

ОПИСАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ МАТЕРИАЛА В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ УДАРНО-ЦЕНТРОБЕЖНОЙ МЕЛЬНИЦЫ

Гребенчук П.С., Левданский Э.И.

Белорусский государственный технологический университет

Ранее в журнале «Инженер-механик» были рассмотрены особенности современного состояния теории и практики ударного измельчения, проанализированы достоинства и недостатки наиболее распространенных измельчителей, предложена новая конструкция ударно-центробежной мельницы метательного действия (см. «Инженер-механик» № 46). В данной статье предложен механизм поиска рациональных условий ударного нагружения, а именно — описано движение частиц измельчаемого материала в разгонной зоне ротора мельницы и проанализировано влияние геометрических и режимных параметров измельчителя на угол атаки частицы с отражательной поверхностью корпуса мельницы.

Эффективность ударного измельчения зависит не только от скорости удара частицы об отражательную поверхность, но и от угла между вектором скорости и касательной к данной поверхности в точке удара частицы [1, 2]. Чем больше скорость частицы в момент удара и чем ближе угол удара к прямому, тем эффективнее протекает процесс измельчения. Очевидно, что скорость частицы при ударе будет напрямую зависеть от скорости вращения ротора. Следовательно, рассмотрим условия, при которых угол удара об отражательную поверхность, или угол атаки, будет близким к прямому.

Типовые конструкции роторов в мельницах ударно-метательного действия в большинстве случаев имеют радиальные разгонные лопатки, поэтому для начала рассмотрим движение частицы вдоль радиальной лопатки. Частица материала при срыве с лопатки будет иметь радиальную относительную v'_r и тангенциальную переносную скорости v'_t (рис. 1). Тогда вектор полной скорости частицы, равный геометрической сумме векторов этих двух составляющих, будет направ-

лен к касательной в точке удара (точка B , рис. 1) под некоторым углом β .

Так как $R_p \gg h$, то можно принять допущение, что $\beta \approx \alpha$. Тогда для нахождения угла атаки β достаточно определить радиальную и тангенциальную скорости частицы в крайней точке ротора.

Величина тангенциальной переносной скорости частицы определяется как произведение угловой скорости ротора ω на радиус ротора

$$v^t = \omega \times R_p. \quad (1)$$

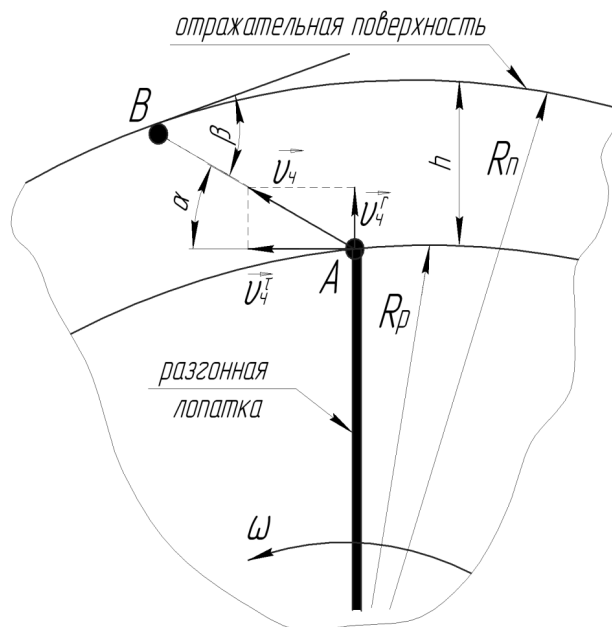


Рис. 1. Механизм удара частицы об отражательную поверхность:

R_p — радиус ротора по концам лопаток, м;
 R_n — радиус отражательной поверхности, м;
 h — зазор между ротором и отражательной поверхностью, м; ω — угловая скорость ротора, с⁻¹

Величину радиальной относительной скорости v_r^r определим путем решения дифференциального уравнения, описывающего движение одиночной частицы по радиальной лопатке вращающегося ротора. Для составления уравнения рассмотрим силы, действующие на частицу, движущуюся по диску. Воспользуемся схемой (рис. 2) движения частицы в роторе и действующих на нее сил.

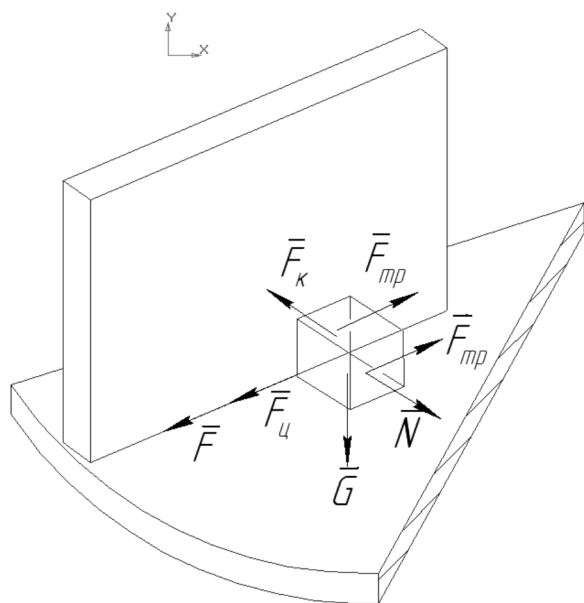


Рис. 2. Схема сил, действующих на частицу в роторе мельницы

Таким образом, на частицу, движущуюся по вращающемуся ротору, будут действовать следующие силы: F_u — центробежная сила инерции; F_k — кориолисова сила инерции; N — сила нормальной реакции опоры; $F_{тр}$ — сила трения частицы о поверхность ротора и лопатки. Определение величин этих сил не вызывает трудностей и разнострастей и подробно описано во многих литературных источниках [3, 4].

На скорость движения частицы может также оказывать влияние сила аэродинамического воздействия воздушного потока. Уравнение для определения этой силы имеет вид [5]

$$R = \frac{1}{2} K_\Phi \cdot \xi \cdot S \cdot \rho_r \cdot \left| \frac{dr}{dt} - v_r \right| \cdot \left(\frac{dr}{dt} - v_r \right), \quad (2)$$

где K_Φ — коэффициент формы частицы; ξ — коэффициент сопротивления; S — миделево сечение частицы, m^2 ; ρ_r — плотность газа, kg/m^3 ; v_r — скорость газа, m/s .

Проецируя силы на ось, направленную по радиусу ротора (рис. 2), можем записать дифферен-

циальное уравнение, решение которого позволит определить требующуюся нам радиальную относительную скорость v_r^r .

$$m \cdot \frac{d^2 r}{dt^2} = F - F_{\pm} \pm R. \quad (3)$$

Влияние силы воздействия воздушного потока R на скорость движения частиц материала в роторе проанализировано в работе [6], где утверждается, что воздушный поток не оказывает существенного влияния на движение частиц с размером более 0,1 мм, и поэтому величиной R в уравнении (3) можно пренебречь. Аналогичные допущения делают и авторы работ [3, 4]. Таким образом, без учета воздействия воздушного потока и после подстановки значений сил и сокращений уравнение (3) будет иметь окончательный и довольно простой вид

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \omega^2 r - 2f\omega \frac{dr}{dt}. \quad (4)$$

Это линейное дифференциальное уравнение второго порядка и его решение уже приводилось ранее [7]. Окончательное его решение для определения v_r^r выглядит следующим образом

$$v_r^r = d\omega R_p \sqrt{\left(1 - \frac{R_n^2}{R_p^2}\right) - \frac{v_0^2}{\omega^2 R_p^2}}, \quad (5)$$

где d — коэффициент пропорциональности, который определяется из следующей зависимости

$$d = -f \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{R_n^2}{R_p^2}\right) + \frac{v_0^2}{\omega^2 R_p^2}} + \sqrt{f^2 \cdot \left[\left(1 - \frac{R_n^2}{R_p^2}\right) + \frac{v_0^2}{\omega^2 R_p^2}\right] + 1}, \quad (6)$$

где R_n — радиус ротора, на котором начинаются лопатки; v_0 — начальная скорость частицы при входе на лопатку, m/s .

Полная скорость частицы на сходе с лопатки ротора определяется из следующей известной зависимости

$$v_r = \sqrt{(v_r^r)^2 + (v_r^t)^2}. \quad (7)$$

Согласно схеме (рис. 2) и принятому допущению ($\alpha = \beta$), угол удара β равен

$$\beta \approx \alpha \approx \arctg \frac{v_r^r}{v_r^t}. \quad (8)$$

Анализ расчетов по определению угла атаки β показывает, что он в итоге практически не зависит от частоты вращения ротора (вследствие пропорционального изменения обеих составляющих полной скорости частицы), мало зависит и от коэффициента трения f (6). То есть повлиять на величину этого угла с помощью изменения одних лишь режимных параметров мельницы не представляется возможным. И поскольку для мель-

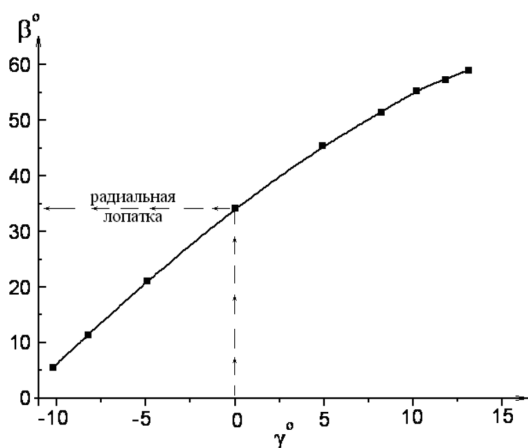


Рис. 4. Зависимость угла атаки β от угла отклонения лопатки γ

Выполнение разгонных лопаток отклоненными позволяет существенно повысить эффективность измельчения в мельницах ударно-метательного типа за счет увеличения угла β до величины 60° . Увеличить этот угол до прямого можно, используя в качестве отбойной поверхности не плоскую стенку, а сложный профиль, сформированный, например, из шестигранных стержней (рис. 5).

В этом случае вполне возможно добиться прямого удара частицы об отбойную поверхность и обеспечить высокую эффективность ударного измельчения. Стержни шестигранной формы выпускаются серийно, поэтому проблем с изготовлением и ремонтом отбойной поверхности не возникает. При измельчении материалов высокой твердости рекомендуется упрочнить поверхность стержней, а также концов лопаток наплавкой износостойкими сплавами.

Литература

1. Клейс, И.Р. Износостойкость элементов измельчителей ударного действия / И.Р. Клейс, Х.Х. Ууэмыйс. — М.: Машиностроение, 1986. — 286 с.
2. Левданский, Э.И. Некоторые пути совершенствования процесса измельчения в мельницах ударно-метательного типа / Э.И. Левданский, А.Э. Левданский, П.С. Гребенчук // Строительная наука и техника. — 2008. — № 2. — С. 99–102.
3. Клепников, Н.С. Расчет движения частиц топлива по размоленной лопатке мельницы-вентилятора / Н.С. Клепников // Труды ЦКТИ. — 1985. — № 5. — С. 71–76.
4. Паладиева, Н.И. Анализ рабочего процесса и проектирование ударно-отражательных мельниц / Н.И. Паладиева, Д.В. Аристов // Горный журнал. — 1995. — № 7. — С. 117–119.
5. Бабуха, Г.Л. Взаимодействие частиц полидисперсного материала в двухфазных потоках / Г.Л. Бабуха, А.А. Шайбер. — Киев: Наукова думка, 1972. — 175 с.
6. Левданский, А.Э. Использование проточных течений для интенсификации процессов классификации и помола материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.08 / А.Э. Левданский. — Минск, 2004. — 272 л.
7. Гвоздев, В.А. Применение роторно-центробежной мельницы мокрого помола в процессе производства ферментных препаратов / В.А. Гвоздев, А.Э. Левданский, Э.И. Левданский // Новые технологии в химической промышленности: материалы Международ. науч.-техн. конф., Минск, 20–22 ноября 2002 г.: в 2 ч. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: И.М. Жарский [и др.]. — Минск, 2002. — Ч. 1. — С. 261–262.

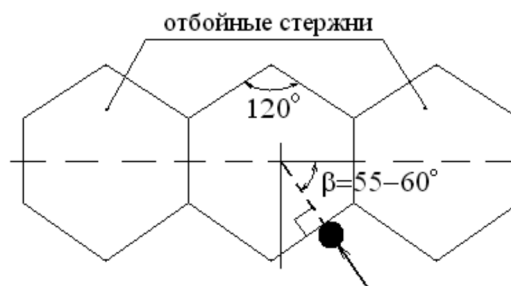


Рис. 5. Рекомендуемый профиль отбойной поверхности

Таким образом, исследования механизма процесса измельчения в ударно-центробежных мельницах метательного типа позволили установить следующее:

повысить эффективность ударного измельчения возможно за счет выполнения разгонных лопаток ротора отклоненными в противоположную вращению сторону на величину $12\text{--}14^\circ$;

с целью обеспечения прямого удара целесообразно использовать отбойную поверхность сложного профиля, сформированную, например, из шестигранных стержней. Достоинством выполнения отражательной поверхности из стержней является то, что по мере износа боковых граней их можно поворачивать вокруг своей оси на 120° и тем самым восстанавливать рабочую поверхность;

выполнение разгонных лопаток отклоненными назад позволяет снизить износ лопаток, так как величина реакции опоры в этом случае значительно ниже, чем при движении материала по радиальной лопатке, а следовательно, сила трения будет снижаться.