



УДК 45.03.05

**В.И. Чарыков,
А.А. Митюнин,
А.А. Евдокимов**

МЕХАНИЗМ РАЗДЕЛЕНИЯ СЫПУЧИХ ПРОДУКТОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА МАГНИТНУЮ И НЕМАГНИТНУЮ ФРАКЦИЮ В СЕПАРАТОРЕ С НАКЛОННОЙ РАБОЧЕЙ ЗОНОЙ

Ключевые слова: процесс сепарации, металломагнитные примеси, магнитная сила, магнитная индукция, дифференциальное уравнение движения частицы, эмпирический коэффициент, коэффициент сопротивления, активный полюс, критерий эффективности, разложение функции.

Введение

Пищевая и перерабатывающая промышленность – одно из приоритетных направлений экономики России. Сельскохозяйственная и зерновая смесь, поступающая на заводы переработки, содержит некоторое количество металломагнитных примесей различной величины. Подобные примеси могут повредить рабочие органы машин, ускорить их изнашивание, вызвать искрение с последующим воспламенением и взрывом в производственных помещениях. Для отделения металлопримесей от сельскохозяйственной продукции применяют различные по типу и конструкции электромагнитные сепараторы. Материал в них пропускают в непосредственной близости к полюсам магнитов, на которых задерживаются ферромагнитные примеси [1, 2].

Объект и цель исследования – получить зависимость параметров движения зернового материала по наклонному продуктопроводу от физико-механических свойств и конструктивно-кинематических параметров сепаратора. Эффективность сепарации зависит от времени движения частицы t_1 вдоль электромагнитного сепаратора и времени притяжения частицы t_2 к полюсным наконечникам. Это выражается в виде критерия эффективности $t_2 < t_1$.

Объект исследования – процесс выделения ферромагнитных материалов из смеси сельскохозяйственного назначения.

Цель исследования – определение параметра t_1 времени движения ферромагнитной частицы вдоль электромагнитного сепаратора и времени притяжения частицы t_2 к полюсным наконечникам.

Задачи исследования:

- 1) вывести расчетную зависимость времени движения ферромагнитной частицы вдоль и поперёк электромагнитного сепаратора от действия внешних сил;
- 2) определить силы, влияющие на параметры t_1 и t_2 , рассчитать время движения ферромагнитной частицы вдоль и поперёк электромагнитного сепаратора.

Методы исследований

Принципиальная схема электромагнитного сепаратора для очистки сельскохозяйственной смеси от ферромагнитных материалов приведена на рисунке. Методика исследования предусматривала анализ процесса движения зерновой смеси с металлическими примесями, определение сил, действующих на металлическую частицу и расчетной схемы, составление дифференциальных уравнений, описывающих движение частицы, их решение.

На ферромагнитную частицу будут действовать следующие силы:

F_m – магнитная сила сепаратора;

F_c – сила сопротивления движению частицы в рабочем слое;

mg – сила тяжести частицы.

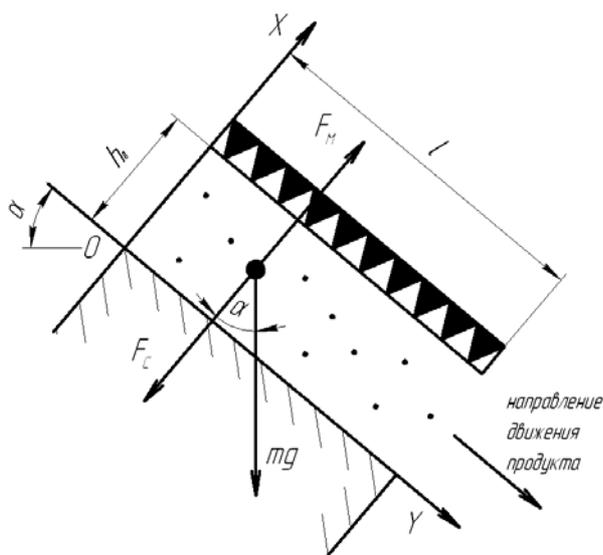


Рис. Схема сил, действующих на металлическую частицу в сепараторе с наклонной рабочей зоной

Магнитная сила находится по формуле (1):

$$F_m = -\frac{V}{2\mu\mu_0} \cdot \text{grad}B^2, \quad (1)$$

где B – магнитная индукция, Тл;

V – объем частицы, м³;

μ – относительная магнитная проницаемость среды;

μ_0 – магнитная проницаемость в вакууме, Гн/м.

Сила сопротивления движению частицы выражается следующим уравнением:

$$F_c = K \cdot K_v \cdot \rho \cdot S \cdot v, \quad (2)$$

где v – скорость частицы, м/с;

ρ – плотность среды, кг/м³;

S – площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную направлению движения, м²;

K_v – коэффициент сопротивления, м/с;

K – безразмерный коэффициент сопротивления [3].

На частицу при движении вдоль оси OY действует одна сила, $mg \sin \alpha$ – сила тяжести. На основании второго закона Ньютона получим следующее дифференциальное уравнение:

$$m\ddot{y} = mg \sin \alpha. \quad (3)$$

Решим это дифференциальное уравнение. Для этого сделаем следующую подстановку: $\dot{y} = \frac{dv_y}{dt}$ и разделим обе части

уравнения на m . Получим:

$$\frac{dv_y}{dt} = g \sin \alpha \Rightarrow dv_y = (g \sin \alpha) dt. \quad (4)$$

Взяв интегралы от обеих частей, получим:

$$v_y = \int (g \sin \alpha) dt \Rightarrow v_y = (g \sin \alpha)t + C_1, \quad (5)$$

где C_1 – постоянная интегрирования, зависит от начальных условий.

Заменив $v_y = \frac{dy}{dt}$, получим:

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dt} &= (g \sin \alpha)t + C_1 \Rightarrow dy = \\ &= (g \sin \alpha)t dt + C_1 dt \end{aligned} \quad (6)$$

Взяв интегралы от обеих частей, получим:

$$y = \frac{1}{2} (g \sin \alpha)t^2 + C_1 t + C_2. \quad (7)$$

Значения C_1 и C_2 найдём исходя из начальных условий: $y_{t=0} = 0$, $v_{y_{t=0}} = v_{нач}$.

Следовательно, постоянные интегрирования выразятся в следующем виде из уравнения (7), при $t = 0$ получаем:

$$0 = 0 + 0 + C_2 \Rightarrow C_2 = 0. \quad (8)$$

Из уравнения (5) получаем:

$$v_{нач} = C_1. \quad (9)$$

Следовательно, уравнение движения частицы в магнитном поле по оси OY будет иметь вид:

$$y = \frac{1}{2} (g \sin \alpha)t^2 + v_{нач}t. \quad (10)$$

Подставляя в уравнение (10) значение $y = l \sin \alpha$ и упрощая это уравнение, где l – длина магнитной системы сепаратора, получаем следующее уравнение для определения времени t_1 – времени движения частицы вдоль электромагнитного сепаратора:

$$(g \sin \alpha)t^2 + 2v_{нач}t - 2l \sin \alpha = 0. \quad (11)$$

Решая полученное квадратное уравнение, найдём значение величины t_1 :

$$t_{1,2} = \frac{-v_{нач} \pm \sqrt{v_{нач}^2 + 2g \sin \alpha \cdot l \sin \alpha}}{g \sin \alpha}. \quad (12)$$

Нас интересуют только положительные значения величины t_1 , поэтому будем иметь следующие значения искомой величины t_1 :

$$t_1 = \frac{-v_{нач} + \sqrt{v_{нач}^2 + 2g \sin \alpha \cdot l \sin \alpha}}{g \sin \alpha}. \quad (13)$$

На частицу при движении вдоль оси OX действует три силы: $mg \cos \alpha$ – сила тяжести; F_m – магнитная сила; F_c – сила сопро-

тивления движению частицы в рабочем слое.

Магнитную индукцию принято выражать в виде следующей функции:

$$B = B_{max} e^{-\frac{d_i}{d_n}}, \quad (14)$$

где B_{max} – максимальное значение магнитной индукции, Тл;

d_i – расстояние точки измерения магнитной индукции от активного полюса, м;

d_n – эмпирический коэффициент.

Поскольку нас интересует значение магнитной индукции на полюсных наконечниках в направлении оси ОХ, то $d_i = x$. Подставив в формулу (1) значение магнитной индукции, получим следующее выражение для магнитной силы F_m :

$$\begin{aligned} F_m &= -\frac{V}{2\mu\mu_0} \cdot grad B^2 = \\ &= -\frac{V}{2\mu\mu_0} \frac{d}{dx} [(B_{max} e^{-\frac{x}{d_n}})^2] = \\ &= -\frac{V}{\mu\mu_0 d_n} B_{max}^2 \cdot e^{-\frac{2x}{d_n}}. \end{aligned} \quad (15)$$

Составляем дифференциальное уравнение движения частицы вдоль оси ОХ:

$$m\ddot{x} = F_m - F_c - mg \cos \alpha. \quad (16)$$

Подставляя в это уравнение значение всех сил, получим:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= \frac{VB_{max}^2}{\mu\mu_0 d_n} e^{-\frac{2x}{d_n}} - k \cdot k_v \cdot \rho \cdot S \cdot v - \\ &- mg \cos \alpha \Rightarrow m\ddot{x} + k \cdot k_v \cdot \rho \cdot S \cdot v + \\ &+ mg \cos \alpha = \frac{VB_{max}^2}{\mu\mu_0 d_n} e^{-\frac{2x}{d_n}}. \end{aligned} \quad (17)$$

Разделив на массу частицы m и заменив v на \dot{x} , получим:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + \frac{k \cdot k_v \cdot \rho \cdot S}{m} \cdot v + g \cos \alpha = \\ = \frac{VB_{max}^2}{\mu\mu_0 d_n} e^{-\frac{2x}{d_n}}. \end{aligned} \quad (18)$$

Дифференциальное уравнение (18) не имеет аналитического решения. Поэтому, чтобы можно было в дальнейшем анализировать полученные результаты, разложим

функцию $e^{-\frac{2x}{d_n}}$ в ряд и возьмём первые два члена ряда для получения более точных значений. Разложение функции $f(x)$ в ряд имеет вид:

$$\begin{aligned} f(x) = f(0) + \frac{f'(0)}{1!} \cdot x + \frac{f''(0)}{2!} \cdot x^2 + \dots \\ + \frac{f^n(0)}{n!} \cdot x^n \end{aligned} \quad (19)$$

Получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} e^{-\frac{x}{d_n}} = (e^{-\frac{x}{d_n}})_{x=0} + (e^{-\frac{x}{d_n}})'_{x=0} \cdot x + \dots = \\ = 1 - \frac{1}{d_n} x_0 \end{aligned} \quad (20)$$

Подставив значение функции $e^{-\frac{x}{d_n}}$ из формулы (20) в формулу (18), получим:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + \frac{k \cdot k_v \cdot \rho \cdot S}{m} \cdot \dot{x} + g \cos \alpha = \\ = \frac{VB_{max}^2}{\mu\mu_0 d_n} e^{-\frac{x}{d_n}} - \frac{VB_{max}^2}{\mu\mu_0 d_n^2} x \end{aligned} \quad (21)$$

В окончательном виде уравнение (21) будет:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + \frac{k \cdot k_v \cdot \rho \cdot S}{m} \cdot \dot{x} + \frac{VB_{max}^2}{\mu\mu_0 d_n^2} \cdot x = \\ = \frac{VB_{max}^2}{\mu\mu_0 d_n} - g \cos \alpha \end{aligned} \quad (22)$$

Обозначив в уравнении (22)

$$\frac{k \cdot k_v \cdot \rho \cdot S}{m} = 2b, \quad \frac{VB_{max}^2}{\mu\mu_0 d_n^2} = c^2,$$

$\frac{V \cdot B_{max}^2}{\mu\mu_0 d_n} - g \cos \alpha = p$, получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\ddot{x} + 2b\dot{x} + c^2x = p. \quad (23)$$

Это линейное дифференциальное уравнение второго порядка. Его решение из теории дифференциальных уравнений имеет вид:

$$x = x_1 + x_2, \quad (24)$$

где x_1 – общее решение дифференциального уравнения без правой части;

x_2 – частное решение полного уравнения (23).

Найдем решение дифференциального уравнения (23). Здесь возможны три случая:

1) $c > b$, т.е. корни характеристического уравнения являются комплексными числами;

2) $b = c$. В этом случае корни характеристического уравнения будут действительными кратными числами, т.е. $\lambda_{1,2} = \pm b$;

3) рассмотрим случай, когда $b > c$. В этом случае корни характеристического уравнения равны:

$$\lambda_{1,2} = -b \pm \sqrt{b^2 - c^2} = -b \pm r, \quad (25)$$

где $r = \sqrt{b^2 - c^2}$.

В этом случае оба корня действительны и отрицательны. Следовательно, общее решение дифференциального уравнения (24), описывающее закон движения частицы вдоль оси ОХ, имеет вид:

$$x_1 = c_1 e^{-(b+r)t} + c_2 e^{-(b-r)t}. \quad (26)$$

Поскольку в нашем случае частица движется за счёт магнитной силы, то естественно предположить, что должен иметь место третий случай, хотя возможны и первые два. Найдем постоянные интегрирования c_1 и c_2 для этого случая исходя из начальных условий при $t = 0$, $x = e$, $v = v_{нач} \cos \alpha$.

Найдем значение скорости движения частицы вдоль оси ОХ:

$$v = \dot{x} = -(b+r)c_1 e^{-(b+r)t} - (b-r)c_2 e^{-(b-r)t}. \quad (27)$$

Подставляя в уравнение (26) значение $x = e$ при $t = 0$, получим:

$$c_1 + c_2 = e, \quad (28)$$

откуда $c_1 = e - c_2$. Подставляя в уравнение (27) значение скорости движения частицы в начальный момент времени $t = 0$, $v_{t=0} = v_{нач} \cos \alpha$, получим:

$$-(b+r)c_1 e^{-(b+r) \cdot 0} - (b-r)c_2 e^{-(b-r) \cdot 0} = v_{нач} \cos \alpha. \quad (29)$$

Упрощаем:

$$-(b+r)c_1 - (b-r)c_2 = v_{нач} \cos \alpha, \quad (30)$$

Подставляя в это равенство значение $c_1 = e - c_2$, получим:

$$-(b+r)(e - c_2) - (b-r)c_2 = v_{нач} \cos \alpha. \quad (31)$$

После преобразований получим

$$c_2 = \frac{(b+r)e + v_{нач} \cos \alpha}{2r}. \quad (32)$$

Найдем значение коэффициента c_1 :

$$c_1 = e - c_2 = e - \frac{(b+r)e + v_{нач} \cos \alpha}{2r} = \frac{-(b-r)e + v_{нач} \cos \alpha}{2r}. \quad (33)$$

Следовательно, общее решение уравнения (26) имеет вид:

$$x_1 = c_1 e^{-(b+r)t} + c_2 e^{-(b-r)t} = \frac{-(b-r)e + v_{нач} \cos \alpha}{2r} e^{-(b+r)t} + \frac{(b+r)e + v_{нач} \cos \alpha}{2r} e^{-(b-r)t}. \quad (34)$$

Найдем частное решение дифференциального уравнения (22). Частное решение дифференциального уравнения (22):

$$x_2 = F_0, \quad (35)$$

где F_0 – постоянная величина, которую надо подобрать так, чтобы дифференциальное уравнение (22) обратилось в тождество.

Подставляя значение x_2 , а также значения первой и второй производных в дифференциальное уравнение (22), получим: $\dot{x} = 0$, $\ddot{x} = 0$, $x_2 = F_0$, следовательно:

$$0 + 0 + c^2 F_0 = p \Rightarrow c^2 F_0 = p \Rightarrow F_0 = \frac{p}{c^2}. \quad (36)$$

Отсюда

$$x_2 = F_0 = \frac{p}{c^2} \Rightarrow x_2 = \left(\frac{VB_{max}^2}{m\mu\mu_0 d_n} - g \cos \alpha \right) \cdot \frac{VB_{max}^2}{m\mu\mu_0 d_n^2} = d_n - \frac{g \cos \alpha \cdot m\mu\mu_0 d_n^2}{VB_{max}^2}. \quad (37)$$

Общее решение дифференциального уравнения (23) будет иметь вид:

$$x = x_1 + x_2 = \frac{-(b-r)e + v_{нач} \cos \alpha}{2r} e^{-(b+r)t} + \frac{(b+r)e + v_{нач} \cos \alpha}{2r} e^{-(b-r)t} + d_n - \frac{g \cos \alpha m\mu\mu_0 d_n^2}{VB_{max}^2}. \quad (38)$$

Упростим решение дифференциального уравнения (38). В нашем электромагнитном сепараторе величина $(b+r)$ очень велика, поэтому $e^{-(b+r)t} \rightarrow 0$. Следовательно, решение уравнения (38) примет вид:

$$x = \frac{(b+r)e + v_{нач} \cos \alpha}{2r} e^{-(b-r)t} + d_n - \frac{g \cos \alpha m\mu\mu_0 d_n^2}{VB_{max}^2}. \quad (39)$$

Найдем время притяжения частиц к плюсным наконечникам t_2 , из уравнения (39) получаем:

$$\frac{(b+r)e + v_{нач} \cos \alpha}{2r} e^{-(b-r)t} = x - d_n + \frac{g \cos \alpha m \mu_0 d_n^2}{VB_{max}^2} \Rightarrow e^{-(b-r)t} = \frac{(x - d_n + \frac{g \cos \alpha m \mu_0 d_n^2}{VB_{max}^2}) \cdot 2r}{(b+r)e + v_{нач} \cos \alpha} \quad (40)$$

Прологарифмировав выражение (40), получим:

$$-(b-r)t = \ln \left[\frac{(x - d_n + \frac{g \cos \alpha m \mu_0 d_n^2}{VB_{max}^2}) \cdot 2r}{(b+r)e + v_{нач} \cos \alpha} \right] \quad (41)$$

Следовательно:

$$t = -\frac{1}{b-r} \ln \left[\frac{(x - d_n + \frac{g \cos \alpha m \mu_0 d_n^2}{VB_{max}^2}) \cdot 2r}{(b+r)e + v_{нач} \cos \alpha} \right] \quad (42)$$

Подставив вместо $b = \frac{k \cdot k_v \cdot \rho \cdot s}{2m}$, $c^2 = \frac{VB_{max}^2}{m \mu_0 d_n^2}$.

$$r = \sqrt{b^2 - c^2} = \sqrt{\left(\frac{k \cdot k_v \cdot \rho \cdot s}{4m^2} - \frac{VB_{max}^2}{m \mu_0 d_n^2}\right)}, \quad x = l$$

в уравнение (42), получим искомое значение времени притяжения частиц к полюсным наконечникам t_2 :

$$t = -\frac{1}{\frac{k \cdot k_v \cdot \rho \cdot s}{2m} - \sqrt{\left(\frac{k \cdot k_v \cdot \rho \cdot s}{4m^2} - \frac{VB_{max}^2}{m \mu_0 d_n^2}\right)}} \cdot \ln \left[\frac{(l - d_n + \frac{g \cos \alpha m \mu_0 d_n^2}{VB_{max}^2}) \cdot 2 \sqrt{\left(\frac{k \cdot k_v \cdot \rho \cdot s}{4m^2} - \frac{VB_{max}^2}{m \mu_0 d_n^2}\right)}}{\left(\frac{k \cdot k_v \cdot \rho \cdot s}{2m} + \sqrt{\left(\frac{k \cdot k_v \cdot \rho \cdot s}{4m^2} - \frac{VB_{max}^2}{m \mu_0 d_n^2}\right)}\right) e + v_{нач} \cos \alpha} \right] \quad (43)$$

Вывод

Разработана расчетная схема сил, действующих на ферромагнитную частицу в рабочей зоне электромагнитного сепаратора и влияющих на параметры t_1 , t_2 , время движения ферромагнитной частицы вдоль и поперек канала электромагнитного сепаратора. Выведена теоретическая зависимость параметров t_1 , t_2 от внешних сил, механических свойств и конструктивно-кинематических параметров сепаратора.

Библиографический список

1. Сумцов В.Ф. Электромагнитные железотделители. – М.: Машиностроение, 1981. – 212 с.
2. Гортинский В.В., Дёмский А.Б., Борискин М.А. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. – М.: Колос, 1980. – 304 с.
3. Зуев В.С., Чарыков В.И. Электромагнитные сепараторы: теория, конструкция. – Курган: Зауралье, 2002. – 178 с.



УДК 631.3.004. (075.08)

В.А. Завора

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ОБЪЕМА ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ РЕМОНТНО-ОБСЛУЖИВАЮЩЕЙ БАЗЫ МОБИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

Ключевые слова: ремонтно-обслуживающая база, трактора, комбайны, автомобили, гарантийный срок, запасные части.

Структурная схема современной ремонтно-обслуживающей базы имеет три уровня:

- ремонтно-обслуживающая база СПК и других агропредприятий, эксплуатирующих технику [1];
- ремонтно-обслуживающая база районных (межрайонных) технических предприятий;
- ремонтно-обслуживающая база областных, краевых, республиканских предприятий.

Объектами ремонтно-обслуживающей базы являются:

- в СПК – центральная ремонтная мастерская (ЦРМ), стационарные пункты технического обслуживания (СПТО), машинные дворы, передвижные средства технического обслуживания и ремонта [2];
- на районном уровне – ремонтная мастерская общего назначения (МОН), станция технического обслуживания тракторов (СТОТ), станция технического обслуживания автомобилей (СТОА);
- на областном, краевом, республиканском уровнях – заводы, специализированные мастерские и цехи по капитальному ремонту тракторов, комбайнов, автомобилей, двигателей, гидроавтомобилей и т.п.