

Семикопенко И.А., канд. техн. наук, проф.,
Воронов В.П., канд. физ.-мат. наук, проф.,
Горбань Т.Л., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦЫ МАТЕРИАЛА ВДОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ЛОПАСТИ РОТОРА

olimp69@narod.ru

В данной статье теоретически исследовано движение частицы материала вдоль криволинейной поверхности. Криволинейная поверхность разбита на «n» количество прямолинейных ломаных линий. С точностью до величин второго порядка малости определена скорость движения частицы материала вдоль поверхности криволинейной лопасти ротора. В результате расчетов получено выражение, из которого следует, что данную скорость можно считать постоянной величиной.

Ключевые слова: криволинейная поверхность, частица, скорость движения

В последние годы для производства тонкодисперсных порошков широкое распространение получили мельницы интенсивного действия с высокой скоростью нагружения [1]. К таким измельчителям, в частности, относятся мельницы ударно-отражательного действия и центробежно-противоточные мельницы. Оптимизация механики движения материала в этих мельницах, достигаемая правильным конструктивным решением, позволяет обеспечивать скорости, достаточные для получения заданного гранулометрического состава готового продукта при минимальных энергозатратах и износе рабочих органов.

Рассмотрим движение частицы материала вдоль поверхности криволинейной лопасти ротора, имеющей постоянный радиус кривизны R_k . Криволинейную дугу лопасти ротора разобьем «n» количеством прямолинейных ломаных линий (см. рисунок 1), начиная от точки поступления частицы материала на поверхность криволинейной лопасти.

Согласно результату работы [2] скорость движения частицы материала вдоль поверхности первого прямолинейного участка пути можно описать уравнением следующего вида:

$$W_1 \frac{dW_1}{d\xi_1} + 2fW_1 - \xi_1 = \cos \beta_1 - f \sin \beta_1, \quad (1)$$

где f – коэффициент трения частицы материала о поверхность криволинейной лопасти; β_1 – угол, образованный первой ломаной линией с радиальным направлением, проведенным из центра вращения.

В соотношении (1) введены следующие обозначения:

$$W_1 = \frac{V_1}{\omega \rho_1}, \quad (2)$$

$$\xi_n = \frac{x_1}{\rho_1}, \quad (3)$$

здесь x_1 – координата движения частицы материала вдоль поверхности первого прямолинейного участка; ρ_1 – радиальное расстояние от центра вращения до начала первого прямоли-

нейного участка пути; V_1 – скорость движения частицы материала на первом прямолинейном участке пути; ω – частота вращения лопасти ротора.

На основании результата работы [2] находим, что

$$V_1 = \omega \rho_1 \frac{\cos \beta_1 - f \sin \beta_1}{2f}. \quad (4)$$

Согласно расчетной схеме, представленной на рисунке 1 и теореме косинусов, применимой к треугольнику OO_1O_2 находим:

$$\rho_2^2 = \rho_1^2 + x_1^2 + 2x_1\rho_1 \cos \beta_1. \quad (5)$$

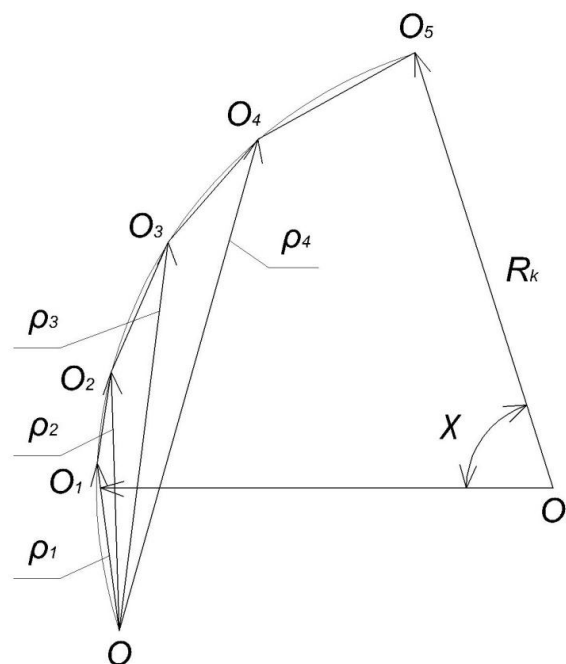


Рис. 1. Расчетная схема к описанию движения частицы материала вдоль поверхности криволинейной лопасти ротора

Очевидно, что при достаточно большом числе разбиений исходной дуги криволинейной лопасти отношение величин $\frac{x_1}{\rho_1}$ будет являться малой величиной. В дальнейшем отношение каждого прямолинейного участка пути к своему радиальному расстоянию

$$\frac{x_n}{\rho_n} = 0 \left(\frac{x_n}{\rho_n} \right) n = 1, 2 \dots \quad (6)$$

будем считать малой величиной первого порядка малости.

$$\rho_2 = \rho_1 \left(1 + \frac{2x_1}{\rho_1} \cos \beta_1 + \frac{x_1^2}{\rho_1^2} \right)^{\frac{1}{2}} \approx \rho_1 \left(1 + \frac{2x_1}{\rho_1} \cos \beta_1 \right)^{\frac{1}{2}} \approx \rho_1 \left(1 + \frac{x_1}{\rho_1} \cos \beta_1 \right). \quad (7)$$

Аналогично для движения частицы на втором и третьем прямолинейном участке можно получить следующие соотношения

$$V_2 = \omega \rho_2 \frac{\cos \beta_2 - f \sin \beta_2}{2f}, \quad (8)$$

$$V_3 = \omega \rho_3 \frac{\cos \beta_3 - f \sin \beta_3}{2f} \quad (9)$$

где

$$\rho_3 = \rho_2 \left(1 + \frac{x_2}{\rho_2} \cos \beta_2 \right). \quad (10)$$

$$\rho_1 \cos \beta_1 - \rho_1 f \sin \beta_1 = \rho_1 \left(1 + \frac{x_1}{\rho_1} \cos \beta_1 \right) (\cos \beta_2 - f \sin \beta_2). \quad (12)$$

На основании (12) можно получить следующие соотношения

$$\cos \beta_1 = \cos \beta_2 \left(1 + \frac{x_1}{\rho_1} \cos \beta_1 \right) \quad (13)$$

и

$$\sin \beta_1 = \sin \beta_2 + \frac{x_1}{\rho_1} \cos \beta_1 \sin \beta_2. \quad (14)$$

Соотношение (5) с точностью до величины второго порядка малости можно привести к следующему виду [3]:

Из условия непрерывности величины скорости в точке O_i можно записать следующее соотношение

$$\omega \rho_1 \frac{\cos \beta_1 - f \sin \beta_1}{2f} = \omega \rho_2 \frac{\cos \beta_2 - f \sin \beta_2}{2f}. \quad (11)$$

С учетом соотношения (8) (11) можно привести к следующему виду:

С учетом (13) и (14) с точностью до величин первого порядка малости согласно (6) можно получить следующие соотношения:

$$\cos \beta_2 = \cos \beta_1 \left(1 - \frac{x_1}{\rho_1} \cos \beta_1 \right) \quad (15)$$

и

$$\sin \beta_2 = \sin \beta_1 \left(1 - \frac{x_1}{\rho_1} \cos \beta_1 \right). \quad (16)$$

Подставляя (7) и (15) в (10) находим, что

$$\rho_3 = \rho_1 \left(1 + \frac{x_1}{\rho_1} \cos \beta_1 \right) \left(1 + \frac{x_2 \cos \beta_1 \left(1 - \frac{x_1}{\rho_1} \cos \beta_1 \right)}{\rho_1 \left(1 + \frac{x_1}{\rho_1} \cos \beta_1 \right)} \right). \quad (17)$$

Будем считать, что все прямолинейные участки разбиения имеют одинаковый размер, т.е.

$$x_1 = x_2 = x_3 = \dots = x_n = \text{const} = x. \quad (18)$$

С учетом (18) и (16) получаем, что (17) имеет вид:

$$\begin{aligned} \rho_3 &\approx \rho_1 \left(1 + \frac{x}{\rho_1} \cos \beta_1 \right) \left(1 + \frac{x}{\rho_1} \cos \beta_1 \left(1 - \frac{x}{\rho_1} \cos \beta_1 \right) \left(1 - \frac{x}{\rho_1} \cos \beta_1 \right) \right) \approx \\ &\approx \rho_1 \left(1 + \frac{x}{\rho_1} \cos \beta_1 \right) \left(1 + \frac{x}{\rho_1} \cos \beta_1 \left(1 - \frac{x}{\rho_1} \cos \beta_1 \right) \right) \approx \\ &\approx \rho_1 \left(1 + \frac{x}{\rho_1} \cos \beta_1 \right) \left(1 + \frac{x}{\rho_1} \cos \beta_1 \right) \approx \rho_1 \left(1 + 2 \frac{x}{\rho_1} \cos \beta_1 \right). \end{aligned} \quad (19)$$

Аналогично можно получить следующие соотношения:

$$\rho_4 \cong \rho_1 \left(1 + 3 \frac{x}{\rho_1} \cos \beta_1 \right); \quad (20)$$

$$\cos \beta_3 \cong \cos \beta_1 \left(1 - 2 \frac{x}{\rho_1} \cos \beta_1 \right); \quad (21)$$

$$\cos \beta_4 \cong \cos \beta_1 \left(1 - 3 \frac{x}{\rho_1} \cos \beta_1 \right); \quad (22)$$

$$\sin \beta_3 \cong \sin \beta_1 \left(1 - 2 \frac{x}{\rho_1} \cos \beta_1 \right); \quad (23)$$

$$\sin \beta_4 \cong \sin \beta_1 \left(1 - 3 \frac{x}{\rho_1} \cos \beta_1 \right). \quad (24)$$

Используя метод математической индукции, можно доказать, что выполняются соотношения:

$$\rho_n \cong \rho_1 \left(1 + (n-1) \frac{x}{\rho_1} \cos \beta_1 \right); \quad (25)$$

$$\cos \beta_n \cong \cos \beta_1 \left(1 - (n-1) \frac{x}{\rho_1} \cos \beta_1 \right); \quad (26)$$

$$\sin \beta_n \cong \sin \beta_1 \left(1 - (n-1) \frac{x}{\rho_1} \cos \beta_1 \right). \quad (27)$$

На основании найденных соотношений (25) - (27) определим скорость движения частицы материала на прямолинейном участке:

$$V_n = \omega \rho_n \frac{\cos \beta_n - f \sin \beta_n}{2f}. \quad (28)$$

Подстановка (25) - (27) в (28) приводит к следующему результату:

$$V_n \cong \omega \rho_1 \left(1 + (n-1) \frac{x}{\rho_1} \cos \beta_1 \right) \frac{\cos \beta_1 - (n-1) \frac{x}{\rho_1} \cos^2 \beta_1 - f \sin \beta_1 + f(n-1) \frac{x}{\rho_1} \sin \beta_1 \cos \beta_1}{2f}. \quad (29)$$

С точностью до величин второго порядка малости на основании (29) можно получить следующее выражение:

$$\begin{aligned}
 V_n &= \omega \rho_1 \frac{\cos \beta_1 - f \sin \beta_1}{2f} + \\
 &+ \frac{\omega \rho_1 \left((n-1) \frac{x}{\rho_1} \cos^2 \beta_1 - (n-1) \frac{x}{\rho_1} \cos^2 \beta_1 - \frac{x}{\rho_1} f (n-1) \sin \beta_1 \cos \beta_1 + f (n-1) \frac{x}{\rho_1} \sin \beta_1 \cos \beta_1 \right)}{2f} = \\
 &= \omega \rho_1 \frac{\cos \beta_1 - f \sin \beta_1}{2f} \equiv V_1 = \text{const} = V_\rho. \quad (30)
 \end{aligned}$$

Таким образом, с точностью до величин второго порядка малости скорость движения частицы материала вдоль поверхности криволинейной лопасти ротора можно считать постоянной величиной, значение которой определяется выражением (30).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Товаров В.В., Оскаленко Г.Н. Исследование вылета частиц из лопастных роторов центробежных измельчающих машин // Труды Ги-процент. М.: Госстройиздат, 1962. - Вып.84. С. 38-45. 263.
2. Воронов В.П., Семикопенко И.А., Пензев П.П. Теоретические исследования скорости движения частиц материала вдоль поверхности ударного элемента мельницы дезинтеграторного типа // Известия ВУЗов. Строительство, № 11-12, 2008. С. 93-96.
3. Кухлинг Х. Справочник по физике. М.: Мир, 1982. 520 с.