

**Жарынин Д.В.**

## УТОЧНЁННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОЧЕЙ ОБЛАСТИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЖЕЛЕЗОТДЕЛИТЕЛЯ

*Проведён анализ существующих работ, посвящённых определению характеристик импульсных электромагнитных железозоделителей. Предложен новый метод определения характеристик рабочей области, учитывающий импульсный характер воздействия магнитного поля железозоделителя на ферромагнитные тела. Приведён алгоритм расчёта характеристик рабочей области. Проведено сравнение предложенного метода с существующим. Новый метод позволяет повысить надёжность извлечения ферромагнитных тел из потока немагнитного сыпучего вещества.*

**Ключевые слова:** магнитное поле, железозоделитель, рабочая область, пондеромоторная сила.

**Актуальность исследования.** В последние годы в связи с резким удорожанием природного газа был объявлен переход электростанций с природного газа на уголь, и как следствие, рост потребления каменного угля. Однако использование каменного угля требует использования комплекса оборудования, неотъемлемой частью которого являются электромагнитные железозоделители. Современные железозоделители представляют собой электромагниты массой порядка нескольких тонн, потребляющие мощность 3-5 кВт в непрерывном режиме, т.е. их производство и использование также связано со значительными затратами. В такой ситуации очевидна необходимость снижения материалоёмкости и энергопотребления железозоделителей

**Теоретический анализ исследований.** В значительном количестве работ [1,2,3] была предложена схема комбинированного импульсного железозоделителя, который менее материалоёмок и обладает меньшим энергопотреблением по сравнению с традиционными моделями. Экономический эффект такого железозоделителя обеспечивается работой в импульсном режиме, т.е. протеканием в обмотках токов величины, значительно большей, чем в традиционных моделях, что позволяет создать удельную пондеромоторную силу необходимой величины в рабочем объёме. Ток подаётся на обмотки только в случае наличия ферромагнитного тела (ФТ) в потоке немагнитного вещества, что значительно снижает энергопотребление. Обнаружение ФТ на конвейере производится с помощью магниточувствительных элементов (феррозондов).

Однако при расчётах импульсного железозоделителя было принято [1], что при извлечении ФТ движется равномерно, что не соответствует действительности в случае импульсного воздействия магнитного поля.

**Цель работы.** Целью работы является уточнение параметров рабочей области железозоделителя с учётом неравномерности движения ФТ при его извлечении из сыпучей среды, что позволит улучшить дальнейший расчёт магнитной системы железозоделителя.

### Материал и результаты исследований.

Исходными данными для синтеза магнитной системы подвесного железозоделителя являются:

- Ширина конвейера;
- Скорость движения ленты конвейера  $V_k$ ;
- Высота подвеса железозоделителя  $h$ ;
- Толщина немагнитной смеси на конвейере  $d < h$ .

Из этих данных можно определить как рабочую область железозоделителя, так и необходимые параметры магнитного поля в ней. Очевидно, что ширина рабочей области должны быть равна ширине конвейера, высота – высоте подвеса железозоделителя.

Для определения длины рабочей области и характеристик магнитного поля рассмотрим движение ФТ в потоке немагнитного вещества под действием магнитного поля.

Пондеромоторная сила, действующая на извлекаемые ФТ относительно малых, по сравнению с электромагнитом, размеров описывается следующим соотношением [4]:

$$\bar{F}_l = \int_V \frac{1}{2} \mu_0 \chi \text{grad}(H)^2 dV \approx \mu_0 \chi V H \text{grad} H, \quad (1)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ ,

$\chi$  – магнитная восприимчивость ФТ;

$V$  – объём ФТ;

$H$  – напряжённость магнитного поля в объёме ФТ.

Вертикальная составляющая пондеромоторной силы может быть записана так:

$$\bar{F}_l = \mu_0 \chi V H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} = \mu_0 \chi \frac{m}{\rho} H_z \frac{\partial H_z}{\partial z}, \quad (2)$$

где  $z$  – вертикальная координата.

Сила сопротивления движения ФТ в первом приближении равна [4]

$$F_c = m\gamma \frac{dz}{dt} + mg, \quad (3)$$

где  $\gamma$  – коэффициент, величина которого находится в пределах [4]  $\gamma=5-15 \text{ с}^{-1}$ ;  
 $m$  – масса ФТ.

Тогда результирующую силу, действующую на тело, можно определить как

$$F = \mu_0 \chi \frac{m}{\rho} H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} - \left( m\gamma \frac{dz}{dt} + mg \right).$$

Ускорение тела по второму закону Ньютона будет равно

$$a = \frac{F}{m} = \frac{\mu_0 \chi}{\rho} H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} - \left( \gamma \frac{dz}{dt} + g \right). \quad (4)$$

Но ускорение – это вторая производная координаты  $z$  по времени, следовательно, (4) является линейным дифференциальным уравнением второго порядка:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 z}{dt^2} &= \frac{\mu_0 \chi}{\rho} H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} - \left( \gamma \frac{dz}{dt} + g \right); \\ \frac{d^2 z}{dt^2} + \gamma \frac{dz}{dt} &= \frac{\mu_0 \chi}{\rho} H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} - g. \end{aligned}$$

Используем замену  $\frac{\mu_0 \chi}{\rho} H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} - g = p$ , при решении получим

$$\begin{cases} z = \frac{p}{\gamma^2} (t\gamma - 1) + \frac{1}{\gamma} C_1 + C_2 e^{-\gamma t}; \\ \frac{dz}{dt} = \frac{p}{\gamma} - \gamma C_2 e^{-\gamma t}. \end{cases} \quad (5)$$

Граничными условиями для данных уравнений являются  $z$ -координата тела и его вертикальная скорость ( $V=dz/dt$ ) в момент начала движения при подаче импульса тока в катушку  $t=0$  ( $z(0)=-h$ ,  $\frac{dz}{dt}(0)=0$ ). При подстановке граничных условий получим

$$z = \left( \frac{\mu_0 \chi}{\rho \gamma^2} H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} - \frac{g}{\gamma^2} \right) \cdot (t\gamma + e^{-\gamma t} - 1) - h; \quad (6)$$

$$V = \frac{dz}{dt} = \left( \frac{\mu_0 \chi}{\rho \gamma} H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} - \frac{g}{\gamma} \right) \cdot (1 - e^{-\gamma t}). \quad (7)$$

С использованием этих выражений можно получить координату  $z_1$  и скорость тела  $V_1$  в момент прекращения импульса тока  $t_1$ .

Рассмотрим движение тела после окончания импульса тока в обмотках магнитной системы. Результирующая сила, действующая на тело в отсутствие воздействия со стороны магнитного поля железотделителя равна

$$F = - \left( m\gamma \frac{dz}{dt} + mg \right),$$

Тогда дифференциальное уравнение, описывающее движение тела имеет вид

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = - \left( \gamma \frac{dz}{dt} + g \right).$$

При решении аналогично первому случаю получим

$$\begin{cases} z = \frac{-g}{\gamma^2} (t\gamma - 1) + \frac{1}{\gamma} C_1 + C_2 e^{-\gamma t}; \\ \frac{dz}{dt} = \frac{p}{\gamma} - \gamma C_2 e^{-\gamma t}. \end{cases}$$

Граничными условиями для данных уравнений являются  $z$ -координата тела и его вертикальная скорость ( $dz/dt$ ) в момент  $t=t_1$  ( $z=z_1$ ,  $dz/dt=V_1$ ). При подстановке граничных условий получим

$$z = \frac{-g}{\gamma^2} \left( t\gamma + e^{-\gamma(t-t_1)} - 1 \right) - \frac{V_1}{\gamma} e^{-\gamma(t-t_1)} + \frac{1}{\gamma} (z_1 \gamma + V_1 + g t_1). \quad (8)$$

$$V = V_1 e^{-\gamma(t-t_1)} - \frac{g}{\gamma} (1 - e^{-\gamma(t-t_1)}).$$

Определим момент  $t_2$ , в который тело остановится ( $V=0$ ):

$$0 = V_1 e^{-\gamma(t-t_1)} - \frac{g}{\gamma} (1 - e^{-\gamma(t-t_1)});$$

$$\frac{g}{\gamma} = \left( V_1 + \frac{g}{\gamma} \right) e^{-\gamma(t-t_1)}; \Rightarrow e^{-\gamma(t-t_1)} = \frac{g}{\gamma V_1 + g};$$

$$t_2 = t_1 + \frac{1}{\gamma} \ln \left( \frac{\gamma V_1 + g}{g} \right).$$

Тогда координату  $z_2$  после остановки тела исходя из (8) найдём как

$$z_2 = -\frac{g}{\gamma^2} (t_2 \gamma + e^{-\gamma t_2} - 1) - \frac{V_1}{\gamma} e^{-\gamma t_2} + \frac{1}{\gamma} (z_1 \gamma + V_1 + g t_1). \quad (9)$$

Алгоритм расчёта координаты  $z_2$  после остановки тела запишется следующим образом:

$$1. \begin{cases} z_1 = \left( \frac{\mu_0 \chi}{\rho \gamma^2} H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} - \frac{g}{\gamma^2} \right) \cdot (t_1 \gamma + e^{-\gamma t_1} - 1) - h; \\ V_1 = \left( \frac{\mu_0 \chi}{\rho \gamma} H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} - \frac{g}{\gamma} \right) \cdot (1 - e^{-\gamma t_1}). \end{cases}$$

$$2. t_2 = t_1 + \frac{1}{\gamma} \ln \left( \frac{\gamma V_1 + g}{g} \right).$$

$$3. z_2 = -\frac{g}{\gamma^2} (t_2 \gamma + e^{-\gamma t_2} - 1) - \frac{V_1}{\gamma} e^{-\gamma t_2} + \frac{1}{\gamma} (z_1 \gamma + V_1 + g t_1).$$

Принимая во внимание закон полного тока и (1), можно сказать, что удельная пондеромоторная сила пропорциональна второй степени тока, протекающего в катушке:

$$f = \mu_0 \chi H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} \propto I^2$$

При работе в импульсном режиме величина тока выбирается максимально возможной для заданного периода времени прохождения импульса, т.е. выполняется соотношение

$$I^2 t = const.$$

Следовательно, при неизменной геометрии магнитной системы будет действовать соотношение

$$H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} \cdot t_1 = const.$$

Эту постоянную можно определить для любой рабочей области железоотделителя графическим методом.

Необходимо определить такую область множества значений  $H_z \frac{\partial H_z}{\partial z}$  и  $t_1$ , в которой конечная координата  $z_2$ , рассчитанная по формуле (9), будет больше либо равна  $(d-h)$ . Для значений  $\chi=3$ ;  $\rho=7800 \text{ кг/м}^3$ ;  $\gamma=10 \text{ с}^{-1}$ ;  $g=9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $h=0,4 \text{ м}$ ;  $d=0,35 \text{ м}$  получаем график, изображённый на рис.1.

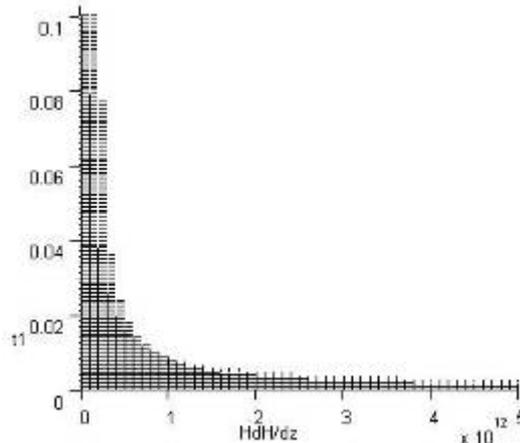


Рис.1. Извлечение ФТ.

В заштрихованной области извлечение ФТ не происходит, в незаштрихованной – ФТ извлекается. Можно определить уравнение кривой, разделяющей эти области, проведя аппроксимацию по точкам,

находящимся на границе областей. Поскольку граничные точки образуют линию, подобную гиперболе, в качестве аппроксимирующей используем функцию  $t_1 = a + \frac{b}{H_z \frac{\partial H_z}{\partial z}}$  (рис.2).

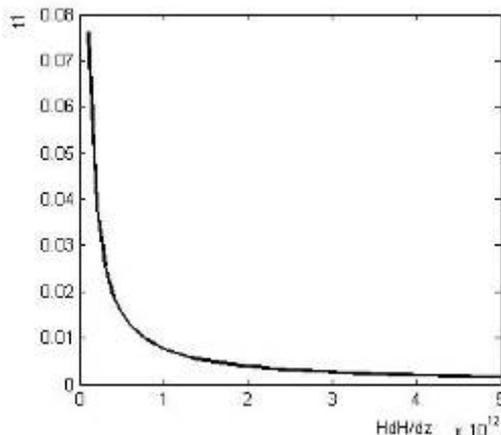


Рис.2. Аппроксимация кривой  $t_1=f(H_z dH_z/dz)$

При решении получим значения  $a=5,835 \cdot 10^{-5}$  с,  $b=7,6254 \cdot 10^9$  с  $\cdot$   $A^2/m^3$ .

Отсюда можно найти зависимость выражения  $H_z \frac{\partial H_z}{\partial z}$  от времени импульса  $t_1$ :

$$H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} = \frac{b}{t_1 - a}.$$

Тогда скорость тела в момент прекращения действия импульса тока можно найти с учётом найденной аппроксимации как

$$V_1 = \left( \frac{\mu_0 \chi}{\rho \gamma} \cdot \frac{b}{t_1 - a} - \frac{g}{\gamma} \right) \cdot (1 - e^{-\gamma t_1}). \quad (10)$$

Можно сказать, что длина зоны действия железоотделителя  $l$  связана как со временем извлечения ФТ  $t_2$ , так и скоростью движения конвейера  $V_k$  следующим уравнением:

$$l = V_k \cdot t_2.$$

С учётом (10)

$$l = V_k \cdot \left[ t_1 + \frac{1}{\gamma} \ln \left( \left( \frac{\mu_0 \chi}{g \rho} \cdot \frac{b}{t_1 - a} - 1 \right) \cdot (1 - e^{-\gamma t_1}) + 1 \right) \right]. \quad (11)$$

Теперь, задавая время импульса тока, можно определить необходимую удельную пондеромоторную силу и длину рабочей области железоотделителя, например, при скорости конвейера равной  $V_k = 2,5$  м/с (рис.3).

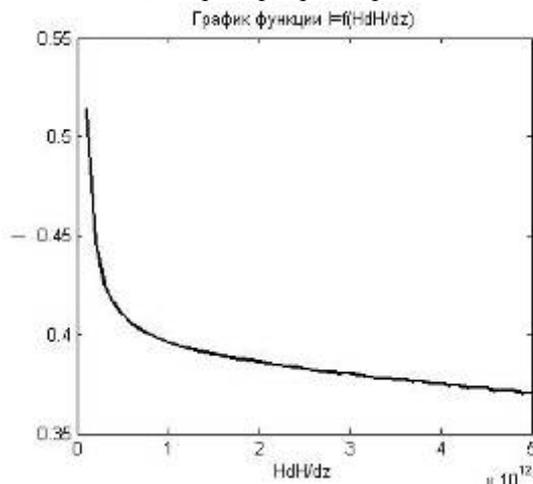


Рис.3. Зависимость длины рабочей области железоотделителя от величины удельной пондеромоторной силы.

Из графика на рис.3 видно, что увеличение удельной пондеромоторной силы свыше  $10^{12}$   $A^2/m^3$  не приводит к значительному уменьшению длины рабочей области в случае, если время импульса  $t_1$  принимается минимально возможным. Это необходимо учесть при оптимальном проектировании железоотделителей.

Аналогичные зависимости можно определить для любых исходных данных расчёта.

Проведём сравнение двух методов определения длины рабочей области. В [1] удельная ponderomotorная сила определялась из выражения

$$\mu_0 \chi \frac{m}{\rho} H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} = m\gamma \frac{dz}{dt} + mg, \quad (12)$$

где  $\frac{dz}{dt}$  принималось постоянным и равным  $\frac{dz}{dt} = \frac{V_k h}{l}$ . Тогда из (12) следует

$$l = \frac{\gamma \rho V_k h}{\mu_0 \chi H_z \frac{dH_z}{dz} - g \rho}. \quad (13)$$

В табл.1 приведены расчётные значения длины рабочей области, рассчитанные по формулам существующего метода (13) ( $l_1$ ) и предлагаемого (11) ( $l_2$ ). Для различного времени импульса  $t_I$  были получены значения  $H_z \frac{\partial H_z}{\partial z}$  по аппроксимированной кривой, затем был произведён расчёт длин рабочей зоны.

Таблица 1

Сравнение методов определения длины рабочей зона железоотделителя.

$t_I, c$	0,1	0,075	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,015	0,01	0,005
$H_z \frac{\partial H_z}{\partial z}, 10^{11} A^2/m^3$	0,763	1,018	1,272	1,527	1,909	2,547	3,824	5,103	7,670	15,431
$l_1, m$	0,369	0,254	0,194	0,156	0,121	0,088	0,057	0,042	0,028	0,014
$l_2, m$	0,502	0,472	0,454	0,443	0,432	0,421	0,411	0,406	0,401	0,397
$\delta, \%$	26,46	46,16	57,40	64,71	71,92	79,04	86,09	89,60	93,09	96,58

Из приведённых данных видно, что с уменьшением времени импульса погрешность существующего метода значительно увеличивается. Таким образом, новый метод повышает надёжность извлечения ФТ из потока немагнитного вещества при импульсном характере работы железоотделителя.

**Выводы.** Предложен новый способ определения параметров рабочей области импульсного железоотделителя, который позволяет точнее определить требования к его магнитной системе. Определён зависимости длины рабочей зоны от удельной ponderomotorной силы, что должно быть учтено при оптимальном проектировании железоотделителей.

### Литература

1. Букреев В.В. Железоотделитель с комбинированной электромагнитной системой. // Техн. електродинаміка. – 2004. – №6. – С. 107-110.
2. Букреев В.В. Формирование магнитного поля в рабочей области импульсного железоотделителя. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2004. – №4. – С. 150-152.
3. Букреев В.В., Яковенко В.В., Якименко А.Е. Расчёт магнитной системы железоотделителя. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2008. – №4,ч.1. – С. 70-72.
4. Бранспиз Ю.А. Совершенствование методов расчёта и конструкций электромагнитных шкивных железоотделителей.: Дис. канд.техн.наук. - Ворошиловград, 1989. – 210 с.

### References

1. Bukreev V.V. Zhelezootdelitel s kombinirovannoy elektromagnitnoy sistemoy. // Tehn. elektrodinamika. – 2004. – №6. – S. 107-110.
2. Bukreev V.V. Formirovanie magnitnogo polya v rabochey oblasti impulsnogo zhelezootdelitelya. // Visnik Kremenchut'skogo derzhavnogo politehnichnogo universitetu. – 2004. – №4. – S. 150-152.
3. Bukreev V.V., Yakovenko V.V., Yakimenko A.E. RaschYot magnitnoy sistemyi zhelezootdelitelya. // Visnik Kremenchut'skogo derzhavnogo polItehnIchnogo unIversitetu. – 2008. – №4, ch.1. – S. 70-72.
4. Branspiz Yu.A. Sovershenstvovanie metodov raschyota i konstruktsiy elektromagnitnyih shkivnyih zhelezootdeliteley.: Dis. kand.tehn.nauk. - Voroshilovgrad, 1989. – 210 s.

*Проведено аналіз існуючих праць, присвячених визначенню характеристик імпульсних електромагнітних залізовідділювачів. Запропоновано новий метод визначення характеристик робочої області, який враховує імпульсний характер впливу магнітного поля залізовідділювача на феромагнітні тіла. Наведено алгоритм розрахунку характеристик робочої області. Проведено порівняння запропонованого методу з існуючим. Новий метод дозволяє підвищити надійність вилучення феромагнітних тіл з потоку немагнітної сипучої речовини.*

**Ключові слова:** магнітне поле, залізовідділювач, робоча область, ponderomotorна сила.

*Existing works devoted to the characterization of pulsed electromagnetic iron separators are analyzed. A new method for determining the characteristics of the work area is proposed. It takes into account the pulsed nature of the iron separator's magnetic field impact on the ferromagnetic parts. Algorithm for calculating characteristics of the work area is given. The proposed method is compared with the existing ones. The new method improves the reliability of the extraction of ferromagnetic parts from non-magnetic flux of particulate matter.*

**Keywords:** magnetic field, iron separator, work area, the ponderomotive force.

**Жарынин Д.В.** – аспирант кафедры «Электромеханика», ВНУ им. В.Даля.

*Рецензент - Яковенко В.В. докт.техн.наук, профессор ВНУ им.В.Даля*

Zharynin D.V.

## IMPROVED TECHNIQUE FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF THE WORK AREA OF PULSED ELECTROMAGNETIC IRON SEPARATOR

*Existing works devoted to the characterization of pulsed electromagnetic iron separators are analyzed. A new method for determining the characteristics of the work area is proposed. It takes into account the pulsed nature of the iron separator's magnetic field impact on the ferromagnetic parts. Algorithm for calculating characteristics of the work area is given. The proposed method is compared with the existing ones. The new method improves the reliability of the extraction of ferromagnetic parts from non-magnetic flux of particulate matter.*

**Keywords:** magnetic field, iron separator, work area, the ponderomotive force.

**Actuality of the research.** In recent years, due to the sharp rise in price of natural gas a transition of power plants from natural gas to coal, and as a consequence, increased consumption of coal has been declared. However, the use of coal requires the use of the complex of equipment, integral part of which are electromagnetic separators. Modern separators are electromagnets weight of several tons, power consumption 3-5 kW in continuous mode, i.e. their manufacture and use is also associated with considerable costs. In such situations obviously there is a need to reduce the consumption of materials and energy of iron separators.

**Theoretical analysis of researches.** A significant amount of works [1, 2, 3] proposed a scheme of combined pulse iron separator, which has lower consumption of materials and power than conventional models. The economic effect of such a separator is provided with work in pulsed mode, i.e. the flow of currents in the windings of magnitude significantly greater than in the traditional model, which allows to create specific ponderomotive force of required value in the working volume. Current is supplied to the coils only in case of presence of the ferromagnetic part (FP) in the flow of non-magnetic material, which greatly reduces power consumption. Detection of FP on the line is produced by magnetically sensitive elements (ferroprobes).

However, during calculating the pulse iron separator was accepted [1] that while extraction FP moves uniformly, which is not true in the case of a pulsed magnetic field exposure.

**The purpose of the work.** The purpose of the work is to refine the parameters of the iron separator working area taking into account the non-uniformity of FP movement during the extraction of the granular medium, which will further improve the calculation of iron separator magnetic system.

### Material and research results.

The input data for the synthesis of suspended separator magnetic systems are:

- Width of the conveyor;
- The speed of the conveyor belt  $V_k$ ;
- Suspension height of iron separator  $h$ ;
- The thickness of the nonmagnetic mixture on the line  $d < h$ .

From these data both a work area of iron separator and the required parameters of the magnetic field there can be determined. It is obvious that the width of the work area must be equal to the width of the conveyor, the height – to suspension height of iron separator.

To determine the length of the working area and the magnetic field characteristics let's consider the FP motion in nonmagnetic material flow under the influence of the magnetic field.

The ponderomotive force acting on extracted FP is relatively small as compared to electromagnet, sizes described in the following equation [4]:

$$\bar{F}_l = \int_V \frac{1}{2} \mu_0 \chi \text{grad}(H)^2 dV \approx \mu_0 \chi V H \text{grad} H, \quad (14)$$

where  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m,

$\chi$  – FP magnetic susceptibility;

$V$  – volume of FP;

$H$  – the magnetic field strength in the FP volume.

The vertical component of the ponderomotive force can be written as:

$$\bar{F}_l = \mu_0 \chi V H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} = \mu_0 \chi \frac{m}{\rho} H_z \frac{\partial H_z}{\partial z}, \quad (15)$$

where  $z$  - vertical coordinate.

The force of the resistance movement of FP in the first approximation is given by [4]

$$F_c = m\gamma \frac{dz}{dt} + mg, \quad (16)$$

where  $\gamma$  - coefficient whose value is within [4]  $\gamma = 5-15 \text{ s}^{-1}$ ;

$m$  – mass of FP.

Then the resultant force acting on a body can be defined as

$$F = \mu_0 \chi \frac{m}{\rho} H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} - \left( m\gamma \frac{dz}{dt} + mg \right).$$

Acceleration of the body by Newton's second law is equal to

$$a = \frac{F}{m} = \frac{\mu_0 \chi}{\rho} H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} - \left( \gamma \frac{dz}{dt} + g \right). \quad (17)$$

But acceleration is the second time derivative of  $z$ , so (4) is a linear second order differential equation:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 z}{dt^2} &= \frac{\mu_0 \chi}{\rho} H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} - \left( \gamma \frac{dz}{dt} + g \right); \\ \frac{d^2 z}{dt^2} + \gamma \frac{dz}{dt} &= \frac{\mu_0 \chi}{\rho} H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} - g. \end{aligned}$$

Using the change  $\frac{\mu_0 \chi}{\rho} H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} - g = p$ , we get the solution

$$\begin{cases} z = \frac{p}{\gamma^2} (t\gamma - 1) + \frac{1}{\gamma} C_1 + C_2 e^{-\gamma t}; \\ \frac{dz}{dt} = \frac{p}{\gamma} - \gamma C_2 e^{-\gamma t}. \end{cases} \quad (18)$$

The boundary conditions for these equations are the  $z$ -coordinate of the body and its vertical speed ( $V=dz/dt$ ) at the onset of movement for applying a current pulse to the coil  $t=0$  ( $z(0)=-h$ ,  $\frac{dz}{dt}(0)=0$ ). Substituting the boundary conditions, we get

$$z = \left( \frac{\mu_0 \chi}{\rho \gamma^2} H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} - \frac{g}{\gamma^2} \right) \cdot (t\gamma + e^{-\gamma t} - 1) - h; \quad (19)$$

$$V = \frac{dz}{dt} = \left( \frac{\mu_0 \chi}{\rho \gamma} H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} - \frac{g}{\gamma} \right) \cdot (1 - e^{-\gamma t}). \quad (20)$$

Using these expressions coordinate  $z_1$  and speed  $V_1$  of the body at the termination of the current pulse  $t_1$  can be obtained.

Let's consider the body motion after the pulse of current in the windings of the magnetic system. The resultant force acting on the body in the absence of influence from the magnetic field of iron separator is equal to

$$F = - \left( m\gamma \frac{dz}{dt} + mg \right),$$

Then the differential equation describing the motion of the body is of the form

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = - \left( \gamma \frac{dz}{dt} + g \right).$$

At the solution in the first case we obtain

$$\begin{cases} z = \frac{-g}{\gamma^2} (t\gamma - 1) + \frac{1}{\gamma} C_1 + C_2 e^{-\gamma t}; \\ \frac{dz}{dt} = \frac{p}{\gamma} - \gamma C_2 e^{-\gamma t}. \end{cases}$$

The boundary conditions for these equations are the  $z$ -coordinate of the body and its vertical speed ( $dz/dt$ ) at the time  $t=t_1$  ( $z=z_1$ ,  $dz/dt=V_1$ ). Substituting the boundary conditions, we get

$$z = \frac{-g}{\gamma^2} \left( t\gamma + e^{-\gamma(t-t_1)} - 1 \right) - \frac{V_1}{\gamma} e^{-\gamma(t-t_1)} + \frac{1}{\gamma} (z_1 \gamma + V_1 + g t_1). \quad (21)$$

$$V = V_1 e^{-\gamma(t-t_1)} - \frac{g}{\gamma} \left( 1 - e^{-\gamma(t-t_1)} \right).$$

Let's define the time  $t_2$ , in which the body stops ( $V=0$ ):

$$0 = V_1 e^{-\gamma(t-t_1)} - \frac{g}{\gamma} \left( 1 - e^{-\gamma(t-t_1)} \right);$$

$$\frac{g}{\gamma} = \left( V_1 + \frac{g}{\gamma} \right) e^{-\gamma(t-t_1)}; \Rightarrow e^{-\gamma(t-t_1)} = \frac{g}{\gamma V_1 + g};$$

$$t_2 = t_1 + \frac{1}{\gamma} \ln \left( \frac{\gamma V_1 + g}{g} \right).$$

Then coordinate  $z_2$  after stopping the body from (8) we find as

$$z_2 = -\frac{g}{\gamma^2} (t_2 \gamma + e^{-\gamma t_2} - 1) - \frac{V_1}{\gamma} e^{-\gamma t_2} + \frac{1}{\gamma} (z_1 \gamma + V_1 + g t_1). \quad (22)$$

The algorithm for calculating the coordinate  $z_2$  after stopping the body can be written as follows:

$$4. \begin{cases} z_1 = \left( \frac{\mu_0 \chi}{\rho \gamma^2} H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} - \frac{g}{\gamma^2} \right) \cdot (t_1 \gamma + e^{-\gamma t_1} - 1) - h; \\ V_1 = \left( \frac{\mu_0 \chi}{\rho \gamma} H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} - \frac{g}{\gamma} \right) \cdot (1 - e^{-\gamma t_1}). \end{cases}$$

$$5. t_2 = t_1 + \frac{1}{\gamma} \ln \left( \frac{\gamma V_1 + g}{g} \right).$$

$$6. z_2 = -\frac{g}{\gamma^2} (t_2 \gamma + e^{-\gamma t_2} - 1) - \frac{V_1}{\gamma} e^{-\gamma t_2} + \frac{1}{\gamma} (z_1 \gamma + V_1 + g t_1).$$

Considering Ampère's circuital law and (1), we can say that the specific ponderomotive force is proportional to the second degree of current flowing in the coil:

$$f = \mu_0 \chi H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} \propto I^2$$

Operating in a pulsed mode current value is selected as maximally possible for a given time period of the pulse, i.e., satisfying the relation

$$I^2 t = const.$$

Therefore, at constant geometry of the magnetic system the relation will operate as

$$H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} \cdot t_1 = const.$$

This constant can be determined for any work area of iron separator by graphic method. It's necessary to determine the area of plurality of values  $H_z \frac{\partial H_z}{\partial z}$  and  $t_1$ , in which the final coordinate  $z_2$ , calculated by formula (9), is greater than or equal to  $(d-h)$ . For values of  $\chi=3$ ;  $\rho=7800 \text{ kg/m}^3$ ;  $\gamma=10 \text{ s}^{-1}$ ;  $g=9,81 \text{ m/s}^2$ ;  $h=0,4 \text{ m}$ ;  $d=0,35 \text{ m}$  we get a graph shown in Figure 1.

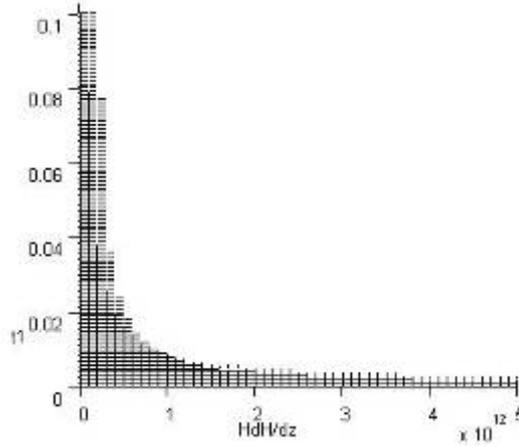


Figure 1. Extracting the FP.

In the shaded area extraction of FP does not occur, in the unshaded one FP is removed. We can determine the equation of the curve separating these areas, spending approximation of the points located on the border areas. Since the boundary points form a line like hyperbole, as the approximating function we use  $t_1 = a + \frac{b}{H_z \frac{\partial H_z}{\partial z}}$  (Fig. 2).

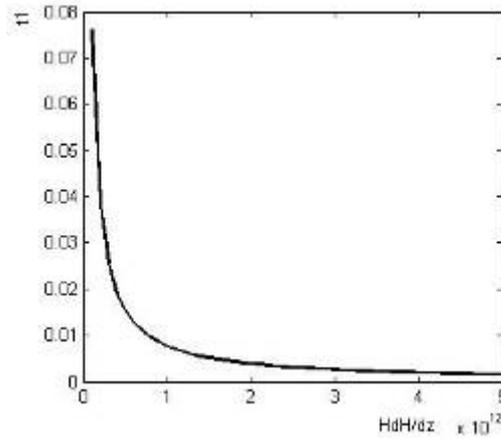


Figure 2. Approximation of the curve  $t_1=f(H_z dH_z/dz)$   
 In the solution we obtain the values of  $a=5,835 \cdot 10^{-5}$  s,  $b=7,6254 \cdot 10^9$  c · A<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>.

From this we can find the dependence of the expression  $H_z \frac{\partial H_z}{\partial z}$  on the pulse time  $t_1$ :

$$H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} = \frac{b}{t_1 - a}.$$

Then the speed of the body at the time of the termination of the current pulse can be found considering the found approximation as

$$V_1 = \left( \frac{\mu_0 \chi}{\rho \gamma} \cdot \frac{b}{t_1 - a} - \frac{g}{\gamma} \right) \cdot (1 - e^{-\gamma t_1}). \quad (23)$$

It can be said that the length of iron separator work area  $l$  is associated with time of extraction FP  $t_2$ , and the conveyor speed  $V_k$  with following equation:

$$l = V_k \cdot t_2.$$

In view of (10)

$$l = V_k \cdot \left[ t_1 + \frac{1}{\gamma} \ln \left( \left( \frac{\mu_0 \chi}{g \rho} \cdot \frac{b}{t_1 - a} - 1 \right) \cdot (1 - e^{-\gamma t_1}) + 1 \right) \right]. \quad (24)$$

Now, setting the current pulse, specific ponderomotive force and length of the working area of iron separator can be determined, for example, equal to the conveyor speed  $V_k=2,5$  m/s (Fig. 3).

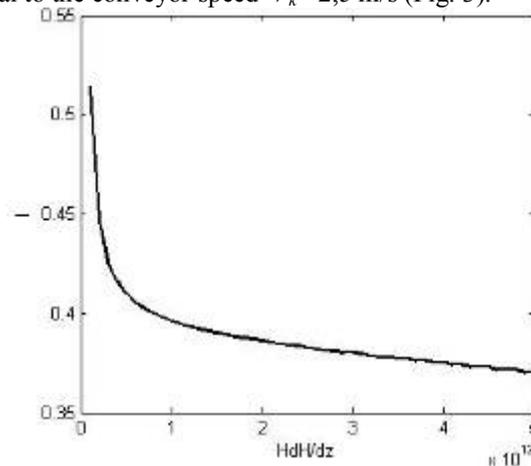


Figure 3. The dependence of the length of the work area iron separator on the specific ponderomotive force.

The graph in Figure 3 shows that the increase in the specific ponderomotive force of more than  $10^{12}$  A<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> does not lead to a significant reduction in the length of the work area when the pulse time  $t_1$  is taken as minimally possible. This should be taken into account in optimal designing of iron separators.

Similar dependencies can be defined for any initial data.

Let's compare two methods of determining the length of the work area. In [1] the specific ponderomotive force was determined from the expression

$$\mu_0 \chi \frac{m}{\rho} H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} = m \gamma \frac{dz}{dt} + mg, \quad (25)$$

where  $\frac{dz}{dt}$  was assumed constant and equal  $\frac{dz}{dt} = \frac{V_k h}{l}$ . Then from (12)

$$l = \frac{\gamma \rho V_k h}{\mu_0 \chi H_z \frac{dH_z}{dz} - g \rho} \quad (26)$$

Table 1 shows the calculated values for the length of the working area, calculated according to formulas of the existing method (13) ( $l_1$ ) and the proposed method (11) ( $l_2$ ). For a different pulse time  $t_1$  values  $H_z \frac{\partial H_z}{\partial z}$  were obtained by the approximated curve, then we calculated the length of the work area.

Table 1

Comparison of methods for determining the length of the iron separator working area.

$t_1, s$	0,1	0,075	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,015	0,01	0,005
$H_z \frac{\partial H_z}{\partial z}, 10^{11} A^2/m^3$	0,763	1,018	1,272	1,527	1,909	2,547	3,824	5,103	7,670	15,431
$l_1, m$	0,369	0,254	0,194	0,156	0,121	0,088	0,057	0,042	0,028	0,014
$l_2, m$	0,502	0,472	0,454	0,443	0,432	0,421	0,411	0,406	0,401	0,397
$\delta, \%$	26,46	46,16	57,40	64,71	71,92	79,04	86,09	89,60	93,09	96,58

The data shows, that with the current pulse time decrease the error of the existing method is greatly increased. Thus, the new method improves the reliability of FP extraction from the flow of non-magnetic materials with pulsed nature of the iron separator work.

**Conclusions.** A new method for determining the parameters of the working area of the pulsed iron separator is suggested, which allows a better definition of the requirements to its magnetic system. The dependences of the length of the working area to the specific ponderomotive force are defined, which should be taken into account in optimal designing of iron separators.

#### References

5. Bukreev V.V. Zhelezootdelitel s kombinirovannoy elektromagnitnoy sistemoy. // Tehn. elektrodinamika. – 2004. – №6. – S. 107-110.
6. Bukreev V.V. Formirovanie magnitnogo polya v rabochey oblasti impulsnogo zhelezootdelitelya. // Visnik Kremenchutskogo derzhavnogo politehničnogo universitetu. – 2004. – №4. – S. 150-152.
7. Bukreev V.V., Yakovenko V.V., Yakimenko A.E. RaschYot magnitnoy sistemyi zhelezootdelitelya. // Visnik Kremenchutskogo derzhavnogo politehničnogo unIversitetu. – 2008. – №4, ch.1. – S. 70-72.
8. Branspiz Yu.A. Sovershenstvovanie metodov raschyota i konstruktsiy elektromagnitnyih shkivnyih zhelezootdeliteley.: Dis. kand.tehn.nauk. - Voroshilovgrad, 1989. – 210 s.

**Zharynin D.V.** - Post-graduate student "Electromechanics" Volodymyr Dahl East Ukrainian National University.

*Reviewer: V. Yakovenko Doctor of Science Professor of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University.*