

УДК 621.926

П.Е. Вайтехович, доцент; Г.М. Хвесько, доцент; Д.В. Гапанюк, ассистент;
Д.В. Семененко, студент

ОТРЫВ МЕЛЮЩИХ ТЕЛ ОТ ПОВЕРХНОСТИ БАРАБАНА В ПЛАНЕТАРНОЙ МЕЛЬНИЦЕ С ВНЕШНЕЙ ОБКАТКОЙ

Movement of a crushing body on a surface of a drum of a planetary mill has been considered. Its condition tearing off, corresponding to zero value of normal reaction of communication has been analyzed. The design procedure of normal reaction at any initial position of a crushing body in a drum has been developed.

Процесс помола материала является одним из энергоемких. Поэтому поиск новых высокоэффективных помольных агрегатов с низкими энергозатратами представляется весьма актуальной задачей.

Большие перспективы в этом направлении имеют планетарные мельницы [1, 2]. Первый патент на конструкцию такой мельницы был получен в конце девятнадцатого столетия. Исследования планетарных мельниц начаты только в середине двадцатого столетия французским ученым А. Жуазелем [3]. Несмотря на огромный интерес к этим агрегатам во многих странах мира [4–7], в настоящее время они не нашли пока широкого использования в промышленности. Одной из основных причин сложившейся ситуации является отсутствие надежных методов расчета кинематических и динамических характеристик планетарных мельниц.

Приоритет в теоретическом анализе движения загрузки в планетарных мельницах принадлежит российскому ученому Бушуеву Л.П. Его теоретические исследования базируются на постулате об эквивалентности форм движения загрузки в планетарных и барабанных мельницах [8]. Ряд его работ [9,10] позволил создать основы теории движения мелющей загрузки в планетарных мельницах. Этим же постулатом руководствовались и другие ученые [11–13], которые продолжили изучение механики помольной среды в планетарных мельницах.

Во всех этих работах загрузка барабанов рассматривается как единое целое. Ее движение начинает изучаться с того момента, когда частицы прижаты к стенкам барабана и движутся вместе с ним. Совершенно не учитывается момент разгона планетарной мельницы, когда все мелющие тела могут находиться в нижней точке. Далее изучается возможность отрыва мелющих тел от стенок барабана или от слоя загрузки. При этом во всех работах не учитывается влияние силы тяжести на механику движения загрузки. Более того, в работе [8] указано, что отрыв тел в планетарной мельнице имеет место при равенстве переносной и относительной сил инерции. Такая предпосылка выглядит очень некорректно, так как эти силы нельзя приравнивать, поскольку их направление не совпадает и постоянно изменяется при вращении барабана планетарной мельницы. Именно поэтому необходимо учитывать и воздействие силы тяжести. В некоторые критические моменты, когда силы инерции уравниваются, сила тяжести может оказать решающее влияние на механику движения мелющих тел.

Кроме того, крайне неудачным следует считать выбор в качестве основного масштабного критерия соотношения угловых скоростей водила и барабана и дополнительного – радиусов этих же элементов мельницы. Во-первых, можно обойтись одним критерием, так как радиусы конструктивных элементов планетарных мельниц и их скорости движения взаимно связаны. Во-вторых, характер движения мелющего тела связан

ного с барабаном, определяется траекторией движения отдельных точек барабана, зависящей от соотношения радиусов барабана и неподвижной окружности, по которой он обкатывается без скольжения. Поэтому в качестве масштабного фактора целесообразнее принять соотношение этих радиусов.

В одной из последних работ [14], затрагивающих вопросы динамики мелющей загрузки в планетарных мельницах, указывается большинство тех недостатков, которые отмечены нами. Автором проведен анализ существующих на сегодняшний день моделей движения и указано, что большинство исследователей представляют мелющую загрузку либо как одно тело, либо в качестве распределенной массы, обладающей упругими и диссипативными свойствами. Практически отсутствуют исследования, в которых рассматривается движение отдельных мелющих тел шаровой загрузки. Вместе с тем ученые сходятся во мнении, что только рассмотрение динамики одиночных шаров может реально отразить процессы, происходящие в помольных камерах мельниц.

Поэтому перед нами была поставлена задача изучения кинематики и динамики одиночного измельчающего тела в планетарной мельнице с учетом всех действующих сил. Первым важным моментом является условие отрыва измельчающего тела от поверхности барабана.

Для выяснения этого условия рассмотрим положение измельчающего тела в произвольной точке В (рис. 1). Движение мелющего тела при этом рассматривается как сложное, состоящее из переносного и относительного. Относительным является перемещение точки В по отношению к подвижной системе координат АХУ, а переносным – поступательное перемещение последней относительно неподвижной системы координат ОХ₀У₀. В этом случае, в соответствии с принципом Даламбера, на мелющее тело действует сила тяжести G, нормальная реакция N, сила трения F_Т, переносная F_А^И и относительная F_{ВА}^И силы инерции.

Из силовой схемы (рис. 1) очевидно, что мелющее тело оторвется от стенки барабана при условии, если реакция связи N = 0. Для определения этой реакции спроектируем все силы на ось, совпадающую с радиусом барабана.

$$F_{ВА}^{И} + F_{А}^{И} \cdot \cos(\varphi - \varphi_0) = N + G \sin \varphi, \quad (1)$$

где φ_0 и φ – соответственно углы поворота водила и барабана, рад.

Отсюда реакция связи

$$N = F_{ВА}^{И} + F_{А}^{И} \cdot \cos(\varphi - \varphi_0) - G \sin \varphi \leq 0. \quad (2)$$

Инерционные силы рассчитываются по формулам

$$F_{А}^{И} = \frac{m\omega^2 k^2 R}{1+k}; \quad F_{ВА}^{И} = m\omega^2 kR, \quad (3)$$

где m – масса мелющего тела, кг; ω – угловая скорость барабана, рад/с; $k = r/R$ – геометрический критерий; r – радиус барабана, м; R – радиус неподвижной окружности, м.

Подставив значения для всех сил в уравнение (2), получим

$$m\omega^2 kR + \frac{m\omega^2 k^2 R}{1+k} \cos(\varphi - \varphi_0) - mg \sin \varphi \leq 0. \quad (4)$$

После сокращения массы и упрощения выражения оно примет вид

$$\omega^2 kR \left[1 + \frac{k}{1+k} \cos(\varphi - \varphi_0) \right] - g \sin \varphi \leq 0. \quad (5)$$

Это уравнение характеризует условие отрыва мелющего тела от стенок барабана; и представляет собой относительную нормальную реакцию, т.е. реакцию, отнесенную к единице массы тела, $N_{\text{отн}} = N/m$.

Используя уравнение (5), можно не только установить момент отрыва, но и определить как изменяется нормальная реакция при любом положении мелющего тела. Это важно, потому что нормальная реакция равна по величине силе давления измельчающего тела на разрушаемый материал.

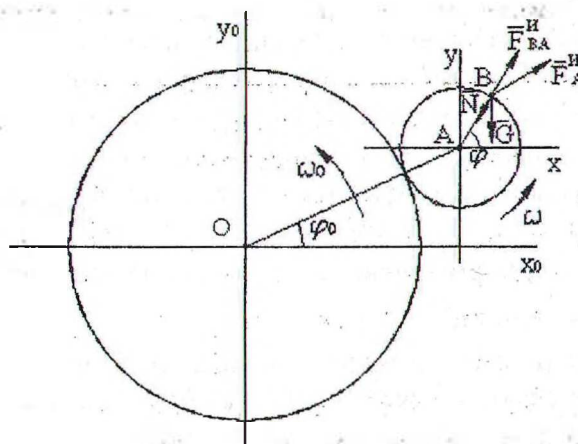


Рис. 1. Силовая схема для определения условия отрыва шара от барабана

Для нашего случая целесообразнее проанализировать изменение относительной реакции за один оборот водила, которым характеризуется полный цикл работы мельницы. Поэтому в уравнении (5) возникла необходимость замены φ и ω на φ_0 и ω_0 . Связь между этими параметрами для мельниц с внешней обкаткой устанавливается формулами

$$\varphi = \varphi_0 \frac{1+k}{k}; \quad \omega = \omega_0 \frac{1+k}{k}, \quad (6)$$

где ω_0 – угловая скорость водила, рад/с.

С учетом (6) уравнение (5) примет вид

$$\omega_0^2 \left(\frac{1+k}{k} \right)^2 kR \left[1 + \frac{k}{1+k} \cos \frac{\varphi_0}{k} \right] - g \sin \left(\frac{1+k}{k} \varphi_0 \right) \leq 0. \quad (7)$$

После преобразований условие отрыва (относительная реакция связи) записывается следующим образом:

$$\omega_0^2 R(1+k) \left[\frac{1+k}{k} + \cos \frac{\varphi_0}{k} \right] - g \sin \left(\frac{1+k}{k} \varphi_0 \right) \leq 0. \quad (8)$$

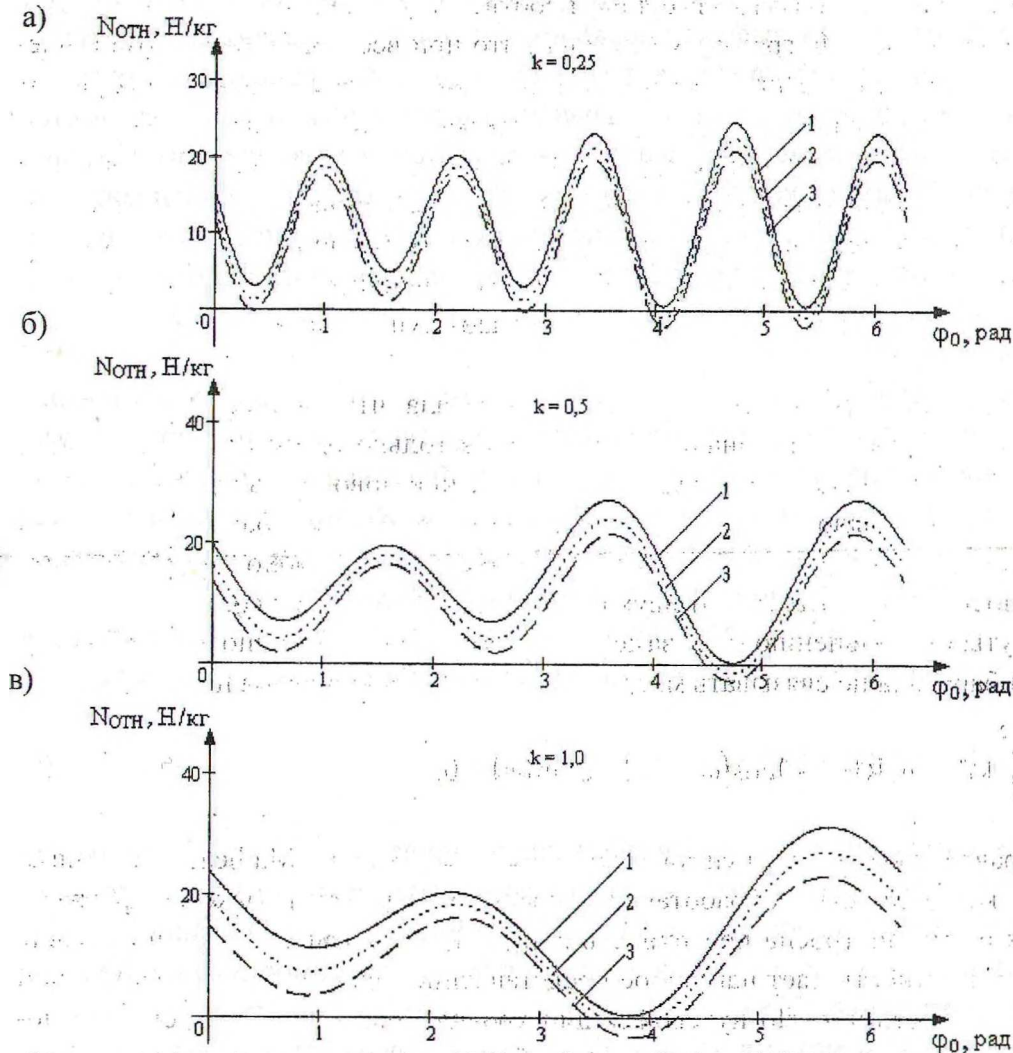


Рис. 2. Зависимость изменения относительной реакции связи от угла поворота водила при разных k : а) 1 – $\omega = 15,652$ рад/с; 2 – $\omega = 14,5$ рад/с; 3 – $\omega = 13,5$ рад/с; б) 1 – $\omega = 12,124$ рад/с; 2 – $\omega = 11$ рад/с; 3 – $\omega = 10$ рад/с; в) 1 – $\omega = 9,899$ рад/с; 2 – $\omega = 8$ рад/с; 3 – $\omega = 7$ рад/с

Расчеты относительной реакции связи (8) проводились с использованием пакета программ «Mathcad». Угол поворота водила изменялся в пределах $\varphi_0 = 0 \div 2\pi$. В начальный момент времени принималось, что измельчающее тело находится на оси x и при этом $\varphi_0 = 0$ и $\varphi = 0$. Расчеты проводились для планетарной мельницы с радиусом обкатки $R = 0,2$ м при трех различных значениях геометрического критерия $k = 0,25; 0,5; 1,0$. При этом в каждом случае угловая скорость барабана изменялась от максимального значения, соответствующего началу режима центрифугирования, в сторону уменьшения.

На рис. 2 представлены расчетные зависимости изменения относительной реакции связи от угла поворота водила для различных k . Сплошной линией показано изменение реакции при максимальной угловой скорости, которая характеризует безотрывное движение мелющих тел. Штриховые линии соответствуют скоростям, при которых может наблюдаться отрыв. На графиках показано, что при всех значениях геометрического критерия в этом режиме происходит хотя бы один отрыв измельчающих тел от стенок барабана. С уменьшением скорости вращения вероятность отрыва повышается. Диапазон изменения относительной реакции с увеличением геометрического критерия также увеличивается. Однако количество пульсаций измельчающих тел относительно стенок барабана существенно выше при малых значениях геометрического критерия. Поэтому говорить о том, в каком случае будет более интенсивный помол материала пока преждевременно, так как оба эти фактора оказывают существенное влияние на разрушение материала.

Апробация предложенной методики расчета показала, что она несколько идеализирована и дает возможность проанализировать отрыв только одного мелющего тела. Совершенствование методики направлено на то, чтобы при повороте водила на определенный угол φ_0 можно было установить положение относительно барабана для всех мелющих тел, находящихся в любом его месте. Это значит, что необходимо установить зависимость относительной реакции от двух переменных $N_{\text{отн}} = f(\varphi_0; \varphi)$.

Если вернуться к уравнению (5) и заменить в нем ω на ω_0 согласно (6), а углы поворота водила и барабана не связывать между собой, то условие отрыва примет вид

$$\omega_0^2 \left(\frac{1+k}{k} \right)^2 kR + \omega_0^2 R(1+k) \cos(\varphi - \varphi_0) - g \sin(\varphi) \leq 0. \quad (9)$$

Решив неравенство (9) с использованием пакета программ «Mathcad», получили массив чисел, который был обработан в графоаналитическом пакете программ «Origin». В результате построена поверхность $N_{\text{отн}} = f(\varphi_0; \varphi)$ (рис. 3) и линии уровня (рис. 4). Форма поверхности дает наглядное представление зависимости относительной реакции от двух переменных. По нулевой линии уровня можно точно определить положение мелющего тела в момент отрыва. Вся область, очерченная нулевой линией, соответствует значениям относительной реакции $N_{\text{отн}} \leq 0$, и в этом диапазоне изменения углов поворота водила и барабана мелющее тело обязательно оторвется от его стенок.

Подводя итог, отметим, что предложенная методика расчета позволяет определить условия отрыва мелющего тела в зависимости от конструктивных и технологических параметров и установить для каждого конкретного случая диапазон изменения углов поворота, при которых этот отрыв произойдет.

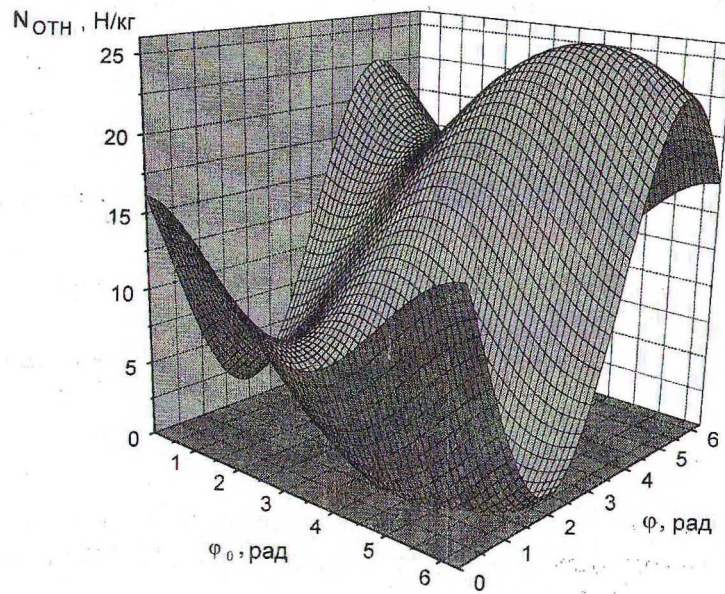


Рис. 3. Зависимость изменения относительной реакции связи от двух переменных ϕ_0 и ϕ при $k = 0,5$, $\omega = 11$ рад/с

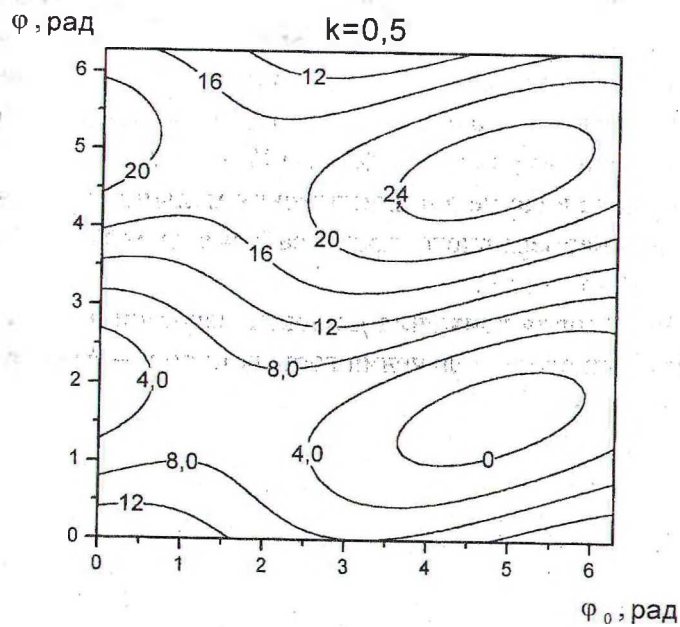


Рис. 4. Линии уровня относительной реакции связи при $k = 0,5$, $\omega = 11$ рад/с

ЛИТЕРАТУРА

1. Молчанов В.И., Селезнев О.Г., Жирнов Е.Н. Активация минералов при измельчении. – М.: Недра. – 1988. – 208 с.
2. Дуда В. Цемент / Пер. с нем. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
3. Жуазель А. Планетарная мельница / Пер. с франц. // Цемент. – Сб.перев. МПСМ СССР. – 1957. – Вып.6. – № 28.
4. John G., Vock F. Modellunter – suchungen an einer Planeten kugelmiihle. – Chem. – Ingr. – Techn. – 1965. – 37. – № 4. – С. 411–417.
5. Cieslinski Walery Mlyny Satelitowe. – Cement, Wapno, Gips. – 1971. – 26. – № 4. – С. 97–100.
6. Современные мельницы / Дзинбо Йокояма Таекадзу. Кикай сэкэй – Mach. Des. – 1989. – 33. – № 5. – С. 26–36.
7. Schuttgutbewegung und Entmischung – serscheinungen in Planetentrommeln / Korber R. // Hufbereit. – Techn. – 1993. – 34. – № 4. – С. 173–181.
8. Бушуев Л.П. Об аналогии между движением массива частиц в шаровой и планетарной центробежной мельницах // Изв. АН СССР, ОТН: Механика и машиностроение. – 1959. – № 4. – С. 153–155.
9. Бушуев Л.П. Экспериментальное исследование и вопросы теории планетарных центробежных мельниц // Научные доклады высшей школы: Горное дело. – 1959. – №2. – С. 220–226.
10. Бушуев Л.П. О движении загрузки в барабанах планетарной мельницы // Изв. АН СССР, ОТН: Механика и машиностроение. – 1961. – № 1. – С. 167–169.
11. Ким Бен Ги. Определение положения помольной среды в планетарной мельнице при каскадном режиме // Изв. вузов: Горный журнал. – 1976. – № 1. – С. 149–153.
12. Доброборский Г.А., Лансберг Л.М., Рабин А.Н. Определение границ основных режимов движения загрузки в планетарно-центробежных мельницах с вертикальными осями // Изв. вузов: Горный журнал. – 1992. – № 12. – С. 78–81.
13. Глемб И.Л. Исследование эпициклических мельниц с целью установления оптимальных параметров непрерывного процесса измельчения горных пород. – Автореф. канд. дис. – М.: 1975. – 15 с.
14. Дмитрак Ю.В. Теория движения мелющей загрузки и повышение эффективности оборудования для тонкого измельчения горных пород. – Автореф. докт. дис. – М.: 2000. – 45 с.