

УДК 622.775

**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СЕПАРАЦИЯ ТОНКИХ ЧАСТИЦ
В ИМПУЛЬСНОМ БЕГУЩЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

В. И. Дядин

*Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН, E-mail: nigtc@nigtc.ru,
Северо-восточное шоссе, 30, а/я 56, 683002, г. Петропавловск-Камчатский, Россия*

Приведены и проанализированы результаты экспериментов по использованию электродинамического сепаратора с импульсным бегущим магнитным полем для работы со смесями песка, содержащими металлические частицы классов крупности – 0.25 мм.

Электромагнитная индукция, бегущее магнитное поле, массопоток, скин-слой, высокоградиентное поле, генератор импульсных напряжений, полиимидная пленка

DOI: 10.15372/FTPRPI20200113

В [1, 2] даны оценки параметров магнитного поля, необходимого для извлечения из россыпных месторождений частиц свободного металла в классах крупности – 1.0 мм, и описан макет электродинамического сепаратора, генерирующего такое магнитное поле. В настоящей работе приведены результаты экспериментов на макете сепаратора с импульсным бегущим магнитным полем.

Эксперименты проводились на искусственно составленных смесях, основу которых представлял кварцевый песок, а роль мелкого золота играли частицы меди. Медь, как и золото, является диамагнетиком и хорошим проводником тока. Выбор меди в качестве представителя золота можно считать вполне оправданным, так как она имеет практически те же физические свойства и характеристики, что и золото. При оценке результатов экспериментов нужно лишь учитывать, что золото несколько худший проводник тока и имеет вдвое большую плотность.

Из промытого, просушенного и просеянного через лабораторные сита (ГОСТ Р 51568-99) кварцевого песка тщательно удалялась магнитная фракция. Добавлялись частицы металла, изготовленные на токарном станке 16К-20 с помощью специального резака из медной проволоки соответствующего диаметра. На лабораторных ситах отсеивались частицы металла классов крупности – 0.50 + 0.25, – 0.25 + 0.15, – 0.15 + 0.10, – 0.10 + 0.06 и – 0.06 мм. Частицы каждого диапазона классов крупности добавлялись в песок в пропорциях 1:1000, 1:10 000, 1:100 000 и тщательно перемешивались до получения навески смесей для каждого диапазона классов крупности металла с содержанием 0.001, 0.01 и 0.1 %. Наибольшее количество экспериментов выполнено со смесями, содержащими частицы классов крупности – 0.25 + 0.15. Этот диапазон удобен для экспериментов ввиду того, что частицы не улавливаются традиционными электро-

динамическими сепараторами и видны невооруженным глазом, вследствие чего не возникает проблем с подсчетом уловленных и потерянных частиц. Более мелкие классы крупности $-0.10+0.06$ и -0.06 после сепарации приходилось искать под бинокулярным микроскопом, что требовало больше времени.

Частицы, падающие из рабочей зоны сепаратора, отскакивали от поверхности стола и лишь после нескольких отскоков останавливались. Это не позволяло определить, была ли частица металла отклонена магнитным полем или просто укатилась в сторону при ударе о стол. Чтобы предотвратить отскоки частиц и получить картину их распределения в результате сепарации, под выходным отверстием сепаратора поставили кювету с прозрачным дном и высокими бортами. На дно кюветы снаружи снизу приклеили лист миллиметровой бумаги, а на дно внутри кюветы нанесли тонкий слой касторового масла. Падающие частицы прилипали к маслу и оставались на месте, что позволяло определять их координаты. Для обеспечения повторяемости результатов экспериментов кювета ставилась в фиксированном положении. Для следующего эксперимента дно кюветы вытиралось насухо и покрывалось новым слоем масла. Распределения фотографировались, результаты эксперимента обрабатывались. Чтобы убедиться, что магнитное поле перемещает металлические частицы выбранных классов крупности, первые эксперименты провели с частицами без песка-наполнителя. Установлено, что полученное магнитное поле перемещает в пространстве частицы металла классов крупности < 1 мм (рис. 1, 2).

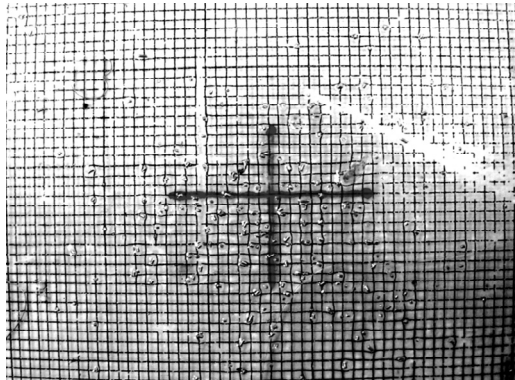


Рис. 1. Начальное распределение частиц класса крупности -0.25 мм без включения магнитного поля. Крест — точка непосредственно под питателем (начало координат)

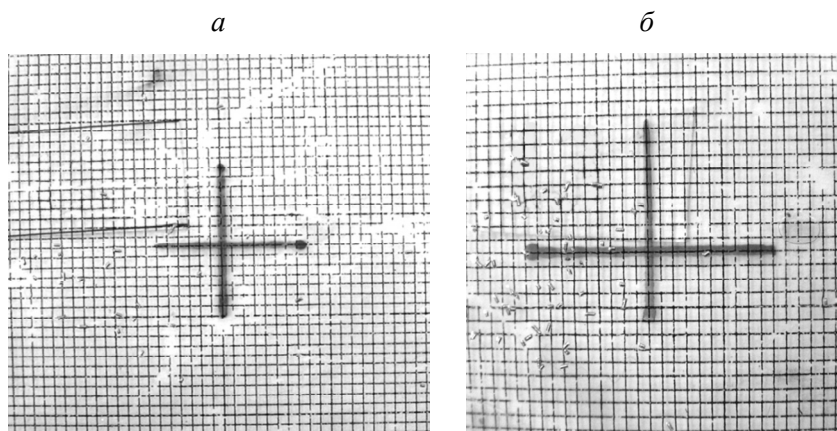


Рис. 2. Распределение частиц крупностью металла -0.15 (а) и -0.25 мм (б) с включенным магнитным полем. Зарядное напряжение $U=1500$ В, частота следования импульсов $f=20$ Гц

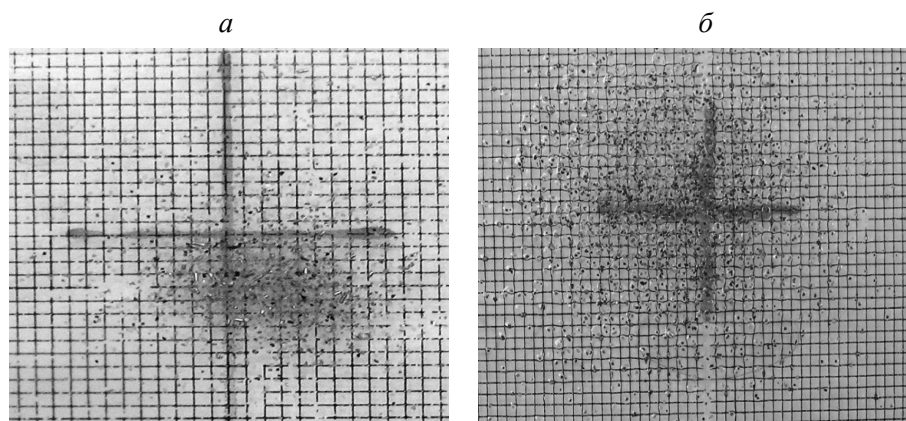


Рис. 3. Эксперимент со смесью на основе кварцевого песка (*а*) и с пробами на основе титаномагнетитового песка (*б*). Песок и металл крупностью -0.25 мм

Поведение смесей металлических частиц с песком при взаимодействии с магнитным полем отличается от поведения металлических частиц без песка. В условиях стесненного массопотока частицы песка существенно осложняют траекторию движения частиц металла. Чтобы убедиться, что и в случае помех со стороны инертных частиц песка разделение возможно, проведены эксперименты со смесями. Выполнен эксперимент со смесью на основе кварцевого песка (рис. 3*а*). Поля нет, частицы металла и песка падают вместе. Частицы металла -0.25 мм в песке крупностью -0.25 мм, соотношение песок : металл 10 : 1. Затем эксперимент усложнили и вместо кварцевого песка подготовили пробу на основе проводящего титаномагнетитового песка, чтобы убедиться, что разницы в проводимостях песка и меди будет достаточно для их разделения (рис. 3*б*). Рабочее напряжение на конденсаторах 1500 В. В результате воздействия поля металл заметно смещен вверх влево.

Эксперименты с пробами на основе титаномагнетитового песка показали, что поле смещает частицы металла и в условиях стесненного массопотока. Разницы в проводимостях частиц титаномагнетитового песка и металла оказывается достаточно, чтобы получить заметное разделение частиц в пространстве. Блок питания и генераторы импульсных напряжений имели избыточную мощность, но конструкции индуктора и питателя не позволяли увеличить производительность макета сепаратора. Поэтому был сконструирован и изготовлен новый рабочий узел, с которым эксперименты продолжились (рис. 4) [3, 4].

Производительность нового рабочего узла определялась пропускной способностью щели между конусным распределителем-дозатором и корпусом индуктора. Индуктор имел внутренний диаметр 100 мм, следовательно, длина щели ~ 314 мм, ширина щели 1.5 мм. В зависимости от крупности разделяемого материала расчетная производительность рабочего узла составляла 30–60 кг/ч.

Проведена принудительная жидкостная система охлаждения катушек. Насос через каналы в корпусе индуктора прокачивал ~ 15 л/мин трансформаторного масла. Масло изнутри через систему каналов омывало всю катушку и подавалось в теплообменник, охлаждаемый проточной водой. Полиимидная изоляция [5] заменена более прочным и температуростойким мусковитом. Пластины мусковита толщиной 0.01 мм укладывались между витками катушек так, чтобы не допустить межвиткового пробоя через край изоляции. Края пластин мусковита выступали за край шины на 0.5 мм, незакрытые изоляцией кромки шины омывались охлаждающей жидкостью. Система охлаждения и новая изоляция позволили увеличить рабочие токи в индукторе. Уменьшение толщины изоляции способствовали увеличению амплитуды индукции и улучшению качества импульсов магнитного поля.

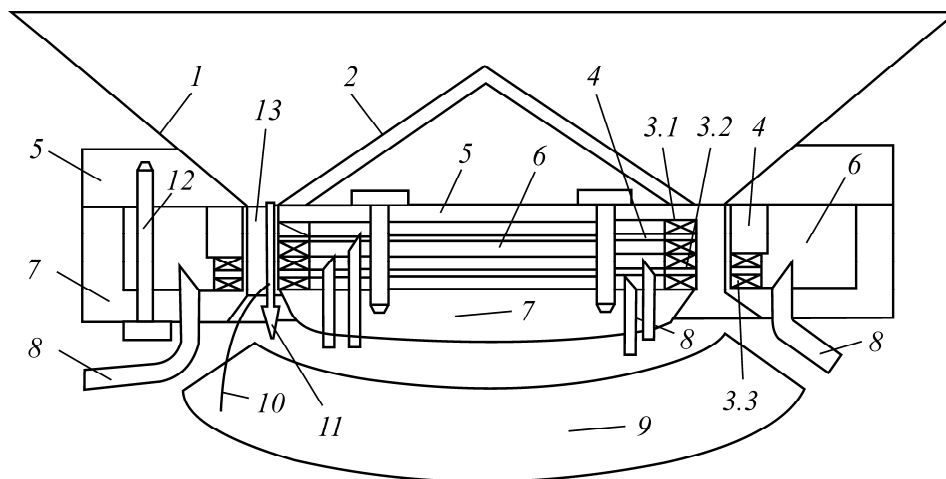


Рис. 4. Схема рабочего узла сепаратора: 1 — чаша загрузочного устройства; 2 — конусный распределитель-дозатор; 3.1–3.3 — катушки сложного индуктора; 4 — дистанционные шайбы; 5, 7 — стяжные шайбы; 6 — полости-протоки для охлаждающей жидкости; 8 — токовводы, одновременно являющиеся патрубками системы охлаждения; 9 — отсекающий поток непроводящих частиц; 10 — поток непроводящего материала; 11 — извлеченный проводящий материал; 12 — стяжной винт; 13 — кольцевая щель

Применение мусковита привело еще к одному эффекту. На катушке с изоляцией использовалась полиимидная пленка толщиной 0.02 мм. Лента наматывалась “виток к витку” на каждое кольцо шины, и при сборке индуктора между кольцами шины оказывалось два слоя изоляции, расстояние между витками шины составило не 0.02, а 0.04 мм. Такая катушка создавала магнитное поле, но большая часть его уходила в межвитковые щели и рассеивалась в пространстве [6]. Первые эксперименты оказались успешными лишь благодаря избыточной мощности источника и накопителя энергии. Мусковит позволил уменьшить межвитковые зазоры в 4 раза и собрать практически все магнитное поле в рабочем пространстве.

На рис. 4 показано, как работает индуктор и происходит разделение частиц. Классифицированный с отделенной магнитной фракцией исходный материал подается из бункера в чашу загрузочного устройства 1 и на конусный распределитель-дозатор 2 сверху равномерным потоком и через щель 13 попадает в рабочее пространство под воздействие импульсного бегущего магнитного поля, индуцируемого катушками 3.1–3.3. В результате взаимодействия с импульсным бегущим магнитным полем проводящие частицы (металл) выталкиваются магнитным полем к центру индуктора и попадают за кромку отсекающего элемента 9 в емкость для сбора материала. Непроводящий инертный материал 10 с магнитным полем практически не взаимодействует и падает в щель между внутренней поверхностью индуктора и отсекающим элементом. Таким образом в индукторе происходит пространственное разделение компонентов исходного материала.

Новый рабочий узел позволил получать поля с более высокими значениями индукции, градиента и скорости изменения импульсов магнитного поля. Удалось построить сепарационные характеристики макета сепаратора для частиц класса крупности –0.05 мм [4]. В экспериментах не ставилась цель достичь максимального извлечения металла из смеси, но на полученном семействе сепарационных характеристик видно, что с увеличением амплитуды импульсов индукции магнитного поля во всех классах крупности частиц увеличивается степень извлечения частиц и сепарационные характеристики приобретают более четкую S-образную форму. Четкость и крутизна сепарационных характеристик оказались слишком очевидными, что связано

с несовершенством методики подготовки металлоспесчаных смесей [4]. В искусственно составленных смесях присутствуют лишь узкие классы крупности частиц хорошо проводящего металла и плохо проводящий кварцевый песок. Высокая контрастность свойств сама по себе предполагает четкое разделение.

С естественными смесями получить сепарационные характеристики столь высокого качества никогда не удавалось, так как в них содержатся минералы, обладающие широким спектром проводимости. Естественные смеси трудно разделить на узкие классы крупности, такие как в искусственных смесях. Сепарационные характеристики для естественных смесей получались более пологими и нечеткими из-за засорения посторонними минералами и их фракциями (у них производная $d\varepsilon/d\xi$ меньше (где ε — сепарационная характеристика, ξ — размер частиц) [7]. В естественных смесях, в отличие от искусственных, частицы металла не имеют определенной формы. Частицы металла в смесях по форме являются плоскими цилиндрами (пластинками) — это результат способа их изготовления. С другими формами частиц экспериментов не проводилось, сепарационные характеристики для других форм частиц не строились.

Для извлечения частиц металла крупностью -0.10 и тем более -0.05 мм необходимо поле с весьма жесткими характеристиками. Все его параметры должны быть выше, чем у поля, с помощью которого извлекаются частицы крупностью -0.25 мм. Благодаря избыточной мощности источника и накопителя получены поля и с более высокими характеристиками. Подготовлена проба с частицами меди крупностью -0.02 мм и запущена в индуктор, все электрические характеристики которого устанавливались на максимум. Проба не успела пройти через сепаратор, так как индуктор разрушился от межвиткового замыкания. Оно происходило всякий раз, когда работал режим, близкий к максимальному. Индукторы выходили из строя в результате быстрого перегрева и пробоя межвитковой изоляции. Разрушения носили катастрофический характер, в ряде случаев вместе с индукторами разрушалась и система охлаждения, несмотря на то, что температура масла не поднималась >43 °С.

Быстрые изменения мощного магнитного поля в катушках приводили к возникновению больших вихревых токов не только в частицах, но и в самом индукторе. Бегущее магнитное поле вызывало сильный нагрев в тонком поверхностном слое шины (скин-слое), а мощные знакопеременные осевые и радиальные нагрузки — в индукторе, которые приводили к разрушениям изоляции и бандажа. За время между импульсами магнитного поля металл шины не успевал отвести и отдать через кромку всю тепловую энергию охлаждающему маслу. Поверхность шины под пластинами мусковита оказалась теплоизолированной. Теплопередача поверхности через пластины мусковита в ~ 80 раз ниже, чем металла без изоляции на торце шины. Шина отдавала тепло лишь с узкой полосы поверхности своих торцов, в результате перегревалась, теряла прочность и разрушалась. Разрушенными оказывались не только изоляция и бандаж, но и сама шина. В индукторах, даже при неполной мощности источника, развивались усилия, близкие к пределу прочности меди. Для мощных полей шины нужно изготавливать из более прочных, хорошо проводящих материалов [8]. Для межвитковой изоляции необходим более прочный материал, чем мусковит, более теплопроводный и с хорошими электроизоляционными свойствами в широком диапазоне температур.

Предпринята попытка создать сепаратор, пригодный для работы в полевых условиях, с производительностью $0.25 - 0.50$ т/ч и индуктором большего размера. Расчеты показали, что генерировать магнитное поле с параметрами, необходимыми для извлечения мелких частиц, большим индуктором невозможно. Индуктор даже для сепаратора производительностью

0.25 т/ч будет иметь слишком большое индуктивное сопротивление и для генерации мощного и быстрого магнитного поля потребует много энергии. У нашего источника запас мощности есть. По расчетам этого запаса могло хватить, чтобы в большом индукторе получить нужный по величине ток. Но этот ток из-за большого индуктивного сопротивления нарастал слишком медленно. Магнитное поле индуктора стало “ленивым” и не могло возбуждать вихревые токи в частицах, которые следовало извлекать.

Индуктивное сопротивление индуктора уменьшили, изменив геометрию катушек и сделав их прямоугольной формы (рис. 5). Такая форма индуктора потребовала изменения конструкции всего рабочего узла. Наиболее приемлемой для нового рабочего узла стала конструкция, подобная линейному статору трехфазного электродвигателя, как у большинства существующих аппаратов с бегущим магнитным полем [9]. В этих сепараторах линейный статор электродвигателя с бегущим магнитным полем промышленной частоты располагается под ленточным транспортером, по которому движется разделяемый материал. Разделяемая смесь движется на ленте транспортера под углом $\sim 45^\circ$ к осям прямоугольных (щелевых) индукторов статора, и бегущее магнитное поле перемещает проводящие частицы перпендикулярно направлению массопотока [9–11].

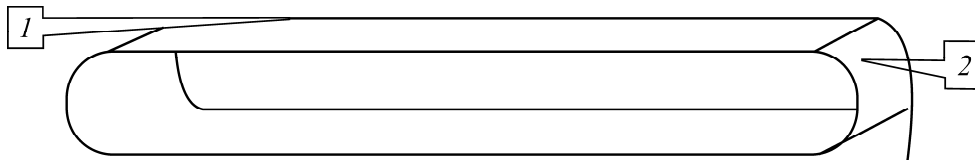


Рис. 5. Виток прямоугольного индуктора: 1 — прямолинейный участок; 2 — изогнутый

Линейные участки катушек индуктора уложены в гнезда так же, как и в пазах статора трехфазного электродвигателя. Катушки — без трансформаторного железа, гнезда — в пластине толстого стеклотекстолита. Рабочие размеры индуктора $200 \times 7.5 \times 7.5$ мм. Изогнутые участки катушек заведены под стеклотекстолитовую пластину, вся панель залита высокотемпературным эпоксидом и для увеличения прочности выдержана в течение суток в термошкафу. Несмотря на малую напряженность поля по сравнению с экспериментами со старым рабочим узлом, в индукторе с прямоугольными витками разрушения начались практически сразу. Магнитное поле разрушало эпоксидную заливку, вырывало витки из гнезд, деформировало их, превращая в круглые кольца. При прохождении токовых импульсов уже вырванная из гнезда катушка продолжала деформироваться и разрушаться, увеличивался ее диаметр и высыпалась изоляция.

ВЫВОДЫ

Приведены параметры магнитного поля, необходимого для извлечения частиц металла крупностью -1.0 мм и предложен способ генерации такого поля. Описаны результаты экспериментов по воздействию импульсного бегущего магнитного поля на частицы немагнитного металла (меди) в классах крупности -0.25 и $+0.15$ мм. Подтверждено наличие эффекта отклонения частиц немагнитного металла в этих классах крупности.

Параметры импульсного бегущего магнитного поля, необходимого для отклонения проводящих частиц, удовлетворительно соответствуют полученным ранее оценкам. Результаты экспериментов по извлечению частиц меди классов крупности -0.25 и -0.15 мм из стесненных массопотоков показали удовлетворительное пространственное разделение частиц меди и тита-

номагнетита. Параметры импульсного бегущего магнитного поля, использованного в экспериментах, и разница проводимостей титаномагнетита и меди оказались достаточными для разделения частиц классов крупности – 0.25 мм.

Использование импульсного бегущего магнитного поля открывает возможность не только извлекать из массопотоков мелкие проводящие частицы, но и уменьшать энергопотребление электродинамических сепараторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дядин В. И., Кожевников В. Ю., Козырев А. В., Подковыров В. Г., Сочугов Н. С.** Метод импульсной электродинамической сепарации малых проводящих частиц // ФТПРПИ. — 2008. — № 3. — С. 110–111.
2. **Мязин В. П., Дядин В. И., Латкин А. С.** Электродинамический сепаратор для извлечения мелких классов золота из металлоносных песков // Вестн. ЧитГУ. — 2009. — № 5 (56). — С. 45–51.
3. **Пат. RU 2 452 582 C1 B03C 1/02.** Способ генерации бегущего магнитного поля в рабочей зоне электродинамического сепаратора и устройство для его осуществления / В. И. Дядин // Опубл. в БИ. — 2012. — № 16.
4. **Дядин В. И., Козырев А. В., Латкин А. С., Подковыров В. Г., Сочугов Н. С.** Разделение минеральных смесей в импульсном бегущем магнитном поле // Обогащение руд. — 2008. — № 5. — С. 39–41.
5. **Полиимидные пленки** марки ПМ-1 с толщинами от 12 мкм Эстроком. www.izoteksltd.ru/.../poliimidnaja-plenka.htm (дата обращения 17.04.2010).
6. **Карасик В. Р.** Физика и техника сильных магнитных полей. — М.: Наука, 1964. — 289 с.
7. **Тихонов О. Н.** Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. — М.: Недра, 1984. — 208 с.
8. **Наноструктурные** электротехнические провода с аномально высокой прочностью и электропроводностью. URL: <file://localhost> (дата обращения 27.04.2010).
9. **Коняев А. Ю., Назаров С. Л.** Устройство электродинамического сепаратора для обработки лома и отходов цветных металлов // Пром. энергетика. — 2001. — № 6. — С. 34–39.
10. **Багин Д. Н., Коняев А. Ю.** Показатели эффективности электродинамических сепараторов на основе линейных индукторов // Пром. энергетика. — 2015. — № 4. — С. 20–24.
11. **Коняев А. Ю., Коняев И. А., Назаров С. Л.** Повышение энергоэффективности электродинамических сепараторов на стадии проектирования // Пром. энергетика. — 2014. — № 4. — С. 22–26.

Поступила в редакцию 05/IV 2019

После доработки 10/XII 2019

Принята к публикации 04/II 2020