

УДК 622.73

С.Л. Букин, канд. техн наук, доц., А.С. Букина, студ.
Донецкий национальный технический университет, Украина
Тел./Факс: +38 (062) 301-07-47, E-mail: S.Bukin08@gmail.com

ДИНАМИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИНЕРЦИОННОЙ БИГАРМОНИЧЕСКОЙ ВИБРОМЕЛЬНИЦЫ НОВОГО ТИПА

Рассматривается принципиально новая конструкция горизонтальной вибрационной мельницы с бигармоническим возбуждением колебаний. Составлены принципиальная схема и уравнения движения рабочей массы в стационарном режиме. Изучаются динамические параметры вибромельницы, такие как ускорения помольной трубы и траектории ее движения. Установлено, что сложное неоднородное поле колебаний помольной трубы вибромельницы может быть создано двумя дебалансными виброприводами, вращающимися с разными угловыми скоростями и внецентренно установленными на помольной трубе. Изменяя частоты вращения, модули возбуждающих сил, а также реверсируя один из электродвигателей привода вибровозбудителей, можно управлять в широком диапазоне силовым воздействием на помольные тела и измельчаемый материал.

Ключевые слова: вибромельница, бигармонические колебания, инерционный вибровозбудитель, внецентренная установка, численный анализ.

Введение

Тонкое измельчение материалов находит широкое использование в строительной, горнорудной, металлургической, пищевой, химической и других отраслях промышленности. Для тонкого измельчения наибольшее распространение получили измельчители истирающе-раздавливающего действия (жерновые измельчители, бегуны, катково-тарельчатые мельницы, шаро-кольцевые мельницы, бисерные мельницы), ударного действия (бильные мельницы, шахтные мельницы, дезинтеграторы и дисмембраторы, центробежные мельницы, барабанные мельницы, газоструйные мельницы) и ударно-истирающего действия (вибрационные мельницы, планетарные мельницы, гироскопические мельницы, коллоидные мельницы, виброкавитационные мельницы и др.) [1].

Анализ многочисленных исследований по тонкому измельчению позволяет сделать вывод, что наиболее эффективным средством для получения продукта с гранулометрическим составом -50 мкм при исходном питании крупностью 2...10 мм и относительно небольшой производительности (до 10 т/ч) является вибрационная мельница. Применение вибрационных мельниц по сравнению с другими типами мельниц позволяет уменьшить расход электроэнергии, повысить производительность, уменьшить износ помольных тел и помольной трубы, использовать помольные тела из различных материалов, достичь высокой тонины помола, получить более чистый конечный продукт, осуществлять процесс измельчения в вакууме, инертной среде, при разных температурах [2].

Наиболее распространены инерционные однострубные, двухтрубные и многотрубные горизонтальные вибромельницы с гармоническими однородными колебаниями по траекториям, близким к кругу или эллипсу. Круговая циркуляция помольных тел, возникающая за счет однородного поля траекторий движения корпуса помольной трубы, не создает достаточно интенсивного перемешивания помольных тел

и измельчаемого материала. Вследствие этого образуются застойные зоны, происходит сегрегация помольных тел и измельчаемого материала, что является существенным недостатком вибрационных мельниц указанного типа.

Интенсификация процесса тонкого измельчения может идти по ряду направлений, одним из которых является реализация в конструкциях вибромельниц горизонтального типа двумерных и трехмерных сложных колебаний, возбуждающих переменную скорость движения мелющих тел [3], использование мельниц с нетрадиционной формой рабочей камеры. Эти инновации позволяют «турбулизировать» движение загрузки, вовлечь в процесс т.н. малоподвижное ядро и, в конечном счете, значительно снизить энергозатраты процесса измельчения [4].

Так, например, в ФРГ разработана конструкция вибрационной горизонтальной мельницы с неоднородным полем колебаний рабочего органа за счет возбуждения гармонических колебаний внецентренно установленным дебалансным вибровозбудителем [5]. Благодаря существенным технологическим преимуществам, по сравнению с центрированными системами [6], эта вибромельница получила широкое распространение при измельчении разнообразных материалов и послужила аналогом для производства практически идентичных машин во многих странах мира.

В последние годы экспериментальными исследованиями установлено и промышленной практикой подтверждено, что полигармонический состав рабочего воздействия на обрабатываемый технологический продукт существенно более эффективен, чем простой гармонический [7]. Чем богаче спектральный состав используемых вибрационных воздействий, тем выше достоверность формирования в структурах обрабатываемой среды высокоэффективных резонансных и близких к резонансным режимам перемещений и деформаций, и тем шире обхват активного объема [8].

Однако в результате сложности формирований поличастотных режимов колебаний на данном этапе развития вибрационной техники в качестве достаточно простого, но эффективного решения, могут быть успешно использованы бигармонические режимы работы.

Таким образом, исследования, способствующие разработке новых конструкций вибромельниц, интенсифицирующих тонкое измельчение разнообразных материалов, носят актуальный характер.

Цель и задачи исследования. Возможность создания неоднородного поля бигармонических колебаний рабочего органа горизонтальной вибрационной мельницы.

Достижение поставленной цели требует выполнения ряда задач:

- разработка расчетной схемы вибрационной бигармонической вибромельницы;
- разработка математической модели движения рабочего органа в стационарном режиме;
- анализ полученных результатов, формулирование дальнейших направлений исследования.

Основное содержание.

Рассматриваемая вибрационная мельница нового типа (рис. 1) состоит из рабочего органа, включающего помольную трубу 1 и помольные тела 2, который соединен при помощи опорных упругих элементов 3 с неподвижным основанием 4.

Мельница снабжена двумя дебалансными виброприводами 5, каждый из которых включает приводной вал 6 с индивидуальным приводом вращения 7, выполненным с возможностью независимого изменения угловой скорости и направления вращения приводного вала и дебалансов 8.

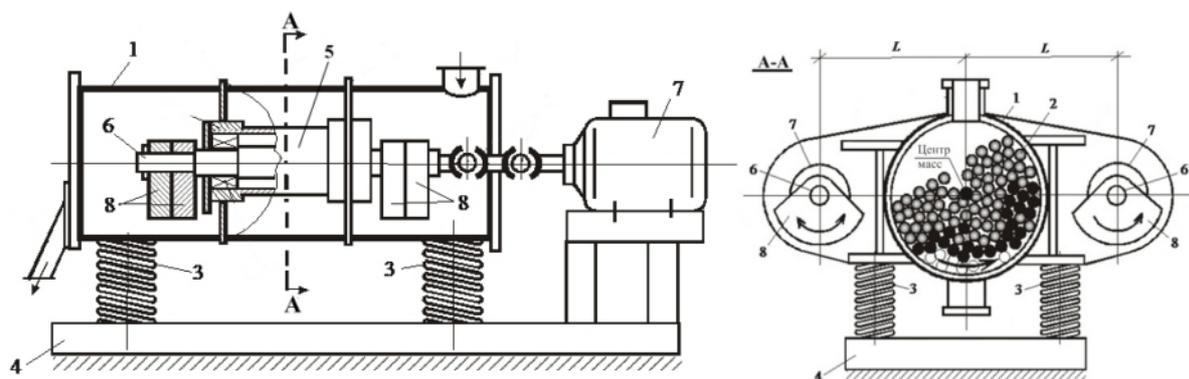


Рис. 1. Конструкция бигармонической вибромельницы

Общий вид 3D-модели экспериментального образца бигармонической вибромельницы приведен на рис. 2.

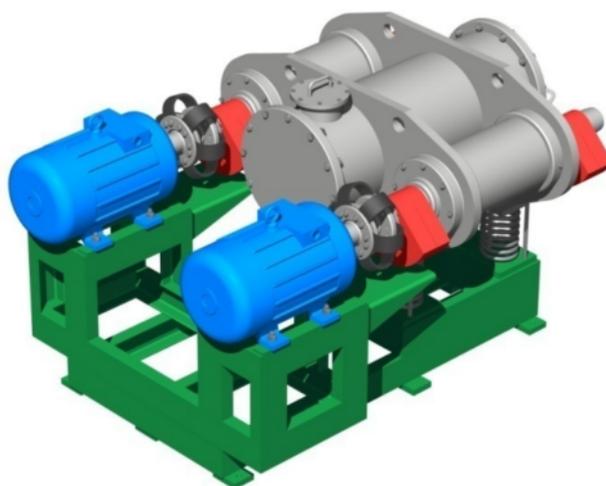


Рис. 2. 3D-модель экспериментального образца вибромельницы

Для исследования динамических параметров бигармонической вибромельницы разработаем расчетную схему (рис. 3) и математическую модель колебательной системы. Принимаем следующие допущения:

- система имеет вертикальную продольную плоскость симметрии, что позволяет изучать только плоское движение рабочей массы вибромельницы в вертикальной поперечной плоскости;
- помольная труба представляет собой абсолютно твердое тело;
- деформации упругих элементов виброизоляторов осуществляются в пределах их линейных характеристик;
- влиянием технологической нагрузки на первоначальном этапе пренебрегаем.

Введем следующие обозначения. Помольная труба мельницы, заполненная мелющими телами, имеет массу m^* и центральный момент инерции I^* . Опорные виброизоляторы характеризуются приведенными коэффициентами жесткости и диссипации по осям X и Y соответственно c_x, c_y и b_x, b_y , а также на кручение (по координате ψ) - c_ψ и b_ψ . Так как составляющие коэффициентов диссипации близки друг к другу, можно принять $b_x=b_y=b_\psi=b$. Статические моменты масс центробежных вибровозбудителей m_1r_1 и m_2r_2 , а их центральные моменты инерции – I^*_1 и I^*_2 .

Коэффициенты $\sigma_1=1$ и $\sigma_2=1$ учитывают направление вращения вибровозбудителей. Начало неподвижной системы координат XOY поместим в точку O , совпадающей с центром масс мельницы в статически равновесном положении. Центр жесткости опорных виброизоляторов помещен в точку O^* с координатами e и s в системе координат XOY , а оси вращения вибровозбудителей O_1 и O_2 определяются координатами l_1, h_1 и l_2, h_2 .

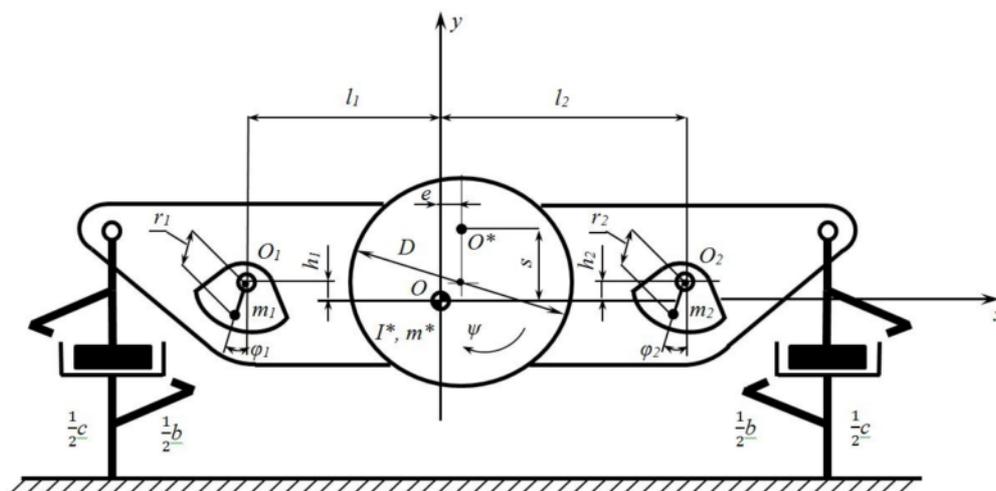


Рис. 3. Расчетная схема вибромельницы нового типа

Положения подвижных тел на плоскости в любой момент времени однозначно определяются совокупностью обобщенных координат: абсолютными смещениями центра масс рабочего органа x и y , абсолютным углом его поворота вокруг центра O - ψ , а также отклонением дебалансов вибровозбудителей от вертикали - φ_1 и φ_2 .

При составлении уравнений движения воспользуемся уравнением Лагранжа второго рода. Для этого определяем кинетическую T и потенциальную Π энергии, а также функцию рассеяния энергии Φ в виде диссипативной функции Рэлея.

Для практических целей представляет интерес исследование динамических параметров вибромельницы в стационарном режиме, который характеризуется средними (постоянными) угловыми скоростями вращения валов возбуждителей колебаний, т.е. $\dot{\varphi}_1 = \omega_1 = const$, $\dot{\varphi}_2 = \omega_2 = const$, $\dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_2 = 0$.

Используя уравнение Лагранжа второго рода, в итоге получим уравнения движения рабочей массы мельницы по трем обобщенным координатам:

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + c_x(\mu\dot{x} + x) &= m_1 r_1 \sigma_1 \omega_1^2 \cos \omega_1 t + m_2 r_2 \sigma_2 \omega_2^2 \cos \omega_2 t, \\ M\ddot{y} + c_y(\mu\dot{y} + y) &= -m_1 r_1 \sigma_1 \omega_1^2 \sin \omega_1 t - m_2 r_2 \sigma_2 \omega_2^2 \sin \omega_2 t, \\ I\ddot{\psi} + c_\psi(\mu\dot{\psi} + \psi) &= m_1 r_1 \omega_1^2 (l_1 \sin \omega_1 t - h_1 \cos \omega_1 t) + \\ &+ m_2 r_2 \omega_2^2 (l_2 \sin \omega_2 t - h_2 \cos \omega_2 t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $M = m^* + m_1 + m_2$, $I = I^* + m_1(l_1^2 + h_1^2) + m_2(l_2^2 + h_2^2)$, $c_x = c_{x1} + c_{x2}$, $c_y = c_{y1} + c_{y2}$, $c_\psi = c_{x1}l_1^2 + c_{y1}h_1^2 + c_{x2}l_2^2 + c_{y2}h_2^2$.

Используя принцип суперпозиции, систему уравнений (1) можно представить в матричной форме

$$\begin{cases} \mathbf{A}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\mathbf{q} = \mathbf{D}'_1 \sin\omega_1 t + \mathbf{D}'_2 \cos\omega_1 t; \\ \mathbf{A}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\mathbf{q} = \mathbf{D}''_1 \sin\omega_2 t + \mathbf{D}''_2 \cos\omega_2 t, \end{cases} \quad (2)$$

где \mathbf{A} - массив инерционных элементов

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} M & 0 & m_1 h_1 + m_2 h_2 \\ 0 & M & -(m_1 l_1 + m_2 l_2) \\ m_1 h_1 + m_2 h_2 & -(m_1 l_1 + m_2 l_2) & I \end{bmatrix},$$

\mathbf{C} – массив коэффициентов жесткости

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_y & 0 & e_y c_y \\ 0 & c_x & -e_x c_x \\ e_y c_y & -e_x c_x & e_x^2 c_x + e_y^2 c_y + c_\phi \end{bmatrix},$$

\mathbf{B} – массив диссипативных элементов

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{C},$$

\mathbf{D} – векторы возбуждающих сил

$$\mathbf{D}'_1 = \begin{bmatrix} 0 & -m_1 r_1 \sigma_1 \omega_1^2 & -h_1 m_1 r_1 \sigma_1 \omega_1^2 \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{D}'_2 = \begin{bmatrix} -m_1 r_1 \sigma_1 \omega_1^2 & 0 & -l_1 m_1 r_1 \sigma_1 \omega_1^2 \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{D}''_1 = \begin{bmatrix} 0 & -m_2 r_2 \sigma_2 \omega_2^2 & -h_2 m_2 r_2 \sigma_2 \omega_2^2 \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{D}''_2 = \begin{bmatrix} -m_2 r_2 \sigma_2 \omega_2^2 & 0 & -l_2 m_2 r_2 \sigma_2 \omega_2^2 \end{bmatrix}^T.$$

При возбуждении колебаний рабочей массы первой ступенью вибратора ($\omega = \omega_1$) достаточно ограничиться отысканием частных решений вида

$$\mathbf{q}' = \mathbf{H}'_1 \sin\omega_1 t + \mathbf{H}'_2 \cos\omega_1 t, \quad (3)$$

где транспонированные матрицы

$$\mathbf{q}' = [x'; y'; \psi']^T; \mathbf{H}'_1 = [h'_{11}; h'_{12}; h'_{13}]^T; \mathbf{H}'_2 = [h'_{21}; h'_{22}; h'_{23}]^T.$$

Из (3) получим

$$\dot{\mathbf{q}}' = \mathbf{H}'_1 \omega_1 \cos\omega_1 t - \mathbf{H}'_2 \omega_1 \sin\omega_1 t, \quad \ddot{\mathbf{q}}' = -\mathbf{H}'_1 \omega_1^2 \sin\omega_1 t - \mathbf{H}'_2 \omega_1^2 \cos\omega_1 t. \quad (4)$$

Подставив выражения (3) и (4) в (2), имеем в окончательном виде

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C} - \mathbf{A}\omega^2 & -\mathbf{B}\omega \\ \mathbf{B}\omega & \mathbf{C} - \mathbf{A}\omega^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{H}'_1 \\ \mathbf{H}'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}'_1 \\ \mathbf{D}'_2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Аналогично, решение системы (5), соответствующее работе второй ступени вибратора ($\omega = \omega_2$), имеет вид

$$\mathbf{q}'' = \mathbf{H}''_1 \sin\omega_2 t + \mathbf{H}''_2 \cos\omega_2 t,$$

где

$$\mathbf{q}'' = [x''; y''; \psi'']^T; \mathbf{H}_1'' = [h_{11}''; h_{12}''; h_{13}'']^T; \mathbf{H}_2'' = [h_{21}''; h_{22}''; h_{23}'']^T.$$

В общем виде движение колеблющейся массы по обобщенным координатам описывается выражением

$$\mathbf{q} = \mathbf{q}' + \mathbf{q}''.$$

В таком виде решение системы (5) сводится к решению шести линейных алгебраических уравнений.

Важнейшими динамическими параметрами вибротельницы, во многом определяющими технологические показатели ее работы, являются уровень ускорений попольной трубы и траектории ее движения.

Проекции перемещений произвольной i -той точки S_i попольной трубы с координатами $A_i; B_i$, определяем из выражений

$$x_{S_i} = x' + x'' + B_i(\psi' + \psi'') = (h'_{11} + B_i h'_{13}) \cos(\sigma_1 \omega_1 t) + (h'_{21} + B_i h'_{23}) \sin(\sigma_1 \omega_1 t) + (h''_{11} + B_i h''_{13}) \cos(\sigma_2 \omega_2 t) + (h''_{21} + B_i h''_{23}) \sin(\sigma_2 \omega_2 t),$$

$$y_{S_i} = y' + y'' - A_i(\psi' + \psi'') = (h'_{12} - B_i h'_{13}) \cos(\sigma_1 \omega_1 t) + (h'_{22} - B_i h'_{23}) \sin(\sigma_1 \omega_1 t) + (h''_{12} - B_i h''_{13}) \cos(\sigma_2 \omega_2 t) + (h''_{22} - B_i h''_{23}) \sin(\sigma_2 \omega_2 t). \tag{6}$$

Дважды продифференцировав (6) по времени, получим выражения для определения ускорений i -той точки S

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{S_i} &= -\omega_1^2 [(h'_{11} + B_i h'_{13}) \cos(\sigma_1 \omega_1 t) + (h'_{21} + B_i h'_{23}) \sin(\sigma_1 \omega_1 t)] - \\ &\quad - \omega_2^2 [(h''_{11} + B_i h''_{13}) \cos(\sigma_2 \omega_2 t) + \omega_2 (h''_{21} + B_i h''_{23}) \sin(\sigma_2 \omega_2 t)], \\ \ddot{y}_{S_i} &= -\omega_1^2 [(h'_{12} - B_i h'_{13}) \cos(\sigma_1 \omega_1 t) + (h'_{22} - B_i h'_{23}) \sin(\sigma_1 \omega_1 t)] - \\ &\quad - \omega_2^2 [(h''_{12} - B_i h''_{13}) \cos(\sigma_2 \omega_2 t) + (h''_{22} - B_i h''_{23}) \sin(\sigma_2 \omega_2 t)]. \end{aligned} \tag{7}$$

После решения системы уравнений (5) в среде Mathcad 14 рассматривались вибрационные процессы и параметры колебаний (траектории колебаний, виброперемещения, виброускорения вдоль осей X, Y) в пяти характерных точках попольной трубы вибротельницы (рис. 4).

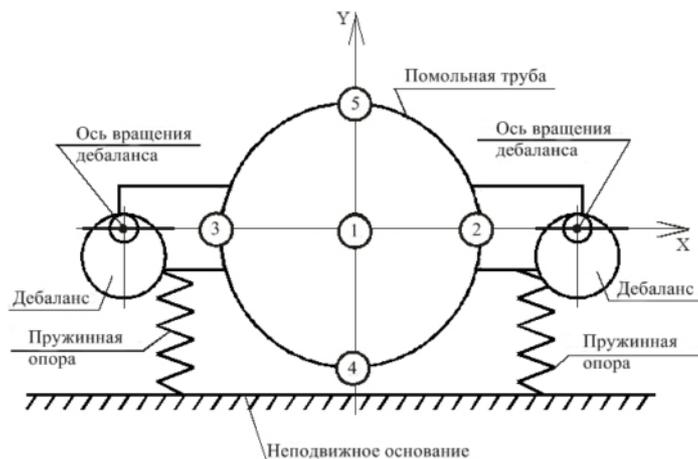


Рис. 4. Характерные точки исследования динамических параметров

В качестве исходных данных для расчета приняты конструктивные параметры, соответствующие параметрам экспериментального образца вибромельницы (табл. 1).

Таблица 1. Параметры исследуемого объекта

№ п/п	Наименование параметра, размерность	Обозначение	Величина
1.	Масса рабочего органа с вибровозбудителями, кг	M	1300
2.	Масса неуравновешенных частей вибратора первой ступени, кг	m_1	50
3.	Масса неуравновешенных частей вибратора второй ступени, кг	m_2	50
4.	Смещение оси вращения вибратора первой ступени по оси X, м	l_1	-0,75
5.	Смещение оси вращения вибратора первой ступени по оси Y, м	h_1	0
6.	Смещение оси вращения вибратора второй ступени по оси X, м	l_2	0,75
7.	Смещение оси вращения вибратора второй ступени по оси Y, м	h_2	0
8.	Эксцентриситет неуравновешенных частей вибратора первой ступени, м	r_1	0,08
9.	Эксцентриситет неуравновешенных частей вибратора второй ступени, м	r_1	0,06; 0,04
10.	Центральный момент инерции рабочего органа, кг*м ²	I^*	1560
11.	Центральный момент инерции вибратора первой ступени, кг*м ²	I_1	10
12.	Центральный момент инерции вибратора второй ступени, кг*м ²	I_2	10
13.	Коэффициент жесткости 1-й пары упругих элементов опорных виброизоляторов по оси X, Н/м	c_{x1}	20000
14.	Коэффициент жесткости 1-й пары упругих элементов опорных виброизоляторов по оси Y, Н/м	c_{y1}	20000
15.	Коэффициент жесткости 2-й пары упругих элементов опорных виброизоляторов по оси X, Н/м	c_{x2}	20000
16.	Коэффициент жесткости 2-й пары упругих элементов опорных виброизоляторов по оси Y, Н/м	c_{y2}	20000
17.	Координата 1-го упругого элемента по оси X, м	x_1	0,75
18.	Координата 1-го упругого элемента по оси Y, м	y_1	0
19.	Координата 2-го упругого элемента по оси X, м	x_2	-0,75
20.	Координата 2-го упругого элемента по оси Y, м	y_2	0
21.	Коэффициент внутренних сопротивлений упругих элементов, с	μ	0,0008
22.	Скорость вращения вибратора первой ступени, рад/с	ω_1	100
23.	Скорость вращения вибратора второй ступени, рад/с	ω_2	150; 200
24.	Направление вращения вибратора первой ступени	σ_1	-1; 1
25.	Направление вращения вибратора второй ступени	σ_2	1

Таблиця 2. Траєкторії колибаний характерних точок вибромельниці при варьировании основных параметров вибраторов

Варьируемые параметры	Точка измерения				
	1	2	3	4	5
$\sigma_1=1$ $\sigma_2=1$ $\omega_1=1.00$ $\omega_2=1.50$ $r_1=0.08$ $r_2=0.06$					
$\sigma_1=1$ $\sigma_2=1$ $\omega_1=1.00$ $\omega_2=1.50$ $r_1=0.08$ $r_2=0.06$					
$\sigma_1=1$ $\sigma_2=1$ $\omega_1=1.00$ $\omega_2=2.00$ $r_1=0.08$ $r_2=0.04$					
$\sigma_1=-1$ $\sigma_2=1$ $\omega_1=1.00$ $\omega_2=2.00$ $r_1=0.08$ $r_2=0.04$					

Таблица 3. Виброграммы ускорений в характерных точках вибромельницы при варьировании основных параметров вибраторов

Параметры	Точка измерения				
	1	2	3	4	5
$\sigma_1=1$ $\sigma_2=1$ $\omega_1=100$ $\omega_2=150$ $r_1=0.08$ $r_2=0.06$					
$\sigma_1=-1$ $\sigma_2=1$ $\omega_1=100$ $\omega_2=150$ $r_1=0.08$ $r_2=0.06$					
$\sigma_1=1$ $\sigma_2=1$ $\omega_1=100$ $\omega_2=200$ $r_1=0.08$ $r_2=0.04$					

Необходимо отметить, что в случае центрирования системы (центр жесткости и центр приложения возбуждающих сил совпадают с центром массы колебательной системы) при одинаковых статических моментах ($m_1r_1=m_2r_2=2 \text{ кг}\cdot\text{м}$), угловых скоростях ($\omega_1=\omega_2=100 \text{ рад/с}$) и направлении вращения обеих ступеней вибровозбудителей в одну сторону, получаем однородное поле круговых колебаний с амплитудой 3,1 мм. При тех же параметрах и направлении вращения вибровозбудителей в противоположные стороны поле траекторий также однородное, но линейного типа, амплитуда та же.

Неоднородное поле колебаний помольной трубы горизонтальной вибромельницы возможно создать путем установки двух центробежных вибровозбудителей дебалансного типа на диаметрально противоположных сторонах помольной трубы. Для возбуждения бигармонических колебаний угловые скорости вращения вибровозбудителей должны отличаться друг от друга. Как видно из рисунков табл. 2 и 3, практически все точки поперечного сечения помольной трубы рассматриваемой вибромельницы не имеют одинаковых параметров. Так как энергия колеблющейся помольной трубы передается от нее телам измельчения и, в конечном счете, измельчаемому материалу, сложное движение тел измельчения совместно с измельчаемым материалом позволяет устранить застойные зоны в рабочем пространстве помольной трубы, интенсифицировать процесс измельчения материала, увеличить производительность вибрационной мельницы.

Моделированием динамических процессов вибромельницы бигармонического типа установлено, что изменяя частоты вращения, модули возбуждающих сил, а также изменяя направление вращения одного из электродвигателей привода вибровозбудителей можно управлять в широком диапазоне силовым воздействием на помольные тела и измельчаемый материал. Этим расширяются возможности вибромельницы по созданию рациональных условий процесса измельчения конкретного измельчаемого материала, что в итоге способствует снижению энергоемкости процесса переработки и повышению удельной производительности.

Проведенные исследования послужили основой для подготовки заявок на выдачу патентов на изобретения Украины и Российской Федерации, на которые получены положительные решения государственных экспертиз. ДонНТУ совместно с ООО «НПК «УкрВиброМаш» (Украина), разработана конструкторская документация на экспериментальный образец бигармонической вибромельницы.

Заключение

Установлено, что для обеспечения условий повышения технологических показателей вибрационной горизонтальной мельницы сложное движение помольной трубы, может быть обеспечено неоднородным полем колебаний, создаваемых бигармоническим дебалансным виброприводом. Разработана конструкция инерционной вибромельницы нового типа. Предполагается дальнейшие исследования проводить в следующих направлениях:

- экспериментальное изучение динамических и энергетических показателей работы лабораторного образца вибромельницы;
- моделирование процесса измельчения в рабочем объеме помольной трубы бигармонической вибромельницы, например, при помощи хорошо зарекомендовавшего себя метода дискретных элементов EDEM [4];
- поиск рациональных технологических, динамических и конструктивных параметров мельницы при измельчении разнообразных материалов;
- исследования переходных процессов колебательной системы.

Список літератури:

1. Подрібнювання. Енергетика і технологія. / [Г.Г. Півняк, Л.А. Вайсберг, В.І. Кириченко та ін.]. - Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2006. – 314 с.
2. Мельницы вибрационные ООО "Вибротехцентр-КТ" [електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.vibrosom.ru/device/mills/mills.htm>.
3. Овчинников П.Ф. Новое оборудование для измельчения. / П.Ф. Овчинников, Н.Д. Орлова // Материалы конф. [«Теория и практика процессов измельчения и разделения»]. – Одесса, 1994. – С.36-40.
4. Методы динамики частиц и дискретных элементов как инструмент исследования и оптимизации процессов переработки природных и техногенных материалов. / [В.А. Арсеньев, И.И. Блехман, Л.И. Блехман и др.] // Обогащение руд. - 2010. - №1. - С. 30-35.
5. Патент ФРГ на изобретение № 3224117, B02C 19/16. Заявл. 29.06.1982.
6. Gock, E. Eccentric vibratory mills – theory and practice [електронний ресурс] / E. Gock, K.-E. Kurrer // Powder Technology. – 1999. - 105. - P. 302-310. – Режим доступу: <http://www.elsevier.com/locate/powtec/>
7. Интенсификация технологических процессов вибромашин путем реализации бигармонических режимов работы. / [С.Л. Букин, С.Г. Маслов, А.П. Лютыи, Г.Л. Резниченко] // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2009. – Вип. 36 (77) - 37 (78). – С. 81-89.
8. Гончаревич И.Ф. О повышении производительности и рентабельности промышленных нанотехнологий [Электронный ресурс]. - М.: РИА. Секция «Горное дело», 2010. – Режим доступу: <http://www.slaviza.ru/mashinostroenie/>.

Надійшла до редакції 31.01.2013.

С.Л. Букин, А.С. Букина
ДИНАМІЧНІ МОЖЛИВОСТІ ІНЕРЦІЙНОГО
БІГАРМОНІЙНОГО ВІБРОМЛИНА НОВОГО
ТИПУ

Розглядається принципово нова конструкція горизонтального вібраційного млина з бігармонічним збудженням коливаль. Складені принципова схема і рівняння руху робочої маси в стаціонарному режимі. Вивчаються динамічні параметри вібромлина, такі як прискорення помольної труби і траєкторії її руху. Встановлено, що складне неоднорідне поле коливаль помольної камери вібромлина може бути створено двома дебалансними віброприводами, що обертаються з різними кутівими швидкостями і позацентрово встановлені на помольній камері. Змінюючи частоти обертання, модулі збуджуючих сил, а також реверсуючи один з електродвигунів приводу віброзбудників можна керувати в широкому діапазоні силовою дією на помольні тіла і подрібнюваний матеріал.
Ключові слова: вібромлин, бігармонічні коливання, інерційний віброзбудник, позацентрова установка, траєкторії, прискорення, чисельний аналіз.

S.L. Bukin, A.S. Bukina
DYNAMIC POSSIBILITIES OF THE INERTIA
BIHARMONIC VIBRATORY MILL
OF NEW TYPE

A new design of horizontal vibratory mill with biharmonic excitation of oscillation is considered. A basic diagram and working mass motion equation is made in the stationary mode. The dynamic parameters are studied, such as acceleration of grinding single-pipe and trajectory of its motion. A complex nonuniform field of vibrations of vibratory mill grinding pipe can be created by two debalance vibrodrives, rotating with different angular velocities and eccentric set on a grinding pipe. Changing frequencies of rotation, modules of excitant forces, and also reverses one of electric motors of drive of vibroexciters it is possible to manage in a wide range power affecting grinding media (rods, balls, cylpebs) and different material for grinding media.
Key words: vibratory mill, biharmonic vibrations, inertia vibroexciter, eccentric setting, trajectories, accelerations, numerical analysis