

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.926

П. Е. Вайтехович

МОЩНОСТЬ, ЗАТРАЧИВАЕМАЯ НА ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ В РОЛИКО-МАЯТНИКОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ С ПЛАНЕТАРНЫМ ДВИЖЕНИЕМ РАБОЧЕГО ОРГАНА

UDC 621.926

P. E. Vaytekhovich

POWER SPENT ON GRINDING IN A PENDULUM ROLLER MILL WITH A PLANETARY MOTION OF THE WORKING BODY

Аннотация

На основе анализа силовой схемы в зоне разрушения составлена расчетная модель для определения мощности, затрачиваемой на измельчение в ролико-маятниковой мельнице. Ее отличительная особенность заключается в отклонении вектора разрушающей силы от центробежной. Расчеты, проведенные по полученной аналитической зависимости, показали существенное влияние на мощность угловой скорости и геометрических соотношений размольного узла мельницы.

Ключевые слова:

мельница, ролик, маятник, размольное кольцо, центробежная сила, геометрический критерий, угловая скорость, мощность.

Abstract

Based on the analysis of the power diagram in the fracture zone, a calculation model was compiled to determine the power spent on grinding in a pendulum roller mill. Its distinctive feature is the deviation of the vector of destructive force from the vector of the centrifugal one. The calculations based on the obtained analytical dependence showed that the angular velocity and geometric ratios of the grinding mill assembly have a significant effect on the power.

Keywords:

mill, roller, pendulum, grinding ring, centrifugal force, geometric criterion, angular velocity, power.

Введение

Процессы измельчения находят широкое распространение во многих отраслях промышленности: химической, пищевой, производстве строительных материалов. Традиционно они реализуются в барабанных шаровых мельницах. Эти агрегаты характеризуются высокими энергопотреблением и металлоемкостью. Снижение отмеченных показателей достигается при переходе от тихоходных

мельниц (барабанные) к средне- и быстроходным [1, 2]. Это направление в последние годы успешно развивается творческим коллективом под руководством автора данной работы.

Одним из перспективных агрегатов, относящихся к классу быстроходных, является планетарная мельница. Аналогом для нее служит обычная барабанная мельница, только барабаны с шарами и материалом вовлечены в сложное планетарное движение. Значительная

часть исследований была направлена на изучение именно этого агрегата [3–5]. В процессе исследований были выявлены как преимущества, так и недостатки указанных мельниц, главный из которых – сложность загрузки материала для машин непрерывного действия.

Этот существенный недостаток вынудил нас обратить внимание на еще один агрегат с планетарным движением рабочего органа, принципиально отличающийся от упомянутых выше. Это роliko-маятниковая мельница [6, 7] с преимущественно раздавливающим воздействием на измельчаемый материал. Он разрушается между кольцом и роликами, перекачиваемыми по его внутренней поверхности. Ролики, в свою очередь, шарнирно соединены с водилом с помощью маятников и совершают планетарное движение. Главным разрушающим фактором в таких мельницах является инерционная центробежная сила.

Важными параметрами роliko-маятниковых мельниц, как и любых других, являются степень измельчения, производительность, энергозатраты на проведение процесса. В [8] были определены некоторые геометрические характеристики роliko-маятниковых мельниц, влияющие на степень измельчения и производительность. Данная работа посвящена изучению энергетических параметров указанных мельниц, определяющее значение среди которых имеют затраты мощности непосредственно на измельчение.

Основная часть

Предварительную оценку затрат мощности на измельчение в роliko-маятниковой мельнице можно осуществить по ее конструктивной схеме (рис. 1).

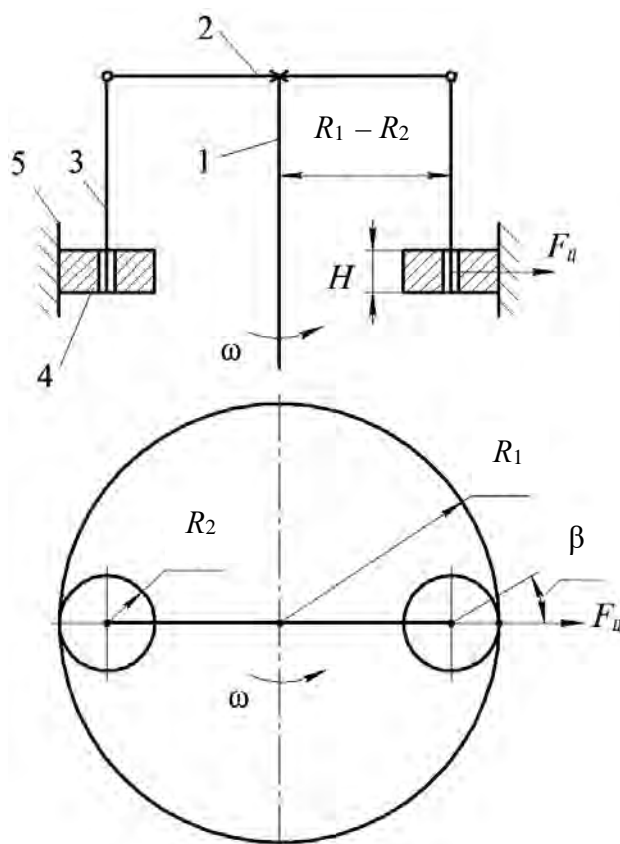


Рис. 1. Схема роliko-маятниковой мельницы

Мельница включает приводной вал 1, жестко соединенный с крестовиной 2, выполняющей функции водила. К крестовине шарнирно присоединены маятники 3, на концах которых подвешены вращающиеся ролики 4. Ролики обкатываются по беговым дорожкам неподвижного кольца 5. Материал вводится в зазор между кольцом и роликами и разрушается под воздействием инерционной силы, возникающей при их вращении. Причем измельчение здесь осуществляется преимущественно методами раздавливания. Измельченный продукт удаляется из зоны разрушения в классификатор пневмотранспортом.

Основная часть мощности в ролико-маятниковой мельнице затрачивается непосредственно на разрушение материала между роликом и кольцом. Этот процесс подобен аналогичному, реализуемому в пресс-валковом измельчителе или в бегунах. Он характеризуется углом захвата [6] и длиной дуги сектора, по которому валок (ролик) контактирует с материалом.

Угол захвата, как для всех измельчителей раздавливающего действия, должен быть $\alpha \leq 2\varphi$, где φ – угол трения. Специфика ролико-маятниковой мельницы заключается в том, что камера измельчения в ней образуется между двумя дугами окружностей разного диаметра (ролика и кольца). Угол захвата при этом определяется между касательными, проведенными в точке соприкосновения куска материала с указанными окружностями. От него в данной конструкции измельчителя зависит только максимальный размер куска, который может затянуться под ролик. В [8] получено уравнение для его расчета:

$$r^2 - r \cdot (R_2 - R_1) - f^2 \cdot R_1 \cdot R_2 = 0. \quad (1)$$

Один из корней этого уравнения будет искомым размером максимального куска.

Одновременно для расчета указанного радиуса можно использовать упрощенное уравнение, предложенное в [6]:

$$r = \frac{R_2 \cdot (R_1 - R_2)}{R_1 + R_2}. \quad (2)$$

Расчеты по уравнениям (1) и (2) показали, что расхождение значений искомого параметра не превышает 10%. Причем меньшие значения получены по второму уравнению. Поэтому для гарантированного затягивания материала под ролик предпочтение следует отдавать уравнению (2).

Особенность ролико-маятниковой мельницы и ее камеры измельчения заключается еще и в том, что углы захвата и сектора контакта ролика с материалом совсем разные. Последний предлагается [8] определять по формуле

$$\beta = \arcsin \frac{(R_2 + r) \cdot \sin \alpha}{R_1 - R_2}. \quad (3)$$

Длину дуги этого сектора можно рассчитать как

$$l = R_2 \cdot \beta, \quad (4)$$

где β – угол сектора, рад.

После анализа геометрии зоны измельчения можно приступить к определению мощности, затрачиваемой на разрушение материала. Расчетная схема для выполнения этой работы представлена на рис. 2.

Подход к определению мощности в данном случае аналогичен, как и на преодолении трения качения колеса (ролика) по плоскости. Однако ролик, перекачиваясь по кольцу, должен не только преодолевать трение качения, но и разрушать материал, ограниченный сектором с углом β . Будем считать, что суммарная разрушающая сила F_p приложена по центру сектора в точке B с углом $\gamma = \beta/2$. Центробежная сила F_c направлена вдоль водила и проходит через точку A начала зоны контакта разрушаемого материала с роликом. В связи с этим для разрушения материала центробежная сила

$$F_u \geq \frac{F_p}{\cos \gamma}. \quad (5)$$

Центробежная сила, возникающая при перемещении ролика по окружности,

$$F_u = m \cdot \omega_1^2 \cdot (R_1 - R_2) \quad (6)$$

или с учетом того, что масса ролика равна произведению плотности на объем,

$$F_u = \rho \cdot H \cdot \pi \cdot R_2^2 \cdot \omega_1^2 \cdot (R_1 - R_2), \quad (7)$$

где ρ – плотность металла, из которого изготовлен ролик; H – высота ролика.

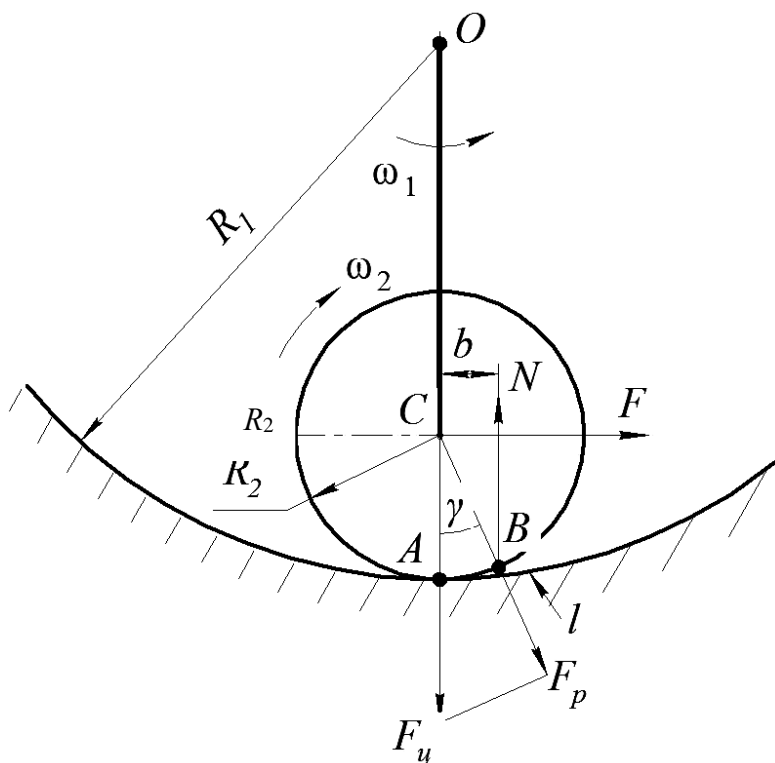


Рис. 2. Схема для определения мощности

Разрушающее усилие, как произведение напряжения на площадь, согласно [8]

$$F_p = \mu \cdot \sigma \cdot H \cdot R_2 \cdot \beta, \quad (8)$$

где μ – коэффициент разрыхления; σ – предел прочности измельчаемого материала.

Из условия (5) с учетом формул (7) и (8) найдем угловую скорость приводного вала ω_1 , при которой обеспечивается разрушение материала

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{\mu \cdot \sigma \cdot \beta}{\rho \cdot \pi \cdot R_2 \cdot (R_1 - R_2) \cdot \cos \gamma}}. \quad (9)$$

Тяговое усилие F на перекачивание ролика с одновременным разрушением материала определяется из условия равенства тягового момента M_T и момента сопротивления M_c относительно мгновенного центра скоростей A . Это равенство можно записать в виде

$$F \cdot R_2 = N \cdot b, \quad (10)$$

где F – тяговое усилие; N – проекция нормальной реакции на ось, параллельную водилу; b – плечо силы.

Поскольку

$$\begin{aligned} N &= F_p \cdot \cos \gamma; \\ b &= R_2 \cdot \sin \gamma, \end{aligned} \quad (11)$$

то

$$F = F_p \cdot \cos \gamma \cdot \sin \gamma. \quad (12)$$

Подставив выражение для силы разрушения, получим

$$F = \mu \cdot \sigma \cdot H \cdot R_2 \cdot \beta \cdot \cos \gamma \cdot \sin \gamma. \quad (13)$$

Мощность, затрачиваемая на перемещение ролика,

$$P = F \cdot v_c, \quad (14)$$

где v_c – линейная скорость центра ролика.

Руководствуясь правилом мгновенного центра скоростей (точка A), можем записать, что

$$v_c = v_{BC} = \omega_2 \cdot R_2. \quad (15)$$

Отсюда мощность

$$P = \mu \cdot \sigma \cdot H \cdot R_2^2 \cdot \omega_2 \cdot \beta \cdot \cos \gamma \cdot \sin \gamma. \quad (16)$$

В ролико-маятниковых мельницах определяющими параметрами чаще всего являются диаметр размольного кольца и частота вращения приводного вала. Аналоги их в нашей задаче – это радиус R_1 и угловая скорость ω_1 . Переход к ним, по подобию планетарных мельниц [1], можно осуществить через геометрический критерий $k = R_2 / R_1$. Тогда при внутренней обкатке ролика по кольцу

$$R_2 = k \cdot R_1; \quad (17)$$

$$\omega_2 = \omega_1 \cdot \frac{1-k}{k}. \quad (18)$$

Подставив эти выражения в формулу (16), получим окончательное уравнение для расчета мощности, затрачиваемой на измельчение материала в роликово-маятниковой мельнице:

$$\begin{aligned} P &= \mu \cdot \sigma \cdot H \cdot R_1^2 \cdot \omega_1 \cdot k \times \\ &\times (1-k) \cdot \beta \cdot z \cdot \cos \gamma \cdot \sin \gamma, \end{aligned} \quad (19)$$

где z – количество роликов.

С использованием геометрического критерия можно трансформировать и формулы (2) и (3) для расчета максимального радиуса куска r и угла сектора контакта ролика с материалом β .

При этом получим

$$r = k \cdot R_1 \cdot \frac{1-k}{1+k}; \quad (20)$$

$$\beta = \arcsin \left(\frac{k \cdot R_1 + r}{R_1(1-k)} \right) \cdot \sin \alpha. \quad (21)$$

Небольшие изменения произойдут и в формуле (9) для расчета угловой скорости:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{\mu \cdot \sigma \cdot \beta}{\rho \cdot \pi \cdot k \cdot R_1^2 \cdot (1-k) \cdot \cos \gamma}}. \quad (22)$$

После проведения всех преобразований можно приступить к апробации предлагаемой методики расчета мощности.

С анализа формулы (19) видно, что мощность зависит от прочности измельчаемого материала, геометрических соотношений размольного узла, угловой скорости рабочего органа. Если от прочности материала, угловой скорости рабочего органа она изменяется линейно, то от геометрических размеров и их соотношения это изменение неоднозначно.

В связи с этим проведем расчеты затрат мощности при измельчении конкретного материала, например гипсо-

вого камня, с неизменным пределом прочности $\sigma = 10$ МПа. Угловую скорость будем изменять в рабочем диапазоне $\omega_1 = 5 \dots 30$ рад/с. За базовый размер примем радиус размольного кольца $R_1 = 0,5$ м, что соответствует промышленному образцу мельницы. Изменения геометрических соотношений размо-

ного узла будут определяться разной величиной геометрического критерия $k = 0,1 \dots 0,3$. Количество роликов в мельнице принято $z = 3$.

Результаты расчетов представлены в виде графической зависимости $P = f(k)$ для разных угловых скоростей (рис. 3).

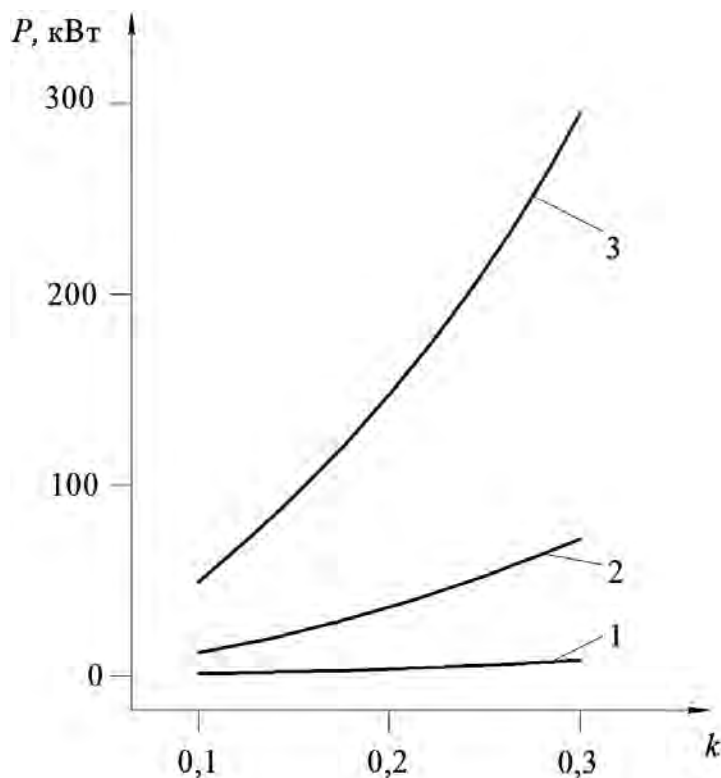


Рис. 3. Зависимость мощности на измельчение материала от геометрического критерия: 1 – $\omega = 5$ рад/с; 2 – $\omega = 15$ рад/с; 3 – $\omega = 30$ рад/с

На представленных графиках четко прослеживается повышение мощности при увеличении геометрического критерия, особенно в сочетании с увеличивающейся угловой скоростью. Причем ее изменение происходит нелинейно. Это можно объяснить тем, что увеличение геометрического критерия эквивалентно увеличению размеров размольного ролика. В свою очередь, размеры ролика влияют на величину углов в зоне контакта, входящих в расчетную формулу (19) для мощности.

Заключение

В работе предпринята попытка по составлению расчетной модели для определения мощности, затрачиваемой на измельчение материала в роlikо-матниковой мельнице. Эта модель основана на анализе силовой схемы в зоне разрушения твердого материала. Отличительной ее особенностью является то, что показано несовпадение векторов центробежной и разрушающей сил. Это отклонение определено по величине угла сектора контакта размольного

ролика с измельчаемым материалом. Заключительным этапом моделирования стало определение тягового усилия для перекачивания ролика по разрушаемому материалу и составление расчетной зависимости для мощности.

Апробация расчетной модели позволила установить степень влияния угловой скорости и геометрических параметров размольного узла на величину мощности. Установлено, что увеличение

соотношения радиусов ролика и кольца измельчающего органа, а также его угловой скорости приводит к повышению мощности, затрачиваемой на разрушение материала. Расчетные данные по мощности близки по значению к полученным в производственных условиях. Работа требует дальнейшего развития как в аналитическом, так и в экспериментальном направлениях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вайтехович, П. Е.** Интенсификация и моделирование процессов диспергирования в поле инерционных сил / П. Е. Вайтехович. – Минск: БГТУ, 2008. – 220 с.
2. **Вайтехович, П. Е.** Тенденции и перспективы развития техники и технологии дезинтеграции / П. Е. Вайтехович // Труды БГТУ. Сер. III. Химия и технология неорганических веществ. – 2008. – Вып. XVI. – С. 106–112.
3. **Вайтехович, П. Е.** Анализ моделей относительного движения мелющих тел в планетарной мельнице / П. Е. Вайтехович, Д. В. Семененко, Г. М. Хвесько // Труды БГТУ. Серия III. Химия и технология неорганических веществ. – 2010. – Вып. XVIII. – С. 167–171.
4. **Вайтехович, П. Е.** Влияние взаимодействия между мелющими телами на характер их движения в планетарной мельнице / П. Е. Вайтехович, Д. В. Семененко // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2010. – № 9. – С. 13–15.
5. **Вайтехович, П. Е.** Разрушающее воздействие мелющих тел в горизонтальной планетарной мельнице при различных способах обкатки помольных барабанов / П. Е. Вайтехович, Д. Н. Боровский // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2019. – № 2. – С. 3–6.
6. **Сиденко, П. М.** Измельчение в химической промышленности / П. М. Сиденко. – Москва: Химия, 1977. – 368 с.
7. **Летин, Л. А.** Среднеходные и тихоходные мельницы / Л. А. Летин, К. Ф. Роддатис. – Москва: Энергоиздат, 1981. – 360 с.
8. **Вайтехович, П. Е.** Основные направления и перспективы использования ролико-маятниковых мельниц / П. Е. Вайтехович // Труды БГТУ. Сер. 2. Химические технологии, биотехнология и геоэкология. – 2017. – № 1 (199). – С. 203–208.

Статья сдана в редакцию 18 сентября 2020 года

Петр Евгеньевич Вайтехович, д-р техн. наук, проф., Белорусский государственный технологический университет. E-mail: vpe51@mail.ru.

Petr Evgenyevich Vaytekhovich, DSc (Engineering), Prof., Belarusian State Technological University. E-mail: vpe51@mail.ru.