

## Движение измельчаемого материала по поверхности ускорителя ударно-центробежной мельницы

Скорость и траектория движения обрабатываемого материала в агрегате часто являются определяющими факторами интенсификации технологического процесса. Это в полной мере относится и к ударно-центробежным мельницам (скорость рабочего органа 20...100 м/с), которые широко используются для обогащения руд, в том числе калийных, для помола извести и в других технологических процессах. Ударное измельчение предпочтительно использовать в следующих случаях: селективное измельчение (создание высокоградиентных нагрузок для разрушения межкристаллических связей); измельчение неабразивных материалов средней прочности; механическая активация материалов (требуется значительная концентрация энергии для максимально быстрого доведения их до состояния пластической деформации) [1].

Основной узел ударно-центробежной мельницы — ротор-ускоритель (диск с укрепленными на нем лопастями), установленный на вертикальном приводном валу [2]. Под воздействием инерционных сил измельчаемый материал движется в межлопастном пространстве от центра к периферии и, с высокой скоростью ударяясь об отбойные пластины статора, разрушается. Такие мельницы обычно применяются в замкнутом цикле с классификаторами. Частицы крупнее требуемого размера отделяются в классификаторе и возвращаются в зону разрушения.

Лопастей целесообразно выполнять криволинейными и загнутыми по ходу вращения ускорителя. При этом форма лопасти — отрезок логарифмической спирали. Это обеспечивает залегание материала на поверхности лопасти, а следовательно — реализацию принципа «самофутеровки», способствующего значительному снижению абразивного износа [2, 3].

Изучение движения материала в межлопастном пространстве [3 и др.] осуществлялось на примере одиночной частицы. Это допустимо при использовании ударно-центробежных агрегатов в качестве дробилок (размер загружаемых кусков 10...80 мм). В мельницах размер загружаемого материала менее 10 мм, а возвращаемого из классификатора — менее 1,0 мм. В этом случае измельчается сыпучая среда, в которой необходимо учитывать взаимодействие между частицами.

Для расчета параметров движения сыпучей среды можно применять такой же подход, что и для движения жидкости [4]. Этот подход базируется на использовании уравнений Навье — Стокса и неразрывности. С учетом небольшой высоты ротора и осевой симметрии течения уравнения движения в полярной системе координат имеют вид [5, 6]:

$$\begin{cases} v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_\varphi^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + v \left( \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} \right); \\ v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \frac{v_r v_\varphi}{r} = v \left( \frac{\partial v_\varphi^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} - \frac{v_\varphi}{r^2} \right); \\ \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $v_r$ ,  $v_\varphi$  — составляющие скорости потока;  $\rho$  — плотность сыпучей среды;  $r$  — текущий радиус на диске ротора;  $p$  — давление в потоке;  $v$  — аналог кинематической вязкости.

Характерная особенность движения частиц в межлопастном пространстве — жесткая связь между угловым и радиальным перемещениями, обусловленная кривизной лопасти. Для лопасти в форме логарифмической спирали эта связь в полярной системе координат устанавливается уравнением  $r = a^\varphi$  ( $a$  — параметр кривизны), при этом полярный угол  $\varphi = \log_a r$ . Сыпучая среда в межлопастном пространстве участвует в сложном движении: вращается вместе с ротором и одновременно перемещается относительно лопасти по криволинейной траектории, повторяющей кривизну лопастей (рис. 1).

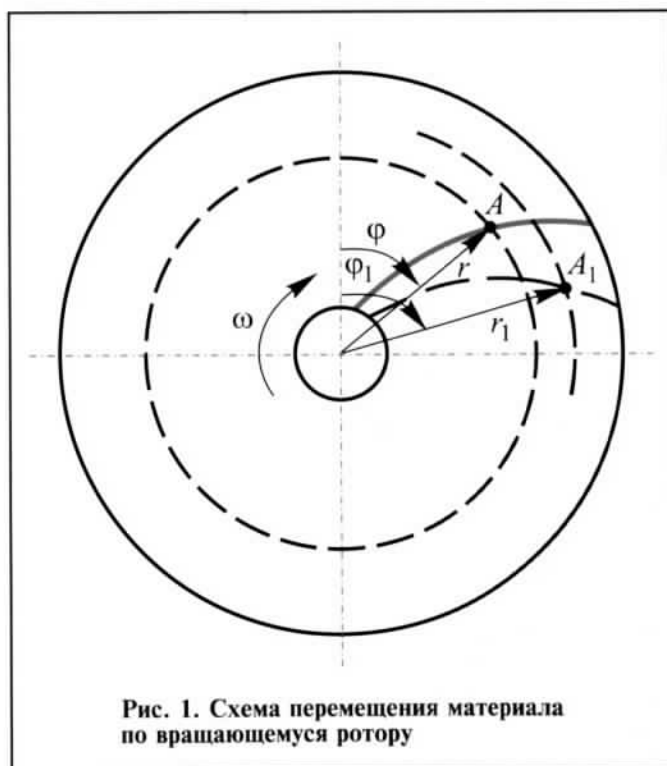


Рис. 1. Схема перемещения материала по вращающемуся ротору

Поэтому суммарное угловое перемещение за определенный промежуток времени определяется по формуле

$$\varphi = \omega t + \log_a r. \quad (2)$$

Окружная скорость  $v_\varphi = r\dot{\varphi}$ . Производная угла  $\varphi$  по времени имеет вид

$$\dot{\varphi} = \omega + \frac{1}{r} \frac{dr}{dt} = \omega + \frac{1}{r \ln a} v_r, \quad (3)$$

тогда окружная скорость

$$v_\varphi = r \left( \omega + \frac{1}{r \ln a} v_r \right), \quad (4)$$

и второй член в первом уравнении системы (1) примет вид

$$\frac{v_\varphi^2}{r} = r \left( \omega + \frac{1}{r \ln a} v_r \right)^2. \quad (5)$$

Таким образом, выразив  $v_\varphi$  через  $v_r$  мы можем избавиться от второго уравнения системы (1). Давление в потоке сыпучей смеси определяется по скорости ее движения  $p = \rho(v_r^2 + v_\varphi^2)/2$ . Здесь также можно произвести замену согласно уравнению (4). В итоге расчетная система уравнений приобретает вид

$$\begin{cases} v_r \frac{dv_r}{dr} - r \left( \omega + \frac{1}{r \ln a} v_r \right)^2 = \\ = -\frac{1}{2} \frac{d}{dr} \left[ v_r^2 + \left( r\omega + \frac{v_r}{\ln a} \right)^2 \right] + v \left( \frac{d^2 v_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dv_r}{dr} - \frac{v_r}{r^2} \right); \\ \frac{dv_r}{dr} + \frac{v_r}{r} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

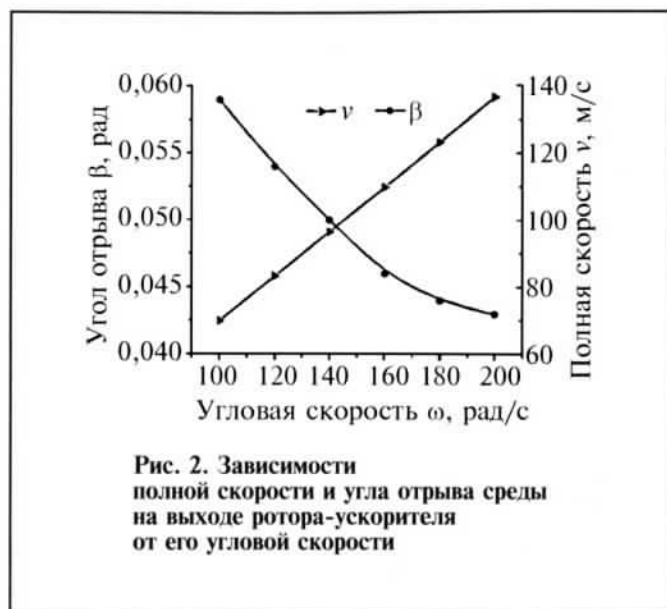
Начальная скорость на входе в межлопаточное пространство рассчитывалась с использованием уравнения постоянства расхода сыпучей среды

$$v_{r0} = \frac{Q(1+c)}{\pi d_0 h (1-\varepsilon)}, \quad (7)$$

где  $Q$  — производительность мельницы,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $c$  — доля циркулирующего материала;  $d_0$  — начальный диаметр установки лопастей,  $\text{м}$ ;  $h$  — высота лопасти,  $\text{м}$ ;  $\varepsilon$  — порозность сыпучей среды.

Уравнения (6) решали численным методом с использованием пакета MathCad. Вначале рассчитывали радиальную составляющую скорости  $v_r$  затем —  $v_\varphi$  по формуле (4), угол отрыва на выходе из ускорителя  $\beta = \arctg v_r/v_\varphi$ . Полная скорость сыпучей среды при этом  $v = v_r/\sin \beta$ .

Результаты апробации предлагаемого алгоритма для ротора-ускорителя диаметром 1310 мм и высотой лопастей 160 мм представлены на **рис. 2**.



Зависимость полной скорости сыпучей среды на выходе ротора-ускорителя от его угловой скорости носит линейный характер — с увеличением угловой скорости возрастает и полная скорость сыпучей среды. Изменение угла отрыва имеет более сложный вид. На начальном участке ( $\omega < 150$  рад/с) угол отрыва уменьшается практически линейно, далее его изменение носит асимптотический характер.

Полученные данные можно использовать для ориентации отбойных пластин статора с целью наибольшего приближения удара к прямому, при котором достигается максимальный разрушающий эффект. Кроме того, по скорости на выходе из ускорителя уже на начальном этапе конструирования можно оценить разрушающую способность ударного воздействия.

## Список литературы

- Вайтехович П.Е.** Интенсификация и моделирование процессов диспергирования в поле инерционных сил. Минск: БГТУ, 2008. 220 с.
- Бороха Э.Л., Воробьев В.В., Горобец А.В.** Центробежные дробилки и мельницы ударного типа // НАН Беларуси: матер. 3-й междунар. науч.-техн. конф. «Центробежная техника — высокие технологии». Минск, 9–11 сентября 2008 г. НПРУП «НПО «Центр». Минск. 2008. С. 5–15.
- Товаров В.В., Оскаленко Г.Н.** Исследование вылета частиц из лопатных роторов центробежных измельчающих машин // Труды ин-та Гипроцемент. Вып. XXIV. Госстройиздат. 1962. С. 64–91.
- Генералов М.Б.** Механика твердых дисперсных сред в процессах химической технологии. Калуга.: Н. Бочкарево. 2002. 592 с.
- Лойцянский Л.Г.** Механика жидкости и газа. М.: Наука. 1978. 736 с.
- Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя. М.: Наука. 1974. 711 с.