

## ОБЩИЙ ПРИНЦИП РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СЕПАРАТОРОВ СЕРИИ УСС

В. И. Чарыков, А. И. Яковлев

В статье рассмотрен принцип работы просыпных сепараторов под условным названием УСС (установка сухой сепарации), разработанных в Курганской государственной сельскохозяйственной академии. Приведено сравнение теоретических и экспериментальных результатов расчета работы сепараторов с различными концентраторами магнитного поля.

**Ключевые слова:** электромагнитный сепаратор, концентратор, магнитная индукция, принцип работы, металлическая частица.

Электромагнитные сепараторы, применяемые на перерабатывающих предприятиях, можно классифицировать по пяти признакам:

- по способу создания магнитного поля (постоянными магнитами, электромагнитами, комбинированный);
- по конструкции магнитной системы (разомкнутая, замкнутая);
- по принципу сепарации (на извлечение магнитных включений, на удержание и комбинированные);
- по степени автоматизации (с автоматическим съемом магнитных включений, с ручным съемом);
- по мобильности (передвижные, стационарные).

В Курганской ГСХА разработано новое поколение просыпных сепараторов под условным названием УСС (установка сухой сепарации). Способ создания магнитного поля в сепараторе УСС – комбинированный.

Для исследования принципа работы сепараторов была изготовлена действующая модель электромагнитной установки. Модель электромагнитного сепаратора для очистки сельскохозяйственных продуктов от металломагнитных частиц была создана на основе электромагнита ФЛ-1. Питание электромагнита осуществлялось от сети переменного тока напряжением 220 В через выпрямитель типа ВСА-ПБ.

Для экспериментальных исследований были изготовлены сменные однотипные полюсные наконечники с концентраторами. Размеры всех полюсных наконечников одинаковы  $400 \times 140$  мм. Глухие отверстия (концентраторы) были заполнены немагнитным материалом (эпоксидной шпаклевкой). Для создания закрытой рабочей зоны электромагнитного сепаратора были сделаны боковины Т-образного сечения, четко фиксирующие зазор между полюсными наконечниками.

194

Принципиальная схема силового взаимодействия в электромагнитном сепараторе приведена на рисунке 1.

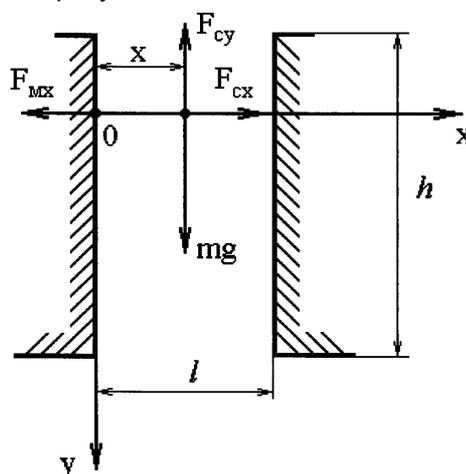


Рисунок 1 – Принципиальная схема силового взаимодействия в электромагнитном сепараторе

На рисунке 1 указаны следующие силы:

$F_{mx}$  – магнитная сила, действующая на частицу по оси OX;

$F_{cx}$  – сила сопротивления движению частицы в среде материала;

$F_{cy}$  – сила, действующая на частицу оси OY (это аэродинамическая сила, действующая от сопротивления движению частицы в воздушной среде);

$mg = F$  – вес частицы.

Процесс сепарации возможен только в том случае, если время движения частицы  $t_1$  по оси OX от её местонахождения до магнитного полюса меньше времени движения частицы  $t_2$  по оси OY от её местонахождения до дна сепаратора:

## ОБЩИЙ ПРИНЦИП РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СЕПАРАТОРОВ СЕРИИ УСС

$$t_1 < t_2. \quad (1)$$

Для определения  $t_1$  и  $t_2$  необходимо составить дифференциальные уравнения движения частицы вдоль осей ОУ и ОХ.

$$m\ddot{y} = mg - F_{cy}, \quad (2)$$

$$m\ddot{x} = mg - F_{cx}. \quad (3)$$

Решение этих уравнений позволит определить время  $t_1$  и  $t_2$ , и, сравнивая их, можно сказать, будет происходить процесс очистки сельскохозяйственных продуктов от металломагнитных включений или нет.

Рассмотрим движение частицы вдоль оси ОУ, т. е. дифференциальное уравнение 2.

$$m\ddot{y} = mg - F_{cy}.$$

Действующую на тело силу сопротивления движению тела в воздушной среде  $F_{cy}$  определяем по общеизвестной формуле:

$$F_{cy} = \frac{1}{2} C_y \rho S v_y^2, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность воздушной среды, кг/м<sup>3</sup>,

$S$  – площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную направлению движения тела, м<sup>2</sup>,

$C_y$  – безразмерный коэффициент сопротивления, обычно определяемый экспериментально и зависящий от формы тела и от того, как оно ориентировано при движении,  $v_y$  – скорость движения тела вдоль оси ОУ, м/с.

В нашем случае путь перемещения очень мал и потому силой  $F_{cy}$ , как правило, пренебрегают, считая, что  $F_{cy} = 0$ .

В этом случае дифференциальное уравнение принимает известный в курсе физике вид:

$$m\ddot{y} = mg. \quad (5)$$

Решение этого дифференциального уравнения также общеизвестно:

$$y = \frac{gt^2}{2} + v_0 t, \quad (6)$$

где  $v_0$  – начальная скорость частицы, м/с.

При движении тела без начальной скорости, т. е. при  $v_0 = 0$ , имеем следующее уравнение движения тела:

$$y = \frac{gt^2}{2}. \quad (7)$$

Из уравнения (7) находим время перемещения частицы вдоль оси ОУ:

$$t = \sqrt{\frac{2y}{g}}. \quad (8)$$

Поскольку наш экспериментальный электромагнитный сепаратор имеет размеры 400×140 мм, то путь движения частицы у  $h = 0,4$  м. Следовательно,

$$t_2 = \sqrt{\frac{2y}{g}} = \sqrt{\frac{2 \times 0,4}{9,81}} = 0,285 \text{ с.}$$

Итак, время движения частицы без начальной скорости вдоль оси ОУ равно:

$$t_2 = 0,285 \text{ с.}$$

Рассмотрим движение частицы вдоль оси ОХ, т. е. дифференциальное уравнение 3:

$$m\ddot{x} = F_{mx} - F_{cx}.$$

Действующую на частицу силу сопротивления движению частицы в слое рабочей смеси  $F_{cx}$  определяем, согласно исследованию [1], по следующей формуле:

$$F_{cx} = k_1 k_2 k_v \rho S v_x, \quad (9)$$

где  $k_1$  – коэффициент, учитывающий влажность рабочей смеси,

$k_2$  – коэффициент, учитывающий сыпучесть рабочей смеси,

$k_v$  – коэффициент сопротивления, м/с,

$\rho$  – плотность рабочей смеси, кг/м<sup>3</sup>,

$S$  – площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную направлению движения, м<sup>2</sup>,

$v_x$  – скорость частицы вдоль оси ОХ, м/с.

Для нормальных условий, т. е. при влажности рабочей смеси до 15 % коэффициент  $k_1 = 1$ . Принимаем также  $k_2 = 1$ .

Коэффициент сопротивления движению тела  $k_v = 10$  м/с [1].

На металлическую частицу, помещенную в электромагнитное поле, действует магнитная сила [2].

$$F_{mx} = -\text{grad}W = -\frac{V_r}{2\mu_0\mu} \text{grad}B^2. \quad (10)$$

Магнитная индукция  $B$  в межполюсном пространстве электромагнитного сепаратора изменяется по экспоненциальному закону [1]:

$$B = B_{\max} - \Delta B(1 - e^{-\frac{x}{d_n}}), \quad (11)$$

где  $B_{\max}$  – максимальное значение магнитной индукции на активном полюсе, Тл,

$$\Delta B = B_{\max} - B_{\min},$$

$B_{\min}$  – минимальное значение магнитной индукции в межполюсном пространстве на пассивном полюсе, Тл,

$d_n$  – константа, которую необходимо определить из опыта, м.

Для определения магнитной силы  $F_M$  необходимо сначала определить магнитную индукцию  $B$ . Для этого воспользуемся таблицей 1, в которой экспериментально определена зависимость магнитной индукции  $B$  в зазоре между полюсами.

Таблица 1 – Результаты измерения магнитной индукции в межполюсном пространстве

Значения магнитной индукции $B$ , мТл	Значения $x_i$ , мм							
	0	2	4	6	8	10	12	14
	160	156	131	129	126	125	124,5	124,2

Из таблицы видим, что  $B_{\max} = 160$  мТл,  $B_{\min} = 124,2$  мТл,  $\Delta B = B_{\max} - B_{\min} = 35,8$  мТл.

В выражении (11) неизвестной величиной является коэффициент  $d_n$ . Определим его с помощью метода наименьших квадратов,  $d_n = 2,615$  м.

Определим расчетным путем значения магнитной индукции по формуле (11) и сравним их с экспериментальными данными.

На рисунке 2 показаны графическая зависимость магнитной индукции, рассчитанная по формуле (11), и экспериментальная.

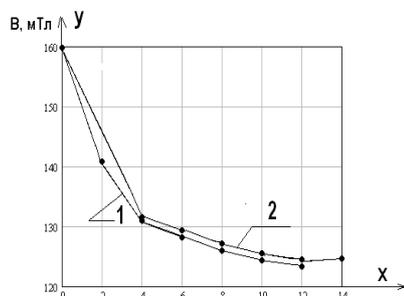


Рисунок 2 – Распределение магнитной индукции в межполюсном пространстве сепаратора УСС (концентраторы с отверстиями):

1 – теоретическая (расчетная) зависимость;  
2 – экспериментальная зависимость

Зная магнитную индукцию  $B$  в межполюсном пространстве, найдем магнитную силу  $F_{mx}$  по формуле (10):

$$F_{mx} = -\text{grad } W = -\frac{V_z}{2\mu_0\mu} \text{grad } B^2 = \frac{V_z}{\mu_0\mu d_n} \times (B_{\min} e^{-\frac{x}{d_n}} + \Delta B e^{-\frac{2x}{d_n}}). \quad (12)$$

Подставляя найденные силы, действующие на частицу вдоль оси ОХ, в формулу (3), получим следующее дифференциальное уравнение, выражающее зависимость перемещения частицы в межполюсном пространстве вдоль оси ОХ от различных факторов:

$$m\ddot{x} = F_{mx} - F_{cx} = \frac{V_r \Delta B}{\mu_0 \mu d_n} (B_{\min} e^{-\frac{x}{d_n}} + \Delta B e^{-\frac{2x}{d_n}}) - KK_v S \rho V, \rightarrow$$

$$m\ddot{x} + KK_v S \rho V = \frac{V_r B_{\min} \Delta B}{\mu_0 \mu d_n} e^{-\frac{x}{d_n}} + \frac{V_r (\Delta B)^2}{\mu_0 \mu d_n} e^{-\frac{2x}{d_n}}. \quad (13)$$

После некоторых математических преобразований выражение (13) можно представить в следующем виде:

$$\ddot{x} + \frac{KK_v S \rho}{m} \dot{x} + \frac{V_r \Delta B (B_{\min} + 2\Delta B)}{m \mu_0 \mu d_n^2} x = \frac{V_r \Delta B (B_{\min} + 2\Delta B)}{m \mu_0 \mu d_n}. \quad (14)$$

Решение данного дифференциального уравнения приведено в литературе [1]. Время движения частицы вдоль оси ОХ равно  $t_1 = 0,0515$  с. Время движения частицы вдоль оси ОУ равно  $t_2 = 0,285$  с.

Как видим, основное условие сепарации зерна от металлических примесей выполнено:

$$t_1 = 0,0515 < t_2 = 0,285.$$

Следовательно, данный сепаратор будет выполнять свои задачи по очистке сыпучей смеси от металлических частиц.

Наряду с концентраторами с отверстиями («дырочными»), нами испытывались на этой установке горизонтальные и вертикальные концентраторы. Для этого изготавливались специальные гребенчатые решетки, которые крепились болтами к активному полюсу. Высота гребней составляла от нуля до 16 мм, а расстояние между гребнями было от 5 мм до 30 мм в зависимости от высоты гребней. Ре-

## ОБЩИЙ ПРИНЦИП РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СЕПАРАТОРОВ СЕРИИ УСС

шетки могли крепиться к активному полюсу так, что гребни располагались либо горизонтально, либо вертикально. Рассмотрим результаты исследований полюсных наконечников с горизонтальными концентраторами.

На частицу в межполюсном пространстве с горизонтальными концентраторами будут действовать те же самые силы, что и с «дырочными» концентраторами. Поэтому, условием эффективности сепарации сыпучих продуктов будет то же самое, что и с дырочными концентраторами:

$$t_1 < t_2, \quad (15)$$

где  $t_1$  – время движения частицы вдоль оси ОХ,

$t_2$  – время движения частицы вдоль оси ОУ.

Время движения частицы вдоль оси ОУ будет тем же самым, что и при исследовании дырочных концентраторов:

$$t_2 = 0,285 \text{ с}.$$

А время  $t_1$  движения частицы вдоль оси ОХ будет зависеть от распределения магнитной индукции в межполюсном пространстве. Определим эту магнитную индукцию.

Зависимость магнитной индукции  $B$  в межполюсном пространстве приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты измерений магнитной индукции  $B$  в межполюсном пространстве

Значения магнитной индукции $B$ , мТл	Значения $x_i$ , мм								
	0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
190	160	150	145	142	141	140	139,6	139,4	

$$B_{\max} = 190 \text{ мТл}, B_{\min} = 139,4 \text{ мТл},$$

$$\Delta B = B_{\max} - B_{\min} = 50,6 \text{ мТл}.$$

Следовательно, искомый коэффициент

$$d_n = \frac{1}{a} = \frac{1}{0,300} = 3,33 \text{ мм}.$$

Определим расчетным путем значения магнитной индукции и сравним их с экспериментальными данными.

На рисунке 3 показана графическая зависимость: расчетная и экспериментальная. Как видно из графика, теоретическая кривая очень близко совпадает с экспериментальной.

В нашем случае для горизонтальных концентраторов выражение для магнитной индукции имеет вид:

$$B = 190 - 50,6(1 - e^{-\frac{x}{0,333}}). \quad (16)$$

Время  $t_1$  движения частицы в межполюсном пространстве определяется аналогично, как и в случае с «дырочными» концентраторами:  $t_1 = 0,0398 \text{ с}$ .

Как видим,  $t_1 = 0,039802 < t_2 = 0,285$ .

Следовательно, сепаратор будет работать при данных условиях.

Рассмотрим результаты исследований полюсных наконечников с вертикальными концентраторами.

При исследовании распределения магнитной индукции в межполюсном пространстве основными показателями параметров вертикальных концентраторов были следующие: высота гребней  $h = 8 \text{ мм}$ , расстояние между гребнями  $t = 12 \text{ мм}$ . Распределение магнитной индукции в межполюсном пространстве представлено в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты измерений магнитной индукции  $B$  в межполюсном пространстве

Значения магнитной индукции $B$ , мТл	Значения $x_i$ , мм					
	0	5	10	15	10,0	20
200	175	162	154	152	150	

$$B_{\max} = 200 \text{ мТл}, B_{\min} = 150 \text{ мТл},$$

$$\Delta B = B_{\max} - B_{\min} = 50 \text{ мТл}.$$

Следовательно, искомый коэффициент

$$d_n = \frac{1}{a} = \frac{1}{0,16} = 6,25 \text{ мм}.$$

Определим расчетным путем значения магнитной индукции и сравним их с экспериментальными данными.

На рисунке 4 показана графическая зависимость – расчетная и экспериментальная. Как видно из графика, теоретическая кривая очень близко совпадает с экспериментальной.

В нашем случае для вертикальных концентраторов выражение для магнитной индукции имеет вид:

$$B = 200 - 50(1 - e^{-\frac{x}{6,25}}). \quad (17)$$

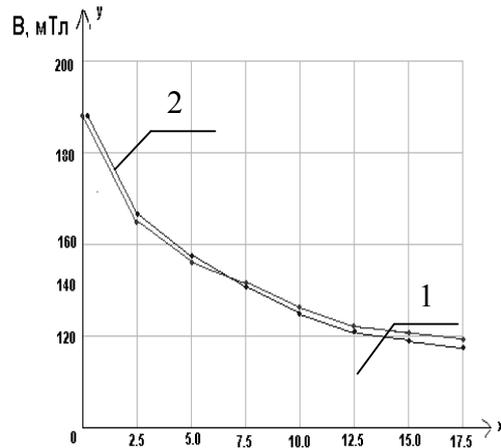


Рисунок 3 – Распределение магнитной индукции в межполюсном пространстве (горизонтальные концентраторы магнитного поля)

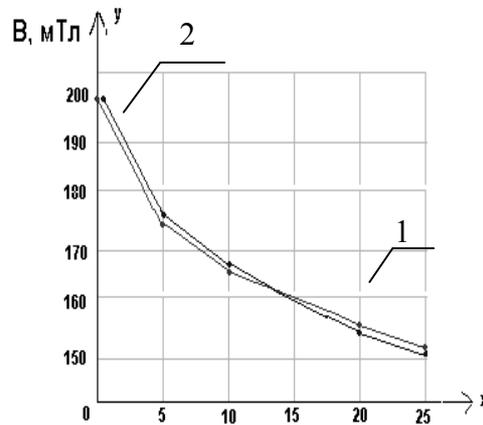


Рисунок 4 – Распределение магнитной индукции в межполюсном пространстве (вертикальные концентраторы магнитного поля)

Время  $t_1$  движения частицы в межполюсном пространстве [1].

$$t_1 = 0,1138 \text{ с.}$$

Как видим,  $t_1 = 0,1138 < t_2 = 0,285$ .

Следовательно, электромагнитный сепаратор будет нормально работать при данных условиях.

#### ВЫВОД

Электромагнитные сепараторы серии УСС, разработанные в Курганской ГСХА, работают по «просыпному» принципу и надежно очищают сыпучие сельскохозяйственные продукты от металлических примесей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чарыков, В. И. Вопросы теории и инновационных решений при конструировании электромагнитных железоотделителей [Текст] / В. И. Чарыков, В. С. Зуев, А. В. Маянцев, С. А. Соколов. – Курган : Изд-во КГУ, 2010. – 238с.
2. Сумцов, В. Ф. Электромагнитные железоотделители [Текст] / В. Ф. Сумцов. – М. : Машиностроение, 1981. – 212 с.

**Чарыков В. И.**, д.т.н., профессор, E-mail: [Viktor52-CHIMESH@yandex.ru](mailto:Viktor52-CHIMESH@yandex.ru); **Яковлев А. И.**, аспирант, Россия, Курганская область, Кетовский район, пос. КГСХА, ФГБОУ ВПО «Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т. С. Мальцева», кафедра «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства»