

УДК 66.011

**ВОПРОСЫ КОМКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ СУШКЕ  
ВЫСОКОВЛАЖНЫХ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ  
ВОЛОКНООБРАЗУЮЩИХ ПОЛИМЕРОВ  
ВО ВЗВЕШЕННОМ СЛОЕ**

**QUESTIONS ON CLUMPING DURING DRYING  
OF HIGH-MOISTURE FINE-DISPERSED  
FIBER-FORMING POLYMERS  
IN SUSPENSION LAYER**

*Б.С. САЖИН, М.Б. САЖИНА, Т.А. ВИЛКОВА, З.Н. ОСМАНОВ, Е.С. БОРОДИНА, Н.А. СОЛДАТОВА  
B.S. SAZHIN, M.B. SAZHINA, T.A. VILKOVA, Z.N. OSMANOV, E.S. BORODINA, N.A. SOLDATOVA*

(Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского,  
Московский государственный текстильный университет им. А.Н. Косыгина)  
(Moscow State University of technology and Management named after K.G. Razumovsky;  
Moscow State Textile University "A.N. Kosygin")  
E-mail: paxt@ya.ru

*Рассмотрены факторы, определяющие условия комкообразования при сушке высоковлажных волокнообразующих полимеров во взвешенном слое.*

*Разработана математическая модель комкообразования при наличии водяной пленки на поверхности частиц и дан вывод уравнения для определения размеров образующихся комков. Рекомендовано для рассмотренной технологической задачи использовать режим кипящего слоя с вибрирующими поверхностями нагрева, погруженными в слой.*

*The factors determining the conditions of clumping during drying of high-moisture fiber-forming polymers in a suspended layer have been considered. The mathematical model of clumping in the presence of a water film on the surface of the particles has been developed and the output equation for determining the size of formed clots of formed clots has been presented. For the considered technological problem it is recommended to use the regime of a boiling layer with vibrating fluidized bed heating surfaces immersed in a layer.*

**Ключевые слова:** сушка, взвешенный слой, виброкипящий слой, адгезия и аутогезия, тонкодисперсные и полидисперсные материалы, комкообразование, вибрирование поверхности нагрева.

**Keywords:** drying, a vibrating and boiling layer, adhesion and autohesion, fine-dispersed and polydispersed materials, clumping, vibration of heating surface.

При сушке высоковлажных дисперсных волокнообразующих полимеров во взвешенном слое (например, поливинилхлорида – ПВХ) факторами, затрудняющими процесс, являются налипание материала на стенки аппарата и комкование. Эти негативные эффекты связаны с адгезионными характеристиками обработки влажных материалов (адгезией, аутогезией и когезией).

Адгезия характеризует связь между разнородными частицами материала при их контакте (обрабатываемый материал и стенки аппарата).

Аутогезия проявляется при соприкосновении однофазных тел (частиц обрабатываемого материала) и служит источником комкообразования при сушке во взвешенном слое.

Связь между частицами сыпучих материалов обусловлена силами различной природы и ее величина определяется совокупным действием этих сил (Ван-дер-Ваальса, адгезионные и когезионные взаимодействия, электрические взаимодействия, капиллярные силы, силы механического зацепления, связанные с шероховатостью частиц) [1...3], [5]. Существенное влияние на комкование оказывают температура и влажность окружающей среды, а также упругопластические свойства частиц обрабатываемого материала [3].

Особенно сильно проявляет себя аутогезионное взаимодействие при сушке во взвешенном слое высоковлажных тонкодисперсных материалов. Явление комкообразования частиц ухудшает однородность структуры слоя, что вызывает неустойчивость гидродинамического режима. При сушке высоковлажных тонкодисперсных материалов комкообразование обусловлено в основном наличием водяной пленки на поверхности частиц, то есть имеет место не только явление аутогезии, но и явление когезии.

Толщина пленки на поверхности частицы может быть определена из уравнения

$$\Delta_{\text{пл}} = r_{\text{пл}} - r_i = r_i \left\{ \sqrt[3]{1 + \frac{\rho_{\text{см}}(1-f_p)}{\rho_{\text{в}}}} \left[ U - \frac{f_p}{(1-f_p)} \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{см}}} \right] - 1 \right\}, \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{см}}$  – плотность сухого материала;  $f_p$  – пористость частицы;  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воды.

В реальном полидисперсном слое имеется множество частиц разных размеров, поэтому для характеристики явления комкообразования в слое необходимо иметь статистическую модель комкообразования.

Обозначим концентрацию частиц  $i$ -й группы через  $n_0$  с размерностью ( $1/\text{м}^3$ ), тогда количество частиц ( $i$ ), прилипших на  $j$ -ю группу за единицу времени (с учетом эффективности столкновения  $e$ ), будет:

$$\frac{dn_{ij}}{dt} = 2eF_{ij}n_i, \quad (2)$$

где  $F_{ij}$  характеризует вероятность столкновения и зависит от коэффициента перемешивания и от эффективного радиуса взаимодействия между частицами, поэтому:

$$F_{ij} = 2\pi e z_{ij} D_{\text{пер},ij} \sigma(\Delta), \quad (3)$$

где  $\sigma(\Delta)$  – импульсная функция, определяемая как

$$\sigma(\Delta) = \begin{cases} 1; & \Delta_{\text{пл}} > 0, \\ 0; & \Delta_{\text{пл}} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

С учетом перемешивания получаем:

$$F_{ij} = 2\pi \psi e \frac{(r_i + r_j)^2}{r_i r_j} \sigma(\Delta). \quad (5)$$

Из уравнения (5) следует, что вероятность столкновения частиц с разными радиусами больше, чем частиц с равными радиусами.

Изменение числа элементарных частиц происходит за счет слияния их между собой и с элементарными частицами другой группы, а также с агломератами, что можно отразить следующим уравнением:

$$\frac{d}{dt} \left( \sum_{i=1}^k n_i \right) + F_0 \left( \sum_{i=1}^k n_i \right)^2 + 2F_0 \varphi \sum_{i=1}^k n_i \sum_{i=k+1}^{\infty} n_i = - \left[ \frac{d}{dt} \left( \sum_{i=k+1}^{\infty} n_i \right) + F_0 \varphi \sum_{i=k+1}^{\infty} n_i \right]. \quad (6)$$

В начале процесса комкообразования вероятность того, что сразу образуются большие комки, мала, поэтому в первом приближении можно принять, что правая часть уравнения (6) равна нулю, то есть:

$$\frac{d}{dt} \left( \sum_{i=k+1}^{\infty} n_i \right) = -F_0 \varphi \sum_{i=k+1}^{\infty} n_i. \quad (7)$$

Обозначив число больших частиц в слое через  $N$ , а маленьких частиц через  $n$  и проинтегрировав, получим:

$$\frac{dn}{dt} + F_0 n^2 + \frac{2F_0 \varphi n N_0}{1 + N_0 F_0 \varphi \tau} = 0. \quad (8)$$

Решение уравнения (8) имеет вид:

$$n = \frac{n_0 N_0 (2\varphi - 1)}{\left\{ \left[ n_0 + N_0 (2\varphi - 1) \right] (1 + N_0 F_0 \varphi \tau)^{2\varphi - 1} - n_0 \right\} (1 + N_0 F_0 \varphi \tau)}. \quad (9)$$

Малые частицы в основном налипают на крупные, так что центром комкообразования являются крупные частицы.

Средний размер комка:

$$\bar{r}_k = \bar{r}_p \sqrt[3]{\frac{n_0 r_0^3 + N_0 R_0^3}{\bar{N}}}, \quad (10)$$

где

$$\bar{N} = \frac{N_0}{\tau (1 + N_0 F_0 \varphi)} \ln(1 + N_0 F_0 \tau), \quad (11)$$

то есть

$$\bar{r}_k = \bar{r}_p \sqrt[3]{\frac{(n_0 r_0^3 + N_0 R_0^3) \tau}{F_0 \varphi \ln(1 + N_0 F_0 \tau)}}. \quad (12)$$

Таким образом, для обеспечения устойчивого гидродинамического режима необходимо учитывать комкообразование и определять рабочие скорости псевдооживления с учетом размеров образующихся комков по уравнению (12).

Из проведенного исследования следует, что выбор аппаратурно-технологического оформления процесса сушки высоковлажных тонкодисперсных материалов типа ПВХ является сложной задачей. Применение активных гидродинамических режимов в данной задаче обуславливает во избежание уноса использовать режим виброкипящего слоя, характеризующийся способностью разрушать образующиеся ком-

ки и обеспечивающий равномерную сушку, но имеющий малую тепловую мощность из-за малых рабочих скоростей газа в аппарате, в то время как при сушке высоковлажных материалов требуется большое количество тепла. Выход – в использовании вибрирующих поверхностей нагрева, погруженных в псевдооживленный слой, то есть в применении сушилок типа КСВПН [4].

## ВЫВОДЫ

1. Показано, что при сушке высоковлажных тонкодисперсных полимеров во взвешенном слое происходит комкообразование за счет действия адгезионных, аутогезионных и когезионных свойств высушиваемых материалов, связанных с соответствующими силами.

2. Особое внимание обращено на образующуюся при сушке высоковлажных материалов пленку жидкости, являющуюся главной причиной комкообразования.

3. Осуществлено математическое моделирование комкообразования при наличии водяной пленки на поверхности частиц полидисперсного слоя. Получено уравнение для определения размера образующихся комков.

4. На основании анализа для сушки высоковлажных тонкодисперсных материалов типа ПВХ рекомендован режим

псевдооживления с погруженными в слой вибрирующими поверхностями нагрева.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Сажин Б.С., Сажин В.Б.* Научные основы техники сушки. – М.: Наука, 1997.
2. *Зимон А.Д.* Адгезия пыли и порошков. – М.: Химия, 1976.
3. *Сажин Б.С., Сажин В.Б.* Научные основы термовлажностной обработки дисперсных и рулонных материалов. – М.: Химия, 2012.

4. *Сажин В.Б., Сажина М.Б.* Выбор и расчет аппаратов со взвешенным слоем. – М.: РосЗИТЛП, 2001.

5. *Сажин Б.С., Дмитриева Л.Б., Сажина М.Б.* К вопросу оценки адгезионно-аутогезионных свойств дисперсных волокнообразующих полимеров. // Химические волокна. – 2007, №4. С. 24...28.

Рекомендована кафедрой процессов и аппаратов химической технологии и безопасности жизнедеятельности МГТУ им. А.Н. Косыгина. Поступила 06.12.12.

---