

УДК 621.926

П. Е. Вайтехович

Белорусский государственный технологический университет

**ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
РОЛИКОМАЯТНИКОВЫХ МЕЛЬНИЦ**

В данной работе проведен анализ использования тарельчато-валковых мельниц в промышленности Беларуси. Отмечены их преимущества и приведен существенный недостаток, заключающийся в больших нагрузках на вращающуюся тарелку, приводной вал, опорные подшипники. Указано, что этого недостатка лишены роликотяматниковые мельницы, которые к тому же более просты в устройстве и эксплуатации. Намечены направления использования таких мельниц для тонкого помола материалов средней прочности и твердости с производительностью до 100 т/ч.

Проведена оценка методов расчета основных параметров роликотяматниковых мельниц. По величине угла захвата определены размеры зоны разрушения материала между катком и неподвижным кольцом и получена зависимость для расчета максимального размера куска, который можно загружать в мельницу. Уточнена методика расчета частоты вращения рабочего органа, которая определяется в основном двумя факторами: обязательным попаданием загружаемого материала хотя бы под один ролик и разрушением его под воздействием инерционной силы. Установлен характер изменения оптимальной частоты вращения при увеличении габаритных размеров роликотяматниковых мельниц. Указано, что для определения рациональных технологических и конструктивных параметров этих агрегатов потребуются дальнейшие исследования по измельчению различных материалов.

Ключевые слова: мельница, ролик, маятник, размольное кольцо, помол, производительность, угол захвата, частота вращения, инерционная сила.

P. E. Vaytekhovich

Belarusian State Technological University

**THE MAIN TRENDS AND PROSPECTS OF USE
ROLLROCKING MILLS**

In this work we analyze the use of disc-roller mills industry in Belarus. Noted their strengths and given the significant disadvantage in high loads on the rotating plate, drive shaft, support bearings. Provided that these shortcomings are spared the rollrocking mill, which, moreover, is more simple in construction and operation. The identified areas of use of such mills for the fine grinding of materials of medium strength and hardness with capacity up to 100 t/h. Evaluation of methods for calculating the main parameters of the rollrocking mills. The magnitude of the angle defined by the size of the zone of destruction of material between the roller and the fixed ring and the dependence for the calculation of the maximum size piece that can be loaded into the mill. The elaborated methods of the calculation of the rotation frequency of the working body, which is determined mainly by two factors: mandatory contact with the feed material at least one roller and its destruction under the influence of inertial forces. The nature of changes in the optimum frequency of rotation by increasing the overall dimensions of rollrocking mills. It is indicated that for determining the rational technological and design parameters of these units will require further study on the grinding of various materials.

Key words: mill, roller, pendulum, grinding ring, grinding, performance, angle, speed, inertia force.

Введение. В последнее время на предприятиях нашей страны начали применяться валковые среднеходные мельницы, в первую очередь на новых цементных заводах. Они используются как для помола угля, так и сырьевых компонентов. Их производительность в первом случае составляет 150 т/ч, во втором – 450 т/ч. Это мельницы исключительно сухого помола с максимальной влажностью измельчаемого материала до 20% и с замкнутым циклом работы. Преимущественным способом разрушающего воздействия в валковых мельницах является раздавливание. В комплексе с замкнутым циклом такое измельчение максимально прибли-

жено к «свободному дроблению» как наименее энергозатратному способу дезинтеграции материалов [1].

В конструктивном исполнении валковые среднеходные мельницы представлены сериями различных типоразмеров машин фирм Loesche («Лёше»), Pfeiffer («Пфайфер»), Smidth («Смидт») [2]. Все они предназначены для тонкого помола материалов средней прочности с твердостью до 6 единиц по шкале Мооса. Производительность некоторых из них может достигать 2000 т/ч. При этом такие мельницы характеризуются низкими удельными энергозатратами и абразивным износом рабочих органов [3].

Основными рабочими органами указанных выше мельниц являются вращающийся стол (тарелка) и прижатые к нему размольные валки, создающие разрушающее усилие. Естественно, что это усилие испытывают тарелка и ее приводные элементы. Огромные нагрузки на тарелку, приводной вал, его опоры, на редуктор представляются основным недостатком валково-тарельчатых мельниц. Данного недостатка лишены роликомаятниковые мельницы, также относящиеся к классу среднеходных валковых.

Основная часть. Размольным органом роликомаятниковых мельниц (рис. 1), как и тарельчатых, являются валки (ролики). Они установлены на маятниках, шарнирно подвешенных к крестовине. При вращении приводного вала маятники под воздействием инерционной центробежной силы отклоняются от центра к периферии, обеспечивая прижатие роликов к размольному кольцу. Между ними вводится исходный материал, который разрушается перекатывающимися роликами преимущественно за счет раздавливания. Неизмельченный при однократном воздействии материал падает вниз. Снизу под валками на специальных кронштейнах, соединенных с крестовиной, укреплены наклонные скребки. Они подхватывают материал и направляют его вверх на кольцо под следующий валок. Очевидно, что обязательным условием движения материала по наклонной лопасти будет угол его установки $\alpha \leq \varphi$, где φ – угол трения. Так, в результате многократного воздействия материал измельчается до требуемого размера. Удаление измельченного продукта из зоны разрушения обеспечивается пневмотранспортом за счет воздуха, нагнетаемого вентилятором в кольцевой тангенциальный коллектор. Такая форма коллектора позволяет равномерно распределить его по всей зоне измельчения. Мелкие частицы выносятся воздухом в классификатор, где разделяются на готовый продукт и крупку, возвращаемую на домол. Вместо воздуха в коллектор могут подаваться топочные газы, обеспечивающие одновременно подсушку материала.

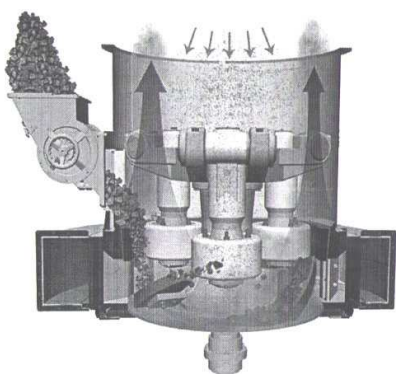


Рис. 1. Роликомаятниковая мельница

Таким образом, в роликомаятниковой мельнице основные динамические нагрузки воспринимаются статическим размольным кольцом, которое никак не связано с элементами привода, и что является основным ее преимуществом по сравнению с тарельчатыми. Более того, здесь обеспечивается многократное разрушающее воздействие на измельчаемый материал и значительно лучшие условия удаления готового продукта за счет непосредственной продувки воздуха через слой падающих вниз частиц.

Указанные преимущества стали импульсом для интенсивной разработки и последующего изготовления роликомаятниковых мельниц. Их выпускают две известные фирмы Verdes и Manfredini&Schianchi. Эти мельницы рекомендуется использовать для помола материалов средней и низкой прочности с твердостью до 6 единиц по шкале Мооса. Это такие довольно прочные материалы, как известняк, полевые шпаты, доломит, и менее прочные бокситы, клинкер, уголь, шлак, нефтяной кокс, фосфаты, глина, каолин, активированный уголь, комплексные минеральные удобрения, гипс, графит, фосфат, тальк. Размер исходного продукта в среднем составляет 20–30 мм и обычно не должен превышать 50 мм. При этом интервал изменения дисперсности готового продукта варьирует в пределах 30–200 мкм, что соответствует тонкому помолу. При соответствующих условиях можно получить порошки со средним размером 15 мкм.

Указанные фирмы выпускают широкую номенклатуру роликомаятниковых мельниц производительностью от 0,3 до 87 т/ч. Естественно, что производительность, как и удельные энергозатраты, зависят от прочностных характеристик измельчаемого материала и требуемой тонины помола. Но в любом случае удельные энергозатраты не превышают 20 кВт · ч/т и в среднем составляют 10–15 кВт · ч/т, что характерно для всех среднеходных мельниц.

При всех одинаковых условиях повышение производительности мельниц достигается за счет увеличения габаритных размеров. Анализ геометрических соотношений выпускаемых образцов показал, что диаметр размольного кольца изменяется в пределах 900–1600 мм, по спецзаказу он может быть выполнен до 6000 мм. В качестве размольных органов в мельницах используется от 3 до 6 роликов. Их диаметр обычно выбирается из соотношения $D_k / D_p = 3-4$. Высота роликов меньше их диаметра примерно в 1,5 раза.

При известных геометрических соотношениях важное значение имеет информация о максимальном размере кусков материала, которые можно подать в мельницу. Как и у всех измельчителей раздавливающего действия, этот размер определяется из условий затягивания материала между роликом и кольцом (рис. 2).

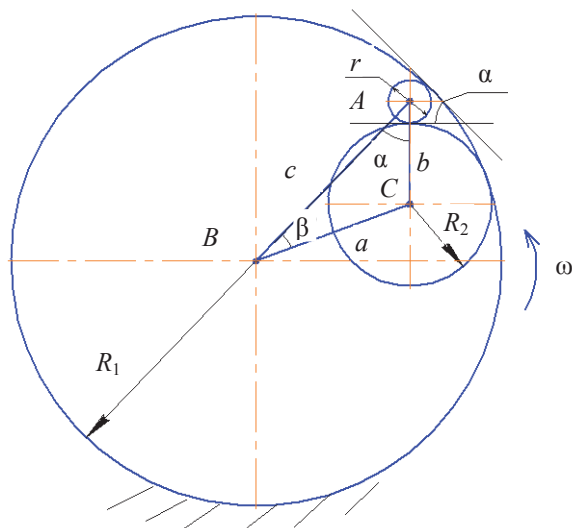


Рис. 2. Схема для определения угла захвата

Это условие записывается в виде [4]

$$\operatorname{tg} \varphi \geq \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}, \quad (1)$$

где φ – угол трения; α – угол захвата.

Зона измельчения в роликомаятниковой мельнице представляет собой клиноподобную камеру, образованную двумя дугами от окружностей ролика и кольца. Поэтому угол захвата определяется между касательными, проведенными в точке соприкосновения частицы материала с этими окружностями.

В свою очередь угол трения находится по формуле

$$\varphi = \operatorname{arctg} f, \quad (2)$$

где f – коэффициент трения материала по металлу.

Из-за небольшого значения угла захвата обычно соотношения тангенсов (1) заменяют соотношением углов и получают:

$$\alpha \leq 2\varphi. \quad (3)$$

Из тригонометрии [5] известно, что для треугольника ΔABC

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \sqrt{\frac{(\Pi - b)(\Pi - c)}{\Pi(\Pi - a)}}, \quad (4)$$

где Π – полупериметр, м, равный

$$\Pi = \frac{a + b + c}{2}. \quad (5)$$

С учетом того, что

$$\begin{aligned} BC = a &= R_1 - R_2, & AC = b &= R_2 - r, \\ AB = c &= R_1 - r \end{aligned}$$

и

$$\Pi = (R_1 - R_2) + (R_2 + r) + (R_1 - r) = 2R_1, \quad (6)$$

получаем:

$$\operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} = f^2 = \frac{r(R_1 - R_2 - r)}{R_1 R_2}, \quad (7)$$

где R_1 – радиус кольца, м; R_2 – радиус ролика, м; r – радиус куса материала, м.

Выражение (7) можно переписать в виде уравнения

$$r^2 - r(R_2 - R_1) - f^2 R_1 R_2 = 0 \quad (8)$$

и, решив его, получить сразу два значения максимального размера куса r , который можно измельчить роликом соответствующего диаметра.

Известный специалист в области измельчения Сиденко [6] провел анализ формулы (7) и получил упрощенное выражение для определения допустимого размера куса:

$$r = \frac{R_2(R_1 - R_2)}{R_1 + R_2}. \quad (9)$$

Возвращаясь к углу захвата α , можно отметить, что при коэффициенте трения $f = 0,3$ удвоенный угол трения $2\varphi = 33^\circ$. Но для надежного затягивания материала угол захвата обычно принимается $\alpha = 18-20^\circ$.

В дальнейшем возникнет необходимость использовать угол β , ограничивающий сектор контакта измельчаемого материала с размольным кольцом. Его можно определить по теореме синусов:

$$\sin \beta = \frac{b \sin \alpha}{a} \quad (10)$$

или

$$\beta = \operatorname{arcsin} \frac{(R_2 + r) \sin \alpha}{R_1 - R_2}. \quad (11)$$

Важным параметром роликомаятниковых мельниц является инерционная центробежная сила, возникающая при вращении роликов. Именно от ее величины зависят условия разрушения и разрушающее усилие, а оно, прежде всего, определяется частотой вращения рабочего органа.

Минимальная частота вращения рассчитывается из условия попадания материала при его загрузке хотя бы под один ролик. Выполнение указанного условия возможно тогда, когда за время перемещения ролика из точки 1 в точку 2 (рис. 3) материал под воздействием силы тяжести пройдет расстояние, не превышающее высоту ролика.

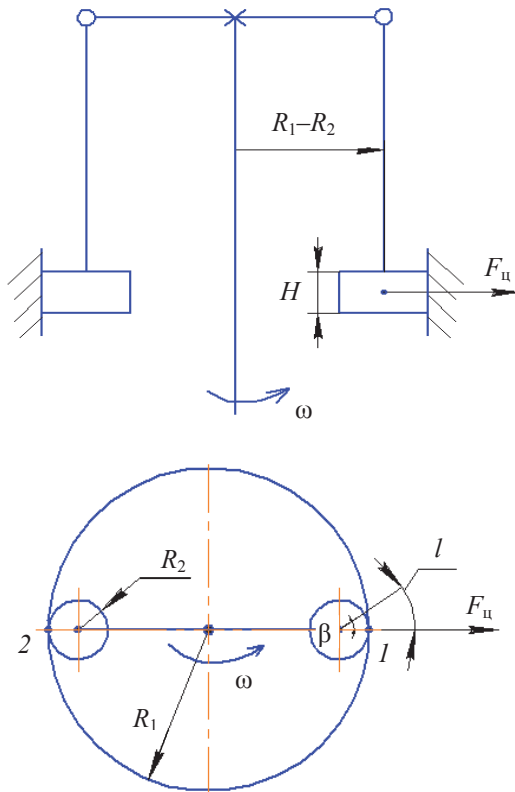


Рис. 3. Схема для определения частоты вращения

При этом

$$H = \frac{gt^2}{2}, \quad t = \sqrt{\frac{2H}{g}}. \quad (12)$$

Одновременно это время

$$t = \frac{1}{nz}, \quad (13)$$

где n – частота вращения крестовины, c^{-1} ; z – количество роликов на ней.

Тогда

$$\frac{1}{nz} = \sqrt{\frac{2H}{g}}, \quad n = \frac{1}{z} \sqrt{\frac{g}{2H}}. \quad (14)$$

С другой стороны, инерционная центробежная сила должна быть больше силы разрушения. Эта сила рассчитывается с помощью следующей формулы:

$$F_p = \mu\sigma S, \quad (15)$$

где μ – коэффициент разрыхления материала; σ – его предел прочности, Па; S – площадь воздействия ролика на материал, m^2 .

Площадь воздействия ограничивается дугой l сектора с углом β (рис. 3) и $l = R_2\beta$, когда β задается в радианах. Тогда

$$S = R_2\beta H. \quad (16)$$

С учетом этого разрушающее усилие находится из уравнения

$$F_p = \mu\sigma HR_2\beta. \quad (17)$$

Инерционная центробежная сила, действующая на каждый ролик, вычисляется по формуле

$$F_{ц} = m\omega^2(R_1 - R_2). \quad (18)$$

Причем

$$\omega = 2\pi n, \quad \omega^2 = 4\pi^2 n^2. \quad (19)$$

Масса ролика рассчитывается по следующему выражению:

$$m = \rho V = \rho\pi R_2^2 H. \quad (20)$$

С учетом (19) и (20) центробежная сила находится по формуле

$$F_{ц} = 4\pi^3 R_2^2 H \rho n^2 (R_1 - R_2). \quad (21)$$

Для разрушения материала должно выполняться условие $F_{ц} \geq F_p$. Согласно выражениям (17) и (21), проведя подстановку и сокращения, получим:

$$4\pi^3 R_2^2 h_2 \rho n^2 (R_1 - R_2) \geq \mu\sigma\beta. \quad (22)$$

Отсюда можно определить частоту вращения, достаточную для разрушения материала между роликом и кольцом:

$$n \geq \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu\sigma\beta}{\pi R_2 \rho (R_1 - R_2)}}. \quad (23)$$

С использованием выражений (14) для минимальной частоты вращения рабочего органа, обеспечивающей гарантированное воздействие ролика на материал, и (23) для частоты начала его разрушения можно оценить диапазон оптимальных частот, при которых достигается эффективное измельчение. Из этих же выражений видно, что каждая из частот зависит от геометрических размеров мельницы.

Для анализа этого изменения условно обозначим частоты из выражений (14) и (23) – n_1 и n_2 соответственно.

Как указывалось ранее, геометрические размеры всех элементов мельницы связаны определенными соотношениями с радиусом рабочего кольца. Поэтому для расчета примем $R_2 = 0,3R_1$, $H = 0,2R_1$. Количество роликов можно принять $z = 3$, плотность материала, из которого они изготовлены, $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$, предел прочности измельчаемого материала $\sigma = 10 \text{ МПа}$. Коэффициент разрыхления при плотной упаковке частиц (кусков) разного диаметра может достигать $\mu = 0,9$ [7].

Результаты расчетов (рис. 4) представлены в виде зависимостей $n_1 = f(R_1)$ и $n_2 = f(R_1)$.

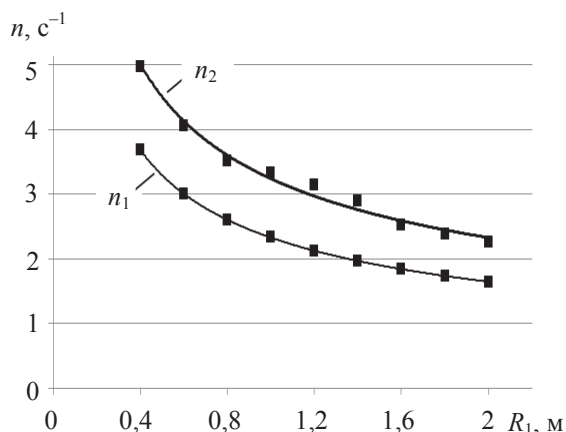


Рис. 4. Зависимость изменения частоты вращения от габаритов мельницы

Из них видно, что частоты вращения, при которых обеспечивается контакт роликов с материалом (n_1) и его разрушение (n_2), уменьшаются с увеличением габаритных размеров мельниц. Причем вторая частота примерно в 1,5 раза выше первой. Это говорит о том, что при ней и надо работать. В данном случае будет обеспечено гарантированное воздействие роликов на материал и его разрушение. Диапазон изменения частот 120–300 об/мин не очень высок, характе-

рен для среднеходных мельниц и близок к значениям, указанным фирмами-изготовителями.

Заключение. В результате анализа конструктивных и технологических параметров роликкомаятниковых мельниц удалось установить области и перспективы их использования. Они могут применяться в малотоннажных производствах и в технологических линиях средней мощности, когда производительность агрегатов не превышает 100 т/ч. К таковым можно отнести производства извести, гипса, минеральных удобрений, помол угля, нефтяного кокса. В роликкомаятниковых мельницах обеспечивается эффективная дезинтеграция материалов на уровне тонкого помола при невысоких удельных энергозатратах и абразивном износе. По сравнению с традиционными шаровыми мельницами они обладают еще и значительно меньшей металлоемкостью. И даже в сравнении со среднеходными валково-тарельчатými они более просты в изготовлении и обслуживании, имеют более высокую надежность и ремонтпригодность. Выпуск таких агрегатов можно без больших проблем наладить в нашей стране. Но для этого необходимо провести дополнительные исследования по оптимизации конструктивных и технологических параметров, по учету особенностей измельчения и классификации конкретных материалов.

Литература

1. Stairmand C. The energy efficiency of milling processes. A review of some fundamental investigations and their application to mill design // *Zerkleinern (4 Europaischen Symposium)*, Dechema Monogr. Weinheim: Chemie, 1976. Bd. 79. S. 1–17.
2. Дуда В. Цемент. М.: Стройиздат, 1981. 464 с.
3. Вайтехович П. Е. Интенсификация и моделирование процессов диспергирования в поле инерционных сил. Минск: БГТУ, 2008. 220 с.
4. Андреев С. Е., Перов В. А., Зверевич В. В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра, 1980. 415 с.
5. Завич Л. И., Рязановский А. Р. Геометрия в таблицах. М.: Драфа, 2002. 128 с.
6. Сиденко П. М. Измельчение в химической промышленности. М.: Химия, 1977. 368 с.
7. Боровский Д. Н., Вайтехович П. Е., Францкевич В. С. Модель упаковки мелющих тел и ее влияние на объем пустот в вертикальной центробежно-шаровой мельнице // *Химическая технология и техника: тезисы 77-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 4–9 февр. 2013 г.* / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. Минск: БГТУ, 2013. С. 23.

References

1. Stairmand C. The energy efficiency of milling processes. A review of some fundamental investigations and their application to mill design. *Zerkleinern (4 Europaischen Symposium)*, *Dechema Monogr.* Weinheim, Chemie, 1976, bd. 79, ss. 1–17.
2. Duda V. *Tsement* [Cement]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1981. 464 p.
3. Vaytekovich P. E. *Intensifikatsiya i modelirovaniye protsessov dispergirovaniya v pole inertsiionnykh sil* [Intensification and modeling of processes dispersion in the field of inertial forces]. Minsk, BGTU Publ., 2008. 220 p.

4. Andreev S. E., Perov V. A., Zverevich V. V. *Drobleniye, izmel'cheniye i grokhocheniye poleznykh iskopaemykh* [Shredding, grinding and screening of useful Fossils]. Moscow, Nedra Publ., 1980. 415 p.

5. Zvavich L. I., Ryazanovskiy A. R. *Geometriya v tablitsakh* [Geometry in tables]. Moscow, Draf Publ., 2002. 128 p.

6. Sidenko P. M. *Izmel'cheniye v khimicheskoy promyshlennosti* [Shredding in the Chemical Industry]. Moscow, Khimiya Publ., 1977. 368 p.

7. Borovskiy D. N., Vaytekhovich P. E., Frantskevich V. S. [The model of packing of grinding bodies and its influence on volume of voids in a vertical centrifugal-ball mill]. *Khimicheskaya tekhnologiya i tekhnika: tezisy 77-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov* [Chemical technology and equipment: the theses of the 77th STC of faculty, researchers and graduate students]. Minsk, 2013, p. 23 (In Russian).

Информация об авторе

Вайтехович Петр Евгеньевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой машин и аппаратов химических и силикатных производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: vpe51@mail.ru

Information about the author

Vaytekhovich Petr Evgen'yevich – DSc (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Productions. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vpe51@mail.ru

Поступила 25.04.2017