

УПОРЯДОЧЕННОЕ ШАРОВОЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ НА ВИБРИРУЮЩЕЙ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Денискина Т.В., Бардовский А.Д., Герасимова А.А.

Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", Москва

Ключевые слова: измельчитель-классификатор, минеральное сырье, помольная загрузка, криволинейная поверхность, амплитуда, частота, угол наклона.

Аннотация. В работе представлены результаты исследования процесса перемещения помольной загрузки по криволинейной вибрирующей поверхности под действием направленных колебаний. Приведены дифференциальные уравнения относительного движения мелющего тела в слое материала вдоль криволинейной рабочей поверхности. Получено уравнение движения частицы в дифференциальной форме, анализ которого доказал, что при определенном сочетании режимных параметров колебаний мелющие шары различного размера,двигающиеся в массе материала вверх по криволинейной вибрирующей поверхности, имеют свои предельные углы подъема. Установлено, что наиболее рациональное распределения шаров по крупности на криволинейной вибрирующей поверхности достигается при определенных сочетаниях амплитуды и частоты колебаний рабочего органа и углах наклона касательных к рабочей поверхности в местах нахождения на ней шаров различного размера.

ORDERED BALL GRINDING OF MINERAL RAW MATERIALS ON A VIBRATING CURVED SURFACE

Deniskina T.V., Bardovsky A.D., Gerasimova A.A.

National research technological university "MISIS", Moscow

Keywords: shredder-classifier, mineral raw materials, grinding loading, curved surface, amplitude, frequency, angle of inclination.

Abstract. The paper presents the results of a study of the process of moving the grinding load along a curved vibrating surface under the action of directional vibrations. Differential equations of the relative motion of the grinding body in a layer of material along a curved working surface are given. The equation of motion of a particle in a differential form is obtained, the analysis of which proved that with a certain combination of operating parameters of vibrations, grinding balls of various sizes moving in the mass of the material up a curved vibrating surface have their own limiting angles of elevation. It is established that the most rational distribution of balls by size on a curved vibrating surface is achieved with certain combinations of the amplitude and frequency of vibrations of the working body and the angles of inclination tangent to the working surface at the locations of balls of various sizes on it.

Введение

В связи с невозможностью упорядоченного воздействия на различные по крупности куски измельчаемого материала со стороны мелющих тел, существующие конструкции размольного оборудования не позволяют осуществлять тонкий помол минерального сырья с одновременной его классификацией по фракциям с минимальными энергозатратами [1, 2].

Коллективом авторов НИТУ «МИСиС» предложен новый способ измельчения материалов и разработана оригинальная конструкция вибрационного измельчителя-классификатора с направленными колебаниями криволинейной рабочей поверхности, обеспечивающая упорядоченное воздействие мелющих шаров различной крупности на измельчаемый материал и являющаяся конструктивно несложной и простой в эксплуатации [3].

Основной задачей исследований явилось определение оптимального сочетания конструктивных и режимных параметров вибрационного измельчителя-классификатора для такого распределения помольной загрузки (шаров и измельчаемого материала) по криволинейной рабочей поверхности вибромашины, при котором крупные мелющие тела измельчают крупные куски материала в нижней части помольной камеры, а мелкие мелющие

тела – мелкие куски материала в верхней ее части. При такой организации помольного процесса по длине вибрирующей криволинейной рабочей поверхности происходит распределение по крупности как мелющих тел (шаров), так и измельчаемого материала, что позволяет улучшить качество измельчения и исключить непроизводительные потери энергии при взаимодействии шаров и материала различных размеров [4]. Чтобы обеспечить такое распределение помольной загрузки, необходимо заставить перемещаться шары различных размеров, находящиеся в исходном состоянии в нижней части помольной камеры в навал вместе с измельчаемым материалом, вверх по криволинейной рабочей поверхности на различные высоты.

Материалы и методы исследований

Для изучения динамики движения мелющего тела в слое материала рассмотрено перемещение единичного шара вверх в слое материала по криволинейной поверхности, при этом угол наклона касательных к ней изменяется по мере ее подъема от 0^0 до угла вибрации β по всей длине поверхности, выбранной по условию однослойного размещения на ней шаров (рис. 1) [5]. На шар массой m , находящийся в слое материала на криволинейной рабочей поверхности вибромашины, действует сила тяжести F_g , сила трения о поверхность F_{mp} , нормальная реакция поверхности F_n , а также сила инерции $F_{ин}$.

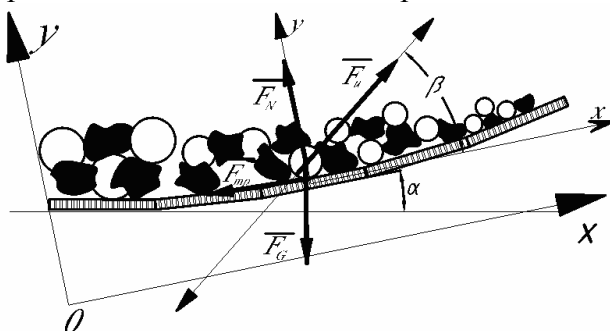


Рис. 1. Мелющее тело (шар) в слое материала на криволинейной поверхности

Дифференциальные уравнения относительного движения мелющего тела в слое материала вдоль криволинейной рабочей поверхности:

$$m\ddot{x} = -mg\delta \sin \alpha + mA\omega^2 \sin \omega t \sin \beta - F_{mp}, \quad (1)$$

$$m\ddot{y} = -mg\delta \cos \alpha + mA\omega^2 \sin \omega t \cos \beta + F_n, \quad (2)$$

где β – угол вибрации; A и ω – соответственно амплитуда и частота колебаний рабочей поверхности; m – масса мелющего тела; g – ускорение свободного падения; δ – коэффициент сопротивления движению; α – угол наклона рабочей поверхности к горизонту.

Считая, что шар под действием направленных колебаний движется в массе мелющей загрузки по вибрирующей поверхности в безотрывном режиме и, учитывая $F_{TP} = fF_n$, получено уравнение движения частицы в слое материала в дифференциальной форме:

$$\ddot{x} = -\frac{g\delta f'(x)^2}{\sqrt{1+f'(x)^2}} + A\omega^2 \sin \omega t \left(\frac{\sin \beta}{\sqrt{1+f'(x)^2}} + \frac{\cos \beta f'(x)^2}{\sqrt{1+f'(x)^2}} - f \left(\frac{g\delta}{\sqrt{1+f'(x)^2}} + A\omega^2 \sin \omega t \right) \left(\frac{\cos \beta}{\sqrt{1+f'(x)^2}} + \frac{\sin \beta f'(x)^2}{\sqrt{1+f'(x)^2}} \right) \right) \quad (3)$$

Анализ полученного дифференциального уравнения показал, что высота подъема шаров различной крупности по криволинейной поверхности под действием направленных вибраций зависит от абсолютного значения максимального ускорения рабочей поверхности $A\omega^2$, угла наклона просеивающей поверхности к горизонту α , угла вибрации β и коэффициента сопротивления движению шаров δ , который в свою очередь зависит от размера и формы частиц, а также механических свойств материала [6, 7].

На рисунке 2 представлен график зависимости высоты подъема мелющих шаров различной крупности в слое материала от угла наклона рабочей поверхности. Исследования проводились для материалов с разными коэффициентами трения измельчаемого материала о рабочую поверхность для выбранных параметров колебаний поверхности. Анализ полученных зависимостей показал, что при достижении определенной высоты подъема мелющее тело переходит в новое квазиравновесное состояние, т.е. при определенном сочетании режимных параметров мелющие шары различного размера, т.е. с разными коэффициентами сопротивления движению, имеют разные предельные углы подъема по криволинейной рабочей поверхности. Следовательно, под действием направленных вибраций в начальной стадии находящиеся в массе материала шары различного размера перемещаются по криволинейной рабочей поверхности вверх до определенной высоты в зависимости от их размеров, а в процессе установившегося режима работы установки (измельчения) будут совершать рабочие движения – столкновения шаров с кусками материала схожих размеров, оставаясь на достигнутом по высоте уровне. В результате созданных условий взаимодействия измельчающих шаров и кусков измельчаемого материала происходит более экономически целесообразный процесс измельчения (без лишних энергозатрат).

Исследованы также зависимости изменения скорости движения мелющей загрузки вверх по криволинейной просеивающей поверхности от амплитуды колебаний при различных значениях углов вибрации β . Установлено, что увеличение амплитуды в общем случае приводит к увеличению скорости движения мелющей загрузки. При малых ($<25^\circ$) и больших (до 50°) углах β заметное увеличение скорости движения шаров наблюдается только при значениях амплитуды свыше 0,75 мм, а при $\beta = 37,5^\circ$ – уже при значениях амплитуды 0,5-0,7 мм. Учитывая, что в технической литературе для вибротранспортирования рекомендуется применение амплитуды колебаний не более 0,5-0,8 мм [8, 9], для интенсификации скоростей перемещения и распределения шаров по рабочей поверхности углы вибрации β должны находиться в пределах $35-40^\circ$.

На рисунке 3 представлены зависимости изменения скорости v движения мелющей загрузки от частоты колебаний рабочей поверхности ω для мелющих тел (шаров) различных диаметров при амплитуде колебаний $A = 0,7$ мм и угле вибрации $\beta = 37,5^\circ$.

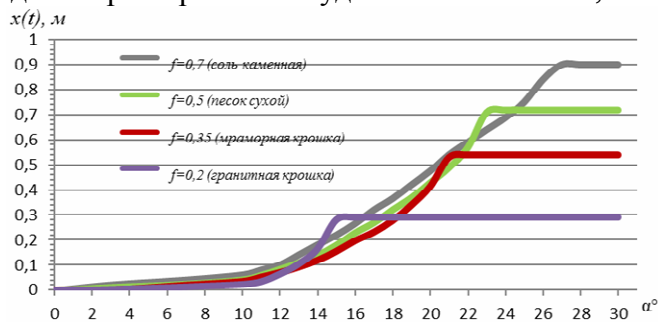


Рис. 2. Зависимости длины участка, пройденного мелющим шаром в слое материала, от угла наклона рабочей поверхности

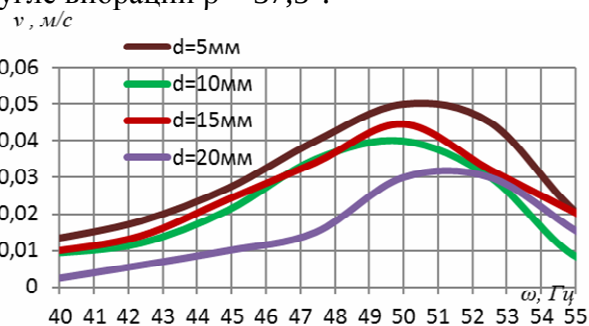


Рис. 3. Зависимость скорости движения мелющей загрузки по криволинейной рабочей поверхности от частоты колебаний рабочей поверхности

Результаты исследований

Анализ полученных зависимостей показал, что при диапазоне частот от 49 до 51 Гц скорость виброраспределения мелющей загрузки достигает максимальных значений. С повышением частоты выше 51 Гц скорость движения шаров различных диаметров значительно снижается.

На основании проведенных исследований установлено, что для получения наиболее эффективного распределения мелющих шаров в слое измельчаемого материала по криволинейной поверхности необходимо соблюдать следующие параметры: угол вибрации $\beta = 35-40^\circ$; частота колебаний рабочей поверхности $\omega = 49 \dots 51$ Гц; амплитуда колебаний рабочей поверхности $A = 0,6 \dots 0,8$ мм [10-11].

Проверка вышеприведенных теоретических зависимостей осуществлена на лабораторном стенде (рис. 4). В качестве измельчаемого материала выбрана каменная соль крупностью до 10 мм. В ходе эксперимента изменению подвергались: амплитуда и частота колебаний рабочей поверхности; набор мелющих тел и величина помольной загрузки. В качестве рабочей поверхности стенда использован изогнутый по кривой перфорированный лист металла. Форма кривой обусловлена однослойным размещением на поверхности шаров различной крупности.

В качестве функции отклика была выбрана эффективность процесса измельчения – классификации, вычисленная по результату измельчения и просеивания заданной навески материала сквозь отверстия рабочей поверхности в течение заданного промежутка времени.

По результатам исследований были построены экспериментальные зависимости, на основании которых установлено, что максимальная эффективность процесса измельчения достигается при амплитуде колебаний рабочей поверхности в пределах 0,6-0,8 мм и частоте 48-54 Гц, что подтверждает данные, полученные теоретическим путем.

Выводы

1. Одним из перспективных видов оборудования для тонкого измельчения минерального сырья является вибрационный измельчитель с направленными колебаниями рабочей поверхности, обеспечивающий упорядоченное воздействие мелющих шаров различной крупности на измельчаемый материал и являющийся конструктивно несложным и простым в эксплуатации.

2. Для получения наиболее эффективного распределения мелющих шаров в слое измельчаемого материала по криволинейной поверхности необходимо соблюдать следующие параметры: угол вибрации $\beta = 35-40^\circ$; частота колебаний рабочей поверхности $\omega = 49...51$ Гц; амплитуда колебаний рабочей поверхности $A = 0,6 \dots 0,8$ мм.

Список литературы

1. Akunov, V.I. and Litvinov, G.P., General technical and economic indicators of counterflow jet mills, Tr. Gos. Nauchno-Issled. Inst. Tsem. Prom. 1982, no. 70, pp. 3-10.
2. Ревнивцев В.И., Капралов Е.П., Костин И.М., Крупа П.И., Яшин В.П., Вайсберг Л.А. Современные направления совершенствования техники и технологии дробления, измельчения, классификации руд и развития процессов селективного раскрытия минералов // Совершенствование процессов дробления, измельчения, грохочения и классификации руд и продуктов обогащения. Межведомственный сборник научных трудов. – Л.: Механообр, 1985. – С. 3-22.
3. Патент № 2498857 РФ. Способ измельчения минерального сырья / Бардовский А.Д., Бибиков П.Я., Денискина Т.В., Рудченко Н.Ф., Рудченко Т.П. – Заявка №2012113358/13 от 06.04.2012; опубл. 20.11.2013, Бюл. №32.
4. Danli Wen, Shuwei Huang, Guangyu Yu. Condition monitoring and fault diagnosis of ball mill gear // Proceedings of the 30th Chinese Control and Decision Conference. – Shenyang, 2018, no. 153, pp. 6715-6718. DOI: 10.1109/CCDC.2018.8408314.
5. Ходаков Г.С. Тонкое измельчение строительных материалов. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1972. – 239 с.
6. Герасимова А.А. Исследование закономерностей пластического деформирования полых стальных профилей сжатием // Computational nanotechnology. 2019. №3. С. 22–26. DOI: 10.33693/2313-223X-2019-6-3-22-26.



Рис. 4. Экспериментальный стенд «Измельчитель-классификатор»

7. Bardovsky A.D., Valeeva L.M., Basyrov I.I. A plant with a rotary jet grinder to produce small fractions of mineral raw material // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 971, p. 052004. DOI:10.1088/1757-899X/971/5/052004.
8. Иванов С.А., Чиченев Н.А. Инжиниринг транспортирующих машин и устройств. Учебник. – М.: Изд. дом НИТУ «МИСиС», 2018. – 392 с.
9. Zhao H., Liu J., Yu Y. Effects of the impeller blade geometry on the performance of a turbo pneumatic separator // Chemical Engineering Communications. 2018, vol. 205(12), pp. 1641-1652. DOI: 10.1080/00986445.2018.1464918.
10. Денискина Т.В. Влияние формы и угла наклона вибрирующей поверхности рабочего органа вибромельницы на качество готового продукта // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 8. – С. 368-373.
11. Gorbatyuk S., Kondratenko V., Sedykh L. Influence of critical speed when working shafts with symmetrically located monolithic weighting on the accuracy of work surfaces // Materials Today: Proceedings. 2019, no. 19, pp. 2361-2364. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.695.

References

1. Akunov, V.I. and Litvinov, G.P., General technical and economic indicators of counterflow jet mills, Tr. Gos. Nauchno-Issled. Inst. Tsem. Prom. 1982, no. 70, pp. 3-10.
2. Revnivtsev V.I., Kapralov E.P., Kostin I.M., Krupa P.I., Yashin V.P., Vaisberg L.A. Modern directions of improving the technique and technology of crushing, grinding, classification of ores and the development of processes of selective disclosure of minerals // Improving the processes of crushing, grinding, screening and classification of ores and enrichment products. Interdepartmental collection of scientific papers. – L.: Mechanobr, 1985. – P. 3-22.
3. Patent No. 2498857 RU. Method of grinding mineral raw materials / Bardovsky A.D., Bibikov P.Ya., Deniskina T.V., Rudchenko N.F., Rudchenko T.P. – Application No. 2012113358/13 from 06.04.2012; publ. 20.11.2013, Bul. No. 32.
4. Danli Wen, Shuwei Huang, Guangyu Yu. Condition monitoring and fault diagnosis of ball mill gear // Proceedings of the 30th Chinese Control and Decision Conference. – Shenyang, 2018, no. 153, pp. 6715-6718. DOI: 10.1109/CCDC.2018.8408314.
5. Khodakov G.S. Fine grinding of building materials. – M.: Publ. house of Literature on construction, 1972. – 239 p.
6. Gerasimova A.A. Investigation of the regularities of plastic deformation of hollow steel profiles by compression // Computational nanotechnology. 2019, no. 3, pp. 22-26. DOI: 10.33693/2313-223X-2019-6-3-22-26.
7. Bardovsky A.D., Valeeva L.M., Basyrov I.I. A plant with a rotary jet grinder to produce small fractions of mineral raw material // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 971, p. 052004. DOI:10.1088/1757-899X/971/5/052004.
8. Ivanov S.A., Chichenov N.A. Engineering of transporting machines and devices. Textbook. – M.: Publ. house of NRTU MISIS, 2018. – 392 p.
9. Zhao H., Liu J., Yu Y. Effects of the impeller blade geometry on the performance of a turbo pneumatic separator // Chemical Engineering Communications. 2018, vol. 205(12), pp. 1641-1652. DOI: 10.1080/00986445.2018.1464918.
10. Deniskina T.V. The influence of the shape and angle of inclination of the vibrating surface of the working organ of the vibrating mill on the quality of the finished product // Mining information and analytical bulletin. 2015, no. 8, pp. 368-373.
11. Gorbatyuk S., Kondratenko V., Sedykh L. Influence of critical speed when working shafts with symmetrically located monolithic weighting on the accuracy of work surfaces // Materials Today: Proceedings. 2019, no. 19, pp. 2361-2364. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.695.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Денискина Татьяна Владимировна – старший преподаватель	Deniskina Tatiana Vladimirovna – senior lecturer
Бардовский Анатолий Данилович – доктор технических наук, профессор	Bardovsky Anatoly Danilovich – doctor of technical sciences, professor
Герасимова Алла Александровна – кандидат технических наук, доцент	Gerasimova Alla Alexandrovna – candidate of technical sciences, associate professor
allochka@rambler.ru	

Получена 07.06.2022