

УДК 621.926

УДАРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЛЮЩИХ ТЕЛ В СЕПАРАЦИОННОЙ ЗОНЕ ЦЕНТРОБЕЖНО-ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

Д.Н. БОРОВСКИЙ

(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

Исследуется ударное взаимодействие мелющих тел в сепарационной зоне центробежно-шаровой мельницы. Рассмотрены проблемы шарового измельчения в барабанных мельницах. Предложена перспективная установка для помола материала при помощи мелющих тел. Рассмотрены ее конструктивные элементы. Представлена методика расчета движения мелющих тел в сепарационной зоне центробежно-шаровой мельницы за счет ударного взаимодействия между телами и стенкой корпуса. Применение данной методики позволит в зависимости от геометрических и технологических параметров рассчитать максимальную высоту подъема тел, необходимую для ударного разрушения материала, а также для наиболее полного циркуляционного движения тел внутри мельницы.

Введение. Шаровое измельчение широко используется в химической и других отраслях промышленности. Причем традиционно оно реализуется в барабанных мельницах, где мелющие тела (шары) вместе с материалом поднимаются на определенную высоту, а затем, отрываясь, падают вниз до соприкосновения со стенками барабана. Все это происходит при невысоких скоростях (до 1 м/с), чем обусловлена низкая эффективность помола. Проблемы измельчения в барабанных мельницах дополнительно усугубляются большой металлоемкостью и энергоемкостью самого процесса. Перспективы устранения указанных недостатков просматриваются в направлении усложнения траектории и увеличения скорости движения мелющих тел [1], что может быть реализовано в быстроходных центробежно-шаровых мельницах.

Основная часть. Основные конструктивные элементы этих мельниц видны на расчетной схеме (рис. 1). Это вращающийся чашеобразный ротор, в который загружаются мелющие тела и измельчаемый материал. К ротору с зазором примыкает статическое кольцо, прикрепляемое к цилиндрическим стенкам корпуса, переходящего в коническую сепарационную камеру.

Элементы загрузки, и прежде всего шары, ударившись о стенку корпуса, возвращаются в зону кольцевого зазора и встречаются с выходящими из ротора новыми шарами, в результате чего происходит их соударение и дальнейшее движение в сепарационной зоне.

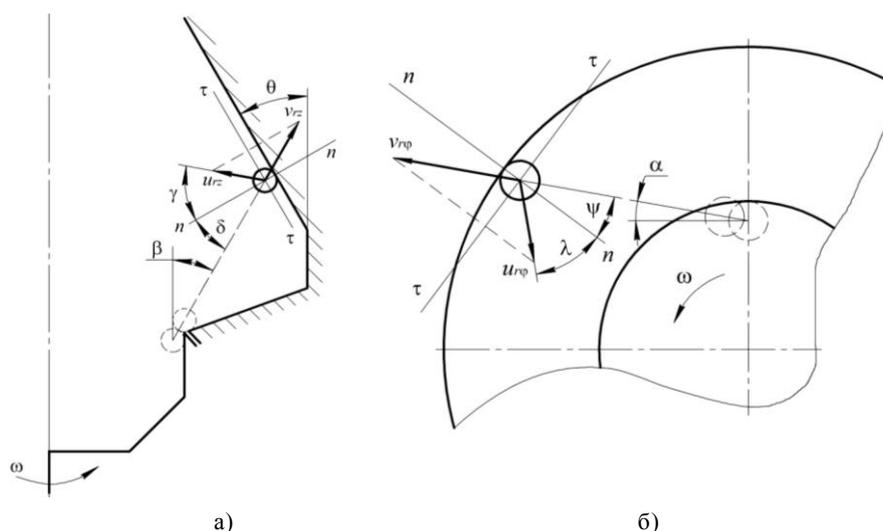


Рис. 1. Расчетная схема при ударе тела о стенки корпуса:
а – соударение в плоскости Orz ; б – соударение в плоскости $Or\phi$

Движение мелющих тел и загрузки в целом в роторе и по статическому кольцу изучено ранее [2; 3].

Задача данной работы заключается в определении траектории движения мелющих тел в сепарационной зоне с последующим возвратом на днище ротора. Причем для увеличения пути перемещения, а соответственно, и увеличения времени контакта мелющих тел с материалом они должны возвращаться как можно ближе к центру ротора.

В цилиндрической системе координат движение одиночного шара после удара (рис. 2) описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} m \cdot r\ddot{\phi} + 2\dot{r}\dot{\phi} = (F_y)_\phi; \\ m \cdot \ddot{r} - r(\dot{\phi})^2 = (F_y)_r; \\ m \cdot \ddot{z} = -G + (F_y)_z, \end{cases} \quad (1)$$

где m – масса мелющего тела (кг); r – координата тела (м); \dot{r} , $\dot{\phi}$ (м/с) и \ddot{r} , $\ddot{\phi}$, \ddot{z} – скорости и ускорения тела (м/с²) соответственно по осям r , ϕ , z ; $(F_y)_r$, $(F_y)_\phi$, $(F_y)_z$ – проекции силы удара (Н) соответственно на оси r , ϕ , z ; G – сила тяжести (Н).

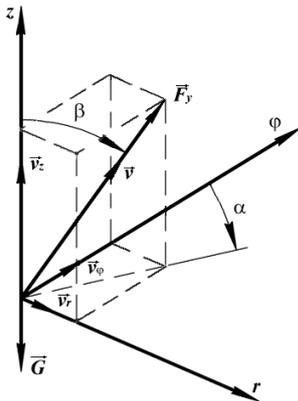


Рис. 2. Расчетная схема на участке «ротор – кольцо»

Направление вектора силы удара или вектора скорости тела после удара определяются углами α (в горизонтальной плоскости) и β (в вертикальной плоскости) (рис. 2).

Сила удара (Н) определяется следующим образом:

$$F_y = S/t.$$

Здесь S и t – импульс ударной силы (кг·м/с) и время удара (с) соответственно. При этом импульс S будет равен $S = m(v_2 - v_1)$, где v_1, v_2 – скорость тел в начале и в конце удара соответственно (м/с). Тогда, преобразовав, получим силу удара $F_y = mv_2/t$.

Скорость тела в начале удара на участке «ротор – кольцо» при спуске его со сменного кольца не учитываем, так как пренебрегаем полной скоростью тела ($v = 0,105$ м/с), скатывающегося с наклонного кольца корпуса, в связи с тем, что она меньше линейной скорости ротора ($v_r = 8,379$ м/с) в десятки раз.

Скорость тела в конце удара вследствие его соударения с телами, находящимися на роторе, будет определяться линейной скоростью ротора v_r , но при этом не учитываем скорость подъема мелющего тела по вертикальной стенке ротора. Эта скорость в момент, когда тела находятся только на стенке ротора и на них не действует сила давления других шаров, будет приближаться к нулевому значению.

Значения начальных скоростей:

$$\begin{aligned} r\dot{\phi} &= v_r k \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha; \\ \dot{r} &= v_r k \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha; \\ \dot{z} &= v_r k \cdot \cos \beta. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь k – коэффициент восстановления при ударе двух шаров; v_r – линейная скорость ротора (м/с), равная $v_r = \omega \cdot r_p$, где ω, r_p – угловая скорость ротора (рад/с) и его радиус (м) соответственно.

Коэффициент восстановления для различных материалов в зависимости от их скорости движения для стали [4; 5] представлен в таблице.

Коэффициент восстановления k для стали

Материал	Линейная скорость ротора, v_r , м/с				
	5	20	32	64	100
Сталь	0,77	0,73	0,68	0,57	0,46

Тогда с учетом формул для силы удара и (2) система уравнений (1) переписывается в следующем виде:

$$\begin{cases} \ddot{\phi} = -\frac{2}{r^2}(v_r k \cdot \sin \beta)^2 \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha + \frac{v_r k \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta}{r^2 t}; \\ \ddot{r} = r(v_r k \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha)^2 + \frac{v_r k \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta}{t}; \\ \ddot{z} = -g + \frac{v_r k \cdot \cos \beta}{t}. \end{cases} \quad (3)$$

Полученная система уравнений (3) была использована для расчета максимальной высоты подъема мелющего тела H_{max} и его траектории движения в сепарационной зоне центробежно-шаровой мельницы.

Расчеты проводились с использованием математического пакета Mathcad для ротора мельницы диаметром $d_p = 185$ мм при различных его угловых скоростях $\omega = 30 \dots 90$ рад/с.

Исходя из того, что направление линии удара для соударяющихся тел будет изменяться с каждой парой контактирующих между собой тел, углы принимались в наиболее вероятном диапазоне: $\alpha = -10 \dots 30^\circ$; $\beta = 10 \dots 75^\circ$.

За начальные условия для расчета принимались значения координат тела предыдущей стадии – движение по статическому кольцу – и рассчитанных скоростей по осям r , ϕ и z . Граничным условием при расчете считали максимальную высоту подъема тела H_{max} , которое соответствует нулевому значению v_z . В этом случае измельчающее тело разворачивается и начинает падение вниз.

По уравнениям (3) с учетом введенных ограничений получили максимально возможную высоту подъема мелющего тела (рис. 3) в зависимости от относительного диаметра D_k/d_p (D_k – диаметр корпуса или сменного кольца, м; d_p – диаметр ротора, м) при разных углах β и фиксированных значениях $\alpha = 10^\circ$ и $v_d = 8,379$ м/с. Аналогично можно получить графические зависимости при изменении угла α или линейной скорости ротора v_d .

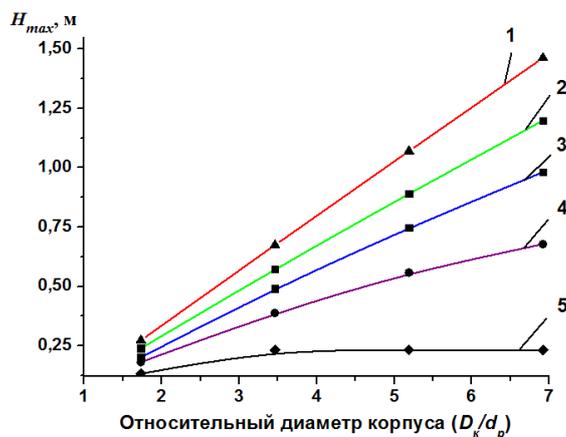


Рис. 3. Зависимость высоты подъема от относительного диаметра корпуса:
1 – $\beta = 10^\circ$; 2 – $\beta = 30^\circ$; 3 – $\beta = 45^\circ$; 4 – $\beta = 60^\circ$; 5 – $\beta = 75^\circ$

При уменьшении угла β (направление линии удара тела приближается к вертикали), а также при отрицательных углах α (дальнейшее движение тела происходит к оси вращения ротора) наблюдается увеличение максимальной высоты подъема. В данном случае будет увеличиваться расстояние от стенок корпуса мельницы и, как следствие, высота подъема мелющих тел будет возрастать.

Корпус мельницы, расположенный над сменным кольцом, представляет собой сопряжение цилиндрической и конической обечаяек. При уменьшении угла наклона образующей конической части корпуса θ (град) снижается и максимальная высота подъема, причем при наклоне более 30° влияние линейной скорости на подъем минимально (рис. 4).

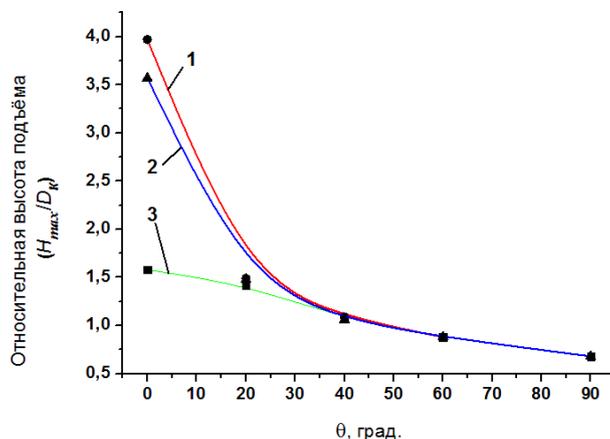


Рис. 4. Зависимость относительной высоты подъема от наклона боковой поверхности крышки корпуса при разных линейных скоростях ротора v_d ($\beta = 30^\circ$ и $\alpha = 10^\circ$):
1 – $v_d = 8,37$ м/с ($n = 900$ об/мин); 2 – $v_d = 5,58$ м/с ($n = 600$ об/мин); 3 – $v_d = 2,79$ м/с ($n = 300$ об/мин)

Для обеспечения возврата мелющего тела на ротор как можно ближе к его оси вращения необходимо, чтобы происходил касательный удар тела о наклонную поверхность корпуса. При этом тело будет приближаться к оси ротора, в конечном итоге произойдет наиболее полное циркуляционное движение внутри мельницы. Удар будет косым как в плоскости $Or\phi$ (см. рис. 1), так и в плоскости Orz . Поэтому необходимо найти величины и направления скоростей $u_{r\phi}$ и u_{rz} тела (частицы) после удара о стенки корпуса мельницы. Величины скоростей до удара $v_{r\phi}$ и v_{rz} определим следующим образом:

$$v_{r\phi} = \sqrt{(\dot{r})^2 + (\dot{\phi})^2}; \quad v_{rz} = \sqrt{(\dot{r})^2 + (\dot{z})^2}. \quad (4)$$

Для определения направлений и величин скоростей $u_{r\phi}$ и u_{rz} при косом ударе используем следующие соотношения для определения коэффициента восстановления [6]:

$$k_1 = \frac{|(u_{rz})_n|}{|(v_{rz})_n|} = \frac{\tan(\delta)}{\tan(\gamma)}; \quad k_2 = \frac{|(u_{r\phi})_n|}{|(v_{r\phi})_n|} = \frac{\tan(\psi)}{\tan(\lambda)}. \quad (5)$$

Значения k_1 и k_2 также можно найти в зависимости от скоростей тела до удара v_{rz} и $v_{r\phi}$ [4; 5].

Согласно расчетной схеме (см. рис. 1, а) и соотношению (5) скорость движения тела после удара u_{rz} в плоскости Orz находится по формуле:

$$u_{rz} = k_1 \left| v_{rz} \cdot \frac{\cos(\delta)}{\cos(\gamma)} \right|. \quad (6)$$

Угол δ (град) находится из следующего равенства:

$$\delta = 90 - (\beta + \theta),$$

где θ – угол наклона боковой поверхности корпуса мельницы, град.

Тогда с учетом равенства (5) и соотношения для угла δ можно найти угол γ :

$$\gamma = \arctan \left(\frac{\tan(\delta)}{k_1} \right). \quad (7)$$

Аналогичным образом находится скорость $u_{r\phi}$ (м/с) и угол λ :

$$u_{r\phi} = k_2 \left| v_{r\phi} \cdot \frac{\cos(\psi)}{\cos(\lambda)} \right|, \quad \lambda = \arctan \left(\frac{\tan(\psi)}{k_2} \right). \quad (8)$$

В этом случае угол ψ (град) будет равен

$$\psi = 90 - (\alpha + \phi),$$

где ϕ – координата тела, град.

После соударения с наклонной стенкой корпуса дальнейшее движение тел происходит по параболе к оси мельницы (в плоскости Orz – вверх; в плоскости $Or\phi$ – к оси мельнице (см. рис. 1)). Далее тело падает на ротор под действием силы тяжести. При этом точки касания тел с ротором будут располагаться на некотором радиусе. Этот радиус далее будем называть радиусом падения.

В зависимости от величины угла наклона образующей боковой поверхности корпуса, линейной скорости ротора, углов, характеризующих направление движения после удара, соотношения диаметров корпуса и ротора D_n/d_p радиус падения частицы будет различным.

Для определения радиуса падения зафиксируем углы $\alpha = 10^\circ$ и $\beta = 40^\circ$ как одни из наиболее вероятных при соударении тел в переходной зоне «ротор – кольцо», определенные при фотосъемке. Радиус падения (рис. 5) будет наименьшим при наклоне образующей боковой поверхности корпуса $\theta = 25 \dots 35^\circ$. В данном случае из-за касательного удара с наклонной стенкой корпуса тело будет продолжать свое дальнейшее движение. С ростом линейной скорости ротора (см. рис. 5) увеличивается и радиус падения тела. Однако при скорости $v_n = 8,379$ м/с тело достигает высоты, где за счет сужения конической части корпуса мельницы оно приближается к оси более интенсивно, чем при $v_n = 5,58$ м/с, т.е. тела будут падать на ротор практически в его центр для наклона образующей боковой поверхности $\theta = 30^\circ$. Для углов $\theta > 30^\circ$ вследствие того, что вектор скорости тела после соударения направлен ближе к вертикали, тела поднимаются выше, но при этом их радиус падения увеличивается, т.е. падение происходит дальше от оси мельницы, чем при $\theta = 30^\circ$. Для углов $\theta < 30^\circ$ наблюдается обратная ситуация, только при этом тела будут «перелетать» ось. Также необходимо отметить, что при фиксированной линейной скорости ротора, углов

соударения α , β и при одной и той же высоте подъема тел к уменьшению их радиуса падения приводит увеличение соотношения D_k/d_p . В этом случае вначале происходит контакт с крышкой корпуса, его стенками, а затем тело падает на ротор. При этом расстояние до оси вращения ротора будет сильно зависеть от радиуса кольца, т.е. при его увеличении с учетом введенных выше условий не будет наблюдаться перелета телом оси.

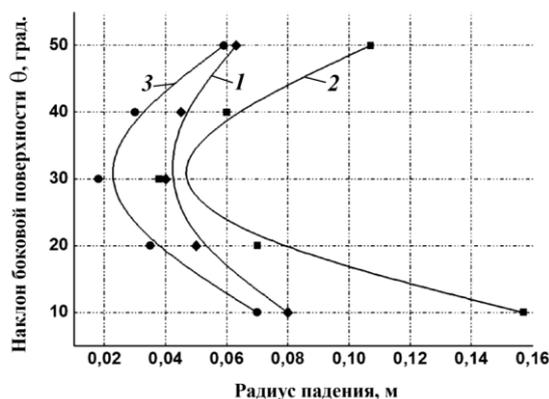


Рис. 5. Зависимость радиуса падения тела от наклона образующей боковой поверхности корпуса при разных величинах линейной скорости и фиксированных значениях углов $\alpha = 10^\circ$, $\beta = 40^\circ$ и соотношении $D_k/d_p = 1,7$: 1 – $v_l = 2,79$ м/с ($n = 300$ об/мин); 2 – $v_l = 5,58$ м/с ($n = 600$ об/мин); 3 – $v_l = 8,37$ м/с ($n = 900$ об/мин)

Аналогичным образом можно получить радиус падения и для других технологических и геометрических параметров, обозначенных выше.

Заключение. Предложенная методика расчета позволяет в зависимости от геометрических и технологических параметров мельницы рассчитать максимальную высоту подъема тел, необходимую для ударного разрушения материала, а также для наиболее полного циркуляционного движения тел внутри мельницы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сиденко, П.М. Измельчение в химической промышленности / П.М. Сиденко. – 2-е изд. – М.: Химия, 1977. – 368 с.
2. Вайтехович, П.Е. Определение важнейших параметров центробежно-шаровых мельниц / П.Е. Вайтехович, В.С. Францкевич, Г.М. Хвесько // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2007. – № 10. – С. 3 – 5.
3. Боровский, Д.Н. Математическое моделирование движения мелющих тел на роторе вертикальной центробежной мельницы / Д.Н. Боровский, П.Е. Вайтехович, Д.В. Семененко // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорганических веществ. – 2009. – Вып. XVII. – С. 163 – 166.
4. Исследование процесса ударных взаимодействий частиц / И. Клейс [и др.] // Трение и износ. – 1997. – Т. 18, № 6. – С. 730 – 735.
5. Барсуков, В. Трибомеханика дисперсных материалов / В. Барсуков, Б. Крунич. – Гродно: ГрГУ, 2004. – 243 с.
6. Тарг, С.М. Краткий курс теоретической механики: учеб. для вузов / С.М. Тарг. – М.: Высш. шк., 2007. – 352 с.

Поступила 24.01.2011

SHOCK INTERACTION OF GRINDING BODIES IN SEPARATION TO THE ZONE OF THE CENTRIFUGAL-SPHERICAL MILL

D. BAROUSKI

In article problems of spherical crushing in drum-type mills are considered. Perspective installation for a grinding of a material by means of grinding bodies is offered. Its constructive elements are considered. The design procedure of movement of grinding bodies in separation is presented a zone of a centrifugal-spherical mill at the expense of shock interaction between bodies and a case wall. Application of the given technique will allow to calculate depending on geometrical and technological parameters the maximum height of lifting of the bodies, necessary for shock destruction of a material, and also for the fullest circulating movement of bodies in a mill.