

УДК 621.926

А. В. Ширко, ассистент (БГТУ); П. А. Глебик, студент (БГТУ);
А. Н. Камлюк, доцент (БГТУ)

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ В МЕЛЬНИЦЕ УДАРНО-МЕТАТЕЛЬНОГО ТИПА С ДУГОВЫМИ ЛОПАТКАМИ

Исследована динамика частиц в мельнице ударно-метательного типа с радиальными, наклонными и дугowymi лопатками. Получены уравнения движения частицы по лопаткам разных типов. Проведено сравнение результатов теоретических расчетов для мельниц ударно-метательного типа с радиальными, наклонными и дугowymi лопатками. Показано, что мельницы с дугowymi лопатками можно рекомендовать для измельчения абразивных хрупких материалов.

Work is devoted research of influence of geometrical characteristics of mills of with great dispatch-throwing type with various kinds of shovels on efficiency of shock crushing, and also deterioration of a shovel. It is theoretically shown, that thanks to arc shovels it is possible to raise at insignificant decrease in a shock impulse of a particle service life of working blades surfaces at the expense of reduction of a friction forces.

Введение. Мельницы ударно-метательного типа находят широкое применение при измельчении различных материалов. Основным рабочим органом таких мельниц является вращающийся ротор, выполненный обычно в виде диска с установленными на нем разгонными лопатками.

При вращении ротора измельчаемый материал, подаваемый, как правило, в его внутреннюю полость, движется под действием инерционных сил по разгонным лопаткам от центра вращения к периферии. Срываясь с лопаток с определенной скоростью, частицы материала ударяются о неподвижную отбойную поверхность и разрушаются при этом на более мелкие части [1–4].

Эффективность ударного измельчения зависит от скорости, при которой происходит удар частицы об отбойный элемент, и от угла между вектором скорости и нормалью к отбойной поверхности в точке удара частицы. Чем больше скорость частицы в момент удара и чем ближе угол удара к нулю, тем эффективнее протекает процесс измельчения. Поэтому необходимой эффективности измельчения можно добиться варьируя профиль и расположение лопатки. Кроме того, следует отметить, что при движении абразивных частиц вдоль лопатки происходит интенсивное истирание ее поверхности. В связи с этим ставится задача подбора таких параметров профиля лопатки, при которых давление на нее окажется минимальным, что в свою очередь снизит силы трения и увеличит долговечность лопатки.

Модель. Уравнения движения. Рассмотрим движение частицы материала по дуговой разгонной лопатке, расположенной в горизонтальной плоскости (рис. 1). При этом считаем, что лопатка имеет постоянный радиус кривизны R_1 , а частица представляется материальной точкой M .

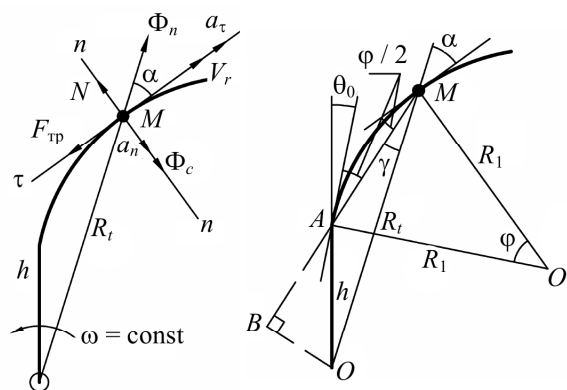


Рис. 1. Схема движения частицы по лопатке:

h – расстояние от центра ротора до начала лопаток;
 R_r – расстояние от центра ротора до частицы на лопатке

Пусть частица находится в произвольной точке на поверхности лопатки. При этом полагаем, что ротор вращается с постоянной угловой скоростью ω . В относительном движении на частицу будут действовать центробежная сила инерции Φ_n , кориолисова сила инерции Φ_c , сила трения частицы о поверхность лопатки $F_{тр}$ и реакция опорной поверхности N .

Систему уравнений, описывающую движение частицы по дуговой лопатке, запишем в виде

$$m\ddot{s} = m\omega^2 R_r \cos \alpha - Nf, \quad (1)$$

$$m \frac{\dot{s}^2}{R_1} = -N - m\omega^2 R_r \sin \alpha + 2m\omega \dot{s},$$

где m – масса частицы; s – дуговая координата, отсчитываемая от начала лопатки; ω – угловая скорость ротора; N – реакция опоры; f – коэффициент трения скольжения.

Из рис. 1 квадрат радиус-вектора определяется по формуле

$$R_t^2 = \left(h \sin \left(\theta_0 + \frac{\varphi}{2} \right) \right)^2 + \left(h \cos \left(\theta_0 + \frac{\varphi}{2} \right) + 2R_1 \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2,$$

где θ_0 – угол наклона касательной в точке A (задает ориентацию лопатки в плоскости ротора). Изменяя угол θ_0 , можно добиться наибольшего ударного импульса.

Из рис. 1 следует, что

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= \frac{1}{R_t} \left(h \cos(\theta_0 + \varphi) + R_1 \sin \varphi \right), \\ \sin \alpha &= \frac{1}{R_t} \left(h \sin(\theta_0 + \varphi) + R_1 (1 - \cos \varphi) \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Учитывая, что угловая координата $\varphi = s / R_1$, из системы (1) с учетом (2) получаем уравнение движения частицы в виде

$$\ddot{s} = \omega^2 \left(h \cos \left(\theta_0 + \frac{s}{R_1} \right) + R_1 \sin \frac{s}{R_1} \right) - fN, \quad (3)$$

где опорная реакция

$$\frac{N}{m} = 2\omega \dot{s} - \frac{\dot{s}^2}{R_1} - \omega^2 \left(h \sin \left(\theta_0 + \frac{s}{R_1} \right) + R_1 - R_1 \cos \frac{s}{R_1} \right).$$

Из дифференциального уравнения (3) можно получить частные случаи движения частицы по прямолинейной наклонной и радиальной лопатке. Для этого нужно осуществить предельный переход $R_1 \rightarrow \infty$.

Выражение (3) интегрируется численно, однако определение положения частицы на лопатке как функции времени не представляет интереса, поскольку для анализа эффективности размельчения необходимо знать полную скорость частицы в момент ее схода с лопатки и направление этой скорости. Численный анализ уравнения (3) показал, что сила трения не будет существенно влиять на величину и направление полной скорости частицы, поэтому в дальнейших расчетах ей будем пренебрегать. В этом случае можно получить первый интеграл движения для уравнения (3)

$$\begin{aligned} \frac{\dot{s}^2}{2} &= \omega^2 \left[hR_1 \left(\sin \left(\theta_0 + \frac{s}{R_1} \right) - \sin \theta_0 \right) + \right. \\ &\quad \left. + R_1^2 \left(1 - \cos \frac{s}{R_1} \right) \right], \end{aligned} \quad (4)$$

что дает возможность определять реакцию опорной поверхности N как функцию положения частицы на лопатке s .

Запишем теорему изменения кинетической энергии частицы во вращающейся системе координат

$$\frac{mV_r^2}{2} = \frac{m\omega^2 R_{\text{рот}}^2}{2} - \frac{m\omega^2 h^2}{2}, \quad (5)$$

где в правой части записана работа центробежной силы инерции при перемещении частицы из начального положения h к концу ротора $R_{\text{рот}}$. Тогда

$$V_r = \omega \sqrt{R_{\text{рот}}^2 - h^2} = \text{const}. \quad (6)$$

Выражение (6) приводит к важному заключению: модуль относительной скорости частицы при вылете ее из ротора не зависит от профиля и расположения разгонной лопатки. Направление вектора относительной скорости, конечно, будет зависеть от формы и расположения лопатки.

Определение ударного импульса. Величина полной скорости частицы ничего не говорит об эффективности процесса измельчения, так как на ударный импульс приходится лишь часть этой скорости. Разложим полную скорость в момент схода частицы с лопатки на радиальную v_n и касательную v_τ составляющие:

$$v_n = V_r \cos \alpha_c, \quad v_\tau = \omega R_{\text{рот}} - V_r \sin \alpha_c, \quad (7)$$

где α_c – угол α в момент схода частицы с лопатки, определяемый по формулам (2).

Если зазор между отбойной поверхностью и ротором небольшой (т. е. если отношение $R_{\text{рот}} / R_H \approx 1$, где R_H – радиус отбойной поверхности), то ударный импульс приобретает преимущественно за счет радиальной составляющей полной скорости:

$$p = mV_r \cos \alpha_c = m\omega \sqrt{R_{\text{рот}}^2 - h^2} \cos \alpha_c. \quad (8)$$

Из формулы видно, что максимальный ударный импульс достигается при сходе частицы с лопатки, для которой $\cos \alpha_c = 1$. Такое значение $\cos \alpha_c$ получается либо на радиальной лопатке, либо на криволинейной лопатке, касательная к которой будет совпадать с радиусом-вектором.

Угол наклона дуговой лопатки θ_0 , который будет обеспечивать $\cos \alpha_c = 1$, рассчитывается по формуле

$$\sin \theta_0 = -\frac{R_{\text{рот}}^2 - h^2}{2hR_1}. \quad (9)$$

Знак « \rightarrow » в формуле (9) показывает, что для обеспечения условия $\cos \alpha_c = 1$ лопатку необходимо наклонять по направлению угловой скорости ω (в сторону отрицательных значений угла θ_0 , рис. 1). Из соотношения (9) получаем возможный интервал изменения радиуса кривизны:

$$\frac{R_{\text{рот}}^2 - h^2}{2h} \leq R_1 < \infty, \quad (10)$$

при этом угол θ_0 изменяется от $-\pi/2$ до 0.

Давление частицы на лопатку. Дуговая лопатка, имеющая $\cos \alpha_c = 1$, и радиальная лопатка

обеспечивают одинаковый ударный импульс (8). Однако давление частицы на дуговую лопатку будет меньше, чем давление частицы на радиальную или прямолинейную наклонную лопатку. В этом легко убедиться, используя формулы (3). Невозможно существенно изменить опорную реакцию за счет поворота радиальной лопатки на угол θ_0 , так как при этом она уменьшится (или увеличится) на незначительную величину $m\omega^2 h \sin\theta_0$. Опорная реакция дуговой лопатки (3) содержит слагаемое $-ms^2/R_1$, которое существенно снижает давление частицы на лопатку. При этом чем меньше радиус кривизны лопатки R_1 , тем ниже давление. Если к тому же стремиться сохранить максимальный импульс, то R_1 необходимо выбирать из интервала (10), а угол наклона лопатки θ_0 рассчитывать по формуле (9).

Решим две задачи: 1) рассчитаем радиус кривизны и наклон дуговой лопатки из условия обеспечения максимального ударного импульса ($\cos\alpha_c = 1$); 2) определим радиус кривизны лопатки из условия минимального давления. Зададимся характерными параметрами мельницы: $m = 2$ г, $\omega = 200$ рад/с, $h = 0,15$ м, $R_{\text{рот}} = 0,5$ м.

1. Реакция лопатки вычисляется по формуле (3), в которой скорость частицы может быть определена без учета силы трения из выражения (4) или с учетом силы трения из дифференциального уравнения (3). Радиус кривизны лопатки возьмем равным левой границе интервала (10), что будет обеспечивать наименьшее давление на лопатку.

Результаты расчета показаны на рис. 2, где для сравнения рассчитаны опорные реакции дуговой, радиальной и прямолинейной наклонной лопаток. Из рисунка очевидна целесообразность применения дуговых лопаток. Радиальная и дуговая лопатки будут создавать одинаковый ударный импульс, однако давление на дуговую лопатку, а значит, и ее износ будут гораздо меньше.

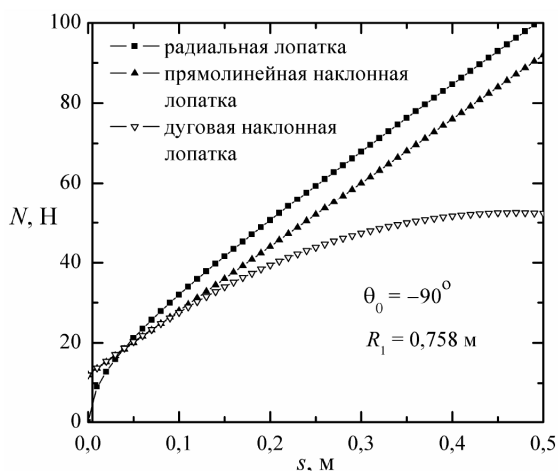


Рис. 2. Опорная реакция лопатки при обеспечении максимального ударного импульса

На практике ударный импульс можно повысить путем создания рифленой отбойной поверхности, ориентируя отбойные плоскости таким образом, чтобы они оказались под прямым углом к направлению полной скорости частицы. Угол наклона таких плоскостей к касательной отбойной поверхности вычисляется по формуле

$$\cos\beta = \sqrt{1 - \left(\frac{R_{\text{рот}}}{R_H}\right)^2 \left(\frac{v_\tau}{v}\right)^2}.$$

2. Если не ставить задачу обеспечить максимальный ударный импульс, то давление на лопатку можно еще больше понизить. Так, если принять $R_1 = R_{\text{рот}} = 0,5$ м, а $\theta_0 = 0$, получим результаты, которые представлены на рис. 3. Из рисунка видно, что давление на дуговую лопатку значительно меньше, чем на радиальную. При этом ударный импульс, согласно (8), уменьшится в $\cos^{-1}\alpha_c$ раз. По формуле (2) при вычисленной длине лопатки получим $\cos\alpha_c = 0,63$. По сравнению с первым примером ударный импульс снизился на 37%, зато давление на такую лопатку, согласно рис. 3, уменьшится в несколько раз, что приведет к значительному повышению сроков эксплуатации таких лопаток. Компенсировать уменьшение ударного импульса можно за счет увеличения угловой скорости ω либо путем создания рифленой отбойной поверхности.

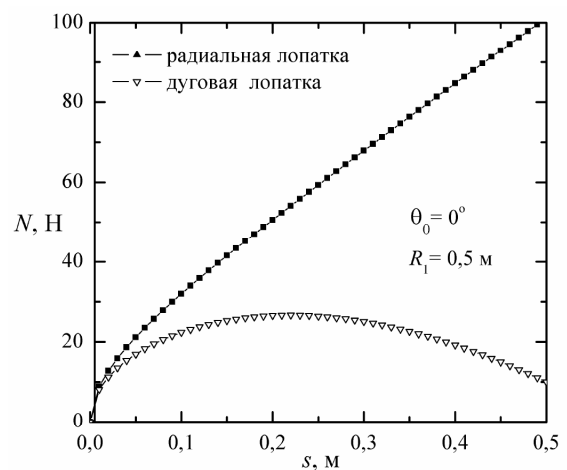


Рис. 3. Опорная реакция лопатки при произвольном ударном импульсе

Минимальное давление на лопатку будет при таком радиусе ее кривизны, при котором опорная реакция в момент схода частицы с лопатки будет равна нулю. В этом случае функция $N(s)$ окажется минимальной, однако ударный импульс также уменьшится.

Заключение. В данной работе были получены законы движения частицы в мельнице ударно-метательного типа с радиальными, наклонными и дугowymi лопатками.

Установлено, что при использовании новых моделей роторно-центробежных мельниц с дугowymi лопатками значительно снизится реакция опоры, а следовательно, сила трения о лопатку. Такие мельницы можно использовать для измельчения абразивных хрупких материалов.

Литература

1. Бабуха, Г. Л. Взаимодействие частиц полидисперсного материала в двухфазных потоках / Г. Л. Бабуха, А. А. Шайбер. – Киев: Наукова думка, 1987. – 464 с.

2. Клепников, Н. С. Расчет движения частиц топлива по размоленной лопатке мельницы-вентилятора / Н. С. Клепников // Труды УКТИ. – 1985. – Т. 5. – С. 71–76.

3. Поладиева, Н. И. Анализ рабочего процесса и проектирования ударно-отражательных мельниц / Н. И. Поладиева, Д. В. Аристов // Горный журнал. – 1995. – Вып. 7. – С. 117–119.

4. 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.

Поступила в редакцию 31.03.2010