

МЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Богданов В. С., д-р. техн. наук, проф.,
Воронов В. П., канд. физ.-мат. наук, проф.,
Потанов Ф. П., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

РАСЧЕТ СРЕДНЕГО ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО РАЗМЕРА ЧАСТИЦ ГОТОВОГО ПРОДУКТА ПРИ КАСКАДНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

v.s_bogdanov@mail.ru

В статье представлен расчет среднего геометрического размера частиц готового продукта, полученного в шаровой барабанной мельнице при каскадном режиме работы дробящей среды. Получена математическая зависимость среднего размера частиц материала от радиуса шаровой загрузки, результирующей силы, действующей на материал и свойств измельчаемого материала.

Ключевые слова: средний размер частицы, объем зоны деформации, работа, энергия.

Для получения высокой производительности в шаровых барабанных мельницах и формирования желаемого зернового состава в процессе измельчения цементного клинкера, получение цементов с заданными свойствами, обусловленными дисперсностью, является сложным и трудным процессом, потому что слишком много факторов влияет на измельчение.

Представленный в работе метод расчета среднего геометрического размера частиц материала основан на учете энергии, передаваемой мелющими телами материалу, и как следствие этого определение деформирующих усилий создаваемых в частицах материала. Деформирующее усилие, создаваемое мелющими телами,

определяется из предположения, что измельчение материала в шаровых барабанных мельницах происходит, как процесс его прессования, протекающего с большой скоростью под действием мелющих тел. При этом измельчение материала происходит в основном истиранием и раздавливанием между шарами и футеровкой барабана мельницы, т.е. при каскадном режиме работы дробящей среды.

Для получения выражений, определяющих средний геометрический размер частицы материала, получаемый под действием приложенной силы R_i , представим величину работы в следующем виде [1]:

$$A_i = \frac{2^{3/4} \cdot \sqrt{\sqrt{2}-1} \cdot (2-\mu)}{3 \cdot \mu \cdot \sqrt{\pi} \cdot E} \cdot \sqrt{\frac{R_i \cdot \sigma_0}{d_i^2}} \cdot (Q_i - Q_i^{\min}). \quad (1)$$

Величина данной работы, зависит от свойства измельчаемого материала, которые задаются такими величинами, как модуль Юнга материала E , коэффициент Пуансона μ , напряжения деформации зоны σ_0 , а также от величины действующей силы R_i и размера d_i вновь образованных частиц в результате разрушения зоны деформации, количества энергии Q_i .

Пусть количество энергии Q_i , передаваемое материалу под действием силы R_i некоторого « i » - слоя шаровой загрузки задается следующим соотношением:

$$Q_i = R_i \cdot h_i, \quad (2)$$

где h_i - максимальное расстояние, на которое распространяется действие силы R_i .

$$h_i = \sqrt{(\sqrt{2}-1) \cdot \frac{R_i}{\pi \cdot \sigma_0}}. \quad (3)$$

Минимальное количество энергии рассчитывается следующим образом:

$$Q_i^{\min} = \frac{3 \cdot (\sqrt{2} - 1) \cdot \mu \cdot (1 - 2\mu)}{\pi \cdot \sqrt[4]{2} \cdot (2 - \mu)} \cdot \frac{R_i^2}{\sigma_0 \cdot d_i} \quad (4)$$

В силу положительности величины A_i необходимо чтобы выполнялось следующее неравенство:

$$Q_i \geq Q_i^{\min} \quad (5)$$

Величина энергии вводимой в объем зоны деформации материала была больше или равна величине минимального количества энергии,

$$A_i = P_i \cdot \left(\frac{2 - \mu}{3 \cdot E \cdot \mu} \cdot Q_i - \frac{3 \cdot P_i \cdot V_{o,i} \cdot (1 - 2 \cdot \mu)}{2 \cdot E} \right), \quad (6)$$

где P_i - реакция материала, действующая на боковую поверхность конуса уплотнения;

Приравняем реакцию материала, действующую на боковую поверхность конуса уплотнения к напряжению критического объемного разрушения, т.е. $P_i = P_k$, при условии что $A_i = 0$, тогда из выражения (6) получим:

$$P_k = \frac{2}{9} \cdot \frac{(2 - \mu)}{\mu \cdot (1 - 2\mu)} \cdot \frac{Q_i}{V_{o,i}} \quad (7)$$

В силу того, что мелющее тело имеет сферическую форму, то в материале в результате действия точечной силы R_i образуется зона уплотнения в форме конуса с основанием на поверхности контакта с материалом. Его сечения в плоскостях перпендикулярных направлению действия силы имеют форму окружностей, радиус которых уменьшается при увеличении расстояния от поверхности материала. По линии действия силы R_i напряжения имеют наибольшие значения, но с удалением от линии действия силы, согласно результатам работы [2] уменьшаются пропорционально квадрату расстояния. Если геометрические размеры поверхности конуса, на которой напряжения достигают значения σ_0 - объемной прочности материала под действием силы R_i обозначить, как h_i и ρ_i (рисунок 1), то объем данного конуса будет равен:

$$V_{o,i} = \frac{\pi}{3} \cdot \rho_i^2 \cdot h_i \quad (8)$$

Учет соотношений (2), (8) и (9) позволяет представить (7) в следующем виде:

которое необходимо ввести в зону деформации материала, чтобы произошло «прорастание» трещин и как следствие этого разрушение материала. Согласно приведенному соотношению (4) величина этой минимальной энергии прямо пропорциональна квадрату действующей силы и обратно пропорционально среднему геометрическому размеру вновь образованных частиц материала и величине объемной прочности материала на растяжение.

На основании выше изложенного выражение (1) можно представить в следующем виде:

$$P_k = \frac{2}{3} \cdot \frac{(2 - \mu)}{\mu \cdot (1 - 2\mu)} \cdot \sigma_0 \quad (10)$$

Следовательно, при значениях нагрузок $P_i = 0$, $P_i = P_k$ и $P_i > P_k$ объем зоны уплотнения $V_{o,i}$ работы не совершает. При $P_i \geq P_k$ вся энергия расходуется только на деформацию объема $V_{o,i}$, которая затем переходит в тепловую энергию, что приводит к увеличению температуры материала и всей шароматериальной загрузки.

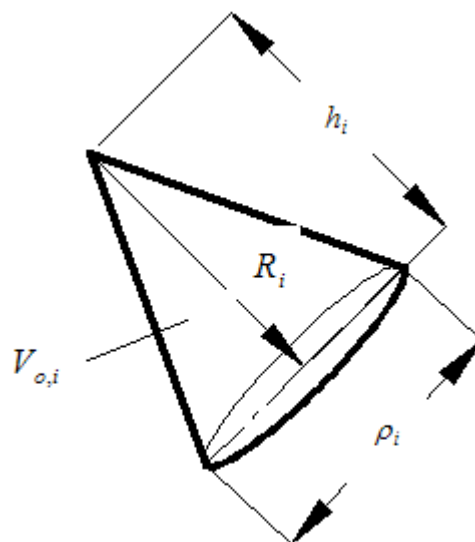


Рисунок 1. Схема зоны уплотнения материала

$$\rho_i = \sqrt{\frac{R_i}{\pi \cdot \sigma_0}} \quad (9)$$

Для определения оптимального значения нагрузки P_{opt} необходимо вычислить первую

производную от соотношения (6) и результат приравнять к нулю, тогда получим следующее уравнение:

$$\frac{(2-\mu)}{3 \cdot E \cdot \mu} \cdot Q_i - \frac{3 \cdot P_{onm} \cdot V_{o,i} \cdot (1-2\mu)}{E} = 0 \quad (11)$$

Решая уравнение (11) относительно переменной P_{onm} находим:

$$P_{onm} = \frac{(2-\mu)}{9 \cdot \mu \cdot (1-2\mu)} \cdot \frac{Q_i}{V_{o,i}} \quad (12)$$

Сравнение соотношения (12) с (7) приводит к следующему результату:

$$P_{onm} = \frac{1}{2} \cdot P_k \quad (13)$$

На основании (10) заключаем, что

$$P_{onm} = \frac{(2-\mu) \cdot \sigma_0}{3 \cdot \mu \cdot (1-2\mu)} \quad (14)$$

Согласно (10) оптимальное значение нагрузки P_{onm} не зависит от номера слоя шаровой загрузки и его характеристик, а определяет-

$$2^{3/4} \cdot \sqrt{\sqrt{2}-1} \cdot \sqrt{\frac{R_i \cdot \sigma_0}{\pi}} \cdot \frac{1}{d_i} = \frac{(2-\mu) \cdot \sigma_0}{3 \cdot \mu \cdot (1-2\mu)} \quad (17)$$

Откуда находим, что:

$$d_i = 3 \cdot 2^{3/4} \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{2}-1}{\pi}} \cdot \frac{\mu \cdot (1-2\mu)}{2-\mu} \cdot \sqrt{\frac{R_i}{\sigma_0}} \quad (18)$$

Результирующие силы, действующие на материал заключенный между последовательно расположенными слоями шаров, имеет вид:

$$R_{n-1} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \sqrt{1+f^2} \cdot r^3 \cdot \rho_{uu} \cdot \omega_{n-1}^2 \cdot r_n \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \kappa_i \cdot \left(1 + 0,0331 \cdot \frac{\rho_m}{\rho_{uu}} \cdot \left(1 - \frac{1}{\kappa_i} \right) \right) \quad (19)$$

А с учетом соотношения (18) имеем:

$$d_{i-1} = 3 \cdot 2^{3/4} \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{2}-1}{\pi}} \cdot \frac{\mu \cdot (1-2\mu)}{2-\mu} \cdot \sqrt{\frac{R_{i-1}}{\sigma_0}} \quad (20)$$

Таким образом, соотношения (18) и (20) определяют средние геометрические размеры сферических частиц материала, образующихся в

только коэффициентом Пуансона μ и значением напряжения объемного разрушения σ_0 . На основании (13) заключаем, что оптимальное значение напряжения P_{onm} составляет половину его критического значения.

Подстановка выражения (13) в выражение (6) позволяет найти максимальное значение работы:

$$A_{max} = \frac{(2-\mu)^2}{18 \cdot \mu^2 \cdot (1-2\mu)} \cdot \frac{\sigma_0}{E} \cdot Q_i \quad (15)$$

С учетом выражений (2) и (3) формула (15) примет вид:

$$A_{max} = \sqrt{\frac{\sqrt{2}-1}{\pi}} \cdot \frac{(2-\mu)^2 \cdot \sigma_0^{1/2} \cdot R_i^{3/2}}{18 \cdot \mu^2 \cdot (1-2\mu) \cdot E} \quad (16)$$

Если организовать нагружения объема (8) оптимальным значением нагрузки P_{onm} , то в результате разрушения данного объема будут образовываться частицы сферической формы, диаметр которых можно найти из соотношения $P_i = P_{onm}$, а именно:

результате разрушения объемов зон деформации $V_{o,i}$ и $V_{o,i-1}$ частицы исходного материала, рас-

полагающиеся между $i-1$ и i слоями шаровой загрузки барабана мельницы при каскадном режиме в случае нагружения рассматриваемых объемов.

$$d_i = 3 \cdot 2^{\frac{3}{4}} \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{2}-1}{\pi}} \cdot \frac{\mu \cdot (1-2\mu)}{2-\mu} \cdot \left[\frac{4 \cdot \pi}{3 \cdot \sigma_0} \cdot \sqrt{1+f} \cdot r^3 \cdot \rho_{ш} \cdot \omega_n^2 \cdot r_n \cdot \sum_{i=1}^n \kappa_i \cdot \left(1 + 0,0331 \cdot \frac{\rho_m}{\rho_{ш}} \cdot \left(1 - \frac{1}{\kappa_i} \right) \right) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (21)$$

Таким образом, задание всех параметров и коэффициентов, входящих в выражение (21), позволяет определить средний диаметр частиц

$d_i, \text{м}$

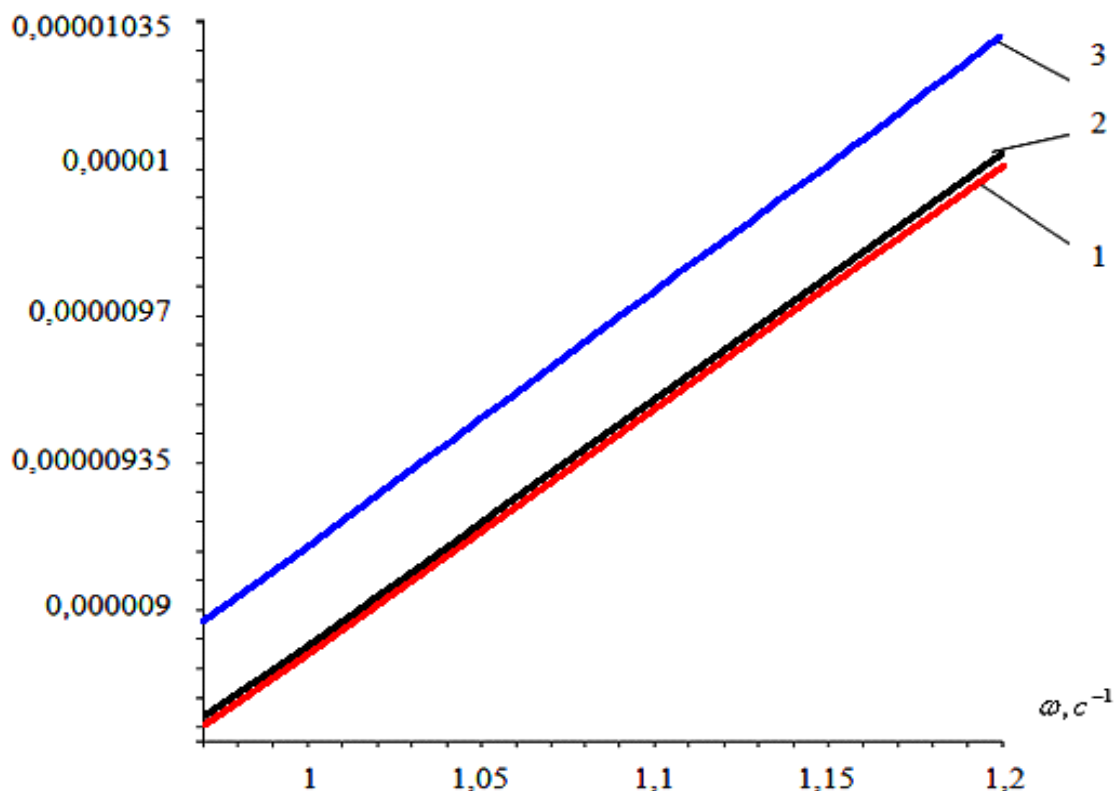


Рисунок 2. График зависимости среднего размера частиц конечного продукта при каскадном режиме движения загрузки от частоты вращения барабана мельницы при $R=0,15$ м, $f=0,3$, $r=0,018$ м, $\rho_m=2100$ кг/м³, $\rho_{ш}=4850$ кг/м³:

1 – коэффициент загрузки $\varphi=0,31$; 2 – коэффициент загрузки $\varphi=0,33$; 3 – коэффициент загрузки $\varphi=0,35$.

Анализ графических зависимостей представленных на рисунке 2 показывает, что с ростом частоты вращения барабана мельницы средний размер частиц конечного продукта увеличивается по линейному закону при каждом фиксированном значении коэффициента загрузки.

С другой стороны при каждом фиксированном значении частоты с ростом коэффициента загрузки средний размер частиц конечного продукта увеличивается нелинейно, и по – видимому, в предельном случае, когда коэффициент загрузки $\varphi \rightarrow 1$ средний размер частиц материала

Подстановка выражения (20) в (18) приводит к следующему соотношению:

конечного продукта в зависимости от значения радиуса шаровой загрузки.

будет стремиться к размеру частиц материала исходного продукта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богданов, В.С. Расчет величины работы затрачиваемой на разрушение материала при каскадном режиме работы шаровой мельницы [Текст] / В.С. Богданов, В.П. Воронов, Ф.П. Потапов // НТЖ «Вестник БГТУ им.В.Г. Шухова», 2011.– № 1. – С. 61 – 64.

2. Безухов, Н.И. Основы теории упругости пластичности и ползучести [Текст] / Н.И. Безухов – М.: Высшая школа, 1961. – 538 с.