

**Франчук В.П.**

д.т.н., профессор

**Анциферов А.В.**

к.т.н., доцент

**Куница В.Ф.**

инженер-механик

*Национальный  
технический  
университет  
«Днепровская  
политехника»*

**Franchuk V.****Antsiferov A.****Kunitsa V.**

*National Technical  
Univercity Dnipro  
Polytechnic*

**УДК 531.3: 621**

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛА ПО РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ГРОХОТА С ПРОДОЛЬНЫМИ РИФЛЯМИ**

*Рассмотрено движение грохота с одновальным инерционным вибровозбудителем, расположенным в вертикальной плоскости. Рабочая поверхность имеет продольные круговые рифли. Составлены дифференциальные уравнения движения короба и построены амплитудные характеристики. На их основе получены аналитические зависимости, определяющие параметры движения частиц по длине рабочей поверхности в пределах одной рифли. Показано, что благодаря пространственным колебаниям рабочей поверхности в поперечном направлении интенсифицируется хаотическое движение материала, что ускоряет его перемешивание в слое.*

**Ключевые слова:** грохот, вибрация, пространственные колебания, круговые рифли, движение материала.

**Постановка проблемы.** Для классификации мелкодисперсных материалов используют вибрационные грохоты, но это весьма трудоемкий и малоэффективный процесс. Для этого материала уже не говорят «о величине толщины слоя порядка 3-4 средних размеров частиц», т.е. для увеличения производительности его подают на просеивающую поверхность относительно толстым слоем. При этом живое сечение просеивающей поверхности весьма мало. В этом случае разделение по крупности происходит в результате таких взаимообусловленных процессов как сегрегация, просеивание и вибротранспортирование. Интенсивность этих процессов зависит от грансостава, формы частиц, физико-механических свойств сырья, толщины слоя, который уменьшается по ходу транспортирования. С учетом этого необходимо подбирать конструктивные и динамические параметры грохота.

Очень часто на грохотах устанавливают двухвальные самобалансные или самосинхронизирующиеся вибровозбудители, которые обеспечивают прямолинейные колебания короба под углом к просеивающей поверхности. У высокопроизводительных грохотов ее длина составляет 5-8 метров и в результате просеивания толщина слоя уменьшается в 3-10 раз. Поэтому для увеличения эффективности классификации

были предложены грохоты с переменными параметрами колебания сетки по длине просеивающей поверхности [1].

Другое перспективное направление классификации мелкодисперсных материалов – использование одновального инерционного вибровозбудителя, ось которого расположена в вертикальной плоскости и обеспечивает пространственные колебания рабочей поверхности. Теоретически такое движение грохотимого материала изучалось в работах Л.Н. Тищенко, В.П. Ольшанского, С.В. Ольшанского [2, 3]. Авторы рассматривают сыпучую среду, которая под действием вибрации приобретает свойства жидкости. При этом они учитывают изменение вязкости по толщине слоя. Сложное движение материала вдоль короба и поперек рассмотрено в двух отдельных задачах.

Другой подход к данной задаче предложен в работе В.П. Франчука, В.А. Федоскина, А.И. Егурнова [4]. В ней исследовалось влияние геометрических параметров грохота и места установки вибровозбудителя. Результаты позволили обеспечить получение рациональных параметров движения материала по рабочей поверхности. Экспериментальные исследования подтвердили эффективность применения предложенной конструктивной схемы [5]. В этом случае наряду с направленными движениями материала к



месту разгрузки, обеспечивается его непрерывное перемешивание.

Следующим этапом модернизации грохота было использование просеивающей поверхности с продольными рифлениями, способствующими интенсификации перемешивания материала и дальнейшему повышению эффективности классификации [6]. С аналитической точки зрения данный случай еще не рассматривался.

**Формулировка цели исследований.**

Математическое моделирование перемещения материала по поверхности с продольными рифлениями, совершающей пространственные колебания.

**Изложение основного материала исследования.** Наиболее простая конструкция такого грохота состоит (рис. 1) из корпуса 1 с

просеивающей поверхностью 2, загрузочно-распределительного устройства 3, разгрузочных патрубков 4. Корпус грохота установлен на основании с помощью эластичных амортизаторов 5. Отличительной особенностью грохота является то, что ось однофазного инерционного вибровозбудителя 6 расположена в вертикальной плоскости под углом к рабочей поверхности. Проекция вектора возмущающей силы привода на вертикальную плоскость проходит через центр тяжести грохота. Это исключает галопирование грохота. Просеивающая поверхность 2 представляет собой продольные цилиндрические перфорированные ручки (рифли), по которым располагается просеиваемый материал.

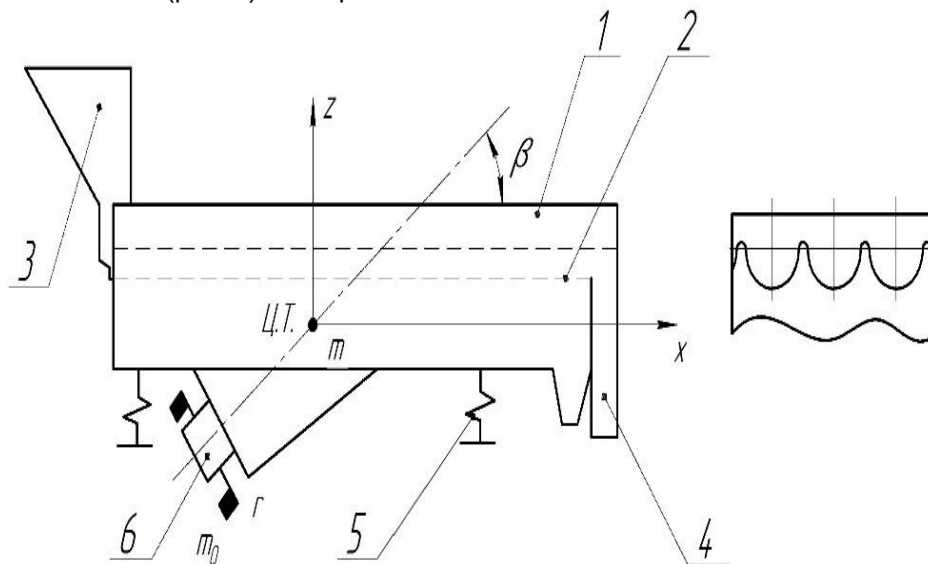


Рис. 1. Конструктивная схема грохота

Вследствие пространственного движения рабочей поверхности, материал совершает направленные движения вдоль оси  $x$  и круговые движения в поперечном направлении. При грохочении мелкодисперсных материалов это позволяет обеспечить лучший контакт с перфорированной поверхностью и повысить производительность и эффективность грохочения.

Зависимость динамических характеристик грохота и параметров движения материала от размеров просеивающей поверхности и места установки привода будем производить исходя из следующих предположений.

Масса корпуса грохота пропорциональна его длине и ширине, момент инерции грохота учитывает концевые элементы (загрузочное и разгрузочное устройства). Присоединение привода приводит к смещению центра тяжести

грохота в целом на величину, пропорциональную массе привода и расстоянию от его центра до центра масс корпуса. При смещении привода выполняется условие, что проекция вектора возмущающей силы на вертикальную плоскость проходит через центр тяжести корпуса.

Динамическая расчетная схема с обозначением геометрических и динамических параметров представлена на рис. 2.

Для составления уравнений движения грохота воспользуемся уравнением Лагранжа II рода. В качестве обобщенных координат принимаем линейные перемещения в направлении действия проекции вектора возмущающей силы на вертикальную плоскость (в направлении осей  $x$  и  $z$ , в поперечном направлении (по оси  $y$ ) и поворотные колебания вокруг осей  $x$  и  $z$ .

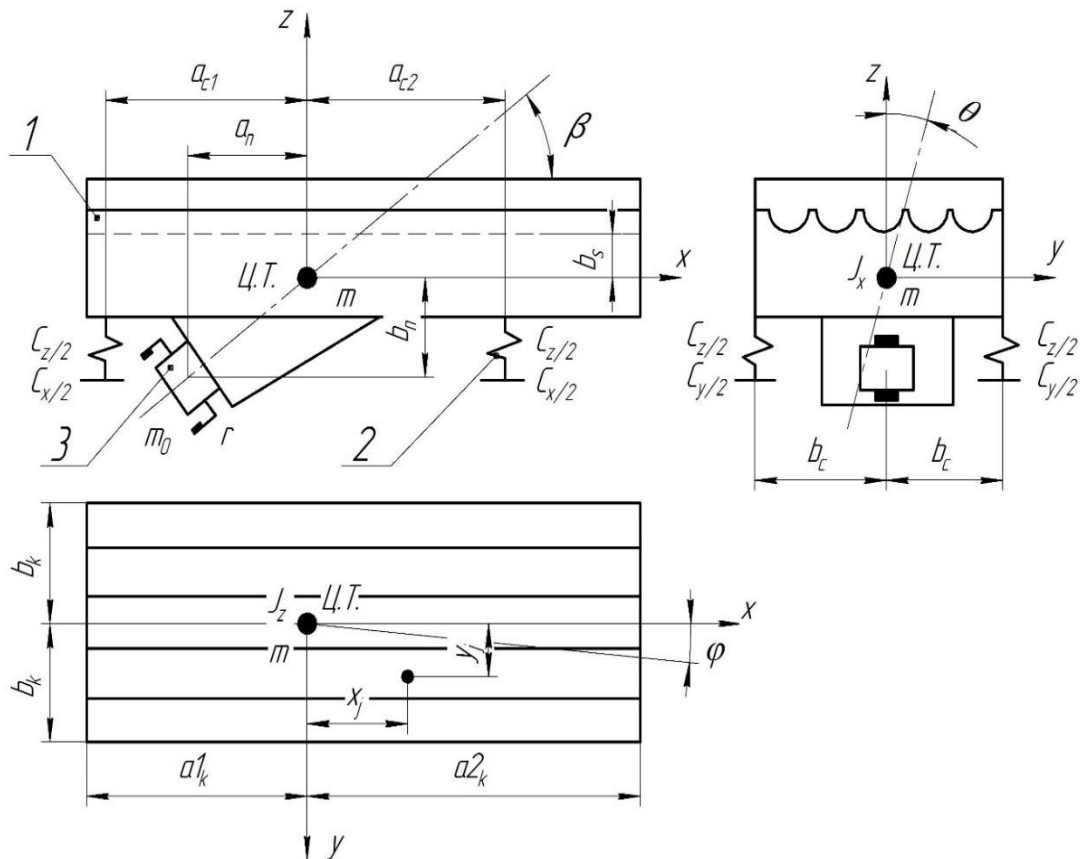


Рис 2. Расчетная динамическая схема грохота

Для составления уравнений движения грохота воспользуемся уравнением Лагранжа II рода. В качестве обобщенных координат принимаем линейные перемещения в направлении действия проекции вектора возмущающей силы на вертикальную плоскость (в направлении осей  $x$  и  $z$ , в

поперечном направлении (по оси  $y$ ) и поворотные колебания вокруг осей  $x$  и  $z$ .

Составляя зависимости для кинетической и потенциальной энергии, используя уравнение Лагранжа II рода, получим систему уравнений, описывающих движение грохота в виде

$$\begin{aligned} M\ddot{q}_1 + (C_x \sin \beta + C_z \cos \beta) q_1 &= m_0 r \omega^2 \sin(\omega t), \\ M\ddot{y}_1 - m_0 a_n \ddot{\varphi} - m_0 b_n \ddot{\theta} + C_y y &= m_0 r \omega^2 \cos(\omega t), \\ I_{x1} \ddot{\varphi} - m_0 a_n \ddot{y}_1 - m_0 a_n b_n \ddot{\theta} + 0,5 C_y (a_{c1}^2 + a_{c2}^2) \varphi &= -m_0 r \omega^2 a_n \cos(\omega t), \\ I_{z1} \ddot{\theta} - m_0 b_n \ddot{y}_1 - m_0 a_n b_n \ddot{\varphi} + C_x b_c^2 \theta &= -m_0 r \omega^2 b_n \cos(\omega t). \end{aligned} \quad (1)$$

В системе уравнений (1) принято

$$M = m + m_0; \quad I_{x1} = I_x + a_n^2 m_0; \quad I_{y1} = I_y + b_n^2 m_0. \quad (2)$$

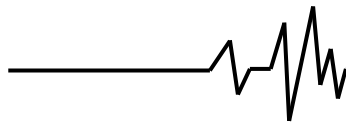
Остальные геометрические, жесткостные и массово-инерционные характеристики приведены на рис. 2.

Первое уравнение системы (1) является независимым и может решаться отдельно. Его решение принимаем в виде

$$q_1 = A \sin(\omega t), \quad (3)$$

$$\text{где } A = \frac{m_0 r \omega^2}{(C_x \sin \beta + C_z \cos \beta) - M \omega^2}.$$

Решение остальных трех уравнений, согласно методу неопределенных коэффициентов, принимаем в виде  $y = Y \cos \omega t$ ,  $\varphi = \Phi \cos \omega t$ ,  $\theta = \Theta \cos \omega t$ . (4)



Амплитудные значения линейных и угловых перемещений, в чисто упругой постановке задачи, будут иметь вид

$$\left. \begin{aligned}
 Y &= m_0 r \omega^2 \left\{ \begin{aligned}
 &\left[ 0,5 C_y (a_{c1}^2 + a_{c2}^2) - J_{x1} \omega^2 \right] (C_x b_c^2 - J_{z1} \omega^2) - \\
 &- 3 (m_0 a_n b_n \omega^2)^2 + \\
 &+ m_0 \omega^2 \left[ a_n^2 (C_x b_c^2 - J_{z1} \omega^2) + b_n^2 (0,5 C_y (a_{c1}^2 + b_{c1}^2) - J_{x1} \omega^2) \right] \end{aligned} \right\} * Z_n^{-1}, \\
 \Phi &= m_0 r \omega^2 \left\{ \begin{aligned}
 &m_0 a_n b_n^2 \omega^4 - a_n (C_y - M \omega^2) (C_x b_c^2 - J_{z1} \omega^2) - \\
 &- m_0 a_n \omega^2 \left[ (C_x b_c^2 - J_{z1} \omega^2) - b_n^2 (C_y - M \omega^2) \right] \end{aligned} \right\} * Z_n^{-1}, \\
 \Theta &= m_0 r \omega^2 \left\{ \begin{aligned}
 &m_0 a_n^2 b_n \omega^4 - b_n (C_y - M \omega^2) (0,5 C_y (a_{c1}^2 + a_{c2}^2) - J_{z1} \omega^2) - \\
 &- m_0 b_n \omega^2 \left[ (0,5 C_y (a_{c1}^2 + a_{c2}^2) - J_{z1} \omega^2) - a_n^2 (C_y - M \omega^2) \right] \end{aligned} \right\} * Z_n^{-1}.
 \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Знаменатель в выражении (5) определится зависимостью

$$\begin{aligned}
 Z_n &= (C_y - M \omega^2) \left\{ \left[ 0,5 C_y (a_{c1}^2 + a_{c2}^2) - J_{x1} \omega^2 \right] (C_x b_c^2 - J_{z1} \omega^2) - (m_0 a_n b_n \omega^2) \right\} - \\
 &- (C_x b_c^2 - J_{z1} \omega^2) (m_0 a_n \omega^2)^2 - \left[ 0,5 C_y (a_{c1}^2 + a_{c2}^2) - J_{x1} \omega^2 \right] (m_0 b_n \omega^2)^2 + \\
 &+ 2 m_0^3 (a_n b_n)^2 \omega^5.
 \end{aligned} \quad (6)$$

Неупругие сопротивления, согласно гипотезе Бокка-Шлиппе, будем считать пропорциональными первой степени скорости деформации упругих связей и не зависящими

от частоты деформации. Это созвучно с понятием комплексного модуля упругости, введенного Е.С. Сорокиным [7]. Для нашего случая это будет выглядеть как:

$$\bar{C}_x = C_x (1 + i \lambda_c), \quad \bar{C}_y = C_y (1 + i \lambda_c), \quad \bar{C}_z = C_z (1 + i \lambda_c), \quad (7)$$

где  $\lambda_c$  – коэффициент внутреннего трения. Коэффициент  $\lambda_c$  связан с коэффициентом поглощения энергии  $\psi$  и декрементом затухания колебаний  $\delta$  соотношением

$$2 \pi \lambda_c = \psi = 2 \delta. \quad (8)$$

Подставляя комплексные величины (7) в выражения (3), (5) и (6), получим комплексные значения амплитуд колебаний  $\bar{A}, \bar{Y}, \bar{\Phi}, \bar{\Theta}$ .

Действительные значения амплитуд и сдвиг фаз колебаний определяются как модуль и аргумент комплексного числа

$$\begin{aligned}
 A &= |\bar{A}|, Y = |\bar{Y}|, \Phi = |\bar{\Phi}|, \Theta = |\bar{\Theta}|, \\
 \alpha A &= \arg(\bar{A}), \alpha Y = \arg(\bar{Y}), \alpha \Phi = \arg(\bar{\Phi}), \alpha \Theta = \arg(\bar{\Theta}).
 \end{aligned} \quad (9)$$

Тогда перемещения по координатам будут иметь вид

$$\begin{aligned}
 q_1 &= A \sin(\omega t + \alpha A), \quad y = Y \cos(\omega t + \alpha Y), \\
 \phi &= \Phi \cos(\omega t + \alpha \Phi), \quad \theta = \sin(\omega t + \alpha \Theta).
 \end{aligned} \quad (10)$$

На рис. 3, а представлена амплитудно-частотная характеристика линейных и поворотных колебаний грохота. Как следует из рисунка, в зоне резонанса наблюдается резкое возрастание амплитуд колебаний грохота. В

зоне рабочих частот колебаний (100 рад/с) амплитуды колебаний стабилизируются. Также в этом диапазоне стабилизируются и фазные характеристики системы (рис. 3, б).

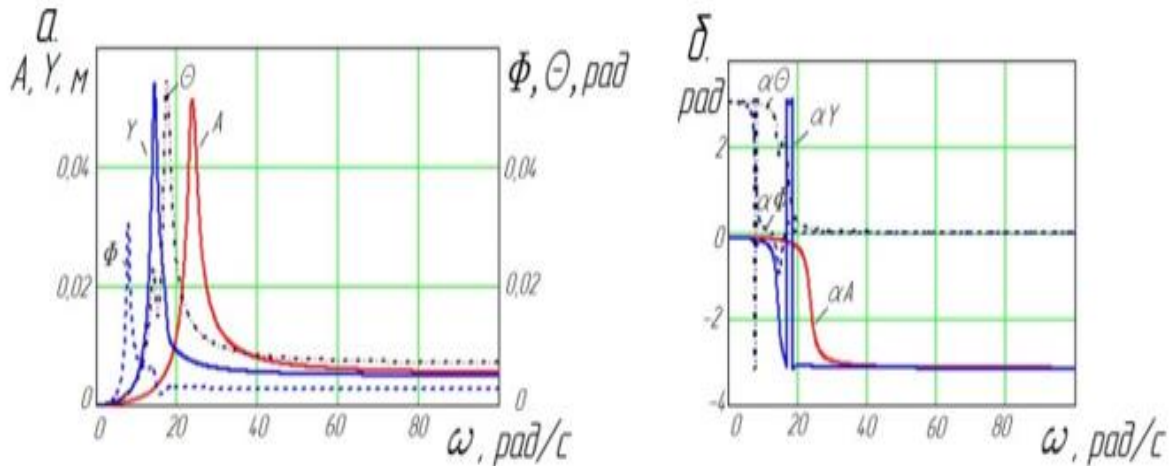
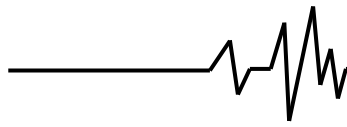


Рис. 3. Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики грохота

Рассмотрим движение материала на цилиндрическую форму (рис. 2, 4). Считаем, что грохот работает в рабочем режиме  $\omega = 100 \text{ рад/с}$ .

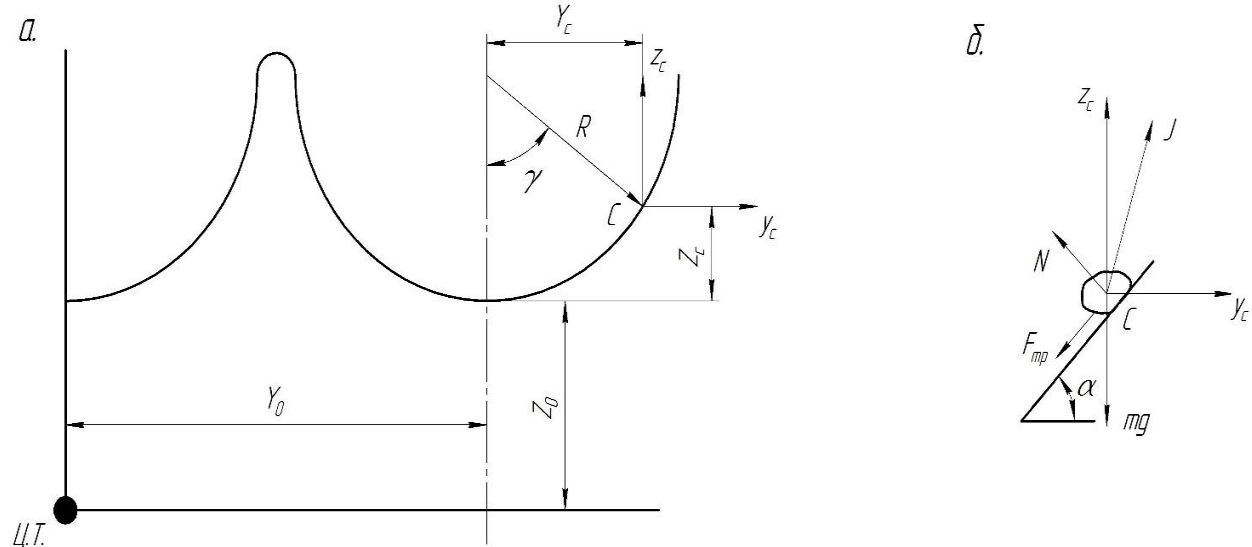


Рис. 4. Расчетная схема для определения движения материала на поверхности грохота

Движение поверхности грохота в точке С по координатам  $x$ ,  $y$  и  $z$  с учетом разложения  $q_1$  по горизонтали и вертикали и движения по координатам  $y$ ,  $\varphi$  и  $\theta$ , запишется как (координата  $x_c$  нормальна к плоскости  $uoz$  и на рисунке не обозначена)

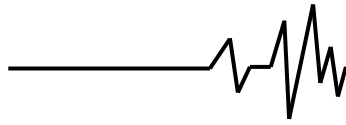
$$\begin{aligned} x_c &= q_1 \cos \beta + (Y_0 + Y_c) \varphi, \\ y_c &= y + X_c \varphi + (Z_0 + Z_c) \theta, \\ z_c &= q_1 \sin \beta + (Y_0 + Y_c) \theta. \end{aligned}$$

где

$$A_{xc} = \sqrt{\left[ A \cos \beta \sin (\alpha A) - (Y_0 + Y_c) \Phi \cos (\alpha \Phi) \right]^2 + \left[ A \cos \beta \cos (\alpha A) - (Y_0 + Y_c) \Phi \sin (\alpha \Phi) \right]^2},$$

Подставляя значения  $q_1$ ,  $y$ ,  $\varphi$  и  $\theta$  из (3) и (4) с учетом (5), (6), (7) и (9), складывая гармоники колебаний, получим значения перемещений в точке С в виде:

$$\begin{aligned} x_c &= A_{xc} \sin (\omega t + \vartheta_{xc}), \\ y_c &= A_{yc} \cos (\omega t + \vartheta_{yc}), \\ z_c &= A_{zc} \cos (\omega t + \vartheta_{zc}), \end{aligned} \quad (11)$$



$$A_{yc} = \sqrt{\left[ Y \cos(\alpha Y) + X_c \Phi \cos(\alpha \Phi) - (Z_0 + Z_c) \Theta \cos(\alpha \Theta) \right]^2 + \left[ Y \sin(\alpha Y) + X_c \Phi \sin(\alpha \Phi) - (Z_0 + Z_c) \Theta \sin(\alpha \Theta) \right]^2}, \quad (12)$$

$$A_{zc} = \sqrt{\left[ A \sin \beta \sin(\alpha A) + (Y_0 + Y_c) \Theta \cos(\alpha \Theta) \right]^2 + \left[ (Y_0 + Y_c) \Theta \sin(\alpha \Theta) - A \sin \beta \cos(\alpha \Theta) \right]^2},$$

а углы сдвига фаз

$$\vartheta_{xc} = \arctg \left[ \frac{A \cos \beta \sin(\alpha A) - (Y_0 + Y_c) \Phi \cos(\alpha \Phi)}{A \cos \beta \cos(\alpha A) - (Y_0 + Y_c) \Phi \sin(\alpha \Phi)} \right],$$

$$\vartheta_{yc} = \arctg \left[ \frac{Y \sin(\alpha Y) + X_c \Phi \sin(\alpha \Phi) - (Z_0 + Z_c) \Theta \sin(\alpha \Theta)}{Y \cos(\alpha Y) + X_c \Phi \cos(\alpha \Phi) - (Z_0 + Z_c) \Theta \cos(\alpha \Theta)} \right], \quad (13)$$

$$\vartheta_{zc} = \arctg \left[ \frac{(Y_0 + Y_c) \Theta \sin(\alpha \Theta) - A \sin \beta \cos(\alpha \Theta)}{A \sin \beta \sin(\alpha A) + (Y_0 + Y_c) \Theta \cos(\alpha \Theta)} \right].$$

Рассмотрим движение материала по поверхности грохота.

Материал под действием вибраций будет двигаться с отрывом от рабочей поверхности вдоль грохота к месту разгрузки (вдоль оси  $x$ ), и в поперечном направлении (в плоскости  $uoz$ , рис. 4).

Обозначив  $\xi_{mx}$  – движение материала вдоль оси  $x$ ;  $\xi_{mp}$ ,  $\xi_{mn}$  – движение материала вдоль и по нормали к поверхности грохота в т. С;  $\xi_{cp}$ ,  $\xi_{cn}$  – движение грохота вдоль и по нормали к поверхности в т. С,  $\alpha_1$  – угол наклона поверхности грохота в сторону разгрузки;  $\alpha$  – угол наклона поверхности грохота в т. С в плоскости  $uoz$  (в данном случае  $\alpha = \gamma$ ), составим его уравнения движения в виде:

$$m \ddot{\xi}_{mx} = m \ddot{x}_c + m g \sin \alpha_1 - F_{mp},$$

$$m \ddot{\xi}_{mp} = m \ddot{\xi}_{cp} - m g \sin \alpha - F_{mp}, \quad (14)$$

$$m \ddot{\xi}_{mn} = m \ddot{\xi}_{cn} - m g \cos \alpha + N.$$

Движение по образующей рабочей поверхности в т. С будет равно:

$$\xi_{cp} = y_c \cos \alpha + z_c \sin \alpha = A_{cp} \sin(\omega t + \vartheta_{cp}), \quad (15)$$

а движение по нормали к этой поверхности:

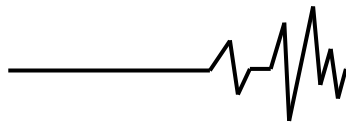
$$\xi_{cn} = y_c \sin \alpha + z_c \cos \alpha = A_{cn} \sin(\omega t + \vartheta_{cn}), \quad (16)$$

где амплитуды:

$$A_{cp} = \sqrt{\left[ A_{yc} \cos(\vartheta_{yc}) \cos \alpha + A_{zc} \cos(\vartheta_{zc}) \sin \alpha \right]^2 + \left[ A_{yc} \sin(\vartheta_{yc}) \cos \alpha + A_{zc} \sin(\vartheta_{zc}) \sin \alpha \right]^2}, \quad (17)$$

$$A_{cn} = \sqrt{\left[ A_{yc} \cos(\vartheta_{yc}) \sin \alpha + A_{zc} \cos(\vartheta_{zc}) \cos \alpha \right]^2 + \left[ A_{yc} \sin(\vartheta_{yc}) \sin \alpha + A_{zc} \sin(\vartheta_{zc}) \cos \alpha \right]^2}, \quad (18)$$

$$\vartheta_{cp} = \arctg \frac{A_{yc} \sin(\vartheta_{yc}) \cos \alpha + A_{zc} \sin(\vartheta_{zc}) \sin \alpha}{A_{yc} \cos(\vartheta_{yc}) \cos \alpha + A_{zc} \cos(\vartheta_{zc}) \sin \alpha}, \quad (19)$$



$$\vartheta_{cn} = \arctg \frac{A_{yc} \sin(\vartheta_{yc}) \sin \alpha + A_{zc} \sin(\vartheta_{zc}) \cos \alpha}{A_{yc} \cos(\vartheta_{yc}) \sin \alpha + A_{zc} \cos(\vartheta_{zc}) \cos \alpha}. \quad (20)$$

Параметры движения материала определится из уравнений (14) при следующих начальных условиях:

$$\xi_{mx} = \xi_{mp} = \xi_{mn} = 0, \dot{\xi}_{mx} = \dot{\xi}_{mp} = \dot{\xi}_{mn} = 0, N = 0, F_{mp} = 0 \text{ при } t = t_0. \quad (21)$$

Принимая во внимание, что в момент отрыва материала от поверхности грохота  $\ddot{\xi} = 0$  из третьего уравнения (14) после подстановки (16), получим

$$\sin(\omega t_0 + \vartheta_{cn}) = \frac{g \cdot \cos \alpha}{\omega^2 A_{cn}}, \text{ откуда, } \psi_0 = \omega t_0 = \arcsin\left(\frac{1}{\Gamma_c}\right) - \vartheta_{cn}, \quad (22)$$

$$\text{где } \Gamma_c = \frac{A_{cn} \cdot \omega^2}{g \cdot \cos \alpha} \text{ - коэффициент} \quad \sin(\psi_0 + \vartheta_{cn}) - \sin(\psi_B + \vartheta_{cn}) - \frac{1}{2} \frac{(\psi_B - \psi_0)^2}{\Gamma_c} + \quad (23)$$

режима вибротранспортирования.

Интегрируя третье уравнение (14), учитывая, что после полета материал контактирует с поверхностью грохота ( $\xi_{mn}=0$ ) при времени  $t_s$  ( $\psi_s = \omega t_s$ ), получим уравнение для определения времени (фазного угла) встречи

$$+(\psi_B - \psi_0) \cos(\psi_0 + \vartheta_{cn}) = 0.$$

Интегрируя далее уравнения 1 и 2 системы (14) при начальных условиях (21) выражения для перемещения материала вдоль продольной оси грохота и вдоль образующей ручья

$$\xi_{mx} = A_{xc} \left[ \begin{aligned} &\sin(\psi_0 + \vartheta_{xc}) - \sin(\psi_B + \vartheta_{xc}) + \frac{1}{2} \frac{g(\psi_B - \psi_0)^2}{A_{xc} \omega^2} \sin(\alpha_1) + \\ &+(\psi_B - \psi_0) \cos(\psi_0 + \vartheta_{xc}) \end{aligned} \right], \quad (24)$$

$$\xi_{mp} = A_{cp} \left[ \begin{aligned} &\sin(\psi_B + \vartheta_{cp}) - \sin(\psi_0 + \vartheta_{cp}) + \frac{1}{2} \frac{(\psi_B - \psi_0)^2}{\Gamma_c} \operatorname{tg}(-\alpha) - (\psi_B - \psi_0) \cos(\psi_0 + \vartheta_{cp}) \end{aligned} \right].$$

При  $\psi = \psi_B$  получим перемещение  $\Delta \xi_{mx}$  и  $\Delta \xi_{mp}$  материала. Средняя скорость перемещения материала определится как:

$$v_{mx} = \frac{\omega}{2\pi p} \Delta \xi_{mx}, \quad v_{mp} = \frac{\omega}{2\pi p} \Delta \xi_{mp}, \text{ т.е.}$$

$$v_{mx} = \frac{\omega}{2\pi p} A_{xc} \left[ \begin{aligned} &\sin(\psi_0 + \vartheta_{xc}) - \sin(\psi_B + \vartheta_{xc}) + \frac{1}{2} \frac{g(\psi_B - \psi_0)^2}{A_{xc} \omega^2} \sin(\alpha_1) + \\ &+(\psi_B - \psi_0) \cos(\psi_0 + \vartheta_{xc}) \end{aligned} \right], \quad (25)$$

$$v_{mp} = \frac{\omega}{2\pi p} A_{cp} \left[ \begin{aligned} &\sin(\psi_B + \vartheta_{cp}) - \sin(\psi_0 + \vartheta_{cp}) + \frac{1}{2} \frac{(\psi_B - \psi_0)^2}{\Gamma_c} \operatorname{tg}(-\alpha) - \\ &-(\psi_B - \psi_0) \cos(\psi_0 + \vartheta_{cp}) \end{aligned} \right].$$

На рис. 5 представлены графики (рис. 5,а) и поперечном направлениях в зависимости от скорости в продольном (рис. 5,б) расстояния до центра тяжести грохота по оси x.

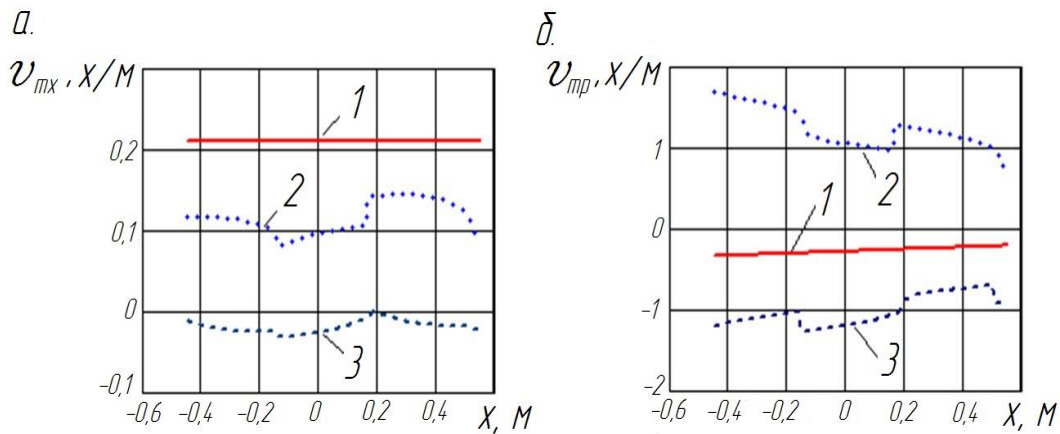


Рис. 5. Графики скорости движения материала в продольном ( $v_{mx}$ ) и поперечном ( $v_{mp}$ ) направлениях от положения на продольной оси грохота:  
1 – в средней части потока материала в ручье; 2, 3 – по краям потока

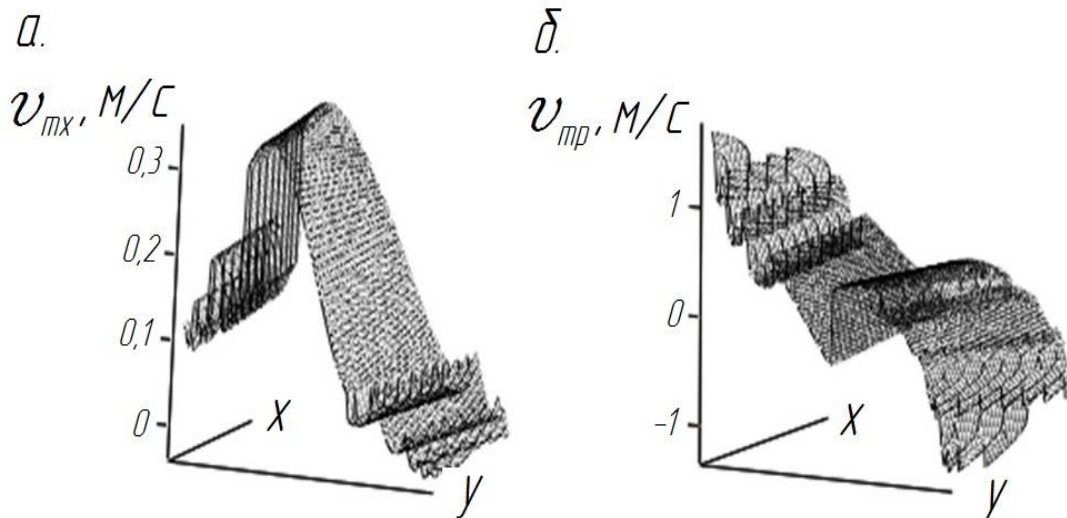


Рис. 1. Скорость движения материала в сторону разгрузки (а) и в направлении, нормальном к оси  $x$  (б)

Как следует из рисунка 6, в продольном направлении материал в общей массе движется равномерно в сторону разгрузки, несколько уменьшаясь к краю потока. Что же касается движения в поперечном направлении, то здесь наблюдается большая разница в скоростях движения материала в центральной части и по краям потока, вследствие чего материал интенсивно перемешивается, что способствует процессу классификации.

Это наглядно следует из рис. 6. Поток материала вдоль оси  $x$  со скоростью до 0,2 м/с в сторону разгрузки (рис. 6, а). Что же касается движения в плоскости  $yoz$  (рис. 6, б), то здесь наблюдается некоторая хаотичность движения с изменением знака скорости, что способствует интенсивному перемешиванию материала.

**Заключение.** Грохот с пространственными колебаниями рабочей поверхности, предназначен для классификации мелкодисперсного сыпучего материала, обеспечивает его движение вдоль рабочей поверхности в сторону разгрузки. Грохот работает в далеко зарезонансном режиме, совершает гармонические колебания по трем координатным осям и поворотные колебания вокруг продольной и вертикальной оси. Благодаря пространственным колебаниям рабочей поверхности и ее ручейковой конструкции, в поперечном направлении материал совершает хаотичные движения, обеспечивающие переворачивание потока. Это приводит к повышению производительности и эффективности работы грохота.



**Список использованных источников**

1. Надутый В. П., Лапшин Е.С. Кинетика грохочения с переменным вибровозбуждением по длине просеивающей поверхности / В.П. Надутый, Е.С. Лапшин // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: Зб. наук. праць – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – Вип. 38. – С. 11-18.

2. Тищенко Л.Н. К расчёту колебаний неоднородного слоя зерновой смеси на виброрешете / Л.Н. Тищенко, В.П. Ольшанский, С.В. Ольшанский // Вибрации в технике и технологиях. – 2011. – № 1(61). – С. 182-185.

3. Тищенко Л.Н. Колебания скорости сепарированной зерновой смеси при поперечных вибрациях плоского решета / Л.Н. Тищенко, В.П. Ольшанский, С.В. Ольшанский // Вибрации в технике и технологиях. – 2012. – № 1(65). – С. 119-122.

4. Франчук В.П. Особенности работы грохота со сложным движением рабочей поверхности / В.П. Франчук, В.А. Федоскин, А.И. Егурнов // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. НГА України – Дніпропетровськ, 2000 – Вип. 9 (50). – С. 107- 113.

5. Франчук В.П. Лабораторные испытания грохота с пространственными колебаниями / В.П. Франчук, В.А. Федоскин, В.Ф. Куница // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. ДВНЗ «НГУ». – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 33 (74). – С. 61-65.

6. Патент України 106274 С2 В07В 1/40 (2006.01) В07В 1/46 (2006.01). Вібраційний грохот / В.П. Франчук, В.О. Федосін, В.Ф. Куниця. – № 201212439; заяв. 30.10.2012; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 3.

7. Е.С. Сорокин К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем. – М.: Госстройиздат. – 1960 – 131 с.

**Список использованных источников в транслитерации**

1. Naduty, V.P., & Lapshin, E.S. (2008). Kinetika grokhocheniya s peremennym vibrovzbuzhdeniem po dline proseivayuschey poverhnosti [Screening kinetics with variable vibration excitation along the length of the screening surface]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «HPІ»* – Bulletin of the National Technical University «KhPI», 38, 11-18 [in Ukrainian].

2. Tischenko, L.N., Olshanskiy, V.P., & Olshanskiy, S.V. (2011). K raschetu kolebaniy neodnorodnogo sloya zernovoy smesi na vibroreshete [To the calculation of oscillations of an inhomogeneous layer of the grain mixture on the vibrating screen] *Vibratsii v tekhnitke i*

*tekhnologiyakh – Vibrations in technics and technologies*, 1(61), 182-185 [in Ukrainian].

3. Tischenko, L.N., Olshanskiy, V.P., & Olshanskiy, S.V. (2012). Kolebaniya skorosti separiruemoy zernovoy smesi pri poperechnykh vibratsiyah ploskogo resheta [Fluctuations in the speed of the grain mixture being separated during transverse vibrations of a flat sieve] *Vibratsii v tekhnitke i tekhnologiyakh – Vibrations in technics and technologies*, 1(65), 119-122 [in Ukrainian].

4. Franchuk, V.P., Fedoskin, V.A., & Yegurnov, A.I. (2000). Osobennosti raboty grokhota so slozhnym dvizheniyem rabochey poverkhnosti [Features of the screen with a complex movement of the working surface] *Zbagachennya korisnikh kopalyn: Nauk.- tekhn. zb. NGA Ukrayini – Extraction of minerals: Scientific and technical collection of NMA of Ukraine*, Dnepropetrovsk – 9(50), 107- 113 [in Ukrainian].

5. Franchuk, V.P., Fedoskin, V.A., & Kuniytsya, V.F. (2008). Laboratornyye ispytaniya grokhota s prostranstvennyimi kolebaniyami [Laboratory tests screen with spatial oscillations] *Zbagachennya korisnikh kopalyn: Nauk.- tekhn. zb. NGU – Extraction of minerals: Scientific and technical collection of NMU*, Dnepropetrovsk, Vip 33(74), 61- 65 [in Ukrainian].

6. Patent Ukrainy 106274 S2 V07V 1/40 (2006.01) V07V 1/46 (2006.01). Vibratsiyni hrokhot [Vibrating screen] / V.P. Franchuk, V.O. Fedosin, V.F. Kuniytsia. – № 201212439; zaiav. 30.10.2012; opubl. 10.02.2014, Biul. № 3.

7. Sorokin, E.S. (1960). K teorii vnutrennego treniya pri kolebaniyakh uprugikh sistem [On the theory of internal friction when vibrations of elastic systems]. Moskva: Gosstroyizdat [in Russian].

**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ  
МАТЕРІАЛУ  
ПО РОБОЧІЙ ПОВЕРХНІ ГРОХОТУ  
З ПОЗДОВЖНИМИ РИФЛЯМИ**

Розглянуто рух грохоту з одновальним інерційним вібровозбуджувачем, розташованим у вертикальній площині. Робоча поверхня має поздовжні кругові рифлі. Складені диференціальні рівняння руху коробки і побудовані амплітудні характеристики. На їх основі отримано аналітичні залежності, що визначають параметри руху частинок по довжині робочої поверхні в межах однієї рифлі. Показано, що завдяки просторовим коливанням робочої поверхні в поперечному напрямку інтенсифікується хаотичний рух матеріалу, що прискорює його перемішування в шарі.

**Ключові слова:** грохот, вібрація, просторові коливання, кругові рифлі, рух матеріалу



**DETERMINATION OF MATERIAL MOVEMENT  
PARAMETERS ON THE SCREEN WORKING  
SURFACE  
WITH LONGITUDINAL RIFFLES**

The motion of a screen with a single-acting inertial exciter located in the vertical plane is considered. The working surface has longitudinal circular furrows. Differential equations of the working box motion are composed and the

amplitude characteristics are plotted. The analytical dependences that determine the parameters of the particles motion along the working surface length within a single furrow are obtained on their basis. It is shown; that the chaotic motion of the material intensifies and accelerates it's mixing in the layer, due to the spatial vibrations of the working surface in the transverse direction.

**Keywords:** screen, vibration, spatial oscillations, circular riffles, material movement

**Сведения об авторах**

**Франчук Всеволод Петрович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горных машин и инжиниринга, Национальный технический университет «Днепровская политехника», (пр. Дмитрия Яворницкого, 19, г. Днепр, Украина, 40005, e-mail: vpfranchuk@gmail.com).

**Анциферов Александр Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры горных машин и инжиниринга, Национальный технический университет «Днепровская политехника», (пр. Дмитрия Яворницкого, 19, г. Днепр, Украина, 49005, e-mail: antsiferovo@nmu.org.ua).

**Куница Василий Федорович**, инженер-механик кафедры горных машин и инжиниринга, Национальный технический университет «Днепровская политехника», пр. Дмитрия Яворницкого, 19, г. Днепр, Украина, 40005, e-mail: kunitsa-v@ukr.net).

**Франчук Всеволод Петрович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри гірничих машин та інжинірингу, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» (НТУ«ДП»), (пр. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, e-mail: vpfranchuk@gmail.com).

**Анциферов Олександр Володимирович**, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри гірничих машин та інжинірингу, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» (НТУ«ДП»), (пр. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, e-mail: antsiferovo@nmu.org.ua).

**Куница Василь Федорович**, інженер-механік кафедри гірничих машин та інжинірингу, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» (НТУ «ДП»), (пр. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 40005, e-mail: kunitsa-v@ukr.net).

**Franchuk Vsevolod Petrovich**, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Professor, Professor in department of mining machines and engineering, National Technical University «Dnipro Polytechnic» (NTU «DP»), (av. Dmitro Yavornitskyi, 19, Dnepr, Ukraine, e-mail: vpfranchuk@gmail.com).

**Antsyferov Alexandr Vladimirovich**, Candidate of Technical Sciences (Ph. D), Docent, Docent in department of mining machines and engineering, National Technical University «Dnipro Polytechnic» (NTU «DP»), (av. Dmitro Yavornitskyi, Dnipro, Ukraine, e-mail: antsiferovo@nmu.org.ua).

**Kunitsa Vasiliy Fedorovich**, mechanical engineer in department of mining machines and engineering, National Technical University «Dnipro Polytechnic» (NTU «DP»), (av. Dmitro Yavornitskyi, 19, Dnepr, Ukraine, e-mail: kunitsa-v@ukr.net).