

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА СХОДА ЧАСТИЦЫ МАТЕРИАЛА С ПОВЕРХНОСТИ ЛОПАСТИ РОТОРА

olimp69@narod.ru

В статье теоретически исследован процесс схода частицы материала с поверхности криволинейной лопасти вращающегося ротора. Приведена расчетная схема с указанием текущей координаты движения частицы вдоль поверхности прямолинейных участков. Получено аналитическое выражение, из которого следует, что величина угла схода частицы с поверхности лопасти зависит от отношения скоростей движения частицы по поверхности криволинейной лопасти ротора и линейной скорости вращения точки схода частицы, а также от углового размера, задающего отклонение конца криволинейной дуги от радиального направления.

Ключевые слова: криволинейная лопасть, частица, угол схода

К измельчителям, обеспечивающим эффективный помол абразивных материалов, относятся центробежно-противоточные мельницы. Оптимизация траекторий движения различных по крупности частиц материала в этих мельницах, достигаемая правильным конструктивным решением, позволяет получить заданный гранулометрический состав готового продукта при минимальных энергозатратах и износе рабочих органов [1].

Рассмотрим процесс схода частицы материала с поверхности криволинейной лопасти ротора, вращающегося с частотой ω .

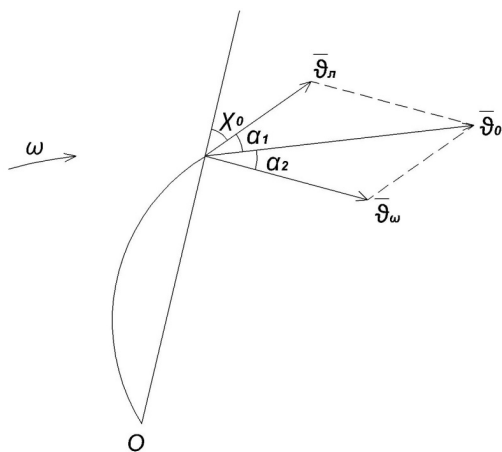


Рис. 1. Расчетная схема для определения угла схода α_1 частицы материала с вращающейся криволинейной поверхностью лопасти ротора

На основании расчетной схемы, представленной на рисунке 1, можно записать следующее соотношение векторов скоростей для частицы материала:

$$\vec{v}_0 = \vec{v}_l + \vec{v}_\omega, \quad (1)$$

где \vec{v}_0 – результирующий вектор скорости частицы материала, построенный по правилу параллелограмма; \vec{v}_l – вектор скорости схода частицы материала с конечной точки поверхности

криволинейной лопасти; \vec{v}_ω – вектор окружной скорости движения криволинейной лопасти, направленный по касательной к окружности, описываемой лопастью, в точке схода.

Умножение векторного соотношения (1) скалярно на вектор \vec{v}_0 приводит к следующему выражению:

$$v_0^2 = \vec{v}_l \vec{v}_0 + \vec{v}_\omega \vec{v}_0, \quad (2)$$

или в скалярной форме:

$$v_0^2 = v_l v_0 \cos \alpha_2 + v_\omega v_0 \cos \alpha_1. \quad (3)$$

Умножение векторного соотношения (1) скалярно на вектор \vec{v}_l приводит к результату:

$$\vec{v}_0 \vec{v}_l = v_l^2 + \vec{v}_\omega \vec{v}_l, \quad (4)$$

или в скалярной форме:

$$v_0 v_l \cos \alpha_2 = v_l^2 + v_\omega v_l \cos(\alpha_1 + \alpha_2). \quad (5)$$

Умножение векторного соотношения (1) скалярно на вектор \vec{v}_ω дает результат:

$$\vec{v}_0 \vec{v}_\omega = \vec{v}_l \vec{v}_\omega + v_\omega^2, \quad (6)$$

или в скалярной форме

$$v_0 v_\omega \cos \alpha_1 = v_l v_\omega \cos(\alpha_1 + \alpha_2) + v_\omega^2. \quad (7)$$

На основании (5) находим, что:

$$\cos(\alpha_1 + \alpha_2) = \frac{v_0 v_l \cos \alpha_2 - v_l^2}{v_\omega v_l}. \quad (8)$$

Подстановка (8) в (7) позволяет получить следующее выражение:

$$v_0 v_\omega \cos \alpha_1 = v_0 v_l \cos \alpha_2 + v_\omega^2 - v_l^2. \quad (9)$$

Полученные соотношения (3) и (9) будем рассматривать как систему линейных уравнений, относительно неизвестных $\cos \alpha_1$ и $\cos \alpha_2$:

$$\begin{cases} v_\omega \cos \alpha_1 + v_l \cos \alpha_2 = v_0 \\ -v_0 v_\omega \cos \alpha_1 + v_0 v_l \cos \alpha_2 = v_l^2 - v_\omega^2. \end{cases} \quad (10)$$

Система уравнений (10) будет иметь решение, если главный определитель системы не равен нулю:

$$\Delta = \begin{vmatrix} v_\omega & v_l \\ -v_0 v_\omega & v_0 v_l \end{vmatrix} = v_0 v_l v_\omega + v_0 v_l v_\omega = 2v_0 v_l v_\omega \neq 0. \quad (11)$$

С учетом (11) находим, что

$$\cos \alpha_1 = \frac{v_0^2 - v_l^2 + v_\omega^2}{2v_0 v_\omega}, \quad (12)$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{v_0^2 + v_l^2 - v_\omega^2}{2v_0 v_l} \quad (13)$$

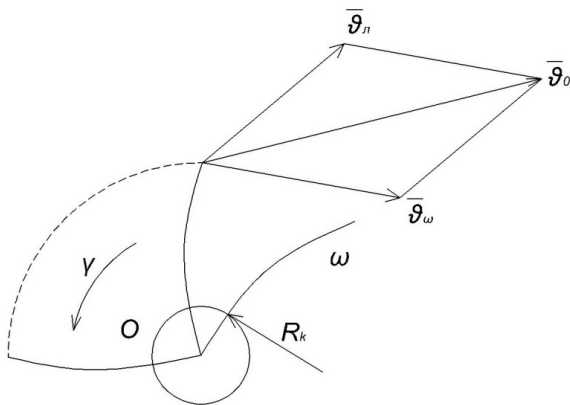


Рис. 2. Расчетная схема определения радиуса кривизны лопасти ротора для обеспечения встречного лобового соударения частиц материала

$$\frac{(v_0^2 + v_l^2 - v_\omega^2) \cdot (v_0^2 - v_l^2 + v_\omega^2)}{4v_0^2 \cdot v_l \cdot v_\omega} - \sqrt{\left(1 - \frac{(v_0^2 - v_l^2 + v_\omega^2)^2}{4v_0^2 \cdot v_\omega^2}\right) \cdot \left(1 - \frac{(v_0^2 + v_l^2 - v_\omega^2)^2}{4v_0^2 \cdot v_l^2}\right)} = \sin \chi_0 \quad (19)$$

Полученное соотношение (19) можно рассматривать как уравнение относительно неизвестной величины v_0^2 .

Уравнение (19) имеет два корня:

$$(v_0^2)_1 = \frac{v_l^4 + v_\omega^4 - 2 \cdot v_l^2 \cdot v_\omega^2}{v_l^2 + v_\omega^2 - 2 \cdot \sin \chi_0 \cdot v_l \cdot v_\omega}; \quad (20)$$

и

$$(v_0^2)_2 = v_l^2 + v_\omega^2 + 2 \cdot \sin \chi_0 \cdot v_l \cdot v_\omega. \quad (21)$$

Для определения истинного значения корня уравнения (19) воспользуемся предельным переходом $\chi_0 \rightarrow 0$, что соответствует прямолинейному радиальному расположению лопасти ротора. Для радиально расположенной лопасти ротора $\chi_0 = 0$ и должно выполняться соотношение:

$$v_0^2 = v_l^2 + v_\omega^2. \quad (22)$$

Если в полученных соотношениях (20) и (21) положить $\chi_0 = 0$, тогда они примут вид:

$$(v_0^2)_1 = \frac{(v_l^2 + v_\omega^2)^2}{v_l^2 + v_\omega^2} \quad (23)$$

и

$$(v_0^2)_2 = v_l^2 + v_\omega^2. \quad (24)$$

Сравнение полученных соотношений (23) и (24) с (22) позволяет сделать вывод, что истинным корнем уравнения (19) является выражение (21).

Согласно расчетной схемы, представленной на рисунке 2 и на основании теоремы косинусов можно записать следующее соотношение:

$$v_l^2 = v_\omega^2 + v_0^2 - 2 \cdot v_0 \cdot v_\omega \cdot \cos \alpha_1. \quad (25)$$

Подстановка в (25) формулы (21) позволяет получить соотношение следующего вида:

$$v_l^2 = v_\omega^2 + v_l^2 + v_\omega^2 + 2 \cdot \sin \chi_0 \cdot v_l \cdot v_\omega \quad (26)$$

или

$$v_\omega^2 + v_l \cdot v_\omega \cdot \sin \chi_0 = v_0 \cdot v_\omega \cdot \cos \alpha_1. \quad (27)$$

В соответствии с расчетной схемой, представленной на рисунке 2, можно получить следующее соотношение:

$$\chi_0 + \alpha_1 + \alpha_2 = \pi/2. \quad (14)$$

На основании (14) находим, что:

$$\cos(\alpha_1 + \alpha_2) = \cos(\pi/2 - \chi_0) \quad (15)$$

или

$$\cos \alpha_1 \cos \alpha_2 - \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 = \sin \chi_0. \quad (16)$$

Учитывая, что:

$$\sin \alpha_1 = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha_1} = \sqrt{1 - \frac{(v_0^2 - v_l^2 + v_\omega^2)^2}{4v_0^2 v_\omega^2}}, \quad (17)$$

$$\sin \alpha_2 = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha_2} = \sqrt{1 - \frac{(v_0^2 + v_l^2 - v_\omega^2)^2}{4v_0^2 v_l^2}}, \quad (18)$$

выражению (16) можно придать следующий вид:

На основании (27) с учетом (21) находим, что

$$\cos \alpha_1 = \frac{v_\omega + v_l \cdot \sin \chi_0}{\sqrt{v_l^2 + v_\omega^2 + 2 \cdot \sin \chi_0 \cdot v_l \cdot v_\omega}} = \frac{1 + \frac{v_l}{v_\omega} \sin \chi_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{v_l}{v_\omega}\right)^2 + 2 \cdot \frac{v_l}{v_\omega} \sin \chi_0}}. \quad (28)$$

Согласно (28) определяем угол схода частицы материала с поверхности криволинейной лопасти ротора:

$$\alpha_1 = \arccos\left(\frac{1 + \frac{v_l}{v_\omega} \sin \chi_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{v_l}{v_\omega}\right)^2 + 2 \cdot \frac{v_l}{v_\omega} \sin \chi_0}}\right). \quad (29)$$

Таким образом, полученное выражение (29) определяет величину угла схода частицы материала с поверхности криволинейной лопасти ротора. Полученная величина зависит от отношения скоростей движения частицы по поверхности криволинейной лопасти и линейной скорости вращения точки схода частицы, которая определяется следующим соотношением:

$$v_\omega = \omega R_p, \quad (30)$$

где R_p – длина хорды, которая соединяет центр вращения ротора и точку схода частицы материала.

Величина угла схода зависит также от конструктивного параметра « χ_0 » – углового размера, задающего отклонение конца криволинейной дуги от радиального направления R_k .

Пусть t_1 – время, в течение которого конец криволинейной лопасти опишет дугу размером γ . Величина данного промежутка времени равна:

$$t_1 = \frac{R_p \cdot \gamma}{v_\omega}. \quad (31)$$

С учетом (30) (31) принимает вид:

$$t_1 = \frac{\gamma}{\omega}. \quad (32)$$

Пусть t_2 – время, за которое частица материала пройдет расстояние от точки загрузки частицы материала на криволинейную лопасть ротора до момента схода. Данный промежуток времени можно вычислить, исходя из следующего соотношения:

$$t_2 = \frac{R_k \cdot \chi_0}{v_n}. \quad (33)$$

Подстановка формулы $v_n = \omega \rho_1 \frac{\cos \beta_1 - f \sin \beta_1}{2f}$ [3] в (33) приводит к следующему результату:

$$t_2 = \frac{2 \cdot R_k \cdot \chi_0 \cdot f}{\omega \cdot \rho_1 \cdot (\cos \beta_1 - f \cdot \sin \beta_1)}. \quad (34)$$

Для схода частицы материала в заданной конечной точке дуги « γ » обеспечивающей лобовое соударение частицы материала во встречном потоке необходимо, чтобы выполнялось равенство выражений (32) и (34):

$$\frac{\gamma}{\omega} = \frac{2 \cdot R_k \cdot \chi_0 \cdot f}{\omega \cdot \rho_1 \cdot (\cos \beta_1 - f \cdot \sin \beta_1)}. \quad (35)$$

Исходя из (35), можно установить следующую связь между величиной радиуса кривизны

лопасти ротора R_k и расстоянием от центра вращения до центра загрузки частицы материала ρ_1 :

$$R_k = \rho_1 \cdot \alpha, \quad (36)$$

здесь введено следующее обозначение:

$$\alpha = \frac{\gamma \cdot (\cos \beta_1 - f \cdot \sin \beta_1)}{2 \chi_0 f}. \quad (37)$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Товаров В.В., Оскаленко Г.Н. Исследование вылета частиц из лопастных роторов центробежных измельчающих машин // Труды Гипроцемент. М.: Госстройиздат, 1962. - Вып.84. С. 38-45.
2. Кухлинг Х. Справочник по физике. М.: Мир, 1982. 520 с.
3. 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. 2008. № 11-12. С. 93-96.

Semikopenko I.A., Voronov V.P., Gorban T.L.

DETERMINATION OF THE ANGLE OF DESCENT OF THE PARTICLES OF THE MATERIAL FROM THE SURFACE OF THE ROTOR BLADE

In the article the process of gathering from the surface of the curved blades of the rotating rotor was researched theoretically. The diagram was calculated and it showed the current coordinates of the particle motion along the surface of the straight portions. Analytical expression is given and it follows that the angle of descent of the particles with the surface of the blade depends on the ratio of the speeds of the particles on the surface of the curved blades of the rotor and the linear speed of the point of descent of the particles and on the angular size that specifies the deviation of the end of a curved arc from a radial direction.

Key words: curved blade, particle, angle of descent.