

А.Н. КОРЧЕВСКИЙ, канд. техн. наук,
(Украина, Донецк, Донецкий национальный технический Университет)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НАКЛОННОЙ ПОДВИЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ДЛЯ СЕПАРАЦИИ МАТЕРИАЛОВ

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Известно, что гравитационные процессы являются наиболее экономически выгодными в связи с относительно невысокой стоимостью применяемого оборудования, простотой наладки, удовлетворительными результатами работы, широким спектром средств управления и автоматизации. Многочисленными исследованиями различных авторов разработаны теоретические основы разновидностей гравитационного разделения, хорошо согласующиеся с результатами практики. Каждый такой способ имеет свои специфические особенности, которые определяют параметры движения и разделения массы зерен с отличающимися свойствами. В целом ряде процессов сепарации различных материалов используются подвижные наклонные плоскости [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. Интерес к этому процессу в последнее время снова возобновился в связи с необходимостью предварительной переработки горной массы шахт для снижения зольности рядового угля и количества перевозимой пустой породы, а также при вторичной стадии утилизации породугольных отвалов, что является особенно актуальным в современных условиях. В этих процессах движение частиц зависит от ряда параметров, одним из которых является перемещение наклонной плоскости, обеспечивающей разделение.

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

Анализ исследований и публикаций. Использование метода вибропневматической сепарации позволяет создавать малогабаритные, компактные и мобильные обогатительные комплексы с круглогодичным циклом работы (МОК-СВП). При этом имеется возможность регулирования основных параметров процесса обогащения и автоматизированного управления. Положительным фактором является независимость от водных ресурсов и сооружений для складирования высоковлажных продуктов [6-9].

Разработки кафедры ОПИ ДПИ способствовали быстрому строительству и пуску фабрик с пневматическим методом обогащения на шахтах Ленинск-Кузнецка и Прокопьевска в двадцатом столетии. В тот период и позже работало 13 обогатительных фабрик и 10 обогатительных установок, которые ежегодно

перерабатывали более 30 млн. т углей или около 8% всех обогащаемых углей СССР [4].

Постановка задачи. Целью данной работы является исследование параметров перемещения деки вибропневматического сепаратора.

Изложение материала и результаты. Вибропневматический сепаратор представляет собой мехатронную систему, состоящую из механической, электрической частей и системы управления. Механическая часть сепаратора является системой твердых тел, соединенных специальными устройствами, называемыми в механике связями (рис. 1).

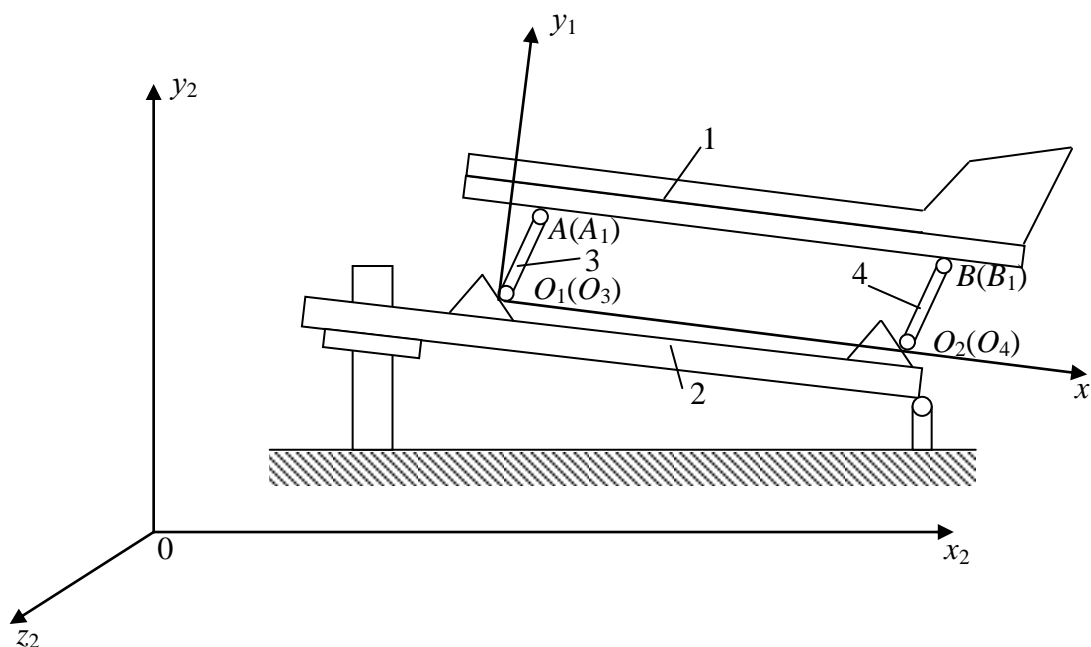


Рисунок 1. Конструктивная схема механической системы сепаратора

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 . В равновесном состоянии дека опирается шарнирно на ось электромотора, создающего в рабочем режиме вибрационные движения деки. Шарниры O_1 и O_2 могут перемещаться 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).

Дека совершает плоскопараллельное движение, так как конструкция не поворачивается вокруг вертикальной оси y_2 и перпендикулярной ей оси x_2 . Следовательно, все сечения механизма движутся в плоскостях параллельно неподвижной плоскости Ox_2y_2 одинаково. Достаточно рассмотреть движение одного такого сечения. Для удобства выбрано сечение, проходящее через тяги 3, 4. В плоскости этого сечения введена система координат Ox_1y_1 . При этом ось

x_1 направлена параллельно раме по отрезку O_1O_2 , ось y_1 перпендикулярно оси x_1 . Кинематическая схема сепаратора со всеми необходимыми для расчета значениями представлена на рис. 2.

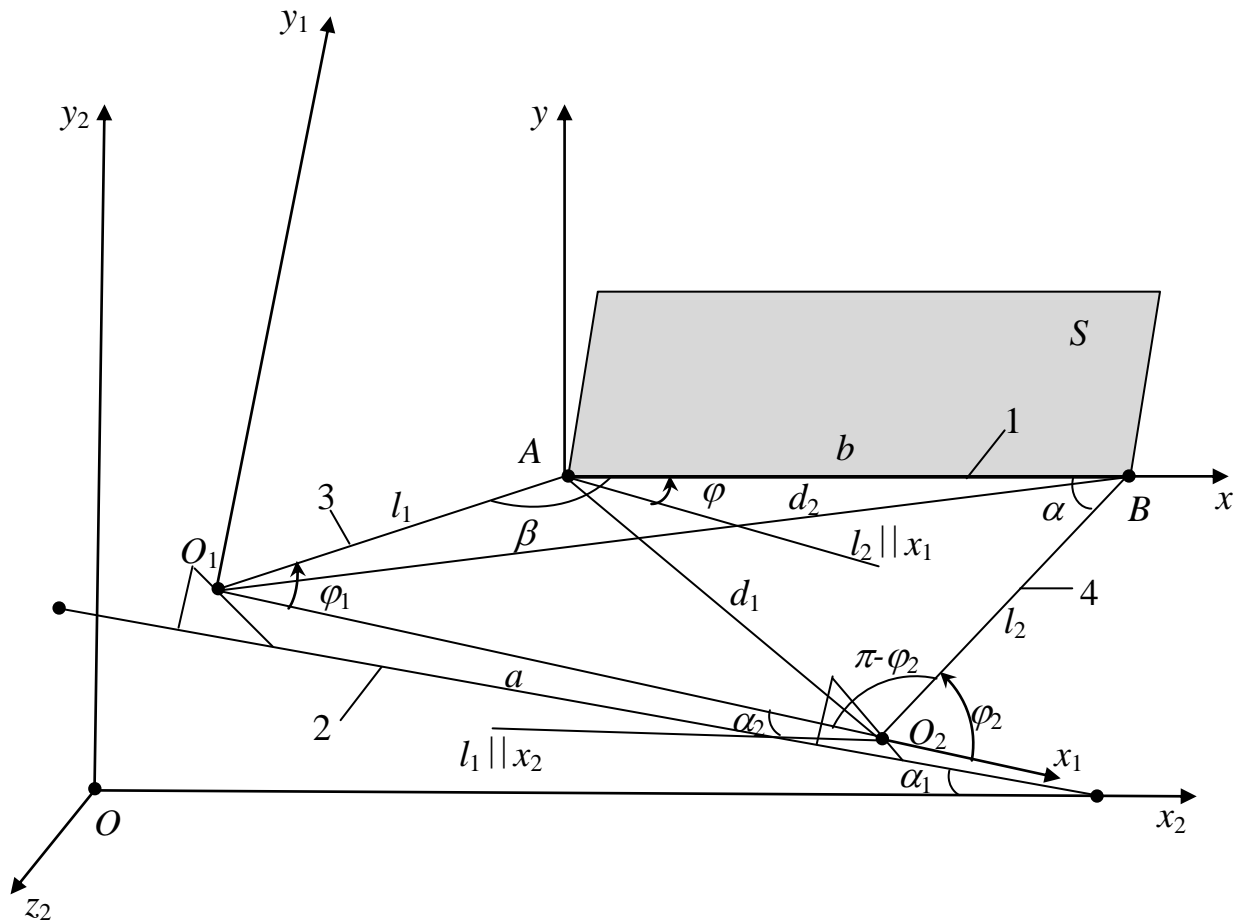


Рисунок 2. Кинематическая схема сепаратора

Для задания движения деки и уравнения ее движения необходимо рассмотреть движение деки в полученной системе координат. В связи с тем, что дека совершает плоское движение, достаточно рассмотреть движение ее сечения S в плоскости $O_1x_1y_1$ (рис. 2). Движение плоской фигуры можно задать с помощью координат ее полюса и угла поворота вокруг полюса. За полюс выбрана точка A . Ее координаты в неподвижной системе координат $O_1x_1y_1$ обозначены как x_A , y_A и определены по зависимостям:

$$\begin{aligned} x_A &= l_1 \cdot \cos \varphi_1; \\ y_A &= l_1 \cdot \sin \varphi_1, \end{aligned} \quad (1)$$

где l_1 – длина стержня O_1A , φ_1 – угол образуемый стержнем O_1A с осью x_1 ($\varphi_1 = \angle AO_1O_2$).

С плоскостью S связана подвижная система координат Axy , ось x которой направлена по линии AB , а ось y перпендикулярна ей.

Угол, образуемый осью x (или AB) с прямой l_2 параллельной x_1 , обозначен как φ . При движении механизма координаты x_A, y_A, φ являются функциями времени t :

$$x_A = x_A(t); \quad y_A = y_A(t); \quad \varphi = \varphi(t). \quad (2)$$

Уравнения (2) представляют собой уравнения или закон движения деки.

Для расчетов параметров приняты следующие обозначения для расстояний и углов: $l_1 = O_1A$ – длина теги 3 (стержня O_1A); $l_2 = O_2B$ – длина теги 4 (стержня O_2B); $a = O_1O_2$ – расстояние между шарнирами O_1 и O_2 ; $b = AB$ – расстояние между шарнирами A и B ; $d_1 = O_2A, d_2 = O_1B$ – диагонали четырехугольника O_1ABO_2 ; φ_2 – угол, образуемый стержнем O_2B с осью x_1 ; α_1 – угол, образуемый рамой 2 с осью x_2 ; α_2 – угол между осями x_1 и x_2 ; $\alpha = \angle ABO_2$; $\beta = \angle O_1AB$.

Рассматриваемая механическая система является системой с одной степенью свободы, ее положение можно задать с помощью угла φ_1 . Координаты полюса A вычисляются через значение угла φ_1 с помощью соотношений (1).

Выразим угол φ через угол φ_1 :

$$\varphi = \varphi_1 - (\pi - \beta). \quad (3)$$

Угол β может быть определен из треугольника O_1AB по теореме косинусов:

$$d_2^2 = l_1^2 + b^2 - 2l_1b \cos \beta.$$

Из треугольника ΔO_1BO_2 по теореме косинусов получено:

$$d_2^2 = l_2^2 + a^2 + 2l_2a \cos \varphi_2.$$

Из последних двух соотношений следует, что

$$l_1^2 + b^2 - 2l_1b \cos \beta = l_2^2 + a^2 + 2l_2a \cos \varphi_2.$$

Из этого уравнения выражаем $\cos \beta$ через $\cos \varphi_2$:

$$\cos \beta = a_1 - a_2 \cos \varphi_2, \quad (4)$$

где

$$a_1 = \frac{b^2 - a^2 + l_2^2 - l_1^2}{2l_2b}, \quad a_2 = \frac{al_1}{bl_2}. \quad (5)$$

В частном случае, когда стержни O_1A и O_1B имеют одинаковую длину ($l_1 = l_2 = l$), получим:

$$a_1 = \frac{b^2 - a^2}{2lb}; \quad a_2 = \frac{a}{b}. \quad (6)$$

Тогда
$$\beta = \arccos(a_1 - a_2 \cos \varphi_2). \quad (7)$$

Далее необходимо выразить угол φ_2 через угол φ_1 . Необходимо установить связь между углами φ_2 и φ_1 и размерами конструкции. По свойству углов четырехугольника O_1O_2BA :

$$\varphi_1 + \alpha + \beta + \pi - \varphi_2 = 2\pi ,$$

или

$$\varphi_1 - \varphi_2 + \alpha + \beta = \pi . \quad (8)$$

Вычислим угол α . Из треугольника O_2AB по теореме косинусов будет:

$$d_1^2 = l_2^2 + b^2 - 2l_2b \cos \alpha .$$

Из треугольника O_1O_2A по теореме косинусов:

$$d_1^2 = l_1^2 + a^2 - 2l_1a \cos \varphi_1 .$$

Из последних двух соотношений следует, что:

$$l_2^2 + b^2 - 2l_2b \cos \alpha = l_1^2 + a^2 - 2l_1a \cos \varphi_1 .$$

Из этого уравнения легко выразить $\cos \alpha$ через $\cos \varphi_1$

$$\cos \alpha = a_1 + a_2 \cos \varphi_1 . \quad (9)$$

Тогда угол α определится как:

$$\alpha = \arccos(a_1 + a_2 \cos \varphi_1) . \quad (10)$$

Подставим значения углов α , β согласно (7), (10) в уравнение (8):

$$\varphi_1 - \varphi_2 + \arccos(a_1 + a_2 \cos \varphi_1) + \arccos(a_1 + a_2 \cos \varphi_2) = \pi . \quad (11)$$

Если ввести вспомогательный угол φ_2'

$$\varphi_2' = \pi - \varphi_2 , \quad (12)$$

то уравнение (11) можно записать в виде:

$$\varphi_1 + \arccos(a_1 + a_2 \cos \varphi_1) + \varphi_2' + \arccos(a_1 + a_2 \cos \varphi_2') = 2\pi . \quad (13)$$

Уравнение (11) или (12) является уравнением связи между углами φ_1 и φ_2 в неявной форме:

$$F(\varphi_1, \varphi_2) = 0. \quad (14)$$

Для дальнейших исследований удобно иметь явную связь углов:

$$\varphi_2 = f_1(\varphi_1). \quad (15)$$

Для решения этой задачи запишем соотношение (13) в виде:

$$\varphi_2 + \beta = 2\pi - (\varphi_1 + \alpha). \quad (16)$$

Из равенства углов следует и равенство их косинусов:

$$\cos(\varphi_2' + \beta) = \cos(\varphi_1 + \alpha) \quad (17)$$

или

$$\cos \varphi_2' \cos \beta - \sin \varphi_2' \sin \beta = c, \quad (18)$$

где

$$c = \cos(\varphi_1 + \alpha). \quad (19)$$

Вычислив

$$\cos \beta = a_1 + a_2 \cos \varphi_2', \quad \sin \beta = \sqrt{1 - (a_1 + a_2 \cos \varphi_2')^2} \quad (20)$$

и обозначив

$$x = \cos \varphi_2', \quad (21)$$

соотношение (18) запишем в виде

$$x(a_1 + a_2 x) - \sqrt{(1 - x^2)(1 - (a_1 + a_2 x)^2)} = c. \quad (22)$$

Избавимся от иррациональности в уравнении:

$$\sqrt{(1 - x^2)(1 - (a_1 + a_2 x)^2)} = c - (a_1 + a_2 x)x,$$

$$(1 - x^2)(1 - (a_1 + a_2 x)^2) = c^2 - 2c(a_1 + a_2 x)x + (a_1 + a_2 x)^2 x^2,$$

$$1 - x^2 - (a_1 + a_2 x)^2 + x^2(a_1 + a_2 x)^2 - c^2 + 2c(a_1 + a_2 x)x - (a_1 + a_2 x)^2 x^2 = 0$$

или

$$(a_2^2 - 2ca_2 + 1)x^2 + 2a_1(a_2 - c)x + a_1^2 + c^2 - 1 = 0 \quad (23)$$

Корни квадратного уравнения (23) будут определяться как:

$$x_{1,2} = \frac{a_1(c - a_2) \pm \sqrt{D}}{a_2^2 - 2ca_2 - 1}.$$

Так как $x = \cos \varphi_2' \leq 0$, то выбираем только отрицательный корень:

$$\cos \varphi_2' = \frac{a_1(c - a_2) - \sqrt{D}}{a_2^2 - 2ca_2 - 1}. \quad (24)$$

Из этого уравнения находим явную зависимость угла φ_2 от φ_1 :

$$\varphi_2 = \pi - \arccos \left(\frac{a_1(c - a_2) - \sqrt{(c^2 - 1)(a_1^2 - a_2^2 + 2ca_2 - 1)}}{a_2^2 - 2ca_2 - 1} \right), \quad (25)$$

где

$$c = \cos(\varphi_1 + \arccos(a_1 + a_2 \cos \varphi_1)), \quad (26)$$

или $c = \cos \varphi_1 (a_1 + a_2 \cos \varphi_1) - \sin \varphi_1 \sin(a_1 + a_2 \cos \varphi_1)$,

или $c = \cos \varphi_1 (a_1 + a_2 \cos \varphi_1) - \sqrt{(1 - \cos^2 \varphi_1)(1 - (a_1 + a_2 \cos \varphi_1)^2)}$,

или

$$c = y(a_1 + a_2 y) - \sqrt{(1 - y^2)(1 - (a_1 + a_2 y)^2)}, \quad (27)$$

где

$$y = \cos \varphi_1. \quad (28)$$

В итоге получена связь между углами φ и φ_1 :

$$\varphi = \pi + \varphi_1 + \arccos(a_1 - a_2 \cos \varphi_2), \quad (29)$$

где согласно (25)

$$\varphi_2 = f_1(\varphi_1), \quad (30)$$

$$f_1(\varphi_1) = \pi - \arccos \left(\frac{a_1(c - a_2) - \sqrt{(c^2 - 1)(a_1^2 - a_2^2 + 2ca_2 - 1)}}{a_2^2 - 2ca_2 - 1} \right), \quad (31)$$

$$c = y(a_1 + a_2 y) - \sqrt{(1 - y^2)(1 - (a_1 + a_2 y)^2)}, \quad (32)$$

$$y = \cos \varphi_1. \quad (33)$$

Выводы и направления дальнейших исследований. Проведенные аналитические исследования движения деки и уравнения ее движения в выбранной системе координат позволили получить выражения для определения ряда параметров, которые могут быть использованы при изучении перемещения зерен по поверхности деки. Дальнейшие исследования следует направить на получение выражений для определения скорости полюса деки и ее угловой скорости, а также 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. **Корчевский А.Н.** Исследование условий разделения лома цветных металлов гравитационными методами // Наукові праці Донецького національного технічного університету. 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. **Є.Є. Гарковенко и др.** Модульна установка переробки вуглевмісних матеріалів / Гарковенко Є.Є. , Корчевський О.М., Назимко О.І.// Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2009.-Вип. 36(77)-37(78).- С. 17-22.
8. **О.І. 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. **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 15.07.13
Рекомендована к опубликованию д.т.н. Назимко Е.И.*