

**А.Н. КОРЧЕВСКИЙ**, канд. техн. наук,  
(Украина, Донецк, 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 0,1-10мм [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  $A, B, A_1, B_1$ .

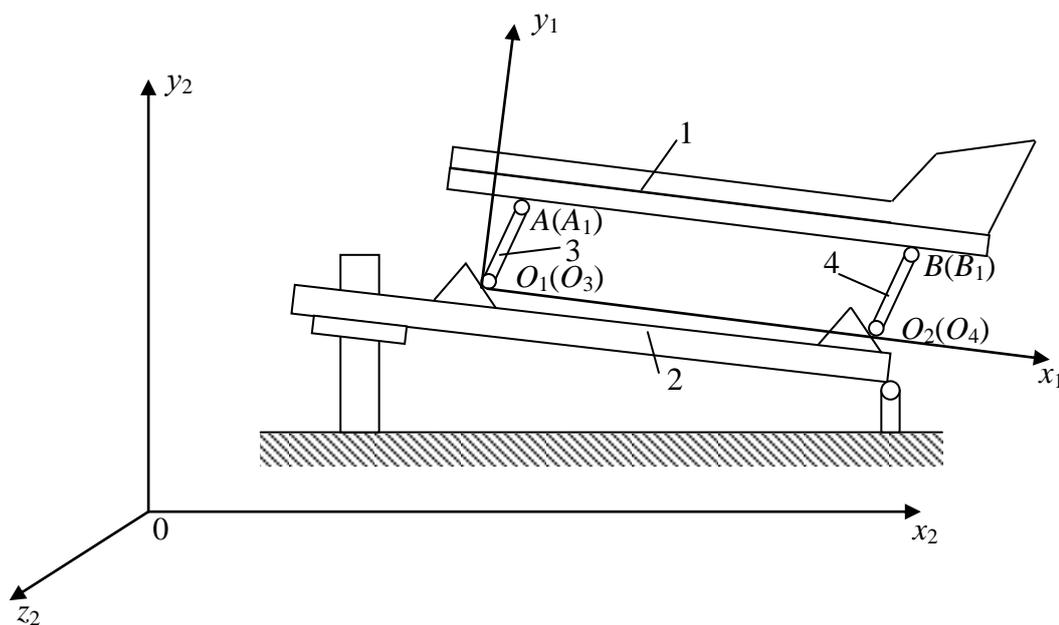


Рисунок 1. Конструктивная схема механической системы сепаратора

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 дека рассмотрим точку  $M(x,y)$  дека, 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

$$\bar{i}_1 = \cos \varphi \bar{i} - \sin \varphi \bar{j}, \quad (1)$$

$$\bar{j}_1 = \sin \varphi \bar{i} + \cos \varphi \bar{j}. \quad (2)$$

Представим вектор  $F$  в двух базисах:

$$F = x\bar{i} + y\bar{j}, \quad (3)$$

$$F = x_1\bar{i}_1 + y_1\bar{j}_1, \quad (4)$$

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

$$x_1 = x \cos \varphi - y \sin \varphi, \quad (5)$$

$$y_1 = x \sin \varphi + y \cos \varphi. \quad (6)$$

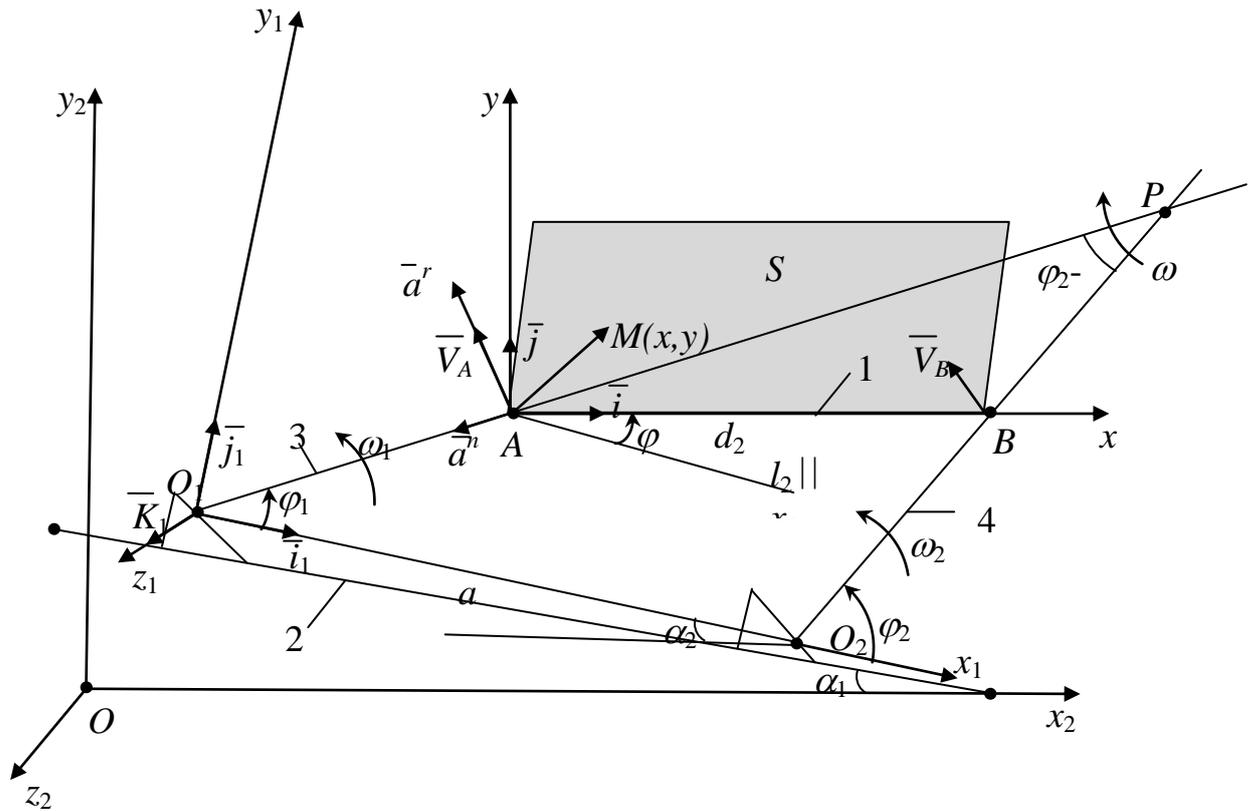


Рисунок 2. Расчетная схема определения скорости полюса деки и ее угловой скорости

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

$$\bar{V} = \bar{V}_A + \bar{\omega}F, \quad (7)$$

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

Проекции вектора  $\bar{V}_A$  на оси  $x_1, y_1$  равны

$$V_{Ax_1} = -l_1\omega_1 \sin \varphi, \quad (8)$$

$$V_{Ay_1} = -l_1\omega_1 \cos \varphi. \quad (9)$$

Тогда

$$\bar{V}_A = V_{Ax_1}\bar{i}_1 + V_{Ay_1}\bar{j}_1 + \begin{vmatrix} \bar{i}_1 & \bar{j}_1 & \bar{k}_1 \\ 0 & 0 & \omega \\ x_1 & y_1 & 0 \end{vmatrix}, \quad (10)$$

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

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

$$V_{x_1} = V_{Ax_1} - \omega y_1, \quad (11)$$

$$V_{y_1} = V_{Ay_1} - \omega x_1, \quad (12)$$

или

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

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

Модуль или величину скорости любой точки деки вычисляем по формуле  $V = (V_{x_1}^2 + V_{y_1}^2)^{1/2}$ . 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:

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

где через  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  обозначены угловые ускорения тяг  $O_1A$  и  $O_2B$ :  $\varepsilon_1 = \dot{\omega}_1$ ,  $\varepsilon_2 = \dot{\omega}_2$ .

Представим угловые ускорения цепи в виде:

$$\varepsilon = g_1 \varepsilon_1 + g_2 \varepsilon_2, \quad (16)$$

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

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

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

$$\vec{a} = \vec{a}_A + \vec{a}_{AM}, \quad (18)$$

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

$$\text{Ускорение полюса } \bar{a}_A = \bar{a}_A^i + \bar{a}_A^n. \quad (19)$$

Касательное ускорение полюса направлено перпендикулярно  $0_1A$  и равно

$$a_A^i = \varepsilon_1 l_1. \quad (20)$$

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

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

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

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

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

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

Ускорение  $\bar{a}_{AM}$  имеет вид:

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

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

$$\text{Вектор углового ускорения } \bar{\varepsilon} = \varepsilon k_1. \quad (26)$$

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:

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

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

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

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

Модуль ускорения любой точки деки будет

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

**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. Берг 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. Вип. 15(131), серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ. – 2008. – 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. Е.Е. Гарковенко и др. Применение вибрационных пневматических сепараторов веерного типа при обогащении углей / Гарковенко Е.Е., Назимко Е.И., Корчевский А.Н., Гарин Ю.М., Пархоменко А.В. / 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. O.I. Nazymko et al. Simulation of the Coal and Rock Particle Interaction Kinetics During the Dry Separation / Nazymko O.I., Garkovenko E.E., Corchevsky A.N., Nazymko V.V., Rozanov Y.A., Martyanov S.V. // *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. Е.Е. Гарковенко и др. Исследование работы вибрационного пневматического сепаратора / Гарковенко Е.Е., Назимко Е.И., Корчевский А.Н., Сурженко А.Н., Кадыров А.Р. //Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2011. - Вип. 45(86). - С. 78-84.

*Рукопись поступила в редакцию 11.02.14  
Рекомендована к опубликованию д.т.н. Назимко Е.И.*