

**ИЗВЛЕЧЕНИЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПРИМЕСЕЙ  
ИЗ СЫПУЧИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Е.Р. Masyutkin

**EXTRACTION OF FERROMAGNETIC IMPURITIES FROM BULK AGRICULTURAL MATERIALS**

**Масюткин Е.П.** – канд. техн. наук, проф., ректор Керченского государственного морского технологического университета, г. Керчь. E-mail: kgmtu@kgmtu.ru

**Masyutkin E.P.** – Cand. Techn. Sci., Prof., Rector, Kerch State Marine Technological University, Kerch. E-mail: kgmtu@kgmtu.ru

Работа посвящена актуальной проблеме извлечения ферромагнитных примесей из высокодисперсных сельскохозяйственных материалов, таких как мука, мелкие крупы, при помощи магнитных концентраторов. Открытые многополюсные системы показали свою неэффективность по ряду показателей. В связи с этим применение полиградиентных магнитных сепараторов позволит существенно повысить эффективность сепарации. Эмпирический подход в создании конструкций не позволяет прогнозировать эффективность очистки сыпучих сельскохозяйственных материалов от ферромагнитных частиц и, как следствие, не всегда дает положительный результат в создании новых устройств. Показаны возможные формы участков, на которые происходит собирание магнитных частиц – «центров» коагуляции. Приведены значения напряженности поля, создаваемого цилиндрическими магнитными стержнями. Важным элементом расчета электромагнитного сепаратора с концентраторами является определение эффективности его работы, выраженной через взаимосвязь с основными электротехническими параметрами устройства. Представлена система уравнений осаждения мелких частиц на «центрах» коагуляции. Полученные уравнения исследовались также численным методом при варьировании параметров частиц, среды и поля. Определена зависимость относительного расстояния от напряженности поля и угла между вектором поля и линией движения частицы к «центру». Доказано, что около «центра» существуют два объема, из которых мелкие частицы осядут на соответствующих полюсах. Принимая во внимание,

что объемы симметричны и сферичны, определен прирост массы «центра» за счет осевших на нем частиц. Полученные математические модели и закономерности кинетики коагуляции и извлечения ферромагнитных частиц в магнитном поле в сыпучих материалах (сферичность частиц близка или равна единице) в полной мере могут быть использованы и для вязких сред (газов, жидкостей).

**Ключевые слова:** дисперсные материалы, магнитные центры, магнитные поля.

The work is devoted to actual problem of extraction of ferromagnetic impurities from highly dispersed agricultural materials such as flour, fine grains with the help of magnetic concentrators. Open multipolar systems have shown their ineffectiveness in a number of indicators. In this regard, the use of multigradient magnetic separators will significantly increase the separation efficiency. The empirical approach in creating designs does not allow predicting the effectiveness of recovery of ferromagnetic particles of granular agricultural materials and positive result isn't always achieved in the creation of new devices. Possible forms of plots are shown on which there is picking up magnetic particles, i.e. the "centers" of coagulation. The values of the field strength created by cylindrical magnetic bars are given. An important element in the calculation of electromagnetic separator with hubs is to determine the effectiveness of its work, expressed in terms of the relationship with the main electrical parameters of the device. The system of equations of the deposition of fine particles in the "center" of coagulation is presented. These equations were also investigated numerically by varying the particles' parameters, environment and field. The dependence of the relative distance from the

field strength, and the angle between the field vector and the line of motion of the particle to the "center" is determined. It is proved that near the "center" there are two volumes of which small particles will settle to the respective poles. Taking into account that the volumes are spherical and symmetrical, the gain of weight of the "center" is defined at the expense of settled particles on it.

**Keywords:** particulate materials, magnetic centers, magnetic fields.

**Введение.** Предметом исследований многих ученых на протяжении многих десятилетий являлись магнитные поля и их различное применение [1, 2]. Одним из таких направлений является актуальная проблема извлечения высокодисперсных ферромагнитных примесей из различных сельскохозяйственных материалов. Практика применения электрических и магнитных полей для интенсификации очистки от примесей показала высокие результаты перед традиционными устройствами [3, 4].

Многие производители магнитных сепараторов столкнулись с актуальной проблемой извлечения ферромагнитных частиц размером 5–100 мкм, которые возникают в продукции в результате износа трущихся пар перерабатывающего оборудования.

**Цель исследования:** создание математической модели процесса извлечения ферромагнитных частиц и определения относительного расстояния от напряженности поля и угла между вектором поля и линией движения частицы к полюсному наконечнику, в котором происходит извлечение посторонних примесей.

**Постановка задачи исследования**

Открытые многополюсные системы (рис. 1, а, б, в) показали свою неэффективность по ряду показателей, что привело к необходимости поиска кардинально нового решения. Применение полиградиентных сепараторов решают эту проблему. Однако отсутствие научного подхода к созданию и расчету данных устройств сдерживает их применение в различных отраслях народного хозяйства.

**Задачей исследования** является определение оптимальных параметров, при которых происходит процесс извлечения ферромагнитных посторонних примесей из сыпучих сельскохозяйственных материалов в полиградиентных сепараторах.

**Результаты исследования.** Вообще в природе источников однородных магнитных полей не существует, и, говоря о различных видах сепараторов, мы предполагаем о существовании градиента напряженности в разных точках его поверхности.

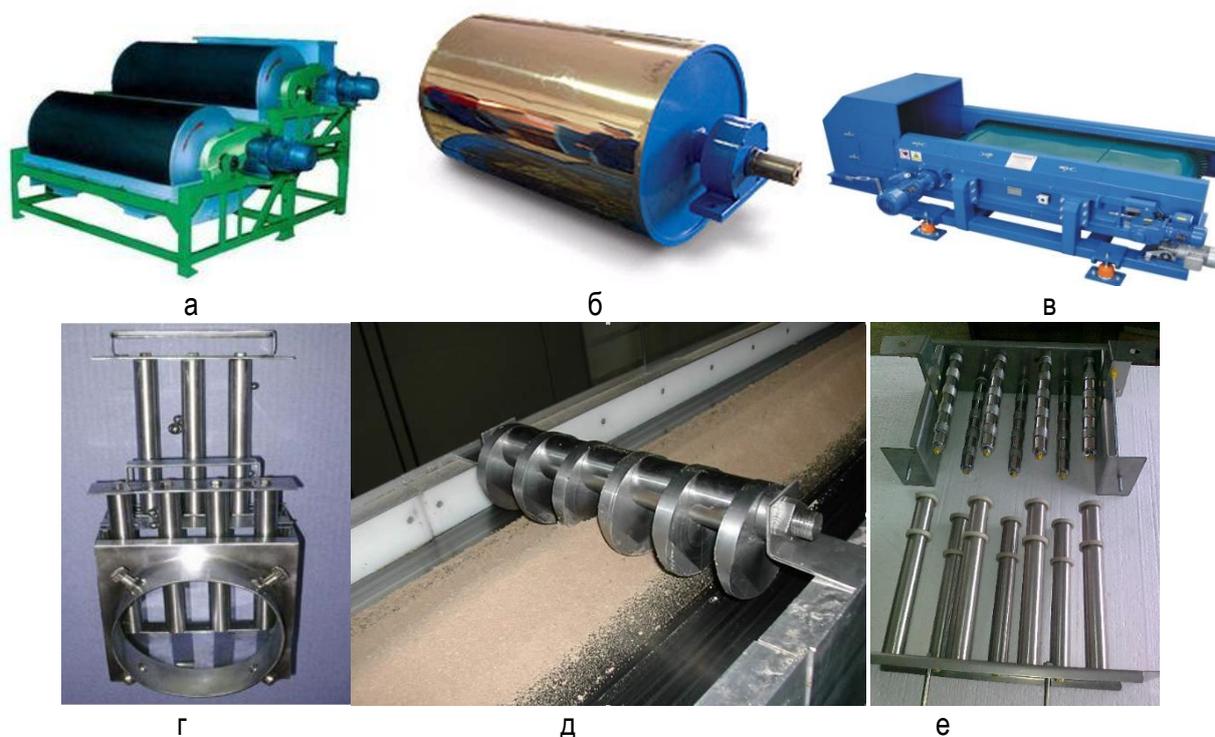


Рис. 1. Магнитные сепараторы [5–8]

Что касается промышленного подхода к созданию полиградиентных магнитных сепараторов, то таких попыток было множество. Но, согласно нашим исследованиям, производитель, идя по пути создания конструкций с полиградиентными магнитными полями на базе постоянных магнитов, проигрывает на снижении качества извлечения примесей при длительной эксплуатации сепараторов за счет сложности очистки улавливающих поверхностей (рис. 1, г, д, е). А также эмпирический подход в создании конструкций не позволяет спрогнозировать эффективность очистки сыпучих сельскохозяйственных материалов от ферромагнитных частиц и, как следствие, не всегда дает положительный результат в создании новых устройств.

Как показали исследования последних нескольких лет, требуется комплексный подход в решении этого вопроса, который, в первую очередь, требует знаний в распределении напряженности магнитного поля. В зависимости от формы взаимодействующих полюсов (рис. 2), так называемых «магнитных центров», или концентраторов поля, будет определяться напряжен-

ность поля в целом, а именно этот параметр стоит в числе главных факторов, непосредственно влияющих на значение фактической величины силы магнитного поля, благодаря которому частичка ферромагнетика извлекается из потока очищаемого материала.

Важным элементом расчета (см. рис. 2) электромагнитного сепаратора с концентраторами является определение эффективности его работы, выраженной через взаимосвязь с основными электротехническими параметрами устройства [9, 10]. В зависимости от формы источника магнитного поля меняется характер осаждения ферромагнитных частиц на полюсах, поэтому следует очень тщательно подходить к выбору форм полюсов. Так, остроконечный полюс имеет более высокую напряженность поля, чем тупоконечный, однако объем рабочего пространства, охватываемый полем, будет меньше. Поэтому к выбору формы взаимодействующих полюсов в полиградиентных сепараторах следует относиться очень серьезно, так как степень извлечения будет зависеть не только от напряженности поля, но и от его градиента.

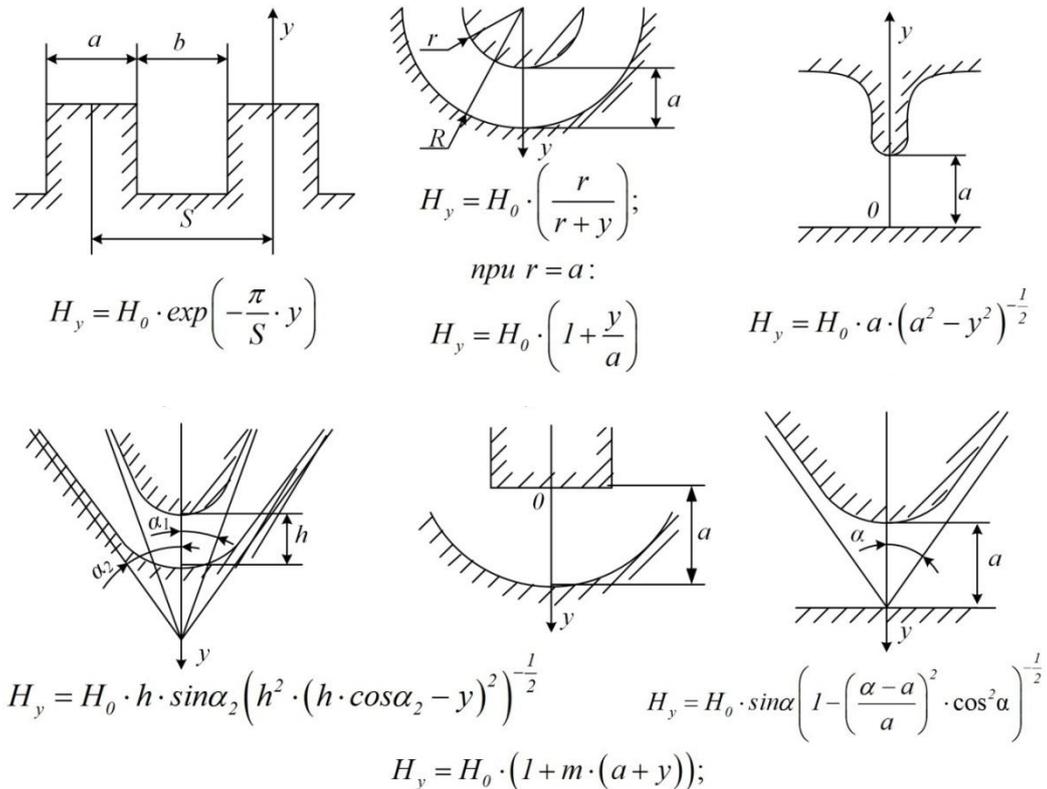


Рис. 2. Виды и формы взаимодействующих полюсов

Для простоты расчетов в качестве «центра» коагуляции примем стержень, имеющий форму цилиндра с диаметром  $d_u$ . Коагуляция мелких частиц на полюсах притяжения происходит за счет искажения магнитного поля «центрами»

коагуляции, т. е. вблизи «центров»  $gradH \neq 0$ . На рисунке 3 показана схема взаимодействия частиц с «центрами» коагуляции.

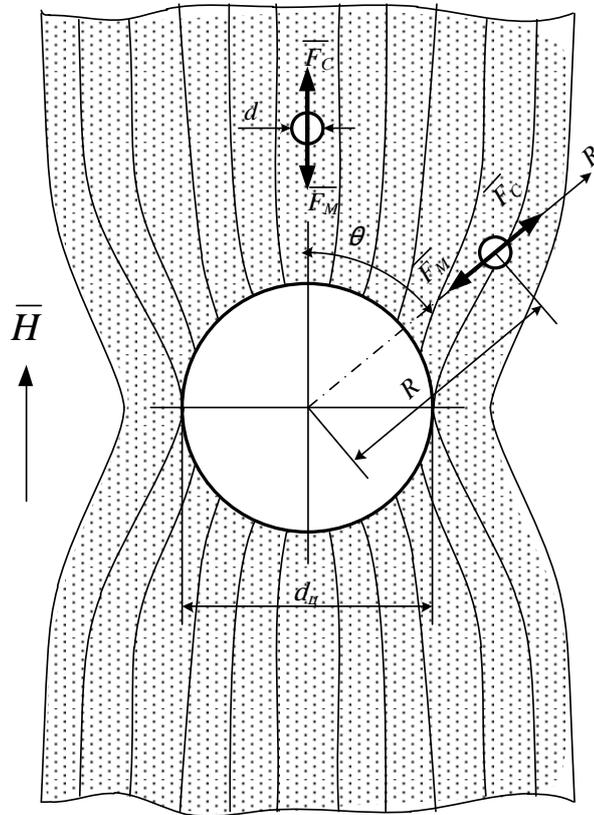


Рис. 3. Схема взаимодействия частиц с «центрами»

Напряженность поля вблизи «центра» коагуляции, перемещенного в однородное магнитное поле ( $gradH = 0$ ), определяется следующим выражением [11]:

$$H_R = H_0 \cdot \left( \frac{1 + (\mu - 1) \cdot d_u^3}{4 \cdot (\mu + 2) \cdot R^3} \right) \cdot \cos \theta \quad (1)$$

Дифференцируя (1) по  $R$  и записывая в виде  $H_R \cdot \frac{dH_R}{dR}$ , определим силу, действующую на частицу в области «центра» коагуляции. Подставляя  $H_R \cdot \frac{dH_R}{dR}$  в магнитную силу:

$$F_M = \mu_0 \cdot \varepsilon \cdot V \cdot H \cdot \frac{dH}{dl}, \quad (2)$$

где  $H$  и  $dH/dl$  – напряженность поля, А/м, и скорость ее изменения, А/м<sup>2</sup>, в направлении

движения частиц соответственно;  $\mu_0 = const = 4 \cdot \pi^{-7}$ ,  $\varepsilon$  и  $V$  – магнитная восприимчивость и объем, м<sup>3</sup>, частицы соответственно, получим:

$$F_M = \mu_0 \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi \cdot d^3}{8} \cdot H_0^2 \cdot \left( 1 + \frac{(\mu - 1) \cdot d_u^3}{4 \cdot (\mu + 2) \cdot R^3} \right) \cdot \frac{(\mu - 1) \cdot d_u^3}{(\mu + 2) \cdot R^4} \cdot \cos^2 \theta \quad (3)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость частицы;  $R$  – текущая координата между частицей и «центром».

Запишем систему уравнений осаждения мелких частиц на «центрах» коагуляции:

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -A \cdot \frac{dR}{dt} + \frac{3 \cdot \mu_0 \cdot \varepsilon \cdot H_0^2 \cdot \cos^2 \theta}{4 \cdot \rho_r} \cdot \left( 1 + \frac{(\mu - 1) \cdot d_u^3}{4 \cdot (\mu + 2) \cdot R^3} \right) \cdot \frac{(\mu - 1) \cdot d_u^3}{(\mu + 2) \cdot R^4} \quad (4)$$

с начальными условиями – при  $t = 0$ :  $t(0) = 0$ ,  $U(0) = U_0$ ,  $R(0) = R_0$ .

Уравнение (4) позволяет определить динамические характеристики коагуляции частиц на «центрах» – скорость и расстояние, с которого

они взаимодействуют. При известных концентрациях частиц и «центров» коагуляции нетрудно определить прирост массы последних.

Уравнение (4) исследовалось также численным методом при варьировании параметров частиц, среды и поля. Учитывая некоторые особенности системы, связанные с размерами «центров» коагуляции и осаждающихся на них более мелких частиц, запишем ее в виде (при условии, что «центр» неподвижен)

$$\frac{dU}{dt} = -A \cdot U + \frac{3\mu_0 \cdot \varepsilon}{4\rho_r} \cdot H_0 \cos^2 \theta \left[ \left( 1 + \frac{\mu-1}{4(\mu+2) \cdot (0,5+Z)^3} \right) \times \right. \\ \left. \times \frac{\mu-1}{d_u \cdot (\mu+2) \cdot (0,5+Z)^4} \right]; \quad (5)$$

$$\frac{dZ}{dt} = -\frac{1}{d_u} \cdot U$$

где  $Z = \frac{(R-0,5d_u)}{d_u}$  – относительное расстояние от центра до частицы.

В качестве примера на рисунке 4 показаны результаты численного решения системы (5): определена зависимость относительного расстояния  $Z$  от напряженности  $H$  и угла  $\theta$  между вектором  $H$  и линией движения частицы к «центру» (отметим, что  $d_u = 12 \cdot 10^{-6}$  м,  $d = 1 \cdot 10^{-6}$  м).

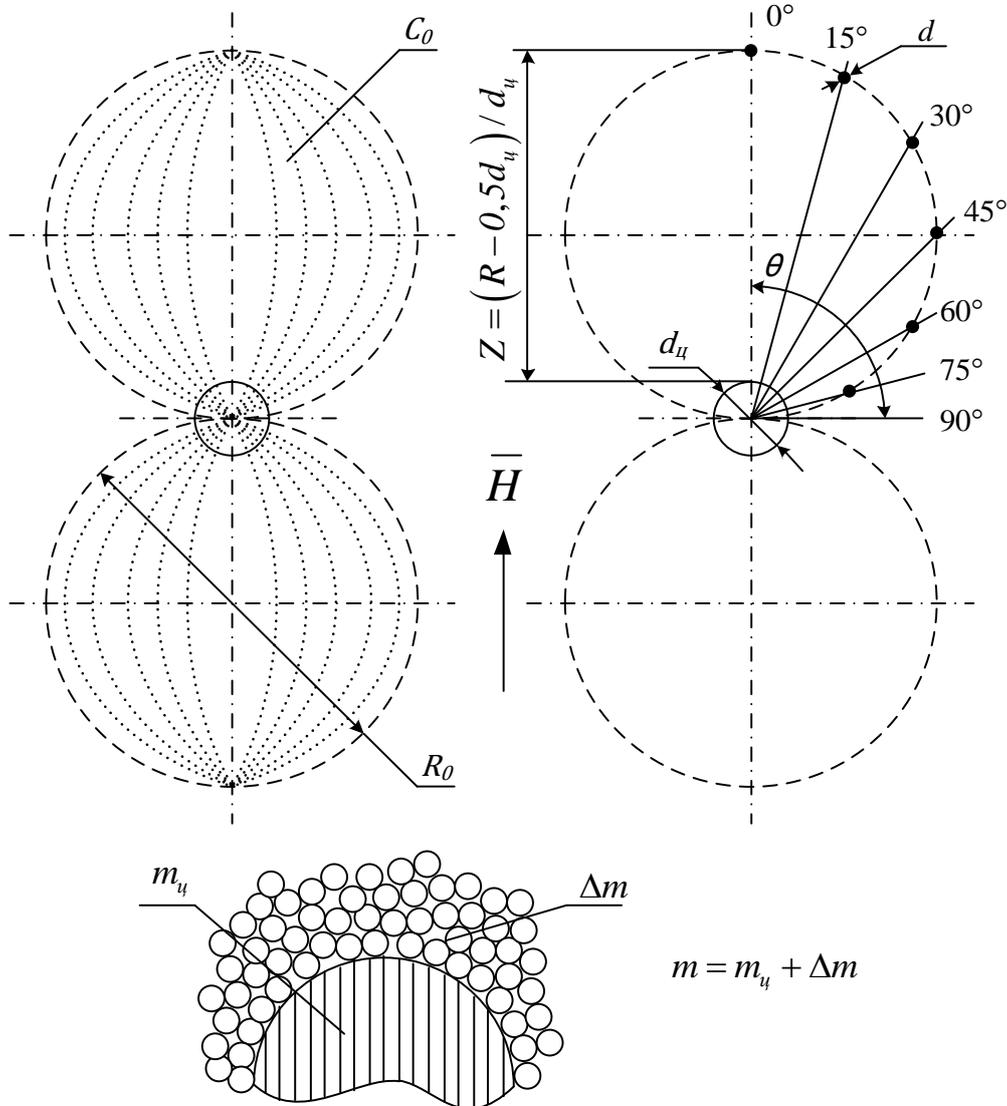


Рис. 4. Схема кинетики коагуляции частиц на «центрах»

Из рисунка 4 видно, что около «центра» существуют два объема, из которых все более мелкие частицы (при  $t \rightarrow \infty$ ) оседают на соответствующих полюсах (N и S). Принимая во внимание, что объемы симметричны и, как видно из решений, сферичны, нетрудно определить прирост массы «центра» за счет осевших на нем частиц:

$$\Delta m = 2 \cdot C_0 \cdot V_u = 2 \cdot C_0 \cdot \frac{\pi}{6} \left( \frac{R_0}{d_u} - 0,5 \right)^3, \quad (6)$$

где  $R_0$  – максимальное расстояние по направлению движения частиц к «центру» коагуляции при  $\theta = 0^\circ$ , которое определяется из решения системы для конкретных условий;  $C_0$  – концентрация частиц в объеме.

Полученные математические модели и закономерности кинетики коагуляции и извлечения ферромагнитных частиц в магнитном поле в сыпучих материалах (сферичность частиц близка или равна единице) в полной мере могут быть использованы и для вязких сред (газов, жидкостей). Кроме того, крупность частиц сыпучих материалов не должна превышать нескольких миллиметров (по некоторым данным – не более 3–5 мм). Следует также отметить, что существенное влияние на поведение частицы оказывает фактор формы, неучёт которого вносит погрешность при расчете реальных гидрозолей, которая может достигать нескольких десятков процентов [11, 12].

На практике, если ферромагнитные примеси в сыпучих материалах составляют сотые, даже тысячные доли процента, то явления коагуляции частиц, как такового, в магнитном поле не наблюдается.

**Выводы.** Эффективность извлечения частиц в электромагнитном сепараторе определяется размером и количеством «зон неулавливания», образованных по причине неполного охвата изменения магнитного поля вокруг каждого магнитного центра. Полученные математические зависимости позволяют определить области в рабочих камерах сепараторов, в которых ферромагнитные частицы при заданном значении напряженности магнитного поля и угла между вектором поля и линией движения частицы оседают на полюсах.

Расчеты показали, что около «центра» существуют два объема, в которых мелкие части-

цы оседают на соответствующих полюсах. Определен прирост массы «центра» за счет осевших на нем частиц.

## Литература

1. Масюткин Е.П., Просвирнин В.И., Авдеев Б.А. Очистка технических жидкостей от магнитных примесей в инфраструктуре водного транспорта // Рыбное хозяйство Украины. – Керчь: Изд-во КГМТУ, 2012. – № 3 (80). – С. 40–49.
2. Чарыков В.И., Соколов С.А. Повышение работоспособности электромагнитных установок для очистки сыпучих сельскохозяйственных продуктов от металлических примесей // Вестн. КрасГАУ. – 2006. – № 11. – С. 194–199.
3. Рогов В.А., Баранов Ю.С., Прусакова В.А. Повышение эффективности работы аппаратов циклонной очистки // Вестн. КрасГАУ. – 2011. – № 5. – С. 154–158.
4. Авдеев Б.А., Голиков С.П. Экспериментальное исследование эффективности очистки магнитного гидроциклона // Транспортное дело России. – 2014. – № 5. – С. 101–103.
5. Вихретоковые магнитные сепараторы, металлоуловители, фильтры сита в Польше. – URL: <http://magnetix.polish.ru>.
6. Сепараторы «Полюс-ПП» для сахарной промышленности. – URL: [http://www.polusn.com/mobile/separator\\_a.html](http://www.polusn.com/mobile/separator_a.html).
7. Сепаратор магнитный МРГ-500. – URL: <http://hobby-cg.ru/catalog/oborudovanie/separatoryi/separator-magnitnyj-mrg-500.html>.
8. Сепаратор магнитный 7 стержней. – URL: [http://riksa.at.ua/load/magnitnye\\_separatory/separatory\\_na\\_n\\_sterzhnej](http://riksa.at.ua/load/magnitnye_separatory/separatory_na_n_sterzhnej).
9. Деркач В.Г. Специальные методы обогащения полезных ископаемых. – М.: Наука, 1966. – С. 338.
10. Кармазин В.И. Современные методы обогащения руд черных металлов. – М.: Гостехиздат, 1962. – 659 с.
11. Масюткин Е.П., Просвирнин В.И., Авдеев Б.А. Влияние формы золь на эффективность очистки дисперсных сред // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 5/8 (59). – С. 52–57.

12. Авдеев Б.А., Масюткин Е.П., Просвирнин В.И. Численное решение задачи о коагуляции двух частиц в потоке текучей среды в полярных координатах // Изв. высш. учеб. заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2014. – № 4 (179). – С. 13–17.
6. Separatory «Poljus-PR» dlja saharnoj promyshlennosti. – Rezhim URL: [http://www.polus-n.com/mobile/separator\\_a.html](http://www.polus-n.com/mobile/separator_a.html).

#### **Literatura**

1. Masjutkin E.P., Prosvirnin V.I., Avdeev B.A. Ochistka tehniceskikh zhidkostej ot magnitnyh primesej v infrastrukture vodnogo transporta // Rybnoe hozjajstvo Ukrainy. – Kerch': Izd-vo KGMTU, 2012. – № 3 (80). – S. 40–49.
2. Charykov V.I., Sokolov S.A. Povyszenie rabotosposobnosti jelektromagnitnyh ustanovok dlja ochistki sypuchih sel'skhozjajstvennyh produktov ot metallicheskih primesej // Vestn. KrasGAU. – 2006. – № 11. – S. 194–199.
3. Rogov V.A., Baranov Ju.S., Prusakova V.A. Povyszenie jeffektivnosti raboty apparatov ciklonnoj ochistki // Vestn. KrasGAU. – 2011. – № 5. – S. 154–158.
4. Avdeev B.A., Golikov S.P. Jeksperimental'noe issledovanie jeffektivnosti ochistki magnitnogo gidrociklona // Transportnoe delo Rossii. – 2014. – № 5. – S. 101–103.
5. Vihretokovye magnitnye separatory metallo- uloviteli fil'try sita v Pol'she. – URL: <http://magnetix.polish.ru>.
7. Separator magnitnyj MRG-500. – URL: <http://hobby-cg.ru/catalog/oborudovanie/separatoryi/separator-magnitnyj-mrg-500.html>.
8. Separator magnitnyj 7 sterzhnej. – URL: [http://riksa.at.ua/load/magnitnye\\_separatory/separatory\\_na\\_n\\_sterzhnej](http://riksa.at.ua/load/magnitnye_separatory/separatory_na_n_sterzhnej).
9. Derkach V.G. Special'nye metody obogashhenija poleznyh iskopaemyh. – M.: Nauka, 1966. – S. 338.
10. Karmazin V.I. Sovremennye metody obogashhenija rud chernyh metallov. – M.: Gostehizdat, 1962. – 659 s.
11. Masjutkin E.P., Prosvirnin V.I., Avdeev B.A. Vlijanie formy zolej na jeffektivnost' ochistki dispersnyh sred // Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij. – 2012. – № 5/8 (59). – S. 52–57.
12. Avdeev B.A., Masjutkin E.P., Prosvirnin V.I. Chislennoe reshenie zadachi o koaguljacii dvuh chastic v potoke tekucej sredy v poljarnyh koordinatah // Izv. vyssh. uceb. zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Tehniceskie nauki. – 2014. – № 4 (179). – S. 13–17.

