный импульсный контакт неподвижного слоя с поверхностью нагрева интенсифицирует теплообмен. В пульсирующем слое перемешивание твердых частиц происходит за счет импульсных газовых струй, газовых поршней, но в основном – за счет изменения состояния слоя. Это позволяет допустить, что в активной стадии механизм теплообмена имеет

сходство с механизмом теплообмена в псевдооживленном слое, и тогда коэффициент теплообмена можно описать зависимостью [2]

$$\alpha_{ст} = c_M \rho_M v_M (1 - \varepsilon) \left[1 - \exp \left(- \frac{1,2 \lambda r}{\delta_c c_M \rho_M v_M (1 - \varepsilon)^{1/3}} \right) \right]. \quad (2)$$

Максимальная величина коэффициента теплообмена между пульсирующим слоем и поверхностью нагрева в активной стадии может быть определена по полуэмпирической формуле С. С. Забродского [2]

$$\alpha_{max} = 35,8 \rho_M^{0,2} \lambda_r^{0,6} d^{-0,36}. \quad (3)$$

В малоактивной стадии, когда слой неподвижный и процесс теплообмена осуществляется в основном теплопроводностью насыпи, $\alpha_{ст}$ опишем зависимостью [3]

$$\alpha_{ст} = \sqrt{\frac{\lambda_3 c_{сп} \rho_{сп}}{\pi \tau_{ма}}}. \quad (4)$$

Эффективную теплопроводность λ_3 неподвижного слоя определим по [4]

$$\lg \frac{\lambda_3}{\lambda_r} = \left(0,28 - 0,751 \lg \varepsilon - 0,0571 \lg \frac{\lambda_r}{\lambda_r} \right) \lg \frac{\lambda_r}{\lambda_r}. \quad (5)$$

Опыты по изучению теплообмена между поверхностью и пульсирующим слоем были проведены на установке, выполненной из стекла с внутренним диаметром 57 мм и высотой 1500 мм. Коэффициент теплообмена между поверхностью нагрева и слоем определялся по известной методике [5].

На рис. 1 представлен характер изменения коэффициента теплоотдачи между пульсирующим слоем древесных опилок и поверхностью нагрева в зависимости от скорости фильтрации.

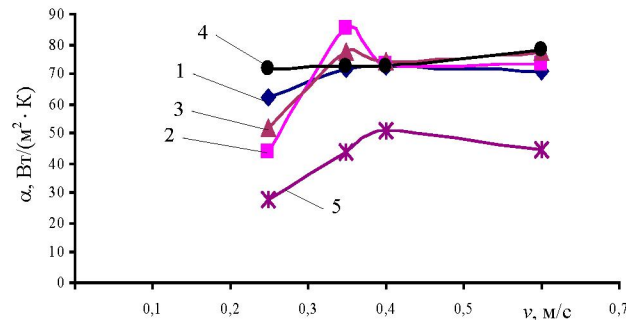


Рис. 1. Изменение коэффициента теплообмена между поверхностью нагрева и слоем древесных опилок в зависимости от скорости фильтрации и частоты пульсации: 1 – 2,0 Гц; 2 – 1,5; 3 – 1,0; 4 – 0,5 Гц; 5 – без псевдооживления

Как показали опыты (рис. 1), при потоке в диапазоне скоростей фильтрации 0,25–0,35 м/с слой оставался неподвижным, в то время как при пульсирующей подаче слой опилок приходил в состояние движения в виде

поршней, пронизываемых воздушными каналами. При этом в малоактивной стадии, когда поток газа отсутствовал, слой оседал, поршни и каналы разрушались. При каждой последующей подаче воздуха образовывались новые поршни и каналы, что способствовало перемешиванию слоя. В диапазоне скоростей фильтрации 0,4–0,6 м/с при стационарном воздушном потоке слой опилок также оставался неподвижным, но при этом около нагревателя образовывался воздушный канал, содержащий отрывающиеся от стенки канала частицы, поэтому на рис. 1 видно увеличение коэффициента теплообмена.

Подвод теплоты для сушки в пульсирующем слое от поверхностей нагрева интенсифицирует не только процесс теплообмена, но и снижает электризацию частиц опилок, что уменьшает взрывоопасность слоя.

Следует привести некоторые гидродинамические характеристики пульсирующего слоя древесных опилок. В табл. 1 представлены результаты приближенных измерений расширения слоя, гидравлического сопротивления слоя при различных частотах пульсации потока воздуха. Расширение слоя определялось визуально с помощью масштабной линейки, закрепленной на цилиндрической колонне. При измерении средней величины сопротивления пульсирующего слоя колебания мениска u-образного водяного манометра были устранены пережимом соединительной трубки.

Таблица 1

Гидродинамика слоя древесных опилок ($H_0 = 220$ мм; $d_s = 2$ мм)

Скорость фильтрации, м/с	Частота пульсации, Гц	Максимальная высота расширения слоя, мм	Сопротивление слоя, мм Н ₂ О	Примечание
0,25	б/п	220	25	Слой неподвижен
	2,0	230	25	Слаборасширенный слой (поршневой режим)
	1,5	235	25	То же
	1,0	240	24	То же
	0,5	260	24	Пульсирующий слой (поршневой режим)
0,35	б/п	225	24	Слой неподвижен
	2,0	310	24	Пульсирующий слой (пронизан каналами)
	1,5	330	24	То же
	1,0	350	24	То же
	0,5	400	24	Пульсирующий слой (расширенный поршень)
0,4	б/п	230	26	Слой неподвижен
	2,0	260	24	Пульсирующий слой (расширенный поршень)
	1,5	280	24	То же
	1,0	320	24	То же
	0,5	400	24	То же
0,6	б/п	240	28	Слой неподвижен (пронизан каналами)
	2,0	500	28	Пульсирующий слой (поршневой режим)

	1,5	600	27	То же
	0,5	700	27	То же

Из табл. 1 видно, что максимальное расширение слоя возрастает с понижением частоты пульсации. Это связано с тем, что за время между импульсами в малоактивной стадии происходит накопление энергии в системе «воздуходувка – пульсатор».

Средняя величина накопленной энергии за цикл ($\tau_a + \tau_{ма}$)

$$W_3 = P_0 (\tau_a + \tau_{ма}). \quad (6)$$

Эта энергия реализуется в очень короткое время активной стадии в виде кратковременного импульса τ_n мощностью

$$P_n = \frac{W_3}{\tau_n} = \frac{P_0 (\tau_a + \tau_{ма})}{\tau_n}. \quad (7)$$

Условные обозначения: c_m – теплоемкость опилок; v_m – нормальная скорость движения частиц к поверхности; ρ_m – плотность зернистого материала; ε – порозность слоя; λ_r – теплопроводность газа; λ_m – то же зернистого материала; λ_3 – эквивалентная теплопроводность неподвижного слоя; α – коэффициент теплообмена между поверхностью нагрева и слоем; τ_a – длительность активной стадии; $\tau_{ма}$ – длительность малоактивной стадии; d – диаметр частиц.

ВЫВОДЫ

1. Проведенные эксперименты показали, что в пульсирующем слое процесс теплообмена значительно интенсифицируется.
2. Пульсирующая (прерывистая) подача воздуха в слой древесных опилок интенсифицирует их движение и перемешивание.

ЛИТЕРАТУРА

1. Любошиц, И. Л. Применение кипящего слоя для глубокой сушки увлажненных полимерных материалов и сырья древопластики / И. Л. Любошиц, Л. С. Слободкин, В. И. Каспер // Тепло- и массообмен в сушильных и термических процессах. – Минск: Наука и техника, 1966. – С. 107–115.
2. Забродский, С. С. Гидродинамика и теплообмен в псевдооживленном слое / С. С. Забродский. – М.: ГЭИ, 1963. – 487 с.
3. Аэров, М. Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем / М. Э. Аэров, О. М. Тодес. – Л.: Химия, 1963.
4. Krupiczka, R. Int. Chem. Eng. / R. Krupiczka. – 1967. – Vol. 7, № 1. – P. 122.
5. Антонишин, Н. В. Теплообмен поверхности, погруженной в развитый неоднородный псевдооживленный слой / Н. В. Антонишин, С. С. Забродский // ИФЖ. – 1963. – № 11. – С. 97–104.

Представлена кафедрой экономики
и организации энергетики

Поступила 04.11.2010