

## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

УДК 621.962.88

**И.М. ЧЕБЕРЯЧКО, В.Г. ДЕРЮГИН, Ю.И. ЧЕБЕРЯЧКО, кандидаты техн. наук,  
Д.С. ПУСТОВОЙ**

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ПРОДУКТОВ ОБОГАЩЕНИЯ В ВИХРЕВЫХ АППАРАТАХ**

Сушка влажных обогащенных концентратов является одним из важнейших процессов в технологических схемах агломерации и грануляции руд черных и цветных металлов, определяющим эффективность и энергозатраты на их реализацию. Формирования способа сушки и конструктивных особенностей сушильных аппаратов, как правило, определяется следующими физическими параметрами исходного материала: размером частиц, влажностью и плотностью. Из большого ассортимента сушилок, широко используемых в различных отраслях техники, нами отдано предпочтение вихревым аппаратам, обладающим высокой интенсивностью теплообменных процессов, в которых процесс сушки влажных материалов осуществляется газообразными энергоносителями.

С точки зрения термодинамики стационарный процесс сушки происходит при постоянных давлении и температуре. Это обусловлено тем, что фазовые переходы связанной капельной жидкости в газообразное состояние являются изобарно-изотермическими процессами.

Технологический процесс сушки в вихревом аппарате протекает таким образом, что высокотемпературный теплоноситель в разгонном канале смешивается с влажным концентратом, образуя гетерогенную среду. В результате непосредственного контакта указанных веществ связанная влага концентрата переходит в водяной пар, смешивается с высокотемпературным теплоносителем и поступает в вихревую камеру, образуя рабочую среду, а после завершения технологического процесса сушки вместе с готовым продуктом покидает ее. Конечная (заданная) влажность концентрата определяется, с одной стороны, временем его нахождения в вихревой камере, а с другой – ее геометрическими размерами. Как первый, так и второй показатели определяют скорость выноса готового продукта из камеры после достижения им состояния готовности.

Известно, что конструкция вихревой камеры обеспечивает такую аэродинамику аппарата, при которой любая частица гетерогенной среды обязательно попадает в центробежное поле энергоносителя.

Отличительной особенностью вихревого способа сушки является то, что влажный материал с большой скоростью (достигающий 120 м/с) вводят тангенциально в цилиндрическую камеру, благодаря чему в ней создается "винтообразный" поток. Тангенциальный ввод влажного материала вместе с потоком энергоносителя в зависимости от геометрии аппарата возможен в одном или нескольких местах в нижней части сушильной камеры. При этом мелкодисперсный материал отбрасывается к внутренним поверхностям стенки аппарата

## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

и перемещается в вихревом слое по сечению цилиндрической камеры снизу вверх. Трение материала о стенку в криволинейном потоке гетерогенной среды создает определенные градиенты скорости по сечению камеры, обеспечивающие оптимальные коэффициенты теплообмена. Такую аэродинамику невозможно получить ни в трубах-сушилках, ни в сушильных установках с кипящим слоем.

В вихревом потоке из всех составляющих сложного теплообмена доминирует конвективный теплообмен, обусловленный большими относительными скоростями твердой фазы гетерогенного потока, из-за чего движение смеси в вихревой сушилке представляет собой сложный аэродинамический процесс, определяемый рядом факторов, основными из которых являются следующие [1]:

- геометрические размеры аппарата;
- теплофизические параметры исходного и конечного продуктов.

Анализ литературных источников показывает [2, 3], что одновременный учет теплофизических свойств рабочего потока, влияющих на кинематику гетерогенной смеси в вихревом аппарате, практически невозможен. Поэтому на практике используют экспериментальные данные и соответствующие критерии подобия, полученные на основе их гидродинамического моделирования.

Многие авторы считают [2, 3], что основное влияние на процесс сушки мелкодисперсных продуктов в вихревой камере оказывают кинематические параметры вихревого потока, их изменение по высоте и радиусу (ширине) камеры. Поэтому для составления математической модели движения вихревого потока с большой плотностью твердых частиц были использованы дифференциальные уравнения Эйлера, и уравнение неразрывности, в которых плотность рабочего потока рассматривается как сплошной среды.

Активная область вихревого слоя в камере обладает осевой симметрией, поэтому движение потока представляется в цилиндрической системе координат. При стационарном процессе сушки температуры вихревого слоя по высоте и радиусу вихревой камеры, как показывают измерения, меняется незначительно и этим изменением пренебрегаем без ущерба для получения конечных результатов. В этом случае дифференциальные уравнения движения гетерогенного потока могут быть представлены в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{r} \rho V_r + \frac{\partial \rho}{\partial r} V_r + \frac{\partial V_r}{\partial r} \rho + V_z \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \rho = 0 \\ V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} - \frac{V_\theta^2}{r} = -\frac{1}{\rho} RT \frac{\partial \rho}{\partial r} \\ V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} + \frac{V_r V_\theta}{r} = 0 \\ V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} RT \frac{\partial \rho}{\partial z} + g \end{array} \right. ,$$

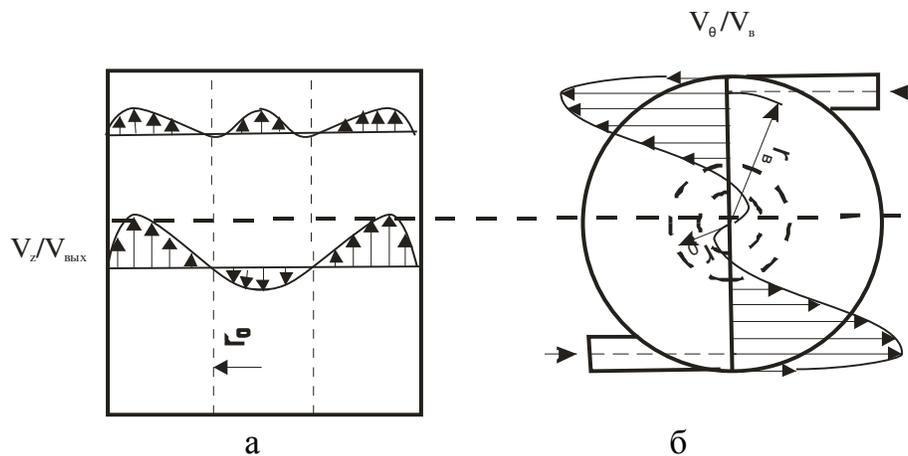
## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

где  $V_r$ ,  $V_\theta$ ,  $V_z$  – соответственно радиальная, окружная и осевая скорости вихревого потока;  $r$ ,  $\theta$ ,  $z$  – геометрические параметры циклонного аппарата;  $T$ ,  $\rho$  – температура и плотность потока, К кг/м<sup>3</sup>;  $R$  – постоянная газовой смеси, Дж/(кг К);  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>.

Учитывая, что вихревое движение потока в камере асимметричное, существенными аргументами искомым функций для него будут только координаты  $r$  и  $z$ . Полученная система уравнений может быть значительно упрощена, если ее условно рассматривать в соответствии с характерными зонами в сушильном аппарате, границы которых могут быть использованы как условия однозначности при решении исходной системы дифференциальных уравнений.

Предложенная математическая модель гетерогенного потока в вихревом аппарате была решена с использованием метода локальных вариаций, конечных элементов и наименьших квадратов. Задавая геометрические и технологические параметры потока в уравнениях модели, получили распределения теплофизических параметров в объеме камеры.

Полученные результаты были обработаны, проанализированы и представлены в виде кривых распределения составляющих скоростей вихревого движения гетерогенного потока по радиусу и высоте камеры (рисунок а и б).



Распределения скоростей по сечению вихревой камеры:  
а – поля осевых скоростей; б – поля тангенциальных скоростей.  
 $V_\theta$ ,  $V_z$  – соответственно окружная и осевая скорости вихревого потока;  
 $V_{\text{вых}}$ ,  $V_{\text{в}}$  – соответственно выходная и входная скорости потока

Из рисунка следует, что распределение осевых скоростей по сечению вихревого аппарата на входе в рабочую область носит волнистый характер. От боковых стенок к оси камеры скорости возрастают от нуля до максимальной величины, после чего они снижаются, достигая величины скорости на стенке.

В центральной части аппарата возникает обратный поток гетерогенной смеси, обусловленный падением осевой скорости, приводящий к снижению эффективности процесса сушки. В дальнейшем происходит выравнивание скоростей по всему сечению, хотя оно носит волнообразный характер.

Из рисунка а и б следует, что для снижения энергоемкости процесса сушки

## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

необходимо изменить конструкцию вихревой камеры, так как центральная ее часть практически не влияет на процессы теплообмена, а только снижает окружную скорость вихревого потока. В этой связи необходимо при увеличении типоразмеров сушильных аппаратов предусмотреть специальные вставки в центральную часть камеры, которые приведут к увеличению окружных скоростей и интенсифицируют процессы теплообмена в камере. Осевая скорость стационарного процесса сушки определяют время пребывания частиц в вихревой камере и зависит от ее геометрических размеров.

Таким образом, разработанная математическая модель и результаты ее решения позволяют получить параметры энергоносителя и геометрические размеры самой камеры, а также стабилизировать температуру конечного продукта.

Экспериментальные исследования по изучению процесса сушки в вихревых потоках ряда авторов [5] подтверждают достоверность данных, полученных в результате математического моделирования.

### **Список литературы**

1. Горобец В.И., Горобец Л.Ж. Новое направление работ по измельчению. – М.: Недра, 1977. – 183 с.
2. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике: 7 изд. – М.: Гостехиздат, 1972. – 329 с.
3. Чеберячко И.М. Разработка процесса тонкого измельчения материалов вихревой мельницы. Дис. канд. техн. наук. 05.15.08. – Защищена 24.12.87: Утв. 11.05.88. – Днепропетровск. 1987. – 246 с.
4. Тамака Т. Scale-up theory of jet mills on basis of comminution kinetics // Industrial and engineering chemistry Design and development. – 1972. – V/3/, №2. – P. 238-244.
5. Гудима В.И. и др. Сушка титано-циркониевого концентрата в вихревой сушилке // Цветные металлы. – 1972. – №6. – С. 45-51.

© Чеберячко И.М., Дерюгин В.Г., Чеберячко Ю.И., Пустовой Д.С., 2011

*Надійшла до редколегії 22.09.2011 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. І.К. Младецьким*