

УДК 621.926

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ В СРЕДНЕХОДНЫХ МЕЛЬНИЦАХ

канд. техн. наук В.С. ФРАНЦКЕВИЧ, канд. техн. наук, доц. П.Е. ВАЙТЕХОВИЧ
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований энергетики процесса измельчения в валковой среднеходной мельнице. Разработана модель разрушения материала под воздействием давления, создаваемого вращающимися валками, впервые учитывающая как кратность воздействия при изменении степени измельчения и удельной поверхности, так и затраты энергии на неупругие деформации, работу сил трения и создание новых поверхностей. На основе модели предложена методика расчета энергозатрат на процесс разрушения материала. Расчеты энергозатрат на измельчение показали хорошую сходимость не только с экспериментальными данными, но и со сведениями по эксплуатируемым за рубежом валковым мельницам.

Введение. Как известно, характерными достоинствами среднеходных мельниц являются сравнительно малые габариты установок, простота монтажа, высокая приспособленность к автоматизации, низкий уровень шума. Они характеризуются более низкими удельными энергозатратами, малым износом размольных элементов, занимают меньше места на единицу мощности и требуют значительно меньших капиталовложений. Возможность гибкого регулирования режимов работы с малой инерционностью при изменении производительности, т.е. высокая маневренность, также является важным преимуществом среднеходных мельниц. Эти машины работают в замкнутом цикле с воздушным сепаратором, легко перестраиваются на требуемую тонкость помола и часто используются в качестве помольно-сушильных комплексов с пневмотранспортом готового продукта. В настоящее время за рубежом выпускаются среднеходные валковые мельницы производительностью до 500 т/ч [1; 2].

Затраты энергии на процесс помола, в том числе и в валковых мельницах, выступают в качестве основного показателя, характеризующего эффективность работы помольного агрегата. В настоящее время при расчете мощности привода среднеходной валковой мельницы приходится пользоваться эмпирическими зависимостями, полученными ранее [3]. В тех немногочисленных работах, в которых исследовались эти агрегаты, не делались даже попытки связать энергозатраты с теоретическими аспектами разрушения и дезинтеграции.

Анализ моделей разрушения монокристаллических тел и монокристаллов показывает, насколько сложен и мало изучен этот процесс и насколько тяжело его описать математически. Поэтому большинство моделей идеализировано, в них не учитывается весь спектр факторов, влияющих на процесс разрушения. Путем теоретического рассмотрения неустойчивости микро- и макротрещин в поле напряжений удалось достигнуть некоторых успехов в объяснении основных закономерностей процесса разрушения. Однако все теоретические модели разрушения дают лишь качественную характеристику процесса, не являясь основой для количественной оценки прочности.

Главным вопросом процесса дезинтеграции остается установление количественной связи между гранулометрическим составом конечного продукта и энергоемкостью процесса. К сожалению, и это подчеркивается в работе [4], успехи в этом направлении незначительны. Мы до сих пор продолжаем использовать гипотезы, высказанные полторы сотни лет тому назад Риттингером и Киком и позднее – Бондом.

Основная часть. В настоящее время при теоретических исследованиях процесса измельчения чаще используют гипотезу Ребиндера. Преимущество уравнения Ребиндера перед вышеперечисленными тремя законами заключается в аддитивном принципе ее построения, подчеркивающим многофакторность процесса разрушения. В этой зависимости учтена и деформация, и образование новой поверхности как процессы, характеризующие собирательное явление, называемое разрушением. Уравнение Ребиндера использовано Осокиным [5] применительно к мельницам ударного действия для оценки удельных энергозатрат. Причем по сравнению с базовым вариантом им дополнительно учтена кратность воздействия на разрушаемый материал. При этом работа измельчения:

$$A = \frac{\sigma^2 V}{2E} \cdot n_g + w_s \cdot S - S_H, \quad (1)$$

где A – работа измельчения, Дж; σ , E – соответственно предел прочности и модуль упругости материала, Па; V – объем измельчаемого материала (остается неизменным в процессе измельчения), м³; n_g – кратность воздействия; w_s – удельная поверхностная энергия, Дж/м²; S_H , S – начальная и текущая поверхности измельчаемого материала, м².

Данная зависимость учитывает энергию, затрачиваемую на упругие деформации и образование новой поверхности. Но, как известно, разрушение твердых материалов сопровождается еще и пластической деформацией, на которую затрачивается некоторая доля подводимой к ним энергии. Аморфизация и другие изменения кристаллической структуры, наблюдаемые при измельчении ряда твердых материалов, позволяют считать наличие заметной пластической деформации при тонком измельчении достаточно общим явлением. Наряду с этим имеются и другие затраты энергии, в частности потери на работу трения и разрушение агломератов. Ходаковым [6] было предложено уравнение для плотности энергии измельчения в общем виде

$$dw_v = \frac{9bw_{vy}}{a_2} \cdot \frac{dS}{S} + \left(\frac{3bw_{vp} + w_{st}}{a_2} + w_{st} \right) \cdot dS + \frac{bw_{vp}l_1^2}{4a_2} \cdot S \cdot dS, \quad (2)$$

где b – объемный фактор формы; w_{vy} – плотность энергии пластической деформации; dS – прирост площади поверхности при разрушении; w_{vp} – плотность энергии пластических деформаций, предшествующих хрупкому разрушению; a_2 – коэффициент; w_{st} – поверхностная плотность работы сил трения и энергии образования и разрушения агрегатов; w_s – свободная энергия единицы площади поверхности; $l_1 = \frac{2 \cdot l}{a_1}$ – коэффициент; l – толщина слоя пластической деформации; S – текущая поверхность измельчаемого материала, m^2 .

В данной зависимости первый член представляет собой затраты энергии на объемное деформирование твердого тела, второй – затраты энергии на неупругие деформации, работу сил трения и создание новых поверхностей, третий учитывает изменение объема области пластических деформаций в связи с изменением размеров частиц.

Для оценки вклада неучтенных ранее статей затрат на суммарную работу разрушения было получено уравнение для плотности энергии измельчения трансформированное непосредственно для мельниц раздавливающего типа:

$$w_v = \frac{9bw_{vy}}{a_2} \cdot \left(\ln \frac{S}{S_0} + \ln \frac{S_{max} - S_0}{S_{max} - S} \right) + \frac{S_{max}}{a_2} \cdot \left(3bw_{vp}l_1 + a_2w_s \right) \cdot \ln \frac{S_{max} - S_0}{S_{max} - S}, \quad (3)$$

где S_0, S_{max} – начальная и максимально возможная поверхности измельчаемого материала, m^2 . Тогда полная работа за один оборот размольного стола среднеходной мельницы будет равна [2]

$$A_\Sigma = w_v V n \cdot \frac{360}{\varphi_1} \cdot \frac{R_T}{R}, \quad (4)$$

где R_T – радиус беговой дорожки стола, м; n – количество циклов измельчения; φ_1 – угол захвата куска материала валком ($\varphi_1 = 2\varphi$, где φ – угол трения, который зависит от коэффициента трения f материала о валок, $\varphi = \text{arctg } f$; R – радиус размольного вала, м.

Определенную сложность в предложенной формуле расчета работы измельчения вызывает определение количества циклов воздействия на материал. Нами был разработан метод расчета этого параметра применительно к валковым измельчителям. Рассмотрим схему воздействия вала на материал (рис. 1).

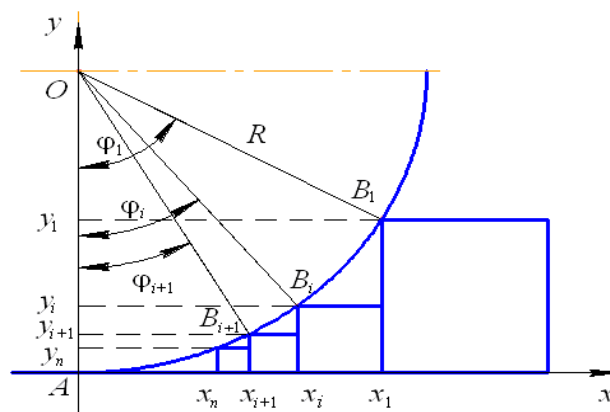


Рис. 1. Схема воздействия вала на материал

Максимальный размер куска материала $y_n = y_1$, который может затянута под валок, определяется для измельчителей такого типа по углу захвата φ_1 . Соотношение между диаметром валка $D = 2R$ и размером максимального куска по аналогии с бегунами можно рассчитать по формуле:

$$\frac{y_n}{2R} = \frac{1 - \cos \varphi}{1 + \cos \varphi}. \quad (5)$$

Валок воздействует на материал по дуге AB_1 . При перекачивании валка по материалу с соответствующей силой прижатия его размер должен уменьшаться от y_1 до y_n . Но это уменьшение происходит постепенно по мере уменьшения зазора между валком и тарелкой. Так как измельчить частицы от размеров y_1 до y_n за один цикл невозможно, воздействие части валка в виде сектора с углом φ_1 и дугой AB_1 можно представить как многоцикловой процесс. Примем по аналогии с классической теорией измельчения допущение, что частицы после каждого цикла воздействия имеют кубическую форму. Тогда кратность воздействия определяется количеством кубиков, уменьшающихся размеров, размещившихся между плоскостью тарелки (ось x) от x_1 до x_n и дугой окружности валка. Количество контактов валка с частицами материала (точки $B_1, \dots, B_i, \dots, B_n$) как раз соответствуют кратности воздействия.

Координаты любой точки соприкосновения определяются по формуле:

$$\begin{aligned} x_i &= R \cdot \sin \varphi_i; \\ y_i &= R - R \cdot \cos \varphi_i. \end{aligned} \quad (6)$$

При этом должно выполняться условие:

$$x_i - x_{i+1} = y_{i+1}. \quad (7)$$

Подставляя значения координат из уравнений (6), получим

$$R \cdot \sin \varphi_i - R \cdot \sin \varphi_{i+1} = R + R \cdot \cos \varphi_{i+1}, \quad (8)$$

или

$$\cos \varphi_{i+1} - \sin \varphi_{i+1} = 1 - \sin \varphi_i. \quad (9)$$

Преобразование разницы двух тригонометрических функций угла φ_{i+1} дает

$$\sqrt{2} \cdot \sin \left(\frac{\pi}{4} - \varphi_{i+1} \right) = 1 - \sin \varphi_i. \quad (10)$$

В общем виде для любой последующей точки контакта можно записать:

$$\varphi_{i+1} = \frac{\pi}{4} \arcsin \frac{1 - \sin \varphi_i}{\sqrt{2}}. \quad (11)$$

Так, пройдя весь участок от x_1 до x_n , мы найдем количество контактов, соответствующее по принятой модели кратности n воздействия валка на материал.

Поверхность после каждого цикла воздействия увеличивается и согласно [5] становится равной

$$S_{i+1} = i_i S_i, \quad (12)$$

где $i_i = \frac{y_i}{y_{i+1}}$ – степень измельчения.

Рассчитав, таким образом, поверхность при каждом цикле воздействия, определим S_n – конечную поверхность, соответствующую размеру частиц y_n .

Начальная поверхность $S_1 = 6y_1^2 z_1$, где z_1 – количество кубиков начального размера y_1 , размещающихся по ширине катка B , составит

$$z_1 = \frac{B}{y_1}. \quad (13)$$

Тогда

$$S_1 = 6y_1 B. \quad (14)$$

Объем материала в процессе измельчения не меняется, и его можно рассчитать по начальным размерам:

$$V = y_1^3 \cdot \frac{B}{y_1} = y_1^2 B. \quad (15)$$

Таким образом, мы имеем все параметры для того, чтобы по уравнениям (3), (4) определить работу измельчения при воздействии вала на материал в пределах сектора, соответствующего углу захвата ϕ_1 .

Мощность, затрачиваемую на измельчение, определим следующим образом:

$$P = A_{\Sigma} \cdot n_T, \quad (16)$$

где n_T – частота вращения размольной тарелки, об/с.

Для проверки адекватности предложенной модели измельчения были проведены экспериментальные исследования на лабораторной валковой мельнице с диаметром размольной тарелки 214 мм, валков 150 мм по методике, изложенной в работе [7]. В процессе опытов изменялась скорость газа в мельнице, частота вращения тарелки, усилие прижатия валков. В качестве измельчаемого материала использовался цементный клинкер фракции 2...5 мм. При варьировании указанных выше параметров замерялись силовые характеристики привода мельницы. Одновременно по разработанной нами методике для лабораторной мельницы была рассчитана теоретическая мощность, затрачиваемая на измельчение клинкера. Некоторые результаты расчета энергозатрат на измельчение, проведенного по предложенной методике, представлены на рисунке 2.

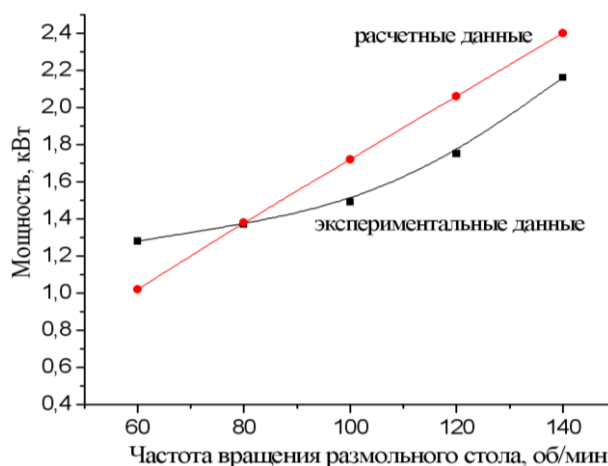


Рис. 2. Зависимость экспериментальной и расчетной мощностей от частоты вращения размольного стола среднеходной мельницы

Сравнение теоретической и экспериментальной мощности показывает, что значения последней несколько ниже. Несмотря на эту разницу, сходимость результатов можно считать вполне удовлетворенной. Например, у Осокина [5] расчетные и экспериментальные значения отличались на два порядка. Модель, разработанная нами, более адекватна с точки зрения физики процесса, поскольку на каждом цикле воздействия учитывались изменения степени измельчения и удельной поверхности одновременно. Разницу можно объяснить тем, что при расчете использовались усредненные табличные физические характеристики материала, которые могут значительно отличаться от реальных значений.

Кроме того, по предложенной методике были проведены расчеты теоретической мощности привода промышленной мельницы с диаметром размольной тарелки 1 м, которая составила около 170 кВт, что соответствует удельному расходу энергии 10...15 кВт·ч/т при помолу клинкера.

Заключение. Разработана модель разрушения материала под воздействием давления, создаваемого вращающимися валками, впервые учитывающая как кратность воздействия при изменении степени измельчения и удельной поверхности, так и затраты энергии на неупругие деформации, работу сил трения и создание новых поверхностей. На основе представленной модели предложена методика расчета энергозатрат на процесс разрушения материала.

Сравнение полученных данных с известными сведениями по эксплуатируемым за рубежом валковым среднеходным мельницам свидетельствует о хорошей сходимости полученных результатов [8], что

подтверждает возможность использования предложенной методики для расчета энергозатрат на измельчение различных материалов в данных агрегатах. Кроме того, используя предложенную методику при расчете работы измельчения и сравнив полученные данные с затратами энергии на упругую деформацию и увеличение удельной поверхности при разрушении материала, возможно оценить вклад затрат энергии на пластические деформации и работу сил трения для любого материала, измельчаемого в мельницах раздавливающего типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kotowski, C. Gleichzeitige Herstellung von Kalksteinmehl und Kornungen minns 1,2 mm mit einer MPS – Walzenschussenmuhlen / C. Kotowski, U. Schnabel, Y. Reichardt // Zement – Kalk – Gips int. – 2003. – Jhrg. 56, № 6. – S. 73 – 75.
2. Йоргенсен, С.В. Вертикальная мельница для помола цемента и шлака / С.В. Йоргенсен // Цемент и его применение. – 2005. – № 3. – С. 22 – 26.
3. Летин, Л.А. Среднеходные и тихоходные мельницы / Л.А. Летин, К.Ф. Роддатис. – М.: Энергоиздат, 1981. – 360 с.
4. Селективное разрушение минералов / В.И. Ревнивцев [и др.]; под ред. В.И. Ревнивцева. – М.: Недра, 1988. – 286 с.
5. Осокин, В.П. Молотковые мельницы / В.П. Осокин. – М.: Энергия, 1980. – 176 с.
6. Ходаков, Г.С. Физика измельчения / Г.С. Ходаков. – М.: Наука, 1972.
7. Вайтехович, П.Е. Исследование влияния работы параметров валковых мельниц на удельные энергозатраты / П.Е. Вайтехович, В.С. Францкевич // Строительная наука и техника. – 2007. – № 2. – С. 21 – 24.
8. Янг, О. Разработки и производственный опыт использования вертикальных валковых мельниц в цементной промышленности / О. Янг, Р. Биссо // Цемент и его применение. – 2000. – № 2. – С. 8 – 15.

Поступила 04.10.2011

DESIGN PROCEDURE OF POWER INPUTS ON CRUSHING IN A VERTICAL ROLL MILLS

V. FRANTSKEVICH, P. VAITEKHOVICH

In article results theoretical and experimental researches of power of process of crushing in a vertical roll mill are resulted. The model of destruction of a material under the influence of the pressure created rotating rolls, for the first time considering as frequency rate of influence is developed at change of degree of crushing and a specific surface, and an expense of energy for not elastic deformations, work of forces of a friction and creation of new surfaces on which basis the design procedure of power inputs on process of destruction of a material is offered. Calculations of power inputs on crushing have shown good convergence not only with experimental data, but also with data on maintained abroad to vertical roll mills.