

УДК 621.926

П. С. Гребенчук, ассистент (БГТУ)

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ УДАРНО-ЦЕНТРОБЕЖНОЙ МЕЛЬНИЦЫ**

Описано движение частиц измельчаемого материала на входном участке в новой конструкции ударно-центробежной мельницы. Проанализирован характер изменения скорости движения частицы в рабочей зоне измельчителя. Установлено, что производительность ударно-центробежной мельницы будет определяться пропускной способностью разгонных каналов на входе в межлопаточное пространство ротора. На основании проведенного анализа предложена зависимость для определения максимально достижимой производительности ударно-центробежной мельницы, учитывающая скорость движения материала, его физические свойства, а также геометрические особенности измельчителя. Предложена методика определения скорости материала на входе в межлопаточное пространство, включающая решение системы дифференциальных уравнений движения частицы по загрузочному конусу. Представлены графически и проанализированы расчетные зависимости радиальной скорости частиц от угла при вершине конуса и производительности мельницы от скорости вращения ротора.

Movement of grinded material particles in the new construction of a centrifugal percussion mill is described. The character of a particle speed change in the working area of the grinder is analyzed. It is stated, that the centrifugal percussion mill productivity is determined by the carrying capacity of the boost channels between blades of the rotor. On the basis of this analysis the dependence for centrifugal percussion mill productivity determination is proposed. This dependence takes into account speed of the material, its physical properties, and also geometrical peculiarities of the grinder. The procedure of the materials speed determination at the beginning of the boost channels, including the system of the differential equations of the particles movement solution. Graphical dependences of radial speed of the particles from the vertex angle of the cone and mill productivity from the rotor speed are produced and analysed.

**Введение.** Производительность, наряду с потребляемой мощностью и дисперсным составом готового продукта, является основным показателем для любого измельчающего агрегата. Именно она определяет габаритные размеры измельчителя, а следовательно, и его металлоемкость.

В предыдущих выпусках данного сборника трудов уже рассматривались устройство и принцип действия новой конструкции ударно-центробежной мельницы и методика расчета потребляемой мощности [1], а также были приведены результаты исследований по определению основных конструктивных параметров данного измельчителя [2]. Здесь мы остановимся на вопросах определения производительности новой конструкции мельницы.

**Теоретические и экспериментальные исследования производительности ударно-центробежной мельницы.** На рис. 1 представлена схема движения потока измельчаемого материала в рабочей зоне ударно-центробежной мельницы. Материал поступает в измельчитель из загрузочного бункера через патрубок 1. Далее материал попадает на распределительный конус 2, установленный на вращающемся роторе. При этом расстояние между выходным отверстием загрузочного патрубка и распределительного конуса рекомендуется устанавливать минимальным в целях снижения запыленности воздуха. Куски материала движутся по конусу, равномерно распределяясь по его поверхности, и попадают в каналы между разгонными лопатками

ротора 3. В этих каналах скорость частиц материала за счет действия центробежных сил будет возрастать. Поскольку вместе с этим увеличивается и ширина разгонных каналов, то очевидно, что материал будет двигаться сплошным потоком лишь на начальном участке, далее движение частиц можно рассматривать как обособленное, т. е. свободное. Достигнув концов разгонных лопаток, частицы материала срываются с них и попадают под многократное ударное воздействие отражательных стержней 4 и отбойных лопаток 5. Далее измельченный материал удаляется из мельницы через полукольцевой канал 6.

Скорость движения частиц материала на входе в межлопаточные каналы будет еще невысокой, и в то же время площадь сечения каналов здесь минимальная. Следовательно, пропускная способность каналов в данном месте будет определять максимально достижимую производительность мельницы. Похожий подход к определению производительности ударно-центробежных измельчителей метательного типа используют и другие исследователи [3, 4].

Согласно схеме (рис. 1), зависимость для определения производительности мельницы будет иметь вид, кг/с,

$$G = k_{\text{разр}} \nu a h n_k \rho_m, \quad (1)$$

где  $k_{\text{разр}}$  – коэффициент разрыхленности материала в самом узком сечении канала;  $\nu$  – скорость материала в узком сечении, м/с;  $a$  – ширина канала в узком сечении, м;  $h$  – высота

канала, м;  $n_k$  – число лопаток ротора;  $\rho_m$  – плотность куска материала, кг/м<sup>3</sup>.

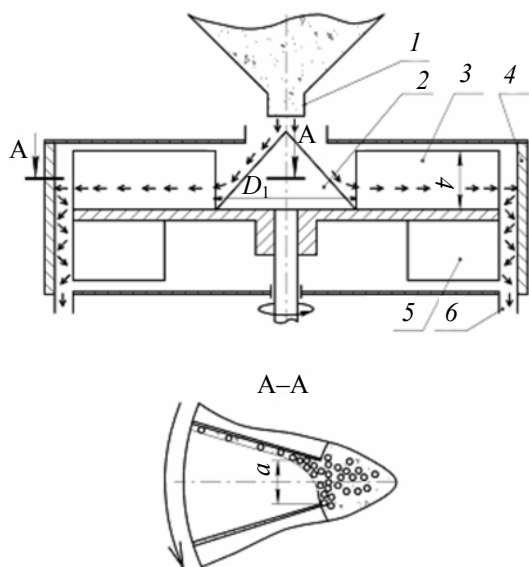


Рис. 1. Схема движения материала в мельнице:  
1 – патрубок загрузочного бункера;  
2 – распределительный конус; 3 – разгонные лопатки; 4 – отражательные стержни;  
5 – отбойные лопатки; б – полукольцевой канал разгрузочного патрубка

Общую ширину кольцевого канала в требуемом сечении можно представить как

$$A = \pi D_1 - n_k b, \quad (2)$$

где  $D_1$  – диаметр окружности внутренних торцов лопаток, м;  $b$  – толщина лопаток, м.

С учетом выражения (2) зависимость для определения максимально достижимой производительности примет вид

$$G = k_{\text{разр}} v \rho_m (\pi D_1 - n_k b). \quad (3)$$

Геометрические параметры  $h$ ,  $D_1$ ,  $n$ ,  $b$  определяем из конструктивных соображений с учетом результатов исследований, изложенных ранее [2]. Тогда неизвестными величинами для вычисления производительности будут  $k_{\text{разр}}$  и  $v$ .

Если бы материал поступал в каналы, образованные лопатками, сплошным массивом, то величина коэффициента разрыхленности равнялась бы единице, то есть  $k_{\text{разр}} = 1$ . Но в нашем случае материал поступает в виде отдельных зерен или кусков. На входе в каналы куски или зерна будут соударяться с торцами лопаток, а также между собой. Часть из них будет двигаться скольжением, а часть – вращаясь, поэтому разрыхленность потока на входе в каналы будет значительно выше, чем неподвижного зернистого материала. Учесть все факторы, влияющие на коэффициент разрыхленности, весьма сложно, и при определении производительности других конструкций измельчителей

его находят опытным путем. Поэтому для определения  $k_{\text{разр}}$  для нашего агрегата был избран путь экспериментальных исследований, результаты которых приведены в конце статьи.

Второй неизвестной величиной для расчета производительности является средняя скорость зерен (кусков) на входе в узкое сечение каналов ротора. Так как согласно схеме (рис. 1) распределительный конус в нижней части оканчивается началом лопаток, то скорость частиц на входе в каналы будет равна скорости схода их с конуса. Определим скорость частиц при сходе с конуса. Для этого сначала следует найти скорость истечения материала из бункера и далее рассмотреть движение материала по распределительному конусу.

Скорость истечения сыпучего материала из бункера определим по известной зависимости, м/с [5],

$$v_{\text{ист}} = \lambda_n \sqrt{3,2gR_r}, \quad (4)$$

где  $\lambda_n$  – коэффициент истечения (для кусковых материалов  $\lambda_n = 0,4$ ; для зернистых  $\lambda_n = 0,6$  [6]);  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $R_r$  – гидравлический радиус отверстия, равный отношению его площади к периметру, м.

Так как расстояние от загрузочного патрубка до вершины распределительного конуса пренебрежимо мало по сравнению с размерами ротора, то приращением скорости за время падения пренебрегаем и принимаем скорость кусков материала при попадании на конус равной  $v_{\text{ист}}$ .

Рассмотрим движение материала по поверхности вращающегося конуса (рис. 2). С учетом вышесказанного принимаем допущение, что частицы движутся обособленно, т. е. без взаимодействия друг с другом. Учитывая, что данная конструкция ударно-центробежного измельчителя предназначена в основном для грубого помола и размеры кусков исходного материала достаточно велики, то силы инерции на порядок выше аэродинамических сил, и, следовательно, сопротивлением среды также можно пренебречь.

Введем неподвижную систему координат и представим полное ускорение частицы как векторную сумму его составляющих вдоль образующей конуса, вдоль касательной конуса и вдоль нормали. Этим направлениям соответствует ортогональная система единичных векторов  $\vec{e}_s$ ,  $\vec{e}_\varphi$ ,  $\vec{e}_n$ , и тогда полное ускорение частицы раскладывается по этим ортам следующим образом:

$$\begin{aligned} \vec{a} = & \frac{d^2 s}{dt^2} \vec{e}_s + \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 s \cdot \sin \alpha \cdot \vec{e}_r + \\ & + \frac{d^2 \varphi}{dt^2} s \cdot \sin \alpha \cdot \vec{e}_\varphi + 2 \frac{d\varphi}{dt} \frac{ds}{dt} \sin \alpha \cdot \vec{e}_\varphi, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\vec{e}_r$  – единичный вектор, направленный в радиальном направлении к оси вращения конуса.

$$\vec{e}_r = -\sin \alpha \cdot \vec{e}_s - \cos \alpha \cdot \vec{e}_n \quad (6)$$

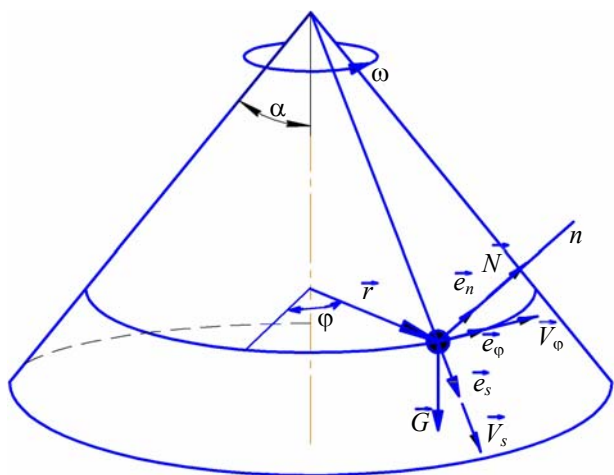


Рис. 2. Движение частицы по вращающейся конической поверхности

С учетом (6) уравнение (5) примет вид

$$\vec{a} = \left( \frac{d^2 s}{dt^2} - \left( \frac{d\phi}{dt} \right)^2 s \cdot \sin^2 \alpha \right) \cdot \vec{e}_s + \left( \frac{d^2 \phi}{dt^2} s + 2 \frac{d\phi}{dt} \right) \sin \alpha \cdot \vec{e}_\phi - \frac{1}{2} \left( \frac{d\phi}{dt} \right)^2 s \cdot \sin 2\alpha \cdot \vec{e}_n. \quad (7)$$

Система дифференциальных уравнений движения частицы, записанная в проекциях на принятую неподвижную систему координат, выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} m \left( \frac{d^2 s}{dt^2} - \left( \frac{d\phi}{dt} \right)^2 \sin^2 \alpha \right) = \\ = mg \cos \alpha - Nf \frac{\frac{ds}{dt}}{\sqrt{\left( \frac{ds}{dt} \right)^2 + s^2 \left( \omega - \frac{d\phi}{dt} \right)^2 \sin^2 \alpha}}; \\ m \left( \frac{d^2 \phi}{dt^2} s + 2 \frac{d\phi}{dt} \frac{ds}{dt} \right) \sin \alpha = \\ = Nf \frac{s \left( \omega - \frac{d\phi}{dt} \right) \sin \alpha}{\sqrt{\left( \frac{ds}{dt} \right)^2 + s^2 \left( \omega - \frac{d\phi}{dt} \right)^2 \sin^2 \alpha}}; \\ -\frac{1}{2} m \frac{d\phi}{dt} s \cdot \sin 2\alpha = N - mg \cos \alpha. \end{cases} \quad (8)$$

Данная система уравнений была решена численными методами на ЭВМ, что позволило

отметить следующие особенности. Радиальная скорость частицы материала, а следовательно, и производительность мельницы, в очень незначительной степени зависит от частоты вращения ротора и коэффициента трения частицы о лопатки ротора. В то же время геометрические параметры распределительного конуса – угол при вершине, диаметр основания и высота – оказывают на радиальную скорость существенное влияние.

На рис. 3 представлены зависимости радиальной скорости частицы от угла при вершине конуса (см. рис. 2), полученные при решении системы уравнений (8). Расчет проводился для мельницы с диаметром основания распределительного конуса 150 мм, коэффициент трения материала о поверхность принимался  $f = 0,5$ .

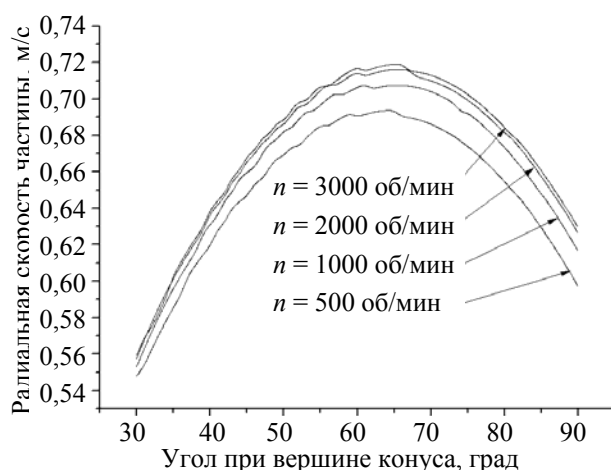


Рис. 3. Влияние угла при вершине конуса на радиальную скорость частиц

Из представленного графика видно, что для всех значений частоты вращения ротора максимальная радиальная скорость частицы наблюдается при угле  $\alpha = 55-65^\circ$ . Подобный результат объясняется тем, что частица движется по наклонной поверхности за счет силы тяжести, поэтому при малых углах конусности возрастает преимущественно осевая составляющая скорости, при больших – существенно снижается величина движущей силы вдоль образующей.

При этом увеличение частоты вращения ротора с 500 до 3000 об/мин не приводит к значительному изменению радиальной скорости, на что обращалось внимание выше.

На скорость и характер движения частицы может оказывать влияние воздушный поток, движущийся в сопутствующем направлении. Но поскольку разгонные лопатки ротора имеют минимальную высоту, расход воздуха через мельницу невелик и в загрузочном патрубке его средняя скорость не превышает 8 м/с. Кроме

того, наличие в центре ротора вращающегося распределительного конуса делает профиль скорости газа в этом случае наибольшим у стенки и минимальным – около конуса. Исходя из вышеизложенного, воздействие воздуха на движущиеся частицы материала будет несущественным, и в вычислениях его не учитываем.

Был произведен расчет максимально достижимой производительности мельницы по предложенной методике при измельчении фуражного зерна и сильвинитовой руды на полупромышленной мельнице с диаметром ротора по концам лопаток 0,45 м. Частота вращения ротора изменялась в пределах 500–3000 об/мин. Результаты представлены в виде графических зависимостей производительности от частоты вращения ротора (рис. 4).

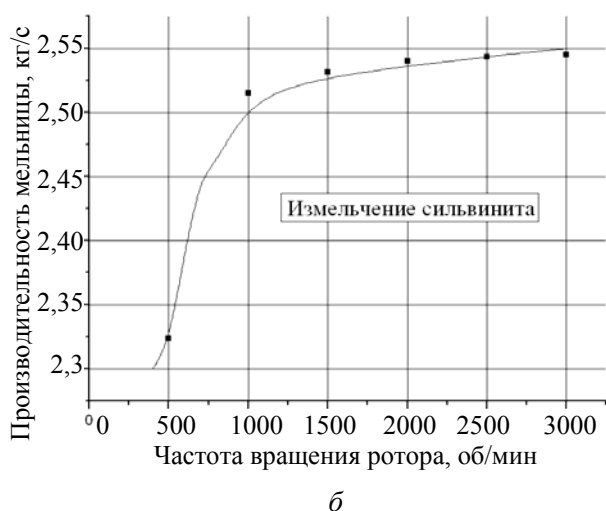
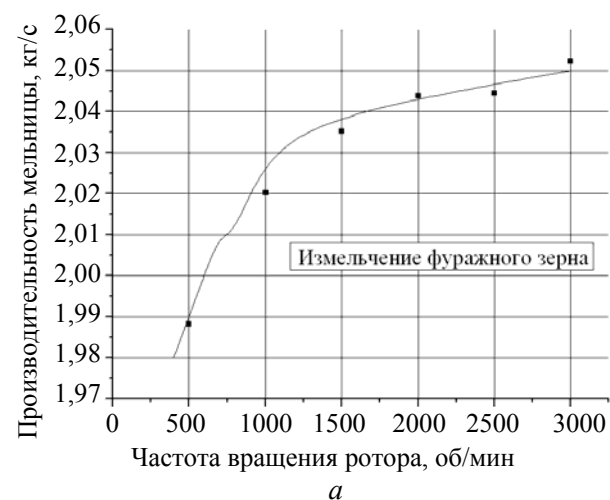


Рис. 4. Зависимость производительности мельницы от скорости вращения ротора:

а – измельчение фуражного зерна; б – измельчение сильвинита

Отметим, что проведены экспериментальные исследования по определению производительности мельницы при тех же условиях. Полученные значения указаны на рис. 4 точками. Как видно из графиков, полученные данные показывают хорошую сходимость с расчетными при значении коэффициента разрыхленности  $k_{\text{разр}} = 0,12$ .

**Заключение.** Таким образом, полученная в результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований математическая модель дает возможность вычислять радиальную скорость частицы измельчаемого материала на сходе с распределительного конуса, позволяет найти значение коэффициента разрыхленности и на основании этого определить максимально достижимую производительность данной конкретной конструкции мельницы.

### Литература

1. Левданский, Э. И. Проблемы измельчения материалов ударом и некоторые пути их решения / Э. И. Левданский, А. Э. Левданский, П. С. Гребенчук // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорган. в-в. – 2005. – Вып. XIII. – С. 154–158.
2. Левданский, Э. И. Влияние конструктивных и технологических параметров роторно-центробежной мельницы на эффективность измельчения материалов / Э. И. Левданский, А. Э. Левданский, П. С. Гребенчук // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорган. в-в.– 2006. – Вып. XIV. – С. 129–132.
3. Хинт, Й. А. Основы производства силикальцитных изделий / Й. А. Хинт. – М.: Госстройиздат, 1962. – 601 с.
4. Гуюмджян, П. П. Методика расчета производительности дезинтегратора / П. П. Гуюмджян, А. А. Мосевичев // Сб. науч.-информ. ст. ИИСИ / Иван. инж.-строит. ин-т. – 1994. – № 1. – С. 206–208.
5. Машины и аппараты химических производств. Примеры и задачи / В. Н. Соколов [и др.]; под общ. ред. В. Н. Соколова. – Л.: Машиностроение, 1982. – 384 с.
6. Бауман, В. А. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций / В. А. Бауман, Б. В. Клушанцев, В. Д. Мартынов. – М.: Машиностроение, 1975. – 351 с.

Поступила 31.03.2010