

УДК 66.011

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ  
ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВИХРЕВЫХ КАМЕРАХ***Б.С.САЖИН, Л.М.КОЧЕТОВ, Е.В.ОТРУБЯННИКОВ***(Московский государственный текстильный университет им. А.Н. Косыгина)**

Сушка тонкодисперсных материалов, в том числе полимерных, во взвешенном состоянии является весьма эффективным процессом и может быть реализована, в зависимости от характеристики пористой структуры материала, в аппаратах различных конструкций, в частности, пневмотрубах, сушилках с псевдооживленным или фонтанирующим слоем, в циклонных или вихревых камерах. Вихревые камеры, имеющие форму плоского диска с вертикальной или горизонтальной осью, наилучшим образом подходят для сушки тонкодисперсных (с размером пор до 5 нм) материалов, поскольку позволяют обеспечить высокую эффективность процессов теплопереноса и достаточно длительное время пребывания материала в зоне сушки. По сравнению с пневмотрубами традиционного исполнения продолжительность пребывания материала в вихревых камерах больше в несколько раз. При этом процесс сушки протекает значительно более интенсивно за счет многократно повторяющихся циклов прохождения материала, циркулирующего в вихревой камере, через струю нагретого газа, на входе в камеру.

Кроме того, в вихревых и циклонных сушилках, при определенных конструктивных модификациях, возможно сочетание в одном аппарате процессов сушки и отделения высушенного материала от газообразного теплоносителя, что позволяет отказаться или значительно упростить систему пылеулавливания, которой, как пра-

вило, комплектуются все сушильные установки со взвешенным слоем.

Тепловой потенциал конвективной сушильной установки определяется разницей температур газа на входе в сушилку и на выходе из нее, поэтому целесообразно максимально увеличивать начальную температуру теплоносителя. Однако ограничивающим фактором при сушке термолабильных материалов, в частности, полимеров, используемых для производства текстильных волокон, таких как поливинилхлорид, полиамиды, полипропилен, является температура термического размягчения материала. При превышении этой температуры происходит налипание материала на стенки аппарата и, как результат, потеря его работоспособности. Тем не менее, в вихревых сушильных камерах и других пневматических сушилках возможно поддерживать начальную температуру газа, на несколько десятков градусов выше максимально допустимой температуры нагрева материала, поскольку высокая интенсивность теплообмена обеспечивает резкое падение температуры газа непосредственно во входном створе сушильного аппарата.

Температуру газообразного теплоносителя, выходящего из сушилки, напротив, целесообразно поддерживать на максимально низком уровне. Как показывают экспериментальные исследования, в пневматических сушилках, в частности, вихревых и циклонных камерах, существует однозначная зависимость между температурой и остаточным влагосодержанием дис-

персного материала. Поскольку температура материала, выходящего из пневматической сушилки с активным гидродинамическим режимом, близка к температуре отходящего газообразного теплоносителя и отличается от нее всего на несколько градусов, может быть установлена корреляция между температурой отходящего газа и остаточным влагосодержанием высушиваемого материала. При этом изменения других параметров, таких как начальная температура газа, начальная влажность материала, расход газа, при поддержании температуры материала на постоянном уровне, мало влияют на остаточное содержание влаги в материале. Исключением является только продолжительность обработки материала, если ее варьировать в достаточно широком диапазоне. В сушил-

ках с псевдооживленным или фонтанирующим слоем, в вихревых камерах и других сушилках, характеризующихся интенсивным перемешиванием материала и накоплением в объеме аппарата значительного количества материала, регулирование продолжительности сушки возможно путем изменения параметров соотношения:  $\tau_{ср} = q/G$ , где  $G$  – расход твердого материала;  $q$  – количество материала в аппарате (для вихревой камеры – удерживающая способность).

Зависимость остаточной влажности материала от температуры отходящего газа имеет обычно простой характер и может быть представлена в виде линейной или экспоненциальной функции.

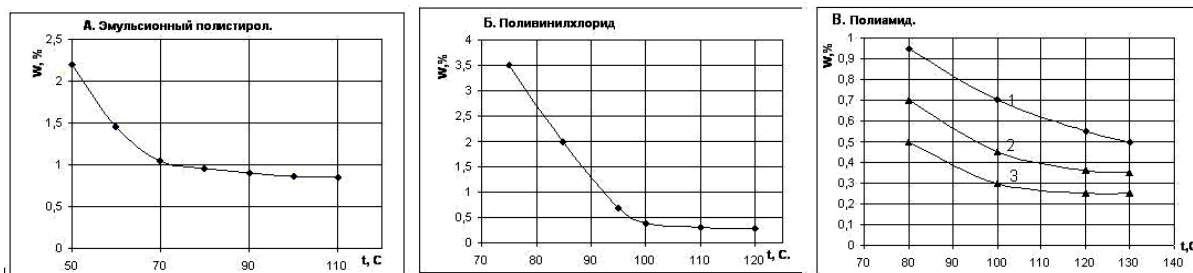


Рис. 1

Некоторые из этих зависимостей, полученных при сушке дисперсных полимерных материалов в вихревой камере диаметром 240 мм, представлены на рис. 1 (А – эмульсионный полистирол; Б – поливинилхлорид; В – полиамид: среднее время пребывания материала в камере ( $\tau_{ср}$ ) соответственно 1 – 15; 2 – 30 и 3 – 60 с). При этом, как отмечалось выше и как показывают результаты непосредственных измерений, температура высушенного материала лишь немного ниже температуры отходящего газа. Несложно показать с помощью расчетов, что внутри мелкой частицы (менее 1 мм), имеющей достаточно высокую теплопроводность, характерную для полимеров, радиальный градиент температуры практически отсутствует, то есть температуры на поверхности и внутри частицы практически одинаковы. Это дает возможность оценить количество тепла, затраченное на нагревание твердого мате-

риала, на основании простых уравнений теплового баланса.

Таким образом, по температуре отходящего газа можно приближенно контролировать остаточное влагосодержание материала. При этом результаты экспериментов, проведенных в лабораторных условиях, могут быть легко масштабированы на промышленные условия.

Расчет кинетики процесса сушки дисперсных материалов в аппаратах с интенсивным перемешиванием твердой фазы может быть выполнен на основании методики, приведенной ниже.

За малый промежуток времени  $dt$  к частице твердого материала, имеющей массу  $m$ , подводится количество тепла:

$$dQ = \alpha \sigma m (t - \Theta) dt, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – удельная поверхность твердого материала;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи

от газового потока к материалу;  $t$  и  $\theta$  – соответственно текущие температуры газа и материала.

Тепло, подводимое к твердой частице, расходуется на нагревание материала и на испарение влаги из него:

$$dQ = dQ_{\theta} + dQ_w,$$

или

$$dQ = -mr \left( 1 + \frac{\mu}{r} - \frac{C}{r} \frac{\partial \theta}{\partial W} \right) \frac{\partial W}{\partial \tau} d\tau, \quad (2)$$

где  $W$  – текущее влагосодержание материала;  $r$  – теплота испарения влаги из материала;  $\mu$  – удельная энергия связи влаги с материалом;  $C = C_M + C_{ж} W$  – приведенная теплоемкость твердого материала;  $C_M$  – теплоемкость сухого материала;  $C_{ж}$  – теплоемкость испаряемой жидкости.

Из уравнений (1) и (2) можно получить выражение для скорости сушки материала:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = - \frac{\alpha \sigma (t - \theta)}{r \left( 1 + \frac{\mu}{r} - \frac{C}{r} \frac{\partial \theta}{\partial W} \right)} = -K_c \alpha \sigma (t - \theta). \quad (3)$$

Величина  $K_c = \frac{1}{r \left( 1 + \frac{\mu}{r} - \frac{C}{r} \frac{\partial \theta}{\partial W} \right)} = \frac{1}{(r + \mu + Rb)}$ , названная коэффициентом

сушки, характеризует свойства влажного материала. Таким образом, скорость сушки равна произведению  $K_c$  на интенсивность подвода тепла к единице массы материала.

Величина  $Rb = -\frac{C \partial \theta}{r \partial W}$ , называемая критерием

Рембиндера и определяемая отношением количеств тепла соответственно на нагревание материала и на испарение влаги из него, мало зависит от технологических параметров процесса сушки (температуры и относительной влажности газа, коэффициентов тепло- и массоотдачи). Можно принять, что для дисперсных материалов величина  $Rb$  является однозначной функцией влагосодержания материала в достаточно

широком диапазоне изменения параметров процесса сушки [1], [2], [6].

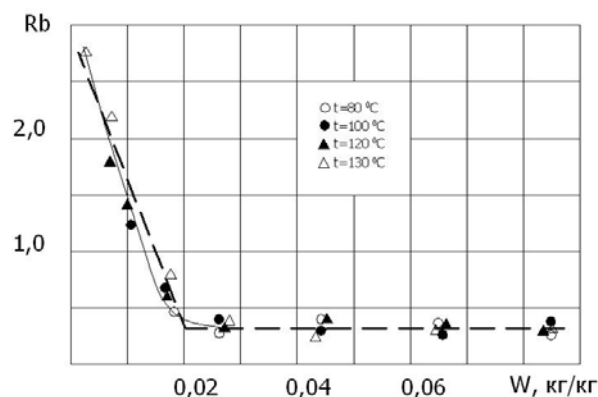


Рис. 2.

На рис. 2 представлена зависимость  $Rb=f(W)$ , полученная для сополимера стирола при различных температурах газа на входе в камеру. Из рис. 2 видно, что для различных режимов сушки экспериментальные точки удовлетворительно описываются общей зависимостью. Таким образом, зависимость  $Rb=f(W)$ , определенная при одних условиях сушки, в том числе при периодическом режиме в лабораторных условиях, может быть трансформирована на другие условия непрерывного процесса.

Энергия связи влаги с материалом зависит от форм этой связи и может быть приближенно представлена соотношением вида:  $\mu = N \exp(-pW)$ , где  $N$  и  $p$  – постоянные величины, зависящие от свойств материала и жидкости. Эта величина достигает заметных значений лишь при малых влагосодержаниях, когда происходит удаление влаги мономолекулярной адсорбции. В процессах скоростной конвективной сушки этот вид влаги обычно не удаляется [2], [6], поэтому для большинства материалов при расчете кинетических закономерностей их сушки от воды энергию связи можно не учитывать. При сушке от низкокипящих органических растворителей при влагосодержаниях, близких к равновесному, энергия связи достигает заметных величин, соизмеримых с теплотой испарения жидкости.

Как видно из рис.2, в начальный период сушки при удалении поверхностной и большей части капиллярной влаги величина критерия  $Rb$  остается практически постоянной. Однако при удалении жидкости из микрокапилляров, а также влаги полимолекулярной адсорбции величина критерия  $Rb$  резко увеличивается. Динамика изменения температуры дисперсного материала в процессе сушки, при известной зависимости  $Rb=f(W)$ , может быть охарактеризована уравнением:

$$\Theta = \Theta_H - \int_{W_H}^W \frac{r}{C} Rb_{(w)} dW = \Theta_H + \int_W^{W_H} \frac{r}{C_M + C_{Ж} W} Rb_{(w)} dW. \quad (4)$$

Используя соотношение (4), можно преобразовать уравнение скорости сушки (3):

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = - \frac{\alpha \sigma}{(1 + \mu + Rb_{(w)})} (t - \Theta_H - \int_W^{W_H} \frac{r}{C_M + C_{Ж} W} Rb_{(w)} dW). \quad (5)$$

Входящая в уравнение (5) температура газа  $t$  может быть заменена на среднее значение  $t_{CP}$  – между температурами газа на входе и выходе в камеру и на выходе из нее:  $t_{CP} = 0,5(t_1 + t_2)$ . При непрерывном процессе сушки ее можно считать постоянной.

Коэффициент теплоотдачи в уравнении (5) можно определить на основании данных специальных исследований [3], [4] или оценить по формуле:

$$\alpha = \frac{LC_{\Gamma}(t_1 - t_2) - Q_{\Pi}}{q\sigma\Delta T}, \quad (6)$$

где  $L$  – массовый расход газа;  $C_{\Gamma}$  – средняя теплоемкость газа;  $Q_{\Pi}$  – потери тепла в аппарате;  $\Delta T = (t_1 - t_2) / \lg \frac{t_1 - \Theta_{сл}}{t_2 - \Theta_{сл}}$  – средний температурный напор;  $\Theta_{сл}$  – средняя температура слоя материала, которая может

быть принята на  $5...10^{\circ}C$  ниже  $t_2$ . Величину удерживающей способности  $q$  можно оценить на основании ранее полученных расчетных соотношений [3], [5].

Зависимости  $Rb=f(W)$  обычно имеют сложный характер, что исключает решение уравнения (5) в общем виде. Однако оно может быть решено, если кривую  $Rb=f(W)$  представить в виде нескольких прямолинейных отрезков, как это сделано на рис. 2. Тогда для каждого участка, характеризующегося диапазоном изменения влагосодержаний материала от  $W_i$  до  $W_{i+1}$ , можно написать выражение:  $Rb=AW+B$ , после подстановки которого в уравнение (5) можно определить продолжительность  $\tau_i$  сушки материала в указанном диапазоне влагосодержаний для реальных условий процесса. Величина приведенной теплоемкости  $C$  может быть принята постоянной, рассчитанной по среднему значению влагосодержаний на рассматриваемом участке.

Общая продолжительность сушки определяется как сумма соответствующих значений для каждого из участков:

$$\tau = \sum_{i=1}^{i=n} \tau_i.$$

## ВЫВОДЫ

1. Установлена однозначная зависимость остаточного влагосодержания дисперсных материалов от его температуры при возможном варьировании других параметров процесса. На основании экспериментальных зависимостей  $Rb=f(W)$  предложен метод расчета кинетики сушки дисперсных материалов в вихревой камере с горизонтальной осью.

2. Приведены результаты сушки некоторых порошкообразных полимеров, используемых в текстильной промышленности. Показана возможность регулирования остаточной влажности материала за счет варьирования средней продолжительности процесса сушки и температурных параметров.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Лыков А.В.* Теория сушки. – М.: Энергия, 1966.
2. *Сажин Б.С., Сажин В.Б.* Научные основы техники сушки. – М.: Наука, 1997.
3. *Кочетов Л.М., Сажин Б.С.* Гидродинамика и теплообмен в сушильной вихревой камере // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1969, № 9.
4. *Сажин Б.С., Кочетов Л.М., Осинский В.П.* Интенсификация и расчет процессов сушки дисперсных материалов / В кн.: IV Всесоюзная конференция по тепло- и массообмену. Материалы дискуссии –М., т. X; ч. II, Минск, 1972.

5. *Сажин Б.С., Кочетов Л.М., Белоусов А.С.* Удерживающая способность и структура потоков в вихревых аппаратах // Теоретические основы химической технологии. – 2008, № 2.

6. *Sazhin B.S., Sazhin V.B.* Scientific Principles of Drying Technology. –New York /Connecticut/: Begelle house, inc., 2007. P. 497.

Рекомендована кафедрой процессов и аппаратов химической технологии и безопасности жизнедеятельности. Поступила 01.02.08.

---