

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ В ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

**В. С. Верченков, Д. М. Мордасов, М. Д. Мордасов**

*Кафедра «Материалы и технология», verch5@yandex.ru;  
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** неодимовые магниты; переменное магнитное поле; переработка твердых отходов; цветные металлы.

**Аннотация:** Предложен метод исследования цветных металлов в переменном магнитном поле. Представлены подготовленные изображения устройства, программного обеспечения, а так же траектория движения цветных металлов в активной зоне. Получены результаты, позволяющие проводить сепарацию исследованных образцов между собой.

---

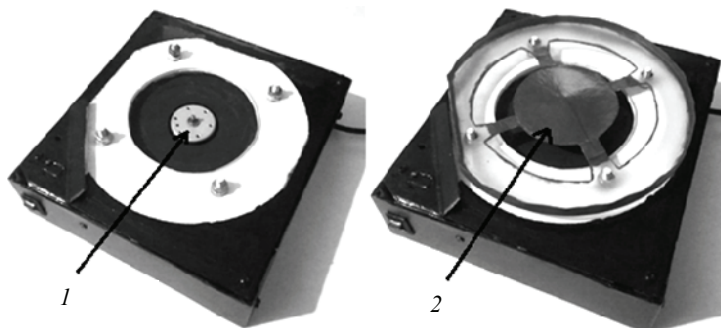
Цветные металлы являются важным сегментом мировой торговли, и их потребление с развитием научно-технического прогресса постоянно растет. Область применения цветных металлов очень широка: строительство, инфраструктура, машиностроение, радиоэлектроника, сфера высоких технологий, бытовые коммуникации [1 – 3].

Одним из эффективных путей получения цветных металлов является переработка твердых металлосодержащих отходов. Существует большое количество методов разделения материалов и установок для их реализации [4, 5]. Извлечение металлических включений чаще всего осуществляется электромагнитными методами. В частности, для сбора цветных металлов применяют электродинамические сепараторы, принцип действия которых заключается в создании переменного магнитного поля воздействующего на сепарируемый материал [6]. Попадая в активную зону, неэлектропроводные частицы движутся без изменений, а цветные металлы приобретают иную траекторию, так как являются электропроводным немагнитным материалом [7]. Таким образом, происходит разделение материалов на электропроводные и диэлектрические, что в настоящее время является порогом функциональности большинства установок.

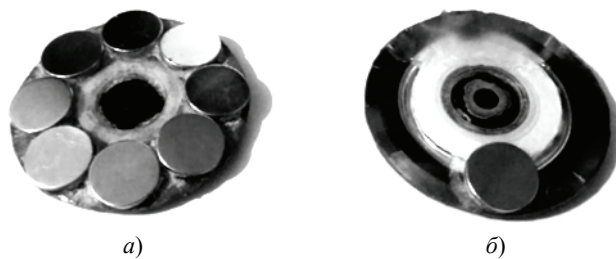
Следует отметить, что металлосодержащие отходы часто представляют собой смеси частиц различных металлов. Большинство серийно-выпускаемых установок-сепараторов не позволяет разделять цветные металлы, близкие по своим магнитным свойствам. В этой связи исследование поведения различных цветных металлов в переменном магнитном поле является актуальной задачей, решение которой позволит проводить сепарацию немагнитных электропроводных материалов между собой, что существенно повысит ценность продуктов разделения.

Для решения поставленной задачи сконструировано устройство (рис. 1), позволяющее создавать переменное магнитное поле путем механического вращения насадки с магнитами и возможностью регулировки скорости вращения [8].

В зависимости от количества магнитов на насадке меняется скорость изменения вектора магнитной индукции (рис. 2). Для 8 магнитов изменение вектора магнитной индукции составляет 16 раз (рис. 2, а), в то время как для одного магнита – 4 раза за один оборот (рис. 2, б).

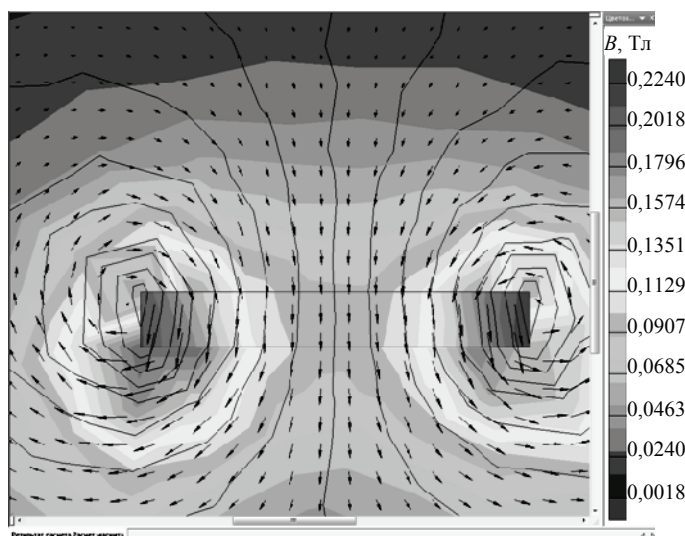


**Рис. 1. Устройство для создания переменного магнитного поля:**  
1 – электродвигатель; 2 – предметный столик



**Рис. 2. Насадки с 8 магнитами (а) и одним магнитом (б)**

В качестве магнитов использовались неодимовые магниты N42, размерами  $14 \times 2$  мм, с магнитной индукцией  $\vec{B} = 1,3$  Тл. Силовые линии такого магнита моделировались в программе ELCUT Student 6.4 и представлены на рис. 3.



**Рис. 3. Силовые линии неодимового магнита N42**

Магнитная индукция неодимового магнита на различном расстоянии от самого магнита не одинакова [9]: на расстоянии 1 мм она составляет 0,120 и 0,224 Тл для насадок соответственно с одним и 8 магнитами; 2 мм – соответственно 0,117 и 0,112.

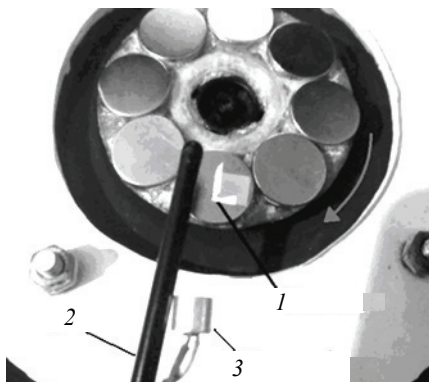
Измерение скорости (частоты) вращения насадок проводилось контактным механическим методом путем определения времени, за которое флажок, жестко закрепленный на насадке, совершает один оборот. При вращении насадки флажок 1 соударяется с неподвижным стержнем 2, микрофон 3 фиксирует звуковой эффект от соударения и через звуковую карту компьютера передает колебания в программу Audacity для их записи и обработки (рис. 4).

В качестве образцов использованы следующие цветные металлы: медь, алюминий, цинк – плотности соответственно 8 920; 2 698,9; 7 133 кг/м<sup>3</sup> (рис. 5). Образцы изготовлены с размерами: длина – 5,9 мм, ширина – 5,9 мм, высота – 0,8 мм.

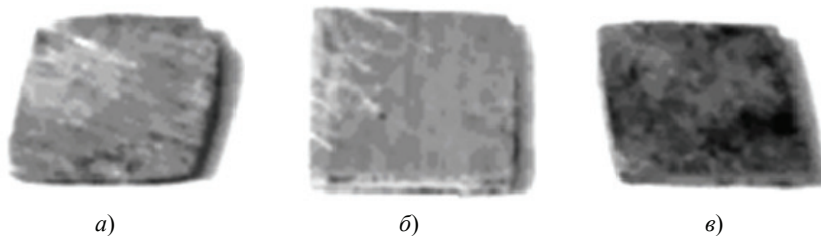
Экспериментальные исследования проводились в соответствии с методикой, включающей следующие основные этапы:

- подготовка образцов;
- выбор и установка насадки с магнитами на устройство для создания переменного магнитного поля;
- изменение скорости вращения насадки до момента начала визуального перемещения образца на предметном столике устройства;
- регистрация и определение скорости (частоты) вращения насадки в программе Audacity, при которой образцы из стационарного положения начинают движение.

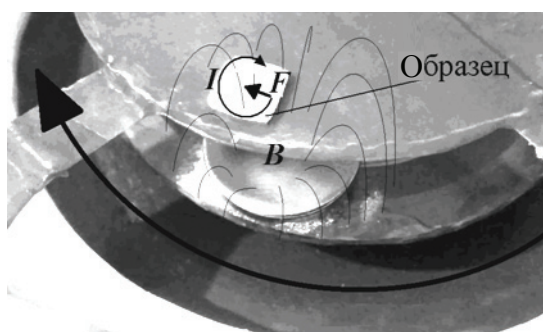
При определенной скорости (частоте) вращения насадки расположенные над ней образцы начинали двигаться. Значения частот вращения насадки, соответствующие началу движения образцов цинка, меди и алюминия, составили соответственно 17, 6 и 3 Гц. При проведении исследований применялась насадка из 8 магнитов с магнитной индукцией  $\vec{B} = 0,112$  Тл.



**Рис. 4. Схема записи колебаний:**  
1 – флажок; 2 – стержень; 3 – микрофон



**Рис. 5. Экспериментальные образцы:**  
а – медь; б – алюминий; в – цинк



**Рис. 6. Исследуемый образец в переменном магнитном поле**

Таким образом, при вращении насадки с магнитами создается переменное магнитное поле, которое действует на образцы, помещенные на предметный столик. Под действием переменного магнитного поля в образцах возникает электродвижущая сила индукции, которая создает токовые петли  $I$ , именуемые вихревыми токами (токами Фуко), при этом возникает сила Лоренца  $F$ , направление которой определяется правилом правой руки [10] (рис. 6).

Анализ представленных выше результатов экспериментальных исследований показывает, что для каждого материала существует своя определенная частота вращения магнитной системы, при которой он начинает двигаться в магнитном поле. Управление скоростью (частотой) вращения магнитной системы открывает возможность разделения различных немагнитных электропроводных материалов между собой.

#### *Список литературы*

1. Тенденции и перспективы развития рециклинга металлов / А. И. Татаркин, О. А. Романова, В. Г. Дюбанов [и др.] // Экология и промышленность России. – 2013. – № 5. – С. 4 – 10.
2. Абросимов, А. С. Подготовка отходов цветных металлов к металлургическому переделу. Зарубежный опыт / А. С. Абросимов, Ю. А. Бондаренко, А. П. Фролов // Цветные металлы. – 1989. – № 8. – С. 100 – 104.
3. Кривцова, Г. Б. Электродинамическая сепарация. Метод и тенденции развития / Г. Б. Кривцова, А. И. Ратникова // Совершенствование процессов электросепарации и конструкций электросепараторов : сб. науч. тр. – Л., 1987. – С. 58 – 68.
4. Ахмадиев, Ф. Г. Моделирование и оптимизация процесса разделения зернистых материалов на ситовых классификаторах / Ф. Г. Ахмадиев, Р. Ф. Гиззятов, И. Т. Назипов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 1. – С. 78 – 83. doi: 10.17277/vestnik.2015.01.pp.078-083
5. Теоретические и экспериментальные исследования помольного комплекса с сепаратором комбинированного действия / В. С. Севостьянов, В. И. Уральский, И. П. Бойчук, Р. А. Ермилов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2019. – Т. 25, № 4. – С. 622 – 634. doi: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.622-634
6. Черепнин, О. М. Сепарация немагнитных цветных металлов в бегущем магнитном поле / О. М. Черепнин, А. И. Шевелев, И. Г. Шаимова // Цветные металлы. – 1985. – № 11. – С. 85 – 87.
7. Опыт разработки электродинамических сепараторов для технологий утилизации твердых отходов / А. Ю. Коняев, Д. Н. Багин, И. А. Коняев [и др.] // Экология промышленного производства. – 2014. – № 2 (86). – С. 17 – 21.

8. Электродинамический сепаратор для разделения материалов с различными коэффициентами магнитной восприимчивости / В. С. Верченков, Д. М. Мордасов, М. Д. Мордасов, А. А. Кузнецов // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития : сб. науч. ст. – Тамбов, 2020. – С. 44 – 47.

9. Бондарев, Б. В. Курс общей физики : в 3 кн. Кн. 2. Электромагнетизм. Волновая оптика. Квантовая физика : учеб. пособие / Б. В. Бондарев, Н. П. Калашников, Г. Г. Спирын. – 2-е изд., стер. – М. : Высшая школа, 2005. – 438 с.

10. Тюрин, Ю. И. Физика. Электричество и магнетизм / Ю. И. Тюрин, И. П. Чернов, Ю. Ю. Крючков. – 2-е изд. – Томск : Изд-во Томского ун-та, 2008. – 468 с.

---

## A Study of the Behavior of Non-Ferrous Metals in a Variable Magnetic Field

V. S. Verchenov, D. M. Mordasov, M. D. Mordasov

*Department of Materials and Technology, verch5@yandex.ru;  
TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** non-ferrous metals; alternating magnetic field; solid waste recycling; neodymium magnets.

**Abstract:** A method for studying non-ferrous metals in an alternating magnetic field is proposed. The prepared images of the device, software, and the trajectory of non-ferrous metals in the core are presented. The results obtained allow for the separation of the studied samples among themselves.

### *References*

1. Tatarkin A.I., Romanova O.A., Dyubanov V.G., Dushin A.V., Bryantseva O.S. [Trends and prospects for the development of metal recycling], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2013, no. 5, pp. 4-10. (In Russ.)

2. Abrosimov A.C., Bondarenko Yu.A., Frolov A.P. [Preparation of non-ferrous metal waste for metallurgical processing. Foreign experience], *Tsvetnyye metally* [Non-ferrous metals], 1989, no. 8, pp. 100-104. (In Russ.)

3. Krivtsova G.B., Ratnikova A.I. [Electrodynamic separation. Method and development trends], *Sovershenstvovaniye protsessov elektroseparatoratsii i konstruktsiy elektroseparatorov: sbornik nauchnykh trudov* [Improving the processes of electrical separation and designs of electrical separators: collection of scientific papers], Leningrad, 1987, pp. 58-68. (In Russ.)

4. Akhmediyev F.G., Gizzyatov R.F., Nazipov I.T. [Modeling and optimization of the separation of granular materials on sieve classifiers], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 1, pp. 78-83, doi: 10.17277/vestnik.2015.01.pp.078-083 (In Russ., abstract in Eng.)

5. Sevost'yanov V.S., Ural'skiy V.I., Boychuk I.P., Yermilov R.A. [Theoretical and experimental research of a grinding complex with a combined action separator], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 4, pp. 622-634, doi: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.622-634 (In Russ., abstract in Eng.)

6. Cherepnin O.M., Shevelev A.I., Shaimova I.G. [Separation of non-magnetic non-ferrous metals in a running magnetic field], *Tsvetnyye metally* [Non-ferrous metals], 1985, no. 11, pp. 85-87. (In Russ.)

7. Konyayev A.Yu., Bagin D.N., Konyayev I.A., Nazarov S.L., Yakushev N.S. [Experience in the development of electrodynamic separators for solid waste disposal technologies], *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva* [Ecology of industrial production], 2014, no. 2 (86), pp. 17-21. (In Russ., abstract in Eng.)

8. Verchenov V.S., Mordasov D.M., Mordasov M.D., Kuznetsov A.A. [Electrodynamic separator for separating materials with different coefficients of magnetic susceptibility], *Problemy tekhnogennoy bezopasnosti i ustoychivogo razvitiya: sbornik nauchnykh statey* [Problems of technogenic safety and sustainable development: collection of scientific articles], Tambov, 2020, pp. 44-47. (In Russ.)

9. Bondarev B.V., Kalashnikov N.P., Spirin G.G. *Kurs obshchey fiziki: v 3 kn. Kn. 2. Elektromagnetizm. Volnovaya optika. Kvantovaya fizika: uchebnoye posobiye* [General physics course: in 3 kn. Book. 2. Electromagnetism. Wave optics. Quantum physics: textbook], Moscow: Vysshaya shkola, 2005, 438 p. (In Russ.)

10. Tyurin Yu.I., Chernov I.P., Kryuchkov Yu.Yu. *Fizika. Elektrichestvo i magnetizm* [Physics. Electricity and magnetism], Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo universiteta, 2008, 468 p. (In Russ.)

---

### Untersuchung des Verhaltens von NE-Metallen in einem variablen Magnetfeld

**Zusammenfassung:** Es ist ein Verfahren zur Untersuchung von Nichteisenmetallen in einem variablen Magnetfeld vorgeschlagen. Die vorbereiteten Bilder des Geräts, der Software sowie der Bewegungsbahn von Nichteisenmetallen sind in der aktiven Zone vorgestellt. Es sind Ergebnisse erhalten, die es ermöglichen, die untersuchten Proben voneinander zu trennen.

---

### Étude du comportement des métaux non ferreux dans un champ magnétique alternatif

**Résumé:** Est proposée une méthode d'étude des métaux non ferreux dans un champ magnétique variable. Sont présentées des images préparées de l'appareil, du logiciel et de la trajectoire des métaux colorés dans la zone active. Les résultats obtenus permettent la séparation des échantillons examinés entre eux.

---

**Авторы:** *Верченoв Виталий Сергеевич* – магистрант; *Мордасoв Денис Михайлович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материалы и технология»; *Мордасoв Михаил Денисович* – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.