УДК 622.764:621.928.6

А.Н. КОРЧЕВСКИЙ, канд. техн. наук
(Украина, Донецк, Государственное ВУЗ "Донецкий национальный технический университет")

ОПИСАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПОДВИЖНОЙ НАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ КАК РАБОЧЕГО ОРГАНА АППАРАТОВ ДЛЯ СЕПАРАЦИИ МАТЕРИАЛОВ

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. В последние годы возобновился интерес к гравитационным аппаратам, в которых основным рабочим органом является наклонная подвижная поверхность. К оборудованию, работающему по этому принципу, относятся концентрационные столы, где разделение идет в водной среде, а также вибрационные пневматические сепараторы, где разделение происходит в потоке воздуха. Параметры регулирования аппаратов, применяемых при сухой сепарации и в схемах с мокрыми методами обогащения, влияют на технологические результаты. Хотя указанное оборудование и применяется для обработки материалов, отличающихся свойствами и крупностью, но имеет сходные параметры конструирования, статики, кинематики и динамики, как мехатронной системы.

В связи с этим актуальной научно-практической задачей является рассмотрение кинематической схемы вибропневматического сепаратора и связи параметров перемещения деки с показателями разделения.

Анализ исследований и публикаций. Исследования многих авторов посвящены вопросам разработки теоретических основ разновидностей гравитационного разделения, которые хорошо согласуются с практическими результатами [1-3]. Для мелких зернистых материалов применяется разделение в тонком слое воды, текущей по подвижной наклонной поверхности – концентрация на столах. Этот метод имеет достаточно высокую эффективность для частиц размером 0,1-10 мм [1, 4, 5]. Для более крупных кусков в свое время широко использовалась сухая сепарация. В этих процессах движение частиц зависит от ряда параметров, одним из которых является перемещение наклонной плоскости, обеспечивающей разделение [6-8].

Постановка задачи. Целью данной работы является продолжение исследований по созданию математической модели параметров движения рабочих органов аппаратов с наклонной в пространстве подвижной декой.

Изложение материала и результаты. Вибропневматический сепаратор, как и концентрационный стол, представлен в виде мехатронной системы (рис. 1) [9]. Основная часть сепаратора – дека или рабочий орган (тело 1). Дека крепится к раме (неподвижное тело 2) с помощью четырех тяг, конструктивно реализованных в виде одинаковых цилиндрических стержней (тела 3, 4, 5, 6). Соединение стержней с декой и рамой осуществляется с помощью цилиндрических шарниров: стержни соединены с рамой с помощью шарниров O_1, O_2, O_3, O_4, а с декой посредством шарниров A, B, A_1, B_1.

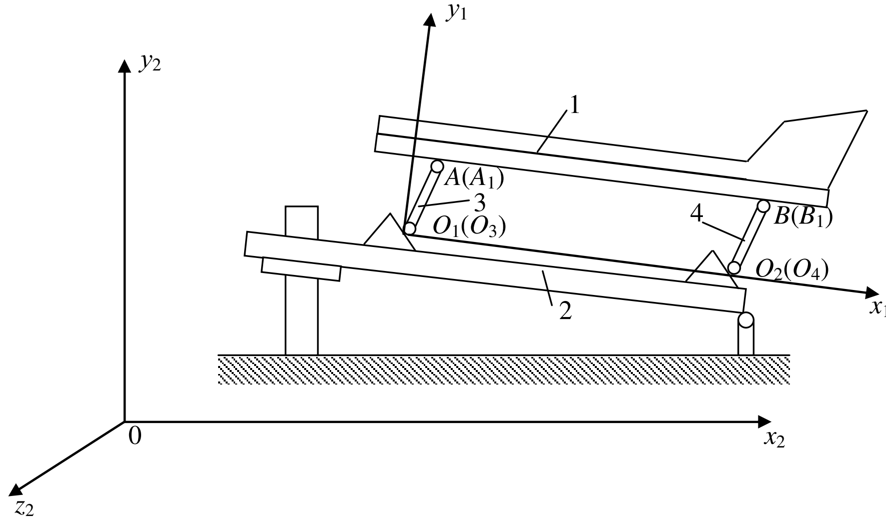

Рис. 1. Конструктивная схема механической системы сепаратора

В равновесном состоянии дека опирается шарнирно на ось электромотора, создающего в рабочем режиме ее вибрационные движения. Шарниры O_1 и O_2 перемещаются вдоль наклонной плоскости – рамы 2 с целью изменения углов наклона стержней к прямой, проходящей через точки O_1 O_2 (ось x_1) (рис. 1).

Рабочий орган системы, по которому перемещается разделяемый материал, совершает плоскопараллельное движение. В допущениях рассмотрения кинематической схемы вводится рассмотрение плоского сечения S в плоскости $O_1x_1y_1$ Для определения скорости любой точки деки рассмотрим точку $M(x,y)$ деки, радиус-вектор которой F, и вычислим ее скорость (рис. 2).

Введем базис $O_1\tau_1J_1K_1$ неподвижной системы координат $O_1x_1y_1$ и базис $A\tau J$ подвижной системы координат Axy (рис. 2), которые связаны уравнением

$$\bar{i}_1 = cos\,\varphi\bar{i} - sin\,\varphi\bar{j}\,, \tag{1}$$

$$\bar{j}_1 = sin\,\varphi\bar{i} + cos\,\varphi\bar{j}\,. \tag{2}$$

Представим вектор F в двух базисах:

$$F = x\bar{i} + y\bar{j}\,, \tag{3}$$

$$F = x_1\bar{i}_1 + y_1\bar{j}_1\,, \tag{4}$$

где величины x, y задаются, а величины x_1, y_1 вычисляются по формулам:

$$x_1 = x\,cos\,\varphi - y\,sin\,\varphi\,, \tag{5}$$

$$y_1 = x\,sin\,\varphi + y\,cos\,\varphi\,. \tag{6}$$

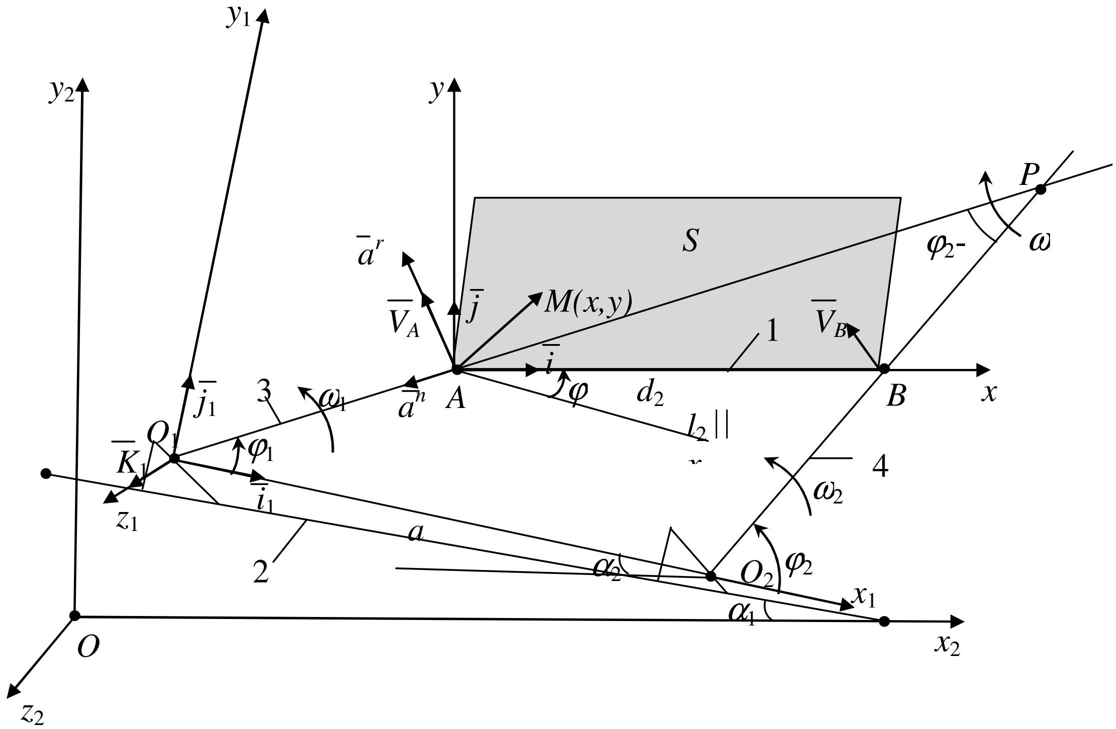

Рис. 2. Расчетная схема определения скорости полюса деки и ее угловой скорости

Согласно теореме о скоростях точек тела, совершающего плоское движение, скорость точки M равна

$$\bar{V} = \bar{V}_A + \bar{\omega} F \,, \tag{7}$$

где $\bar{V}_A$ – скорость полосы $\overline{V_A} = V_{Ax_1}\bar{i}_1 + V_{Ay_1}\bar{j}_1$; $\bar{\omega}$ – вектор угловой скорости деки: $\bar{\omega} = \omega \bar{k}_1$.

Проекции вектора $\overline{V_A}$ на оси x_1, y_1 равны

$$V_{Ax_1} = -l_1\omega_1 \sin\varphi \,, \tag{8}$$

$$V_{Ay_1} = -l_1\omega_1 \cos\varphi \,. \tag{9}$$

Тогда

$$\overline{V_A} = V_{Ax_1}\bar{i}_1 + V_{Ay_1}\bar{j}_1 + \begin{vmatrix} \bar{i}_1 & \bar{j}_1 & \bar{k}_1 \\ 0 & 0 & \omega \\ x_1 & y_1 & 0 \end{vmatrix}, \tag{10}$$

или $\overline{V_A} = V_{Ax_1}\bar{i}_1 + V_{Ay_1}\bar{j}_1 - \omega y_1\bar{i}_1 + \omega x_1\bar{j}_1$, или $\overline{V_A} = (V_{Ax_1} - \omega y_1)\bar{i}_1 + (V_{Ay_1} + \omega x_1)\bar{j}_1$.

Если представить вектор скорости $\overline{V_A}$ в виде $\overline{V_A} = V_{x_1}\bar{i}_1 + V_{y_1}\bar{j}_1$, то можно вычислить его проекции на оси x_1, y_1:

$$V_{x_1} = V_{Ax_1} - \omega y_1, \tag{11}$$

$$V_{y_1} = V_{Ay_1} - \omega x_1, \tag{12}$$

или

$$V_{x_1} = -l_1\omega_1 \sin\varphi - \omega(x\sin\varphi + y\cos\varphi), \tag{13}$$

$$V_{y_1} = l_1\omega_1 \sin\varphi + \omega(x\cos\varphi - y\sin\varphi). \tag{14}$$

Модуль или величину скорости любой точки деки вычисляем по формуле $V = (Vx_1^{2} + Vy_1^{2})^{1/2}$. Вычислим угловое ускорение деки $\varepsilon = \dot{\omega}$. Угловую скорость деки возьмем по формуле $\omega = \dot{\varphi}_1 - \frac{a_2 \sin\varphi_2}{\sqrt{1-(a_1 - a_2\cos\varphi_2)^2}}\dot{\varphi}_2$ и продифференцируем ее по времени:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - \frac{2a_2(\cos\varphi_2(1-(a_1-a_2\cos\varphi_2)^2) + a_2\sin^2\varphi_2(a_1-a_2\cos\varphi_2))\omega_2^2}{(1-(a_1-a_2\cos\varphi_2)^2)\sqrt{1-(a_1-a_2\cos\varphi_2)^2}} - \frac{a_2\sin\varphi_2}{\sqrt{1-(a_1-a_2\cos\varphi_2)^2}}\varepsilon_2, \tag{15}$$

где через ε_1 и ε_2 обозначены угловые ускорения тяг 0_1A и 0_2B: $\varepsilon_1 = \dot{\omega}_1$, $\varepsilon_2 = \dot{\omega}_2$.

Представим угловые ускорения цепи в виде:

$$\varepsilon = g_1\varepsilon_1 + g_2\varepsilon_2, \tag{16}$$

где $g_1 = \frac{2a_2(\cos\varphi_2(1-(a_1-a_2\cos\varphi_2)^2) + a_2\sin^2\varphi_2(a_1-a_2\cos\varphi_2))\omega_2^2}{(1-(a_1-a_2\cos\varphi_2)^2)^{\frac{3}{2}}}$,

$$g_2 = -\frac{a_2\sin\varphi_2}{\sqrt{1-(a_1-a_2\cos\varphi_2)^2}} \tag{17}$$

Тогда можно вычислить ускорение любой точки деки $M(x,y)$ с радиус-вектором $\bar{r} = x_1\bar{i}_1 + y_1\bar{j}_1$. Согласно теореме об определении ускорения точек тела, совершающего плоскопрямолинейное движение, ускорение точки M равно

$$\bar{a} = \bar{a}_A + \bar{a}_{AM}, \qquad (18)$$

где $\bar{a}_A$ – ускорение полосы A, $\bar{a}_{AM}$ – ускорение точки M во вращательном ее движении вокруг полюса A.

Ускорение полюса

$$\bar{a}_A = \bar{a}_A^{\bar{i}} + \bar{a}_A^n. \qquad (19)$$

Касательное ускорение полюса направлено перпендикулярно 0_1A и равно

$$a_A^{\bar{i}} = \varepsilon_1 l_1. \qquad (20)$$

Нормальное ускорение полюса A направлено по 0_1A к точке 0_1 и равно

$$a_A^n = \omega_1^2 l_1. \qquad (21)$$

Векторы $\bar{a}_A^{\bar{i}}$ и $\bar{a}_A^n$ разложим по базису $\bar{i}_1$ и $\bar{j}_1$:

$$\bar{a}_A^{\bar{i}} = a_{Ax_1}^{\bar{i}} \bar{i}_1 + a_{Ay_1}^{\bar{i}} \bar{j}_1; \qquad (22)$$

$$\bar{a}_A^n = a_{Ax_1}^n \bar{i}_1 + a_{Ay_1}^n \bar{j}_1, \qquad (23)$$

где $a_{Ax_1}^{\bar{i}} = -a_A^{\bar{i}} \sin\varphi_1$; $a_{Ay_1}^{\bar{i}} = -a_A^{\bar{i}} \cos\varphi_1$, $a_{Ax_1}^n = -a_A^n \cos\varphi_1$; $a_{Ay_1}^n = -a_A^{\bar{i}} \sin\varphi_1$.

Ускорение $\bar{a}_{AM}$ имеет вид:

$$\bar{a}_{AM} = \bar{a}_{AM}^{\bar{i}} + \bar{a}_{AM}^n, \qquad (24)$$

где

$$\bar{a}_{AM}^{\bar{i}} = \bar{\varepsilon} - \bar{r}, \quad \bar{a}_{AM}^n = \bar{\omega} \times (\bar{\omega} \times \bar{r}). \qquad (25)$$

Вектор углового ускорения

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon k_1. \qquad (26)$$

Распишем векторные произведения в проекциях на оси x_1, y_1:

$$\bar{\varepsilon}\times\bar{r}=\begin{vmatrix}\bar{i}_1 & \bar{j}_1 & \bar{k}_1\\ 0 & 0 & \varepsilon\\ x_1 & y_1 & 0\end{vmatrix}=-\varepsilon y_1\bar{i}_1+\varepsilon x_1\bar{j}_1,$$

$$\bar{\omega}\times\bar{r}=\begin{vmatrix}\bar{i}_1 & \bar{j}_1 & \bar{k}_1\\ 0 & 0 & \omega\\ x_1 & y_1 & 0\end{vmatrix}=-\omega y_1\bar{i}_1+\omega x_1\bar{j}_1,$$

$$\bar{\omega}\times(\bar{\omega}\times\bar{r})=\begin{vmatrix}\bar{i}_1 & \bar{j}_1 & \bar{k}_1\\ 0 & 0 & \omega\\ -\omega y_1 & \omega x_1 & 0\end{vmatrix}=-\omega^2 y_1\bar{i}_1-\omega^2 x_1\bar{j}_1.$$

Представим ускорение любой точки деки $\bar{a}$ согласно формулам (18-19), (24-25) в виде:

$$\bar{a}=\bar{a}_A^{\bar{i}}+\bar{a}_A^{n}+\bar{\varepsilon}\times\bar{r}+\bar{\omega}\times(\bar{\omega}\times\bar{r}). \qquad (27)$$

В базисе неподвижной системы координат $0_1x_1y_1$ ускорение имеет вид:

$$\bar{a}=a_{x_1}\bar{i}_1+a_{y_1}\bar{j}_1, \qquad (28)$$

где

$$a_{x_1}=a_{Ax_1}^{\bar{i}}+a_{Ax_1}^{n}-\varepsilon y_1-\omega^2 x_1,\; a_{y_1}=a_{Ay_1}^{\bar{i}}+a_{Ay_1}^{n}+\varepsilon x_1-\omega^2 y_1,\; x_1=x\cos\varphi-y\sin\varphi,$$
$$y_1=x\sin\varphi+y\cos\varphi.$$

Модуль ускорения любой точки деки будет

$$a=\sqrt{a_{x_1}^2+a_{y_1}^2}. \qquad (29)$$

Выводы и направления дальнейших исследований. Проведенные аналитические исследования движения деки и уравнения ее движения позволили получить выражения для определения скорости полюса деки и ее угловой скорости. Эти зависимости могут быть использованы при изучении перемещения зерен по поверхности деки. Дальнейшие исследования следует направить на установление связи параметров движения деки с показателями разделения различных материалов на наклонной подвижной поверхности.

Список литературы

1. Берт Р.О. Технология гравитационного обогащения. – М.: Недра, 1990. – 574 с.
2. А.Н. Корчевский. Исследование условий разделения лома цветных металлов гравитационными методами // Наукові праці ДонНТУ: Серія гірничо-електромеханічна. – 2008. – Вип. 15(131). – С. 98-104.
3. Исаев И.Н. Концентрационные столы: Монография. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 100 с.
4. Оборудование для обогащения угля: Справ. Пособие / Под ред. Б.Ф. Братченко. – М.: Недра, 1979. – 335 с.
5. Кизевальтер Б.В. Теоретические основы гравитационных процессов обогащения. М. Недра, 1979. – 296с.
6. Применение вибрационных пневматических сепараторов веерного типа при обогащении углей / Е.Е. Гарковенко, Е.И. Назимко, А.Н. Корчевский и др. // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2011. – Вип. 45(86). – С. 66-70.
7. А.Н. Корчевский. Исследование параметров движения частиц по наклонной подвижной поверхности // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2013. – Вип. 53(94). – С. 108-113.
8. Simulation of the Coal and Rock Particle Interaction Kinetics During the Dry Separation / O.I. Nazymko, E.E. Garkovenko, A.N. Corchevsky et al. // Proceedings of XVI ICCP. – USA, 2010. – P. 581-586.
9. А.Н. Корчевский. Исследование параметров перемещения наклонной подвижной поверхности, используемой для сепарации материалов // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2013. – Вип. 54(95). – С. 69-77.
10. Исследование работы вибрационного пневматического сепаратора / Е.Е. Гарковенко, Е.И. Назимко, А.Н. Корчевский и др. // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2011. – Вип. 45(86). – С. 78-84.

Надійшла до редколегії 10.02.2014 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. О.І. Назимко