

**В.П. ФРАНЧУК**, д-р техн. наук

(Україна, Днепропетровск, Национальний горний університет),

**В.П. НАДУТЫЙ**, д-р техн. наук,

**П.В. ЛЕВЧЕНКО**

(Україна, Днепропетровск, Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова НАН України)

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ ПО СИТУ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВИБРАЦИОННОГО ГРОХОТА

*Введение.* При переработке и обогащении минерального сырья неотъемлемой частью цикла является отбор готового класса крупности – грохочение, для снижения энергозатрат дробильного и измельчительного оборудования. В связи с все большим вниманием к переработке техногенных отходов – шламов, хвостохранилищ и терриконов, машины данной технологической операции должны иметь высокие технологические показатели извлечения тонких и особо тонких классов крупности, так как именно тонкодисперсные материалы имеют максимальное процентное содержание полезного компонента.

Для решения данной проблемы в Институте геотехнической механики НАН Украины разработана конструкция вертикального вибрационного грохота (ВВГ) [1, 2]. При габаритных размерах  $1,4 \times 1,4 \times 1,9$  м машина имеет массу 1,3 т, площадь просеивающей поверхности –  $3,2 \text{ м}^2$  и мощность привода – 0,74 кВт, что на порядок меньше, чем у аналогичных по колеблющейся массе грохотов, серийно выпускаемых, как в Украине, так и за рубежом. Рабочий орган грохота представляет собой нисходящую наклонную галерею в виде рам резонирующих ленточно-струнных сит (РЛСС). Преимуществом данного вида просеивающей поверхности является ее высокая долговечность и динамическая активность при работе в резонансном режиме с виброприводом. При этом амплитуда колебаний лент-струн, относительно короба грохота, повышается в несколько раз без дополнительного подведения мощности.

Грохот (рис. 1) приводится в движение диагонально расположенными вибровозбудителями, которые реализуют винтовые колебания грохота относительно его вертикальной оси. Кроме этого, дополнительная пространственная составляющая колебаний рабочего органа способствует наилучшему распределению материала по ширине сита, что особенно важно при неравномерном по ширине сита питании.

Выполнен комплекс экспериментальных исследований [3-7] по установлению зависимости технологических показателей грохота – производительности ( $Q$ , т/ч) и эффективности классификации ( $E$ , %) от конструктивных, режимных параметров машины и характеристик перерабатываемой горной массы. Результаты исследований показали, что пространственные колебания рабочего органа позволяют интенсифицировать движения материала по просеивающей поверхности в продольном и поперечном направлениях. При этом повышаются технологические показатели процесса классификации за счет увеличения пути дви-

## Підготовчі процеси збагачення

ження надрешетного продукта, так як матеріал рухається по волнообразним траекториям вдоль просеивающей поверхности. Увеличение пути движения частиц снижает производительность грохота. Этот эффект компенсируется увеличением угла наклона карт просеивающей поверхности и использованием динамически активных РЛСС.

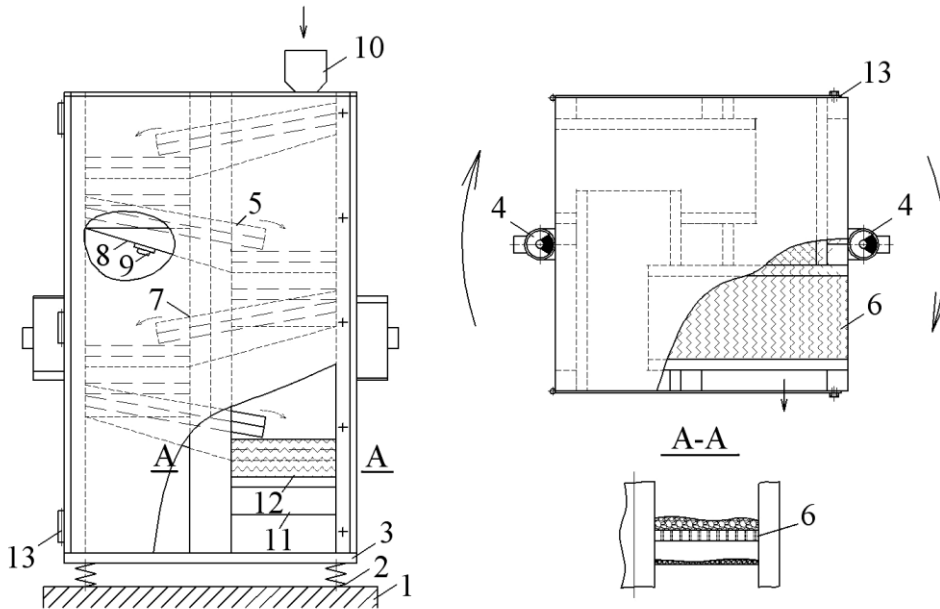


Рис. 1. Конструктивная схема вертикального вибрационного грохота:  
1 – рама; 2 – амортизаторы; 3 – несущая колонна; 4 – вибровозбудитель;  
5 – рабочий орган; 6 – карта РЛСС; 7 – механизм изменения угла наклона карт;  
8 – желоб; 9 – шиберная задвижка; 10 – приемный бункер;  
11, 12 – разгрузочная течка подрешетного и надрешетного продуктов; 13 – кожух

*Целью работы* является определение траектории движения материальной частицы по ситу вертикального вибрационного грохота в поле пространственных колебаний.

Динамическая схема вибропривода вертикального вибрационного грохота состоит из двух дебалансных вибровозбудителей с вращающимся вектором ускорений, расположенных по бортам на расстоянии  $a$  от центра масс машины. Схема действия возмущающих сил представлена на рис.2. Плоскости вращения дебалансных масс вибровозбудителей наклонены в противоположные стороны под изменяющимся углом  $\beta$  к плоскости просеивающей поверхности.

При противофазном вращении валов вибровозбудителей, дебалансы поворачиваются на соответствующие фазные углы  $\varphi_1 = \omega \cdot t$  и  $\varphi_2 = \pi - \omega \cdot t$ , и при равенстве их неуравновешенных масс развивают равные центробежные силы инерции  $P_0$ . Проекции центробежных сил  $P_0 \cdot \cos(\omega \cdot t)$  взаимно уравновешиваются, а проекции  $P_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$  при разложении на вертикальные  $P_z$  и горизонтальные составляющие  $P_y$ , образуют гармоническую возмущающую силу  $2 \cdot P_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(\beta)$  и момент  $2 \cdot P_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin(\beta) \cdot a$ , направленные соответственно вдоль и вокруг оси  $Oz$ . Таким образом, создаются поступательные

поворотные колебания грохота вдоль вертикальной оси.

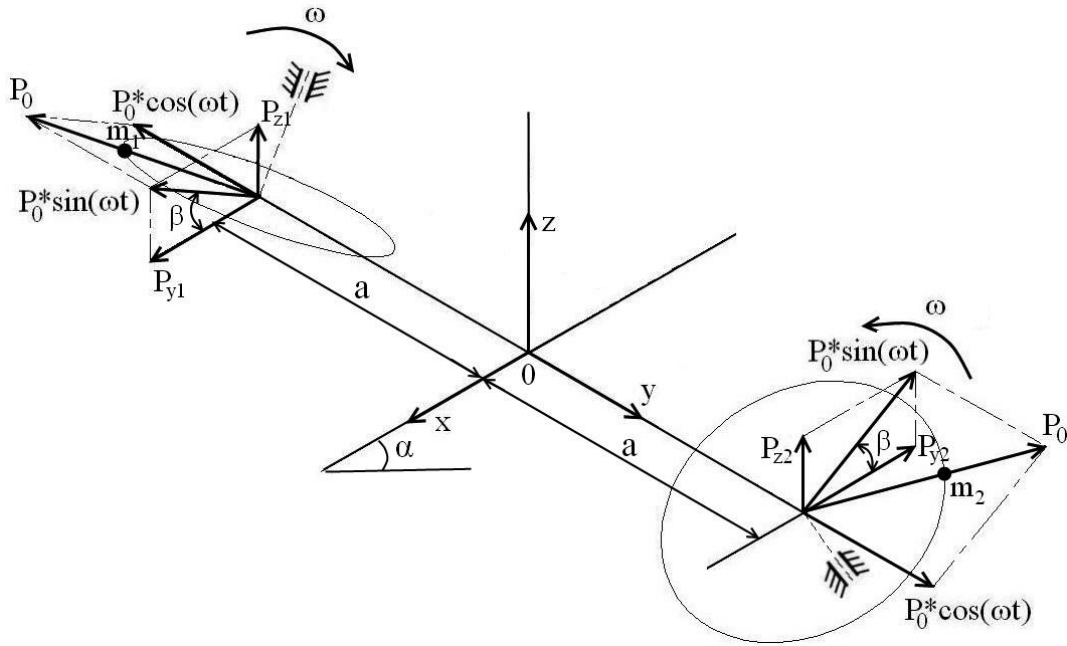


Рис. 2. Схема действия возмущающих сил вертикального вибрационного грохота

Исходя из траектории колебаний короба грохота, определим траекторию движения материальной частицы массой  $m$  по просеивающей поверхности грохота.

Амплитуда поворотных колебаний короба:

$$A_{\varphi} = \frac{A_{\tilde{a}}}{R},$$

где  $A_{\tilde{a}}$  – амплитуда горизонтальных колебаний на контуре короба, мм;  $R = a$  – радиус контура короба, мм.

Результирующая амплитуда колебаний в точке нахождения частицы:

$$A = \sqrt{A_{\tilde{a}}^2 + (r \cdot A_{\varphi})^2},$$

где  $r$  – радиус расположения материальной частицы, мм;  $A_{\tilde{a}}$  – амплитуда вертикальных колебаний на контуре короба, мм

Коэффициент режима виброперемещения в точке нахождения частицы:

$$\tilde{A} = \frac{A \cdot \omega^2 \cdot \sin \beta}{g \cdot \cos \alpha}. \quad (1)$$

Уравнение движения материальной частицы относительно просеивающей поверхности:

## Підготовчі процеси збагачення

$$m \cdot \ddot{z} = -m \cdot g \cdot \cos \alpha + m \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin \beta \cdot \sin \omega \cdot t, \quad (2)$$

$$m \cdot \ddot{x} = m \cdot g \cdot \sin \alpha + m \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \cos \beta \cdot \sin \omega \cdot t. \quad (3)$$

Решим уравнение (2) из условия отрыва материала от рабочей поверхности  $z = 0; \dot{z} = 0; \ddot{z} = 0$  при  $t = t_0$  ( $\psi = \psi_0$ ):

$$\dot{z} = -g \cdot t \cdot \cos \alpha - A \cdot \omega \cdot \sin \beta \cdot \cos \omega \cdot t + C_1, \quad (4)$$

$$z = -\frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \cos \alpha - A \cdot \sin \beta \cdot \sin \omega \cdot t + C_1 \cdot t + C_2. \quad (5)$$

Из (4) и (5) определим коэффициенты  $C_1$  и  $C_2$ :

$$C_1 = -\frac{g \cdot \psi_0}{\omega} \cdot \sin \alpha + A \cdot \omega \cdot \cos \beta \cdot \cos \psi_0, \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{g \cdot \psi_0^2}{2\omega^2} \cdot \sin \alpha + A \cdot \cos \beta \cdot \cos \psi_0 \cdot (1 - \psi_0). \quad (7)$$

Подставив (6) и (7) в (5) получим:

$$z = -\frac{g \cdot \psi^2 \cdot \cos \alpha}{2\omega^2} \cdot \cos \alpha - A \cdot \sin \beta \cdot \sin \psi + \frac{g \cdot \psi_0 \cdot \psi}{\omega^2} \cdot \cos \alpha + \\ + A \cdot \psi \cdot \sin \beta \cdot \cos \psi_0 - \frac{g \cdot \psi_0^2}{2\omega^2} \cdot \cos \alpha + A \cdot \sin \beta \cdot \sin \psi_0 - A \cdot \psi_0 \cdot \sin \beta \cdot \cos \psi_0. \quad (8)$$

Граничные условия:  $z = 0$  при  $\psi = \psi_{\hat{a}}$ . Преобразуем уравнение (8):

$$z = -\frac{g \cdot (\psi - \psi_0)^2}{2\omega^2} \cdot \cos \alpha - A \cdot \sin \beta \cdot (\sin \psi_0 - \sin \psi) + A \cdot \sin \beta \cdot \cos \psi_0 \cdot (\psi - \psi_0).$$

Подставим граничные условия и разделим на  $A \cdot \sin \beta$  с учетом (1):

$$-\frac{(\psi_{\hat{a}} - \psi_0)^2}{2 \cdot \tilde{A}} + (\sin \psi_0 - \sin \psi_{\hat{a}}) + \cos \psi_0 \cdot (\psi_{\hat{a}} - \psi_0) = 0. \quad (9)$$

Из уравнения (9) определим фазный угол встречи частицы с поверхностью. Уравнение трансцендентное. Учитывая, что частица движется с непрерывным подбрасыванием, считаем, что  $\psi_{\hat{a}}$  близок к  $2\pi$ . В таком случае  $\psi_{\hat{a}} = 2\pi + \Delta\psi_{\hat{a}}$ .

Выражение (9) преобразуется к виду:

$$\sin \psi_0 - \sin(2\pi + \Delta\psi_{\dot{a}}) - \frac{(2\pi + \Delta\psi_{\dot{a}} - \psi_0)^2}{2 \cdot \tilde{A}} + \cos \psi_0 \cdot (2\pi + \Delta\psi_{\dot{a}} - \psi_0) = 0. \quad (10)$$

Отсюда, учитывая, что при малых значениях  $\Delta\psi_{\dot{a}}$   $\sin \Delta\psi_{\dot{a}} = \Delta\psi_0$ , получим:

$$\Delta\psi_{\dot{a}} = -\frac{1}{2} \cdot b + \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot b\right)^2 - c}, \quad (11)$$

где

$$b = 4\pi - 2 \cdot \psi_0 + 2 \cdot \tilde{A} \cdot (1 - \cos \psi_0),$$

$$c = 4\pi^2 + \psi_0^2 - 4\pi \cdot \psi_0 - 2 \cdot \tilde{A} \cdot [\sin \psi_0 + (2\pi - \psi_0) \cdot \cos \psi_0].$$

Аналогичные преобразования совершаем для продольных перемещений частицы (3), в результате чего получим:

$$x = \frac{g \cdot \psi^2}{2 \cdot \omega^2} \cdot \sin \alpha - A \cdot \cos \beta \cdot \cos \psi - \frac{g \cdot \psi_0 \cdot \psi}{\omega^2} \cdot \sin \alpha + A \cdot \psi \cdot \cos \beta \cdot \cos \psi_0 + \\ + \frac{g \cdot \psi_0^2}{2\omega^2} \cdot \sin \alpha + A \cdot \cos \beta \cdot \cos \psi_0 \cdot (1 - \psi_0)$$

Разделив на  $A \cdot \cos \beta$  уравнение будет иметь следующий вид:

$$x = A \cdot \cos \beta \cdot \left[ \frac{g \cdot (\psi - \psi_0)^2}{2 \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \cos \beta} \cdot \sin \alpha - (\cos \psi - \cos \psi_0) + (\psi - \psi_0) \cdot \cos \psi_0 \right]. \quad (12)$$

Из уравнения (12) найдем величину перемещения частицы за одно колебание ( $\psi_{\dot{a}} = 2\pi + \Delta\psi_{\dot{a}}$ ):

$$\Delta x = A \cdot \cos \beta \cdot \left[ \frac{(\psi_{\dot{a}} - \psi_0)^2}{2 \cdot \tilde{A}} \cdot \text{tg} \alpha \cdot \text{tg} \beta - (\cos \psi_{\dot{a}} - \cos \psi_0) + (\psi_{\dot{a}} - \psi_0) \cdot \cos \psi_0 \right].$$

За один бросок частица переместится на  $\Delta x$  или по контуру на угол  $\Delta\varphi = \frac{\Delta x}{r}$ . При этом, она сместится по радиусу  $r$  на величину  $\Delta x \cdot \sin(\Delta\varphi)$  и новый радиус (начало следующего броска) будет:

$$r_{i+1} = r_i + \Delta x \cdot \sin(\Delta\varphi). \quad (13)$$

Средняя скорость виброперемещения частицы:

$$v_{\text{н\ddot{o}}} = \frac{\Delta x \cdot \omega}{2\pi}.$$

При помощи полученных уравнений составлен алгоритм расчета траектории движения материальной частицы по просеивающей поверхности вертикального вибрационного грохота в среде MathCAD. На рис. 3 для примера представлена траектория движения частицы по сити вертикального вибрационного грохота при начальных условиях  $r = 400$  мм;  $A = 2,002$  мм;  $\alpha = 8$  град.;  $\beta = 45$  град.;  $\omega = 24$  Гц;  $\Gamma = 2,04$ . Частица движется с постоянным приращением радиуса  $r$  согласно (13).

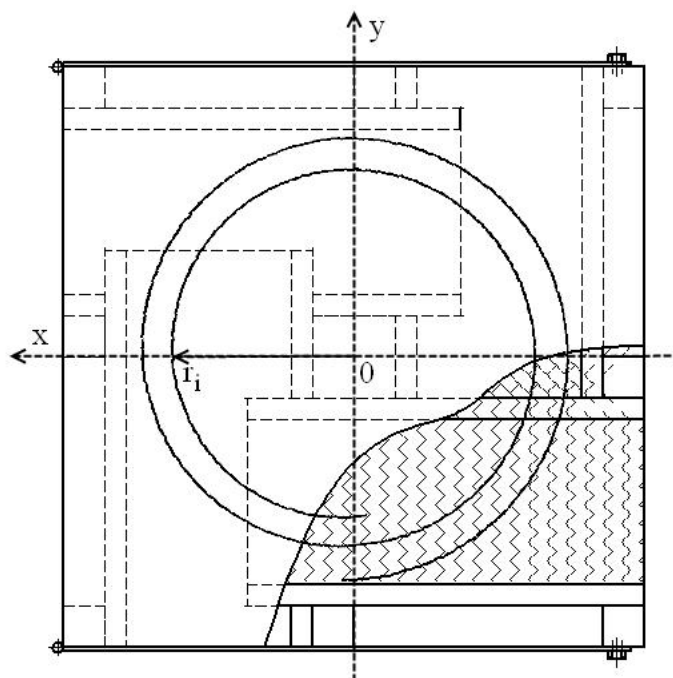


Рис. 3. Траектория движения материальной частицы по сити ВВГ

Таким образом, представленные аналитические выражения для определения траектории движения частицы горной массы на просеивающей поверхности вертикального вибрационного грохота позволяют исследовать путь перемещения частиц материала различной массы и плотности.

*Выводы.* Принятая в конструкции вертикального вибрационного грохота компоновка привода обеспечивает реализацию дополнительных к продольным регулируемых поперечных колебаний просеивающей поверхности. Такой характер колебаний приводит к траекториям перемещения частиц горной массы по спирали. При этом увеличивается длина пути перемещения материала и за счет этого повышается эффективность его просеивания.

**Список літератури**

1. Пат. № 53632 UA, МПК<sup>8</sup> В 07 В 1/40 (2006.01). Вертикальний вібраційний грохот / Надутый В.П., Левченко П.В., Кіжло Л.А.; заявник і патентовласник ІГТМ НАНУ; Заявл. 26.04.2010; Опубл. 11.10.2010, Бюл. № 19. – 3 с.
2. Пат. № 62641 UA, МПК<sup>8</sup> В 07 В 1/40 (2006.01). Вертикальний вібраційний грохот-сушарка / Надутый В.П., Левченко П.В.; заявник і патентовласник ІГТМ НАНУ; Заявл. 24.01.2011; Опубл. 12.09.2011, Бюл. № 17. – 4 с.
3. Надутый В.П., Левченко П.В. Определение зависимости эффективности грохочения от конструктивных параметров вертикального вибрационного грохота // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2011. – Вип. 45(86). – С. 43-48.
4. Франчук В.П., Надутый В.П., Левченко П.В. Определение зависимости эффективности грохочения от режимных параметров вертикального вибрационного грохота // Вібрації в техніці та технологіях: Всеукр. наук.-техн. журнал. – 2011. – Вип. 2(62). – С. 73-76.
5. Надутый В.П., Левченко П.В. Результаты экспериментальных исследований зависимости производительности вертикального вибрационного грохота от его конструктивных параметров // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: Укр. міжвід. наук.-техн. зб. держ. ун-ту "Львівська політехніка". – 2011. – Вип. 45. – С.24-27.
6. Надутый В.П., Левченко П.В. Влияние характеристик горной массы на эффективность классификации вертикального вибрационного грохота // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. – 2011. – Вип. 93. – С. 81-86.
7. Надутый В.П., Левченко П.В., Хмеленко И.П. Влияние свойств горной массы на производительность вертикального вибрационного грохота // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. – 2011. – Вип. 94. – С. 23-29.

© Франчук В.П., Надутый В.П., Левченко П.В., 2013

*Надійшла до редколегії 17.04.2013 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. Б.О. Блюссом*