

УДК 621.8

**ВИБРОВРАЩАТЕЛЬНАЯ МЕЛЬНИЦА С ПРОДОЛЬНО-
ПОПЕРЕЧНЫМ ДВИЖЕНИЕМ МЕЛЮЩИХ ТЕЛ**

А. Ю. Гаврунов, В. С. Богданов

*Кафедра «Механическое оборудование и технология машиностроения»,
ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет
им. В. Г. Шухова», г. Белгород; gavrunov@gmail.com*

Ключевые слова и фразы: вибрационный помол; вибровращательная мельница; наклонная помольная камера; расчет мощности; тонкое измельчение.

Аннотация: Описана актуальность применения вибрационного помола материалов. Предложен способ повышения эффективности вибрационного измельчения путем усложнения рабочего движения мелющих тел. Представлена новая конструкция вибрационной мельницы, и описан принцип ее работы, а также дано определение мощности, сообщаемой мелющим телам.

Тонкое и сверхтонкое измельчение материалов в настоящее время – один из самых энергоемких процессов во многих отраслях промышленности, поэтому повышение эффективности и снижение энергоемкости этого процесса является актуальным. Вибрационное измельчение – едва ли не самый энергоэффективный способ измельчения, который характеризуется небольшими размерами агрегатов, сравнительно малой металлоемкостью и высокой энергонаряженностью среды измельчения. В промышленности строительных материалов на основе вибрационного измельчения разработаны технологические процессы производства вяжущих без применения портландцемента, сухих строительных смесей, стеновых извлектово-песчаных блоков и других строительных материалов [1].

Вибрационные мельницы – основное оборудование такого типа, которое представляет собой ряд машин, разрушающих частицы измельчаемого материала в результате колебательного движения рабочего органа (мелющих тел), который может двигаться в различных режимах. Движение мелющих тел изменяется в зависимости от конструктивных параметров мельниц, которые в разной степени обеспечивают высокую удельную производительность при относительно низких энергозатратах, а также регулируемую тонину продуктов помола.

Существуют два базовых режима тонкого измельчения материалов в вибрационных мельницах – периодический и непрерывный. При периодическом режиме измельчения материал загружается в мельницу одновременно, измельчается, затем полностью выгружается и загружается снова. Применение периодического помола целесообразно для получения очень тонких материалов в сравнительно малых количествах, а так же для проведения научных изысканий. При промыш-

ленном производстве строительных материалов, следует применять непрерывное измельчение, которое является более производительным без потерь времени на загрузку и выгрузку [1].

Вибрационные машины находят применение для помола большого разнообразия материалов: сухих строительных смесей, кварцевого песка, мрамора, слюды, извести, гипса; цемента, известковых вяжущих, вяжущих низкой водопотребности; компонентов керамики, стекольной шихты; тальков, органических и неорганических пигментов и др.

По сравнению с классическими шаровыми барабанными мельницами вибрационные мельницы обладают рядом преимуществ, таких как: возможность измельчения материалов с различными физико-механическими свойствами до частиц микронных и субмикронных размеров; более высокие скорости измельчения и коэффициент полезного действия; возможность плавного регулирования степени измельчения; меньшие размеры и металлоемкость; более высокие показатели качества продуктов помола: однородность распределения частиц по размерам, содержание угловатых частиц, степень механической активации и другие [2].

Большинство существующих конструкций вибрационных машин имеют ряд общих недостатков, который сводится к несовершенству конструкций помольных камер, имеющих в результате невысокую энергоэффективность и недостаточный уровень качества помола материала. Это главным образом выражается эффектом одновременного переизмельчения и агрегирования частиц измельчаемого материала, вследствие перерасхода подводимой энергии, образованием застойных зон и увеличением времени нахождения материала в помольной камере.

Современным направлением повышения производительности вибрационных мельниц и снижения их энергопотребления является создание комбинированного воздействия всех основных механизмов разрушения частиц на обрабатываемый материал с участием как можно большего числа мелющих тел в процессе измельчения. А именно создание сложного пространственного движения мелющих тел, которое достигается совмещением их колебательного, поступательного и вращательного движения во всех трех плоскостях [3].

Принцип совмещения различных конструктивных признаков для усложнения характера движения мелющих тел и более полного вовлечения их в процесс помола, впервые предложенный В. С. Богдановым, был использован при создании новой конструкции (патент РФ № 105199 от 10 июня 2011 г. [4]) вибрационной мельницы с продольно-поперечным движением мелющих тел, лабораторная модель которой, изображенная на рис. 1, была исследована на кафедре механического оборудования Белгородского государственного технологического университета имени В. Г. Шухова. В этом агрегате вибрация мелющих тел, создающая оптимальные условия для усталостного разрушения частиц, дополняется поперечно-продольным движением мелющей загрузки, которое кроме дополнительного ударно-истирающего воздействия на материал способствует устранению застойных зон и участию всех шаров в процессе измельчения.

Конструкция представляет собой, размещенные на неподвижной раме 7, подвижную раму 6, на которой установлена в подшипниковых опорах 5 с возможностью вращения вокруг собственной оси камера помола 4 с мелющими телами 2, и привод вращения помольной камеры 1. Камера помола 4 выполнена в форме наклонного цилиндра, торцевые поверхности которого перпендикулярны оси ее вращения, а его боковая цилиндрическая поверхность установлена под углом к горизонтальной поверхности подвижной рамы 6. Помольная камера 4 свободно установлена в подшипниковых опорах 5, что позволяет ей с помощью привода вращаться вокруг своей оси, в свою очередь, опорные узлы 5 представляют собой часть подвижной рамы 6, с закрепленным на ней виброприводом 8,

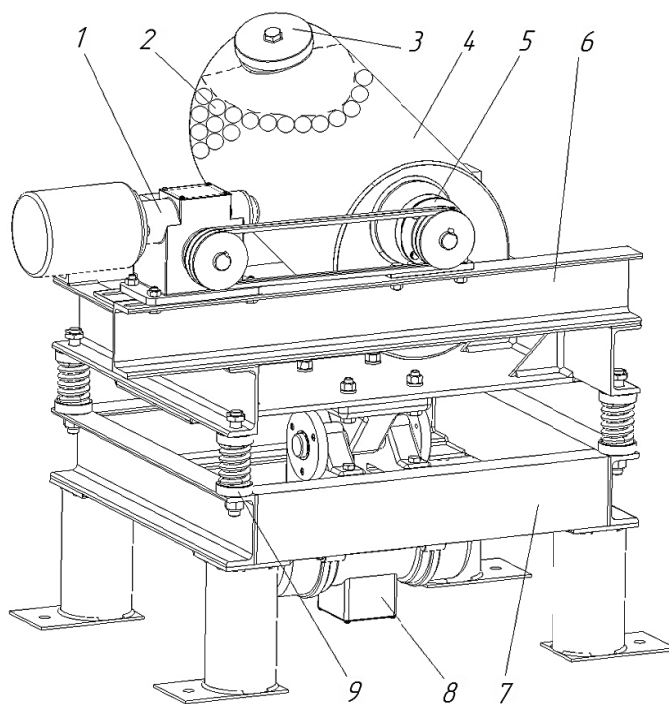


Рис. 1. Конструктивная схема вибровращательной мельницы:

1 – привод вращения помольной камеры; 2 – мелющие тела; 3 – загрузочно-выгрузочный люк; 4 – наклонная помольная камера; 5 – подшипниковая опора; 6 – подвижная рама; 7 – неподвижная рама; 8 – вибропривод; 9 – виброизолятор

опирающейся на неподвижную раму 7 через виброизоляторы 9 (пружины). Угол наклона боковой поверхности цилиндра к горизонтальной поверхности подвижной камеры должен быть больше угла естественного откоса смеси измельчаемого материала, но меньше 45° , что было выявлено опытным путем [4].

Вибровращательная мельница работает следующим образом. Через загрузочный люк 3 в помольную камеру 4 загружают мелющие тела. Исходный материал через загрузочный люк 3 подается в помольную камеру 4 под действием вибрации. В загрузочный люк устанавливается сетка, крышка завинчивается. Вибропривод 8 создает колебания помольной камеры по эллиптической траектории, одновременно с этим, привод вращает помольную камеру, что является основным рабочим процессом. Мелющие тела оказывают на измельчаемый материал ударное и истирающее действие, идет непрерывное перемешивание материала за счет криволинейной траектории движения загрузки по образующей помольной камеры (рис. 2). По истечении определенного опытным путем времени мельница останавливается. Далее, через разгрузочный люк под действием вибрации готовый материал выгружается из помольной камеры по присоединяемому патрубку.

Благодаря наклонной цилиндрической форме помольной камеры мелющие тела и материал совершают сложное продольно-поперечное движение по замкнутой пространственной траектории (рис. 2) [5].

Инновационная форма помольной камеры позволяет загрузке двигаться возвратно-поступательно в продольном направлении, в процессе работы материал эффективно измельчается в режиме сложного циркуляционного и вибрационного движения загрузки по сравнению с классической формой помольной камеры, которая совершает только колебательные движения (см. рис. 2).

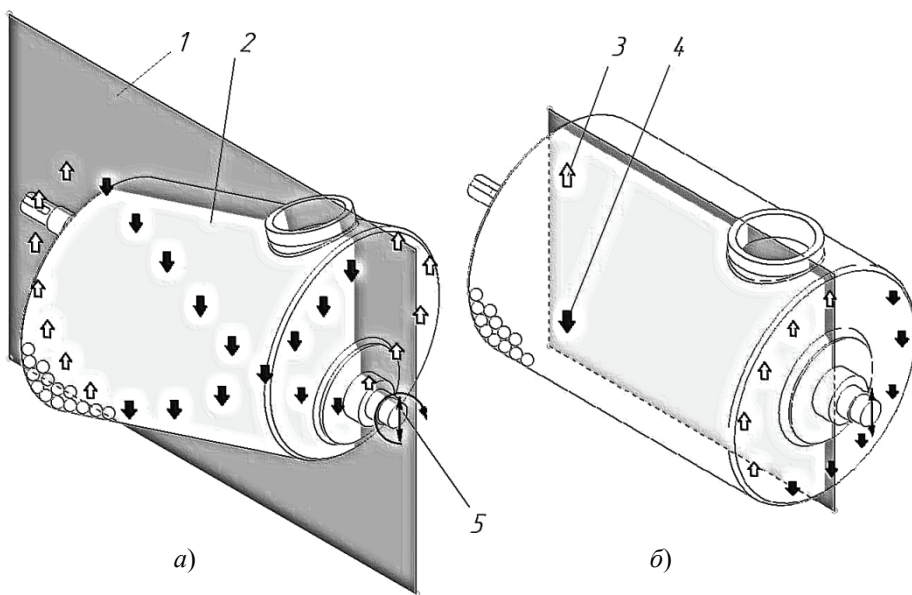


Рис. 2. Схема движения мелющих тел в помольной камере:

a – наклонная помольная камера; *б* – традиционная помольная камера; 1 – вертикальная плоскость симметрии камер; 2 – корпус камеры; 3 – движение мелющих тел вверх; 4 – движение мелющих тел вниз

Продольно поперечное движение мелющих тел, вызванное вращением наклонной камеры, приводит не только к интенсификации типичного для шаровых барабанных мельниц помола, но также существенно повышает эффективность вибрационного измельчения. Мощность, потраченная на перемещение загрузки в вибровращательной мельнице складывается из мощностей двух приводов и представляет собой сумму мощностей вибропривода и привода вращения помольной камеры, с учетом общей эффективности агрегата. Для оценки общей полезной мощности определим каждую из составляющих отдельно.

Оценим величину вращательной составляющей общей мощности. За один оборот помольной камеры, то есть за время $T = 60/n$, где n – число оборотов камеры в минуту, осуществляется два подъема загрузки на высоту l_y и два продольных перемещения длиной l_z . Затраченная при этом работа равна

$$A = 2(V_3 \rho g l_y + V_3 \rho g f l_z), \quad (1)$$

где V_3 – объем загрузки, m^3 ; ρ – плотность загрузки, kg/m^3 ; $g = 9,81$ – ускорение свободного падения, m/c^2 ; f – коэффициент трения.

Вращательная составляющая потребляемой мельницей полезной мощности

$$N_{вр} = \frac{A}{T} = \frac{V_3 \rho g}{30} (l_y + f l_z). \quad (2)$$

Для определения полной мощности вращательного привода необходимо дополнительно учесть потери на трение, в электродвигателе и другие [5].

Оценим величину вибрационной составляющей общей полезной мощности вибровращательной мельницы. Среднее значение мощности за период колебаний T определяется соотношением

$$N_{вибр} = \frac{1}{T} \int_0^T F_{12} \vartheta_{12} dt, \quad (3)$$

где F_{12} – сила взаимодействия загрузки с помольной камерой, входящая в уравнение упруго-вязкостное взаимодействия [2]; ϑ_{12} – скорость движения центра масс загрузки относительно центра масс подвижной части мельницы

$$F_{12} = (1 - K_n)m_1\ddot{y}_1 = b_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - c_1(y_1 - y_2 - y_{цм1}); \quad (4)$$

$$F_{12} = \dot{y}_2 - \dot{y}_1 = \frac{c_1}{b_1}(y_1 - y_2 - y_{цм1}) + \frac{F_{12}}{b_1}, \quad (5)$$

где $y_{цм1}$ – координата центра масс загрузки в состоянии покоя.

Из формул (4) и (5) следует, что выражение мощности (3) может быть записано в четырех эквивалентных видах, из которых наиболее простым является следующее

$$N_{\text{вибр}} = \frac{(1 - K_n)m}{T} \int_0^T \dot{y}_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) dt. \quad (6)$$

Подставив в формулу мощности (6) выражения (7) и (8):

$$y_1 = y_{цм1} + A_1 \cos(\omega t - \alpha_1); \quad (7)$$

$$y_2 = A_2 \cos(\omega t - \alpha_2), \quad (8)$$

после интегрирования получим

$$N_{\text{вибр}} = \frac{1}{2}(1 - K_n)m_1\omega^3 A_1 A_2 \sin(\alpha_1 - \alpha_2), \quad (9)$$

где A_1 , α_1 , A_2 , α_2 – комплексные амплитуды, заданные показателями, определяемыми начальными условиями, и описанные формулами (10 – 13):

$$A_1 = A \sqrt{\frac{\omega^4 (\omega_{01}^4 + 4\delta_1^2 \omega^2)}{\Delta_1^2 + \Delta_2^2}}; \quad (10)$$

$$\alpha_1 = \text{arcctg} \frac{\omega_{01}^2 \Delta_2 - 2\delta_1 \omega \Delta_1}{\omega_{01}^2 \Delta_1 - 2\delta_1 \omega \Delta_2}; \quad (11)$$

$$A_2 = A \sqrt{\frac{\omega^4 (\omega_{01}^2 + \omega^2)^2 + 4\delta_1^2 \omega^2}{\Delta_1^2 + \Delta_2^2}}; \quad (12)$$

$$\alpha_2 = \text{arcctg} \frac{(\omega_{01}^2 - \omega^2) \Delta_2 - 2\delta_1 \omega \Delta_1}{(\omega_{01}^2 - \omega^2) \Delta_1 - 2\delta_1 \omega \Delta_2}. \quad (13)$$

После преобразования формул двух составляющих мощностей (2), (9) получим упрощенный вид формулы определения общей полезной мощности вибровращательной мельницы

$$N_{\text{общ}} = \frac{N_{\text{вр}} + N_{\text{вибр}}}{\eta} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{nV_3 p g}{30} (1y + fl_z) + \frac{1}{T} \int_0^T F_{12} \vartheta_{12} dt \right). \quad (14)$$

Совмещение вибрационного и вращательного движений помольной камеры позволяет увеличить мощность, сообщаемую загрузке, что интенсифицирует ее движение и способствует увеличению производительности мельницы и степени измельчения материала. Таким образом при работе вибровращательной мельницы с наклонной помольной камерой происходит не простое сложение эффектов вибрационного и вращательно-шарового измельчения, а их сложение с взаимным усилением. Другими словами, возникает синергизм различных механизмов измельчения, создающий наиболее благоприятные условия для тонкого измельчения.

Измельчение материалов в наклонной вибровращательной мельнице приводит не только к уменьшению среднего размера частиц, повышению однородности измельчаемого материала, но и к изменению его внутренней структуры – механической активации, которая заключается в изменении физико-механических свойств материала и повышении его химической активности.

Новая конструкция вибровращательной мельницы существенно расширяет возможности процесса измельчения и дает основу для дальнейшего совершенствования технологии помола материалов.

Список литературы

1. Кугель, Р. В. Вибропомольные установки. Устройство, назначение, выбор / Р. В. Кугель, Д. О. Коновалов, А. Ю. Элькин. – М. : Промстройиздат, 1956. – 67 с.
2. Бауман, В. А. Вибрационные мельницы и процессы в строительстве / В. А. Бауман, И. М. Быховский. – М. : Высшая школа, 1977. – 255 с.
3. Сартаков, А. В. Моделирование и интенсификация рабочих процессов вибрационных измельчителей : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 : защищена 14.02.2004 / Сартаков Александр Владимирович. – Барнаул, 2004. – 177 с.
4. Пат. 105199 Российская Федерация, МПК В 02 С 17/06. Вибровращательная мельница / Гаврунов А. Ю., Богданов В. С. ; заявитель и патентообладатель Белгород. гос. технол. ун-т им. В. Г. Шухова. – № 2010152390/21 ; заявл. 21.10.2010 ; опубл. 10.06.2011, Бюл. № 16. – 4 с.
5. Богданов, В. С. Кинематика движения загрузки в вибровращательной мельнице / В. С. Богданов, А. Ю. Гаврунов, В. Г. Шаптала // Вестн. Белгород. гос. технолог. ун-та им. В. Г. Шухова. – 2012. – № 4. – С. 100 – 102.

Vibrating Rotating Mill with Cross-Longitudinal Motion of Grinding Bodies

A. Yu. Gavrunov, V. S. Bogdanov

*Department “Mechanical Equipment and Engineering Technology”,
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
Belgorod; gavrunov@gmail.com*

Key words and phrases: fine grinding; inclined grinding chamber; power calculation; vibrational grinding; vibrating rotating mill.

Abstract: The article briefly describes the relevance of application of the vibration grinding materials. The method for increasing the effectiveness of vibratory grinding by complication of the labor movement of grinding bodies has been proposed. A new design of a vibration mill and the principle of its operation have been described. Also, the power imparted to the grinding bodies has been defined.

Vibrorotierende Mühle mit der Längsquerbewegung der Mahlkörper

Zusammenfassung: Im Artikel ist die Aktualität der Anwendung des Vibrimahlens der Materialien kurz beschrieben. Es ist die Weise der Erhöhung der Effektivität der Vibrozerkleinerung mittels des Kompliziertwerdens der Arbeiterbewegung der mahlenden Körper angeboten. Es ist die Neukonstruktion der Vibromühle vorgelegt, es ist das Prinzip ihrer Arbeit beschrieben. Es wird auch die Bestimmung der Macht, die den mahlenden Körper mitgeteilt wird, gegeben.

Le Broyeur vibrant rotatif avec le mouvement longitudinal-transversal des corps de broyage

Résumé: Cet article décrit brièvement la pertinence de l'application de matériaux de broyage vibratoires. Nous proposons une méthode pour augmenter l'efficacité du broyage vibratoire avec complications du mouvement ouvrier de broyage. Une nouvelle conception d'un broyeur vibrant est décrit ainsi que son fonctionnement. Aussi, définiton la puissance transmise aux organes de broyage.

Авторы: *Гаврунов Алексей Юрьевич* – аспирант кафедры «Механическое оборудование и технология машиностроения»; *Богданов Василий Степанович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механическое оборудование и технология машиностроения», ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород.

Рецензент: *Дубинин Николай Николаевич* – кандидат технических наук, профессор кафедры «Технологические комплексы, машины и механизмы», ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород.
