

УДК 621.926

**Эдуард Игнатъевич ЛЕВДАНСКИЙ,**  
доктор технических наук,  
профессор кафедры машин  
и аппаратов химических  
и силикатных производств  
Белорусского государственного  
технологического университета

**Дмитрий Иванович ЧИРКУН,**  
ассистент кафедры механики  
материалов и конструкций  
Белорусского государственного  
технологического университета

**Павел Сергеевич ГРЕБЕНЧУК,**  
аспирант кафедры машин  
и аппаратов химических  
и силикатных производств  
Белорусского государственного  
технологического университета

## НЕКОТОРЫЕ ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В МЕЛЬНИЦАХ УДАРНО-МЕТАТЕЛЬНОГО ТИПА

### SOME WAYS OF IMPROVING OF GRINDING PROCESS IN IMPACT-THROWING MILLS

В статье рассмотрены особенности устройства и принцип действия ударно-центробежных измельчителей метательного типа. Предложена новая конструкция центробежной мельницы многократного ударного нагружения материала, изложен ее принцип действия. Перечислены преимущества данной конструкции перед другими измельчителями. Получено дифференциальное уравнение движения частицы измельчаемого материала по наклонной лопатке ротора мельницы. Определены оптимальные значения основных геометрических и технологических параметров ударно-центробежной мельницы, влияющих на качество измельчения материалов в ней.

На основании полученных результатов теоретических исследований получен оптимальный профиль отбойной поверхности, а также угол наклона разгонной лопатки. В производстве строительных материалов мельница может найти широкое применение при измельчении известки, мела, гипса и других материалов, а также при приготовлении строительных смесей.

The paper considers the design peculiarities and principle of operation of the impact grinders of the throwing type. A new design of the centrifugal mill with repeated shock loading of the material has been offered and its principle of operation has been described. The advantages of this grinder design in comparison with other grinders have been listed. A differential equation of the grinding material particle motion along the inclined rotor blade of the mill has been obtained. The optimal values have been determined for the basic geometrical and technological parameters of the impact mill, which affect the quality of the material grinding.

On the basis of the theoretical research results obtained, an optimum surface profile and accelerating blade inclination angle have been determined. A new design of the centrifugal mill can be successfully used in building material industry for grinding lime, chalk, gypsum and other materials and also for preparing concrete mixes.

#### ВВЕДЕНИЕ

Измельчающие агрегаты ударно-метательного типа находят широкое применение при измельчении различных материалов [1]. Основным рабочим органом таких измельчителей 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 центробежной силы по разгонным лопаткам от центра вращения к периферии. Срываясь с лопаток с определенной скоростью, частицы материала ударяются о неподвижную отбойную поверхность и разрушаются на более мелкие части. Очевидно, что нахождение оптимальных условий для такого ударного разрушения является важной задачей при изготовлении и внедрении измельчителей метательного типа в производство.

#### НОВЫЙ ВИД КОНСТРУКЦИИ МЕЛЬНИЦЫ УДАРНО-МЕТАТЕЛЬНОГО ТИПА

В качестве примера ударного измельчителя метательного типа авторы статьи предлагают рассмотреть приведенную на рис. 1 конструкцию мельницы, разработанной сотрудниками кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств Белорусского государственного технологического университета [2]. Следует отметить, что предложенную на рис. 1 схему привода с установкой ротора мельницы непосредственно на валу электродвигателя целесообразно применять лишь для полупромышленных образцов. Для измельчителей с большей производительностью и мощностью электродвигатель следует устанавливать на отдельной опоре, а привод ротора мельницы осуществлять через клиноременную передачу.

Основным рабочим органом мельницы является ротор, состоящий из диска 1, насаженного на вал электро-

двигателя 2. К диску сверху крепятся разгонные лопатки 3, а снизу — отбойные лопатки 4. Снаружи ротора установлена цилиндрическая обечайка корпуса 5, футерованная внутри отражательными стержнями 6. Материал на измельчение подается сверху в центр через воронку 7, которая крепится к крышке корпуса 8. Выгрузка измельченного материала осуществляется через полукольцевой канал в днище мельницы 9 и разгрузочный карман 10.

Разработанная мельница имеет ряд преимуществ по сравнению с известными конструкциями. Одно из них заключается в том, что кроме разгонных лопаток 3, закрепленных к верхней части диска 1, снизу к нему крепятся отбойные лопатки 4. При ударном разрушении куска измельчаемого материала образуются как мелкие частицы, так и более крупные осколки. Мелкие частицы разлетаются вдоль отбойной стенки, а крупные осколки отскакивают в обратном направлении. При движении крупных частиц в обратном направлении они под действием силы тяжести и воздействия газового потока опускаются несколько вниз, попадают под удар отбойных лопаток и снова отбрасываются к отбойной стенке. Таким образом, крупные осколки подвергаются многократным ударам отбойных лопаток, пока не опустятся вниз. Вследствие чего, качество измельчения улучшается и в готовом продукте крупные частицы практически отсутствуют. Материал в мельнице измельчается в основном за счет ударного разрушения, что с энергетической точки зрения делает ее весьма экономичной.

Следует также отметить, что измельченный материал в таком измельчителе не скапливается в зоне помола, а вместе с потоком воздуха сразу удаляется из мельницы, что также способствует созданию лучших условий для измельчения.

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В МЕЛЬНИЦЕ УДАРНО-МЕТАТЕЛЬНОГО ТИПА

Эффективность ударного измельчения зависит от скорости, при которой происходит удар частицы об отбойный элемент, и от угла между вектором скорости и касательной к отбойной поверхности в точке удара частицы. Чем больше скорость частицы в момент удара, и чем ближе угол удара об отражательные стержни к прямому, тем эффективнее протекает процесс измельчения. Естественно, скорость частицы при ударе будет зависеть от скорости вращения ротора. Рассмотрим условия, при которых угол удара об отражательные стержни будет близок к прямому.

Типовые конструкции роторов в мельницах ударно-метательного типа традиционно снабжаются радиальными разгонными лопатками [3–6]. Следовательно, частица материала при срыве с лопатки будет иметь радиальную относительную  $v_r^*$  и тангенциальную переносную  $v_t^*$  скорости (рис. 2). Тогда вектор полной скорости частицы, равный геометрической сумме векторов этих двух составляющих, будет направлен к касательной в точке удара (точка В, рис. 2) под некоторым углом  $\beta$ , который назовем углом удара частицы об отбойную поверхность.

Так как  $R_1 \gg h$ , то можно принять допущение, что  $\beta = \alpha$ , где  $\alpha$  — угол срыва частицы с лопатки (см. рис. 2). Таким образом, оценить величину угла удара  $\beta$  в случае радиального расположения разгонных лопаток можно из соотношения тангенциальной и радиальной скоростей частицы в момент ее отрыва от ротора мельницы.

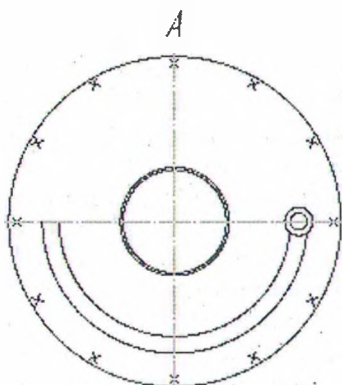
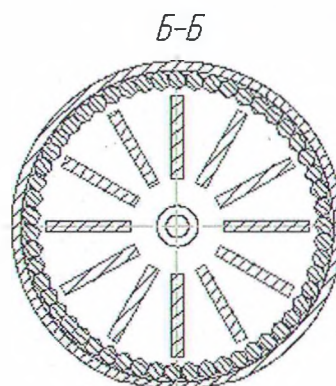
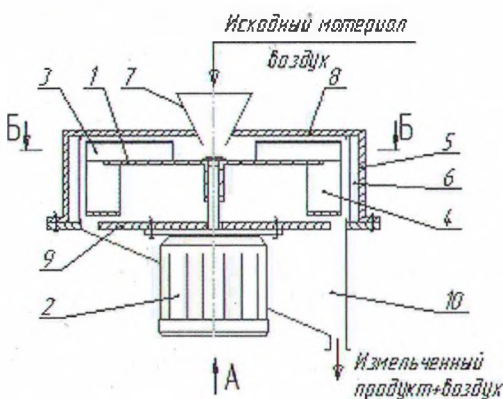
Величина тангенциальной скорости частицы определяется как произведение угловой скорости ротора  $\omega$  на радиус ротора  $R_r$ .

Величина радиальной скорости определяется при решении известного дифференциального уравнения движения одиночной частицы по радиальной лопатке вращающегося ротора [3, 6]

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \omega^2 \cdot x - 2f\omega \cdot \frac{dx}{dt}, \quad (1)$$

где  $x$  — текущая координата частицы, м;  
 $t$  — текущее время движения частицы, с;  
 $f$  — коэффициент трения.

Расчеты показывают, что  $\beta \approx \arctg(v_r^*/v_t^*)$  практически не зависит от угловой скорости и габаритных размеров ротора. Это объясняется тем, что тангенциальная и радиальная скорости частицы изменяются пропорционально, а их отношение, и, соответственно, угол удара частицы, остаются практически постоянными.

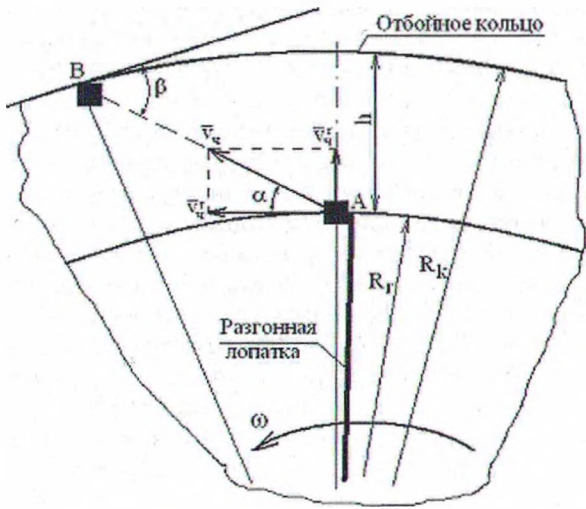


- 1 — диск; 2 — электродвигатель;  
 3 — разгонные лопатки; 4 — отбойные лопатки;  
 5 — обечайка корпуса;  
 6 — отражательные стержни; 7 — воронка;  
 8 — крышка корпуса; 9 — днище;  
 10 — разгрузочный карман с патрубком

Рис. 1. Ударно-центробежная мельница

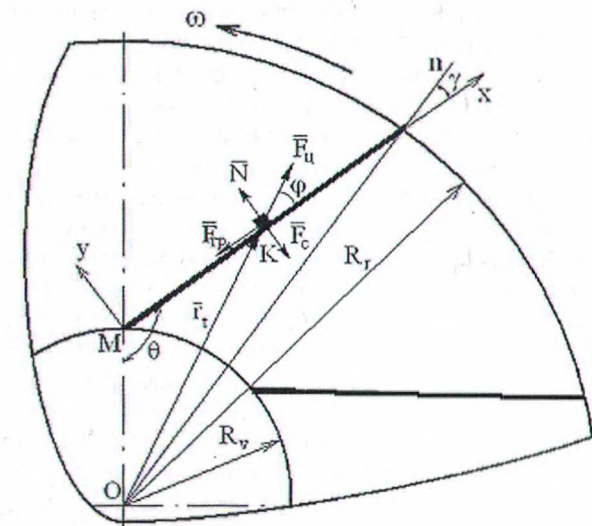






$R_r$  — радиус ротора, м;  $R_k$  — радиус отбойного кольца, м;  
 $h$  — зазор между ротором и отбойным кольцом, м;  
 $\omega$  — угловая скорость ротора,  $c^{-1}$

Рис. 2. Механизм удара



$R_v$  — внутренний радиус ротора по концам лопаток, м;  
 $r_t$  — текущий радиус вращения частицы, м;  
 $\gamma$  — угол наклона лопатки

Рис. 3. Движение частицы по наклонной лопатке

На угол удара частицы об отбойную поверхность оказывает влияние и коэффициент  $f$ , учитывающий трение материала о разгонную лопатку, но в диапазоне его значений от 0,3 до 0,8, характерных для большинства материалов, вариация величины  $\beta$  составляет не более  $1^\circ-2^\circ$ .

В целом, исследования динамики частиц материала в мельницах, имеющих ротор с радиальными лопатками, показали, что угол удара  $\beta$  здесь составляет в среднем  $33^\circ-35^\circ$  градусов, что, конечно, отрицательно сказывается на эффективности ударного измельчения в мельницах такого типа.

Одним из возможных путей повышения эффективности измельчения за счет увеличения угла удара  $\beta$  является выполнение ротора мельницы с наклонными против хода вращения разгонными лопатками. В этом случае угол между векторами радиальной и тангенци-

альной скоростей частицы больше  $90^\circ$ , что, естественно, ориентирует вектор полной скорости по отношению к касательной в точке удара ближе к перпендикулярно.

Рассмотрим движение частицы материала по наклонной разгонной лопатке. Для этого используем схему, представленную на рис. 3.

Пусть частица находится в произвольной точке на поверхности лопатки. На нее действуют: центробежная сила инерции  $F_u$ , кориолисова сила инерции  $F_c$ , сила трения частицы о поверхность лопатки  $F_{тр}$  и реакция опорной поверхности  $N$ . С учетом сил, действующих на движущуюся частицу, были приняты следующие допущения. Пренебрегали силой аэродинамического сопротивления вследствие ее малой величины по сравнению с массовыми силами. Так как величина силы тяжести при рабочих частотах вращения ротора мельницы на порядок меньше величины инерционных сил, то силу трения частицы о диск ротора также не учитывали.

С учетом вышесказанного и согласно схеме, представленной на рис. 2, система уравнений движения частицы по наклонной лопатке запишется в виде:

$$\begin{cases} m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = F_u \cdot \cos \varphi - F_{тр} \\ m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} = F_u \cdot \sin \varphi + N - F_c \end{cases} \quad (2)$$

где  $y$  — текущая ордината частицы, м;

$$F_u = m\omega^2 r_t, \text{ Н;}$$

$$F_{тр} = fN, \text{ Н;}$$

$$F_c = 2\omega \cdot (dx/dt), \text{ Н.}$$

Величина угла  $\varphi$  определяется по геометрическим соотношениям при известных углах  $\gamma$  и  $\theta$  (см. рис. 3), характеризующих наклон лопатки относительно радиального направления.

Так как частица движется вдоль лопатки, то  $m \cdot (d^2 y/dt^2) = 0$ . Следовательно опорная реакция лопатки согласно второму выражению системы уравнений (2) будет равна

$$N = 2m\omega \cdot \frac{dx}{dt} - m\omega^2 \cdot R_v \cdot \sin \theta, \quad (3)$$

где  $R_v$  — внутренний радиус ротора по концам лопаток (см. рис. 3).

С учетом выражения (2) уравнение движения частицы вдоль лопатки примет вид

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x}{dt^2} = & \omega^2 \cdot \sqrt{R_v^2 \cos^2 \theta + x^2 - 2R_v x \cos \theta} - \\ & - f \cdot \left( 2\omega \cdot \frac{dx}{dt} - \omega^2 R_v \sin \theta \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Решение дифференциального уравнения (4) осуществлялось численными способами на ЭВМ. В ходе решения были получены кинематические характеристики частиц при различных конструктивных и технологических параметрах мельницы и, прежде всего,  $v'_c$  и  $v''_c$  в зависимости от угла наклона лопаток  $\gamma$ . Затем из соотношения радиальной и тангенциальной скоростей определялся угол удара  $\beta$ .

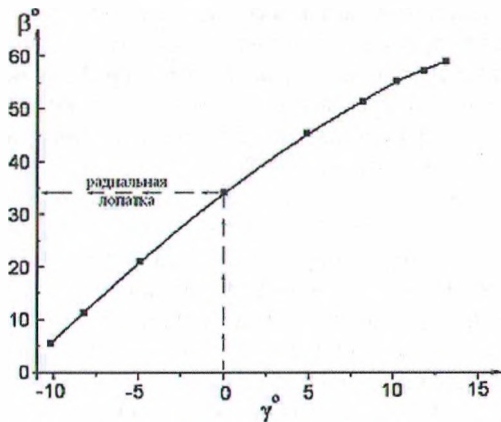


Рис. 4. Зависимость угла удара  $\beta$  от угла наклона лопатки  $\gamma$

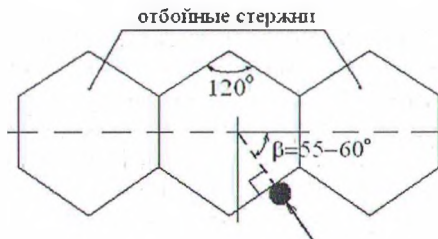


Рис. 5. Профиль отбойной поверхности

На рис. 4 представлена зависимость угла удара  $\beta$  от угла наклона лопатки  $\gamma$  при частоте вращения ротора 1000 об/мин и  $R_v/R_r = 0,3$ .

Из графика (см. рис. 4) видно, что с увеличением угла наклона лопатки  $\gamma$  назад до  $12^\circ$ – $14^\circ$  угол удара  $\beta$  существенно возрастает и достигает  $60^\circ$ . Дальнейшее увеличение угла наклона лопатки нецелесообразно, так как происходит значительное снижение величины полной скорости частицы.

Таким образом, очевидно, что при прочих равных условиях угол удара в мельницах, снабженных ротором с наклонными лопатками, будет гораздо ближе к прямому, чем при использовании ротора с радиальными лопатками.

Расчеты также показали, что, как и в случае с радиальной лопаткой, угловая скорость ротора и его габаритные размеры на угол удара  $\beta$  практически не влияют.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Опыт применения центробежно-ударных измельчителей. Обзор. Информ. / Центр. науч.-исслед. ин-т информ. и техн.-эконом. исслед. черной металлургии. — М.: Черная металлургия, сер. 4, вып. 1, 1991. — 25 с.
2. Патент РБ № 9942, Мельница / Э.И. Левданский, А.Э. Левданский, П.С. Гребенчук, С.Э. Левданский, 2007.
3. Левданский, А.Э. Научно-практические основы применения проточных течений для интенсификации процессов классификации и измельчения: дисс. докт. техн. наук: 05.17.08: защищена 24.11.04; утверждена 12.07.05 / А.Э. Левданский. — Минск, 2004. — 263 с.
4. Паладеева, Н.И. Анализ рабочего процесса и проектирование ударно-отражательных мельниц / Н.И. Паладеева, Д.В. Аристов // Горный журнал. — 1995. — № 7. — С. 117–119.
5. Левданский, Э.И. Энергосбережение при измельчении / Э.И. Левданский, А.Э. Левданский. — Минск: БГТУ, 1999. — 86 с.
6. Клепиков, Н.С. Расчет движения частиц топлива по размольной лопатке мельницы-вентилятора / Труды ЦКТИ, т. 5, 1985. — С. 71–76.

Статья поступила в редакцию 27.11.07.

Выполнение разгонных лопаток наклонными позволяет существенно повысить эффективность измельчения в мельницах ударно-метательного типа за счет увеличения угла  $\beta$  до величины  $60^\circ$ , однако в идеальном случае желательно добиться прямого удара частицы об отбойную поверхность. Для этого авторами статьи предлагается в качестве отбойной поверхности использовать не плоскую стенку, а сложный профиль, сформированный, например, из шестигранных стержней (рис. 5).

В этом случае, как видно из рис. 4, 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 возникнет. При измельчении очень твердых материалов рекомендуется упрочнить поверхность стержней и концов лопаток наплавкой износостойкими сплавами.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования механизма процесса измельчения в мельницах ударно-метательного типа позволили установить следующее:

1. Повысить эффективность ударного измельчения возможно за счет выполнения разгонных лопаток ротора наклонными в противоположную вращению сторону на величину  $12^\circ$ – $14^\circ$ .
2. С целью обеспечения прямого удара целесообразно использовать отбойную поверхность сложного профиля, сформированную, например, из шестигранных стержней. Достоинством выполнения отбойной поверхности из стержней является то, что по мере износа боковых граней их можно поворачивать вокруг своей оси на  $120^\circ$  и тем самым восстанавливать рабочую поверхность.
3. Выполнение разгонных лопаток наклонными назад позволяет снизить износ лопаток, так как величина опорной реакции в этом случае значительно ниже, чем при движении материала по радиальной лопатке, а, следовательно, сила трения будет снижаться.