

УДК 66.011

РАСЧЕТ ВИХРЕВЫХ КАМЕР ДЛЯ СУШКИ ВОЛОКНООБРАЗУЮЩИХ ПОЛИМЕРОВ

Л.М. КОЧЕТОВ, Б.С. САЖИН, М.П. ТЮРИН, Е.В. ОТРУБЯННИКОВ

(Московский государственный текстильный университет им. А.Н. Косыгина)

Дисковые вихревые сушилки хорошо зарекомендовали себя при проведении процессов сушки порошкообразных волокнообразующих полимеров, таких как полиамиды, полипропилен, полиэтилен. В результате их сушки возможно достижение низкой остаточной влажности, менее 0,5%, что делает возможным их последующую переработку в гранулы.

Особенностью вихревых сушилок является сочетание активного гидродинамического режима, характеризующегося высокой относительной скоростью взаимодействующих фаз, с достаточно длительным (до нескольких десятков секунд) временем пребывания дисперсного материала в аппарате. Сочетание этих двух факторов позволяет проводить сушку дисперсных материалов, характеризующихся наличием не только поверхностной, но и связанной влаги [1].

Твердые частицы увлекаются газовым потоком во вращательное движение и отбрасываются в периферийную зону камеры, где движутся по окружности вдоль внутренней стенки. В результате в камере накапливается дисперсный материал в виде кольцевого вращающегося слоя.

При определенном расходе газа вихревая камера способна удерживать определенное количество дисперсного материала q (удерживающая способность камеры). Величина удерживающей способности является важнейшей характеристикой вихревой камеры, поскольку определяет среднее время пребывания дисперсного материала в аппарате. Согласно соотношению:

$\tau_{\text{ср}} = q / G$, где G – расход твердого материала.

При движении дисперсного материала в камере происходит периодическое ускорение твердых частиц и их последующее торможение, обусловленное трением о стенку. Схема движения материала в камере с горизонтальной осью приведена на рис. 1.

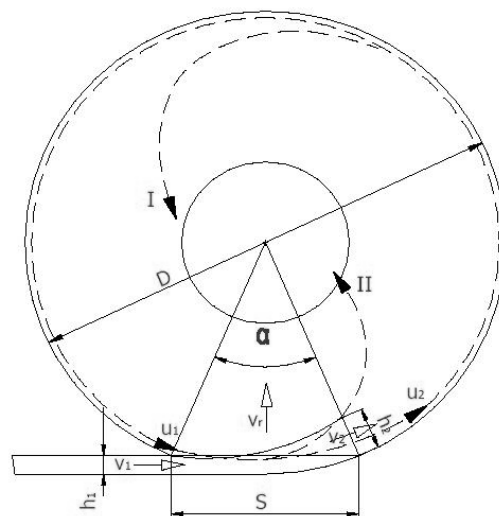


Рис. 1

На разгонном участке камеры на твердую частицу в радиальном направлении действуют следующие силы: сила тяжести G , центробежная сила $F_{\text{цб}}$ и сила давления газового потока $F_{\text{дав}}$.

Условие равновесия этих сил может быть выражено уравнением:

$$(g \cos \varphi + \frac{u_1^2}{\Theta}) \rho_M \frac{\pi \delta^3}{6} = \xi \frac{\pi \delta^2}{8} v_r^2 \rho_G, \quad (1)$$

где Θ – радиус траектории движения частицы; в общем случае $\Theta = \varepsilon D / 2$; D – диаметр камеры; ρ_M и ρ_G – соответственно плотности твердого материала и газа; u_1 – скорость твердых частиц в кольцевом слое при входе в газовую струю; v_r – радиальная скорость газового потока; δ – диаметр твердых частиц; φ – угловая координата местоположения частицы.

В верхней точке камеры (при $\varphi = 180^\circ$) радиальный сток газа, в периферийной зоне камеры, практически отсутствует, то есть $F_{\text{ДАВ}} = 0$. Условие безотрывного прохождения материалом верхней точки вихревой камеры:

$$u \geq (0,5Dg)^{0,5}. \quad (2)$$

Вынос дисперсного материала из вихревой камеры с горизонтальной осью может происходить (в зависимости от расхода газа) из верхней зоны камеры (линия I на рис. 1), в соответствии с уравнением 2, или из ее нижней зоны (линия II на рис. 1), в соответствии с уравнением 1.

Значение расхода газа, при котором происходит изменение характера выноса материала, названо критическим расходом, $V_{\text{КР}}$. Когда $V > V_{\text{КР}}$ скорость дисперсного материала в верхней точке камеры ($\varphi = 180^\circ$) превышает минимальное значение безотрывного движения $u = (0,5Dg)^{0,5}$. Величина $V_{\text{КР}}$ (при одном тангенциальном газоходу $z=1$) может быть оценена с помощью формулы:

$$V = V_{\text{КР}} = 0,5 v_r B D \alpha. \quad (3)$$

Значение v_r можно определить из (1):

$$v_r = \left[\frac{4 \rho_M \delta (2u_1^2 / \varepsilon D + g \cos \alpha / 2)}{3 \xi \rho_G} \right]^{0,5}, \quad (4)$$

где B – ширина камеры; V – объемный

расход газа; $\alpha = 2 \arccos(1 - 2h_1 / D)$ – угловой сектор, в пределах которого происходит радиальный сток; h_1 – высота тангенциального газохода; ε – коэффициент, зависящий от массы частицы и геометрических размеров камеры; когда частица скользит по стенке камеры $\varepsilon = 1$; в других случаях $\varepsilon > 1$.

На участке торможения движение твердых частиц в кольцевом слое можно отобразить уравнением:

$$-\frac{du}{d\tau} = \frac{F_{\text{ТР}}}{m} + g \sin \varphi, \quad (5)$$

$$\text{где } \frac{F_{\text{ТР}}}{m} = \left(\frac{F_{\text{ЛБ}}}{m} + g \cos \varphi \right) f = \left(\frac{2u^2}{D} + g \cos \varphi \right) f; \quad (6)$$

m – масса твердой частицы; τ – время движения; f – коэффициент трения.

Из уравнений (5) и (6) (при граничных условиях: при $\varphi = \alpha/2$, $u = u_2$) можно получить уравнение движения частицы на участке торможения:

$$u = u_2^2 - gD(f \sin \varphi - \cos \varphi) + C)^{0,5} - u_2(1 - \exp(-ft)), \quad (7)$$

где $C = gD(f \sin \alpha / 2 - \cos \alpha / 2)$;

$t = (\varphi - \alpha / 2)\pi / 180$; u_2 – скорость частиц в начале тормозного (в конце разгонного) участка.

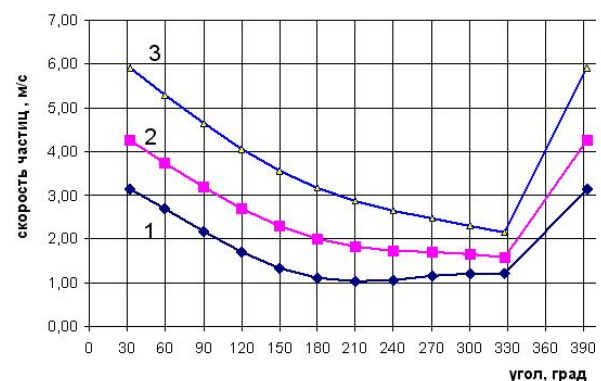


Рис. 2

На рис. 2 приведены результаты расчета средних скоростей твердого материала, по-

лученных согласно уравнению (7), при следующих исходных параметрах: $D=0,25$ м; $B=0,05$ м; $z=1$; $\rho_B=1,2$ кг/м³; $\rho_M=1000$ кг/м³; $h_1=20$ мм; $\delta=0,5$ мм; при $f=0,2$. Линия 1 соответствует режиму $V \leq V_{кр}$; линии 2 и 3 режимам $V > V_{кр}$ (2 – $V=1,45V_{кр}$; 3 – $V=1,85V_{кр}$). При этом согласно уравнению (3) величина $V_{кр}=105$ м³/ч. Коэффициент трения $f=0,2$.

Важно отметить, что при любых режимах $V \leq V_{кр}$ значения скоростей материала, при соответствующих значениях φ , не меняются. Дисперсность и плотность материала при $V \leq V_{кр}$ также не оказывает влияния на скорость твердых частиц.

С увеличением коэффициента трения f величина $V_{кр}$ снижается. Это связано с уменьшением скорости материала u_1 в результате торможения частиц за счет трения на участке от $\varphi=180^\circ$ до точки входа в струю газа. При $V > V_{кр}$ скорость материала (при всех значениях φ) возрастает с увеличением расхода газа.

При входе твердых частиц, движущихся в периферийной зоне камеры, в струю газа, истекающую из тангенциального сопла, происходит увеличение скорости твердых частиц и соответственно снижение скорости газового потока. Используя закон сохранения количества движения (при условии, что давление в газовой струе на участке разгона твердых частиц не изменяется), можно получить следующее уравнение:

$$\rho_{\Gamma}(v_1 - v_2)V/z = M(u_2 - u_1), \quad (8)$$

где v_1 и v_2 – скорости газового потока соответственно в начале и в конце участка разгона твердых частиц; M – расход материала, проходящего через газовую струю в единицу времени, который определяется из соотношения:

$$M = qu_{\text{ср}}/\pi D. \quad (9)$$

Из уравнений (8) и (9) получим выражение для удерживающей способности:

$$q = \frac{\pi D \rho_{\Gamma}(v_1 - v_2)V}{z(u_2 - u_1)u_{\text{ср}}}. \quad (10)$$

Скорость истечения газа из тангенциальных газоподов:

$$v_1 = V/z h_1 B. \quad (11)$$

Скорость газа v_2 в конце разгонного участка:

$$v_2 = V/z h_2 B, \quad (12)$$

где h_2 – степень расширения газовой струи в конце разгонного участка.

При условии, что радиальный сток в пределах разгонного участка распределен равномерно, величину h_2 можно оценить по формуле:

$$h_2 = e h_1. \quad (13)$$

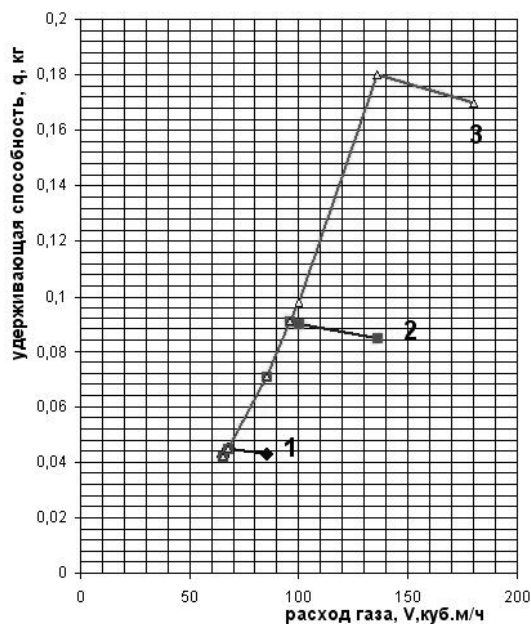


Рис. 3

На рис. 3 приведены зависимости удерживающей способности q , от расхода газа V для камеры с горизонтальной осью и одним тангенциальным каналом, полученные по формуле (10), при следующих исходных параметрах: $D=0,25$ м; $B=0,05$ м;

$\rho_B = 1,2 \text{ кг/м}^3$; $\rho_M = 1000 \text{ кг/м}^3$; $h_1 = 20 \text{ мм}$; $f = 0,3$. Расчеты выполнены для значений: 1 – $\delta = 0,25 \text{ мм}$; 2 – $\delta = 0,5 \text{ мм}$ и 3 – $\delta = 1,0 \text{ мм}$.

Полученные результаты подтверждаются результатами экспериментов [2...4]. Для камер с горизонтальной осью, очевидно, оптимальные условия находятся в области расходов газа, близких к $V = V_{\text{кр}}$, поскольку дальнейшее увеличение газа не приводит к росту удерживающей способности, но вызывает существенный рост потерь напора.

В результате обработки экспериментальных данных получено эмпирическое уравнение, позволяющее оценить значение $V_{\text{кр}}$ с точностью $\pm 10\%$:

$$\text{Re}_{\text{кр}} = A \left(\frac{h_1}{D} \right)^{0,63} \left(\frac{D}{\delta} \right)^{1,3} \text{Ar}^{0,61}, \quad (14)$$

где A – коэффициент, зависящий от условий трения материала. Для исследованных полимеров $A \approx 0,30$; ν – кинематическая вязкость газа, $\text{м}^2/\text{с}$; $\text{Re}_{\text{кр}} = \frac{v_{1,\text{кр}} h_1}{\nu}$ – число Рейнольдса;

$\text{Ar} = \frac{g \delta^3 (\rho_M - \rho_\Gamma)}{v^2 \rho_M}$ – число Архимеда;

$v_{1,\text{кр}}$ – скорость истечения газа, соответствующая $V_{\text{кр}}$.

Удерживающая способность камеры с горизонтальной осью согласно [2] с точностью $\pm 20\%$ определяется эмпирическим уравнением

$$q = x E^{0,8} D^{-0,15}, \quad (15)$$

где E – кинетическая энергия струи газа на входе в камеру, Вт; x – коэффициент, величина которого зависит от когезионных

свойств дисперсного материала и для полимеров составляет в зоне $10 \dots 12 \text{ гм}^{0,15} / \text{Вт}^{0,8}$,

$$E = 0,5 \rho_\Gamma B h_1 v_1^3. \quad (16)$$

Уравнения (14) и (15) получены при изменении параметров в диапазонах: $D = 0,12 \dots 0,8 \text{ м}$; $B/D = 0,15 \dots 0,4$; $D/h_1 = 5 \dots 17,2$; $D/\delta = 58 \dots 705$; $\text{Ar} = 2 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^5$.

Результаты расчетов $V_{\text{кр}}$ и q приведены в табл. 1. Как видно из сопоставления полученных результатов, значения $V_{\text{кр}}$ и q , рассчитанные на основании теоретической модели и эмпирических уравнений, удовлетворительно согласуются между собой.

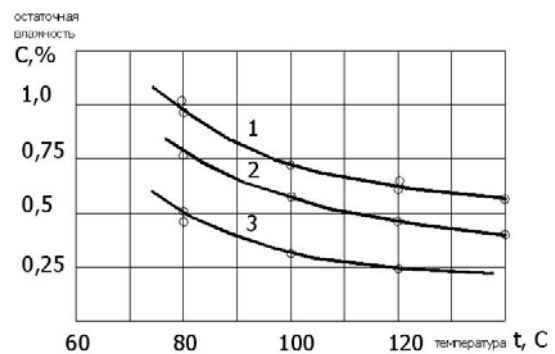


Рис. 4

На рис. 4 представлены экспериментальные зависимости остаточной влажности порошкообразного полиамида ПА-6 от температуры отходящего воздуха при различном среднем времени пребывания материала $\tau_{\text{ср}}$. Данные зависимости были получены при сушке материала в вихревой камере, имеющей следующие параметры: $D = 0,24 \text{ м}$; $B = 0,035 \text{ м}$; $h_1 = 15 \text{ мм}$; кривая 1 – $\tau_{\text{ср}} = 15 \text{ с}$; 2 – $\tau_{\text{ср}} = 30 \text{ с}$; 3 – $\tau_{\text{ср}} = 60 \text{ с}$.

Таблица 1

Диаметр камеры D, мм	Диаметр частиц материала δ , мм	Критический расход $V_{\text{кр}}$, $\text{м}^3/\text{ч}$		Удерживающая способность q при $V_{\text{кр}}$, кг	
		(по ур. 3)	(по ур. 14)	(по ур. 10)	(по ур. 15)
250	0,25	68	63	0,045	0,035
250	0,50	96	91	0,091	0,081
250	1,00	136	131	0,180	0,198
500	0,50	217	223	0,23	0,213

Очевидно, что с увеличением τ_{CP} , при одинаковой температуре отходящего воздуха, остаточная влажность материала существенно снижается. Таким образом, возможно регулировать остаточную влажность материала после вихревых сушилок за счет варьирования τ_{CP} , определяемого как отношение удерживающей способности камеры к производительности по высушиваемому материалу, $\tau_{\text{CP}} = q/G$. Величину удерживающей способности камеры можно изменять за счет выбора конструктивных и технологических параметров, добиваясь оптимальных условий ее работы.

ВЫВОДЫ

1. Предложен метод расчета удерживающей способности вихревой камеры с горизонтальной осью. Установлена зависимость удерживающей способности от расхода газа и других параметров процесса. Проведено сопоставление расчетных и экспериментальных значений удерживающей способности и критического расхода газа в камере.

2. Приведены результаты сушки порошкообразного полиамида в вихревой сушилке. Показана возможность регулирования остаточной влажности материала за счет варьирования удерживающей способности и производительности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сажин Б.С., Сажин В.Б. Научные основы техники сушки. – М.: Наука, 1997.
2. Кочетов Л.М., Сажин Б.С. Гидродинамика и теплообмен в сушильной вихревой камере // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1969, № 9.
3. Сажин Б.С., Кочетов Л.М., Белоусов А.С. Удерживающая способность и структура потоков в вихревых аппаратах // Теоретические основы химической технологии. – 2008, № 2.
4. Белоусов А.С., Кочетов Л.М., Сажин Б.С. Гидродинамическая структура потоков в вихревой сушильной камере // В. кн.: Успехи в химии и химической технологии. – М., 2003, т. XVII, № 13 (38), С. 94...97.

Рекомендована кафедрой процессов и аппаратов химической технологии и безопасности жизнедеятельности. Поступила 02.04.08.