

**Теплообмен между поверхностью нагрева и пульсирующим слоем  
древесных опилок**

Докт. техн. наук, проф. Бокун И.А.

Белорусский национальный технический университет (БНТУ)

По мнению специалистов к 2040 году общее потребление энергии в мире достигнет 13,5 млрд. т. н. э. (100%), при этом вклад всех возобновляемых источников энергии составит 6,44 млрд. т. н. э. (47,7%), из которых биомасса может составить 3,21 млрд. т. н. э. (23,6%) [1]. В настоящее время одним из перспективных направлений использования биомассы в энергетике является производство пеллет (горючих брикетов), древесной щепы (для прямого сжигания), газификация и пиролиз (биогаз, метанол), биодизельного топлива, биоводорода. При производстве пеллет одним из основных этапов является сушка древесных опилок. Сушку древесных опилок можно с успехом осуществлять в установках с пульсирующим слоем, при прерывистой подаче воздуха, так как при продувании слоя древесных опилок стационарным потоком воздуха даже при больших скоростях фильтрации из-за образования каналов слой не псевдоожижается [6]. В низкочастотном пульсирующем слое происходит чередование состояний слоя взвешенного, падающего и неподвижного. Прерывистая подача воздуха при определённых среднеинтервальных скоростях фильтрации изменяет укладку частиц.

При сушке древесных опилок в пульсирующем слое основное количество тепла подводится поверхности нагрева размещённой в слое. Чередование состояний слоя при прерывистой подаче воздуха вызывает пульсацию коэффициента теплообмена. Поэтому в низкочастотном пульсирующем слое отчётливо проявляются активные и малоактивные стадии теплообмена. Контакт взвешенного и падающего слоёв 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:

$$\alpha_{cmn} = \alpha_a \frac{\tau_a}{\tau} + \alpha_{ma} \frac{\tau_{ma}}{\tau}, \quad (1)$$

Таким образом в пульсирующем слое наглядно проявляется большее разнообразие малоактивных стадий в процессе теплообмена слоя с поверхностью нагрева, чем в псевдооживленном слое. Но следует отметить, что даже в псевдооживленном слое величина  $\alpha_{cm\max}$  достигается не при  $\tau_{ma} \rightarrow 0$ , а при числах псевдооживления  $N > 1$ , когда  $\tau_{ma} \gg 0$ . Кроме того кратковременный импульсный контакт неподвижного слоя с поверхностью нагрева интенсифицирует теплообмен. В пульсирующем слое перемешивание твёрдых частиц происходит за счёт импульсных газовых струй, газовых поршней, но в основном за счёт 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]:

$$\alpha_{cm} = C_m \rho_m U_m (1 - \varepsilon) \left[ 1 - \exp \left( - \frac{1,2 \lambda r}{\delta_c C_m \rho_m U_m (1 - \varepsilon)^{1/3}} \right) \right] \quad (2)$$

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

$$\alpha_{\max} = 35,8 \rho_m^{0,2} \lambda_2^{0,6} d^{-0,36} \quad (3)$$

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

$$\alpha_{cm} = \sqrt{\frac{\lambda_2 C_{cl} \rho_{cl}}{\pi \tau_{ma}}} \quad (4)$$

Эффективная теплопроводность неподвижного слоя определим по формуле [4]:

$$\lg \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \left( 0,28 - 0,75 \lg \varepsilon - 0,057 \lg \frac{\lambda_m}{\lambda_2} \right) \lg \frac{\lambda_m}{\lambda_2} \quad (5)$$

Опыты по изучению теплообмена между поверхностью нагрева и пульсирующим слоем древесных опилок были проведены на стеклянной установке с внутренним диаметром 57 мм и высотой 1500 мм. Коэффициент теплообмена между поверхностью нагрева и слоем древесных опилок определялся по методике описанной в работе [5].

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

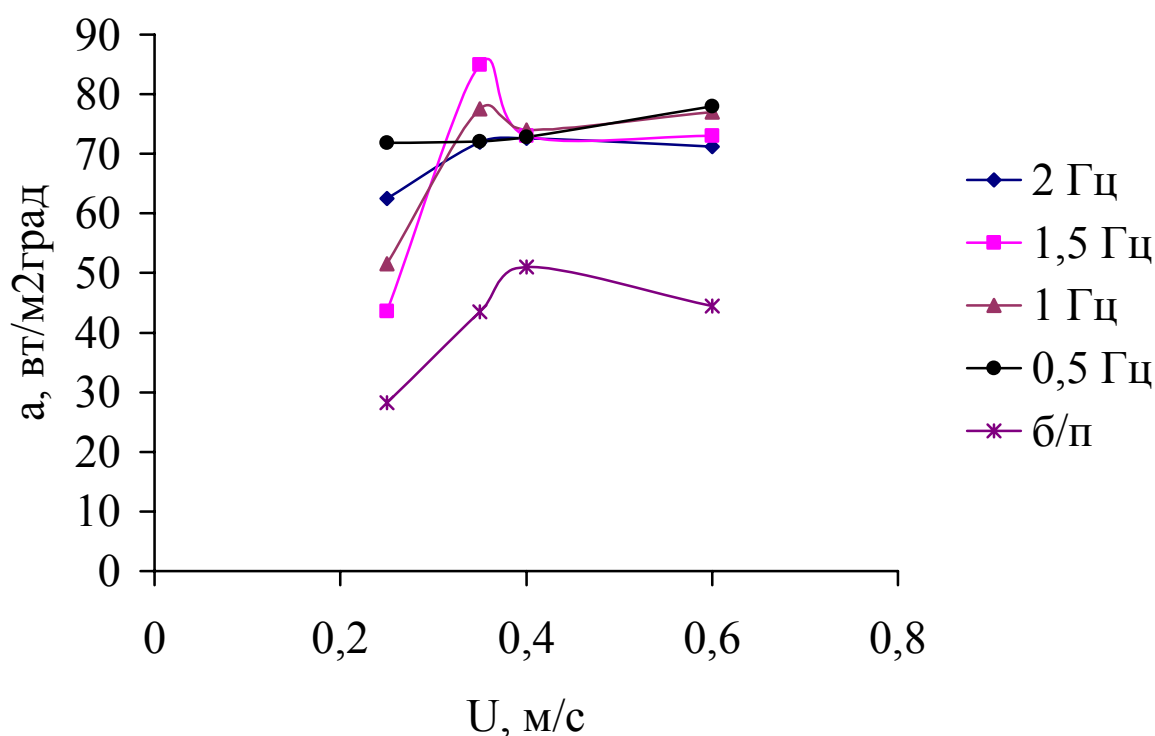


Рисунок 1. Изменение коэффициента теплообмена между поверхностью нагрева и слоем древесных опилок в зависимости от скорости фильтрации и частоты пульсации

Как показали опыты при стационарном 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 и поршни, и каналы разрушались. При каждой последующей подаче воздуха образовывались новые поршни и каналы, что способствовали 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 рисунке видно увеличение коэффициента теплообмена.

Подвод тепла для сушки древесных опилок 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 таблице представлены результаты приближённых измерений расширения слоя, гидравлического сопротивления слоя при различных частотах пульсации потока воздуха. Расширение слоя определялось визуально с помощью масштабной линейки, закреплённой на цилиндрической колонне. При измерении средней величины сопротивления пульсирующего слоя колебания мениска u-образного водяного манометра были устранены пережимом соединительной трубки. Величина пережима была выбрана такой, что при соединении манометра в условиях стационарного потока мениск устанавливался за 2 секунды.

Таблица. Гидродинамика слоя древесных опилок ( $H_0 = 220$  мм,  $d_3 = 2$  мм)

Скорость фильтрации, м/с	Частота пульсации, Гц	Максимальная высота расширения слоя, мм	Сопроти вление слоя, мм	Примечание
0,25	б/п	220	5	Слой неподвижен
	2,0	230	5	Слабо расширенный поршень пульсирует
	1,5	235	5	То же
	1,0	240	4	То же
	0,5	260	4	Пульсирует поршень
0,35	б/п	225	5	Слой неподвижен
	2,0	310	4	Слой пульсирует в виде пронизываемого каналами поршня
	1,5	330	4	То же
	1,0	350	4	То же
	0,5	400	4	Слой пульсирует в виде расширенного поршня
0,4	б/п	230	6	Слой неподвижен
	2,0	260	4	Слой пульсирует в виде расширенного поршня
	1,5	280	4	То же
	1,0	320	4	То же
	0,5	400	4	То же
	б/п	240	8	Слой неподвижен, пронизан каналами

0,6	2,0	500	8	Пульсирует разреженный поршень
	1,5	600	7	То же
	0,5	700	7	То же

Из таблицы видно, что максимальное расширение слоя увеличивалось с понижением частоты пульсации. Это связано с тем, что за время между импульсами в малоактивной стадии происходит накопление энергии в системе воздухоудовка – пульсатор.

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

$$W_s = P_0(\tau_a + \tau_{ma}) \quad (6)$$

Эта энергия реализуется в очень короткое время активной стадии в виде кратковременного импульса  $\tau_u$  мощностью

$$P_u = \frac{W_s}{\tau_u} = \frac{P_0(\tau_a + \tau_{ma})}{\tau_u} \quad (7)$$

Условные обозначения:

$C_m$  – теплоёмкость опилок;

$U_m$  – нормальная скорость движения частиц к поверхности;

$\rho_m$  – плотность зернистого материала;

$\varepsilon$  – порозность слоя;

$\lambda_g$  – теплопроводность газа;

$\lambda_m$  – теплопроводность зернистого материала;

$\lambda_s$  – эквивалентная теплопроводность неподвижного слоя;

$\alpha$  – коэффициент теплообмена между поверхностью нагрева и слоем;

$\tau_a$  – длительность активной стадии;

$\tau_{ma}$  – длительность малоактивной стадии;

$d$  – диаметр частиц.

## Литература:

1. Панцхава Е.С., Возможности и перспективы развития биоэнергетики. «Энергоэффективность», 2007, №4.
2. Забродский С.С., Гидродинамика и теплообмен в псевдооживленном слое – М.: ГЭИ, 1963 – 487 с.
3. Аэров М.Э., Тодес О.М., Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. Л.: Химия, 1963.
4. Krupiczka R., Int. Chem. Eng., 1967, v. 7, №1, p. 122.
5. Антонишин Н.В., Забродский С.С., Теплообмен поверхности погружённой в развитый неоднородный псевдооживленный слой – ИФЖ, 1963, №11, с. 97-104.
6. Любошиц И.Л., Слободкин Л.С., Каспер В.И., Применение кипящего слоя для глубокой сушки увлажненных полимерных материалов и сырья древопластики. В: Тепло- и массообмен в сушильных и термических процессах. Мн.: Наука и техника, 1966, с. 107-115.