

УДК 622.313.2:621.928

В. Н. Лапицкий, А. В. Горб, Ю.А. Бескровная, Р.С. Лагутенко

ИЗВЛЕЧЕНИЕ И РАЗДЕЛЕНИЕ НЕМАГНИТНЫХ ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Розглянуто метод вилучення та розподілу немагнітних сипучих матеріалів по електропровідності змінному магнітному полі який отримав назву електродинамічна сепарація. Відмічено галузі використання методу. Запропоновано класифікацію відомих засобів електродинамічної сепарації, що ґрунтуються на вилученні ряду ознак.

Рассмотрен метод разделения немагнитных сыпучих материалов по электропроводности в переменном магнитном поле, получивший название электродинамическая сепарация. Отмечены области использования метода. Предложена классификация известных способов электродинамической сепарации, основанная на выделении ряда признаков.

The method of separation of non-magnetic dispersion materials by conductivity in the alternating magnetic field called electromagnetic separation is considered. The fields of use for such method are noticed. The classification of known methods of electromagnetic separation based on the accentuation of several features is offered.

Процесс разделения немагнитных материалов в переменном магнитном поле (МП), основанный на использовании явления наведения в электропроводных объектах вихревых токов и силового взаимодействия электропроводных тел с переменным магнитным полем, получил название электродинамической сепарации (ЭС). Наиболее общую форму записи выражения для электродинамических усилий получают с использованием тензора натяжений Максвелла [1]:

$$\bar{F} = \frac{1}{\mu_0} \int_S \{ \bar{B}(\bar{n}B) - 0.5B^2 \bar{n} \} dS \quad (1)$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума;

B — магнитная индукция (вектор);

S — поверхность, охватывающая электропроводный объект;

n — нормаль к поверхности S (вектор).

Для непосредственного применения записанной формулы необходимо знать распределение МП внутри (или снаружи) поверхности S , что связано с интегрированием уравнений Максвелла в среде и имеет аналитическое решение для ограниченного класса задач с телами и источниками поля бесконечных размеров, а также для тел в форме эллипсоида в квазиоднородном поле [1].

Качественный анализ выражения (1) показывает, что решающее значение для разделения материалов при электродинамической сепарации (ЭС) имеет их электропроводность, однако на величину усилий существенное влияние оказывают крупность и особенно геометрическая форма частиц, что обусловлено распределением плотности наведенных токов проводимости в объеме частицы.

В настоящее время изготовлены экспериментальные образцы сепараторов, на которых достигаются необходимые для разделения величины электродинамических усилий на частицы с высокой (металлической) электропроводностью, что предопределило области возможного их применения в народном хозяйстве. Следует отметить, что процесс ЭС относительно несложен и относится к сухим способам разделения материалов, а это позволяет легко вписывать его в существующие технологические линии для замены ручного труда при выборке немагнитных металлов.

В последние годы исследовательские работы направлены на применение метода ЭС при переработке вторичного сырья для механизации извлечения частиц цветных металлов. При разработке месторождений полезных ископаемых возможности использования описанного метода сильно ограничены, ввиду значительно более низкой электропроводности природных руд по сравнению с получаемыми из них металлами. Исключение составляют самородные металлы и пески драгоценных металлов.

Метод ЭС является перспективным для решения упомянутых задач, так как при разделении здесь используется фундаментальный физический признак металлов — электропроводность, и, в силу этого, более универсальным по сравнению с гравитационными методами и аэросепарацией.

При сопоставлении ЭС с электростатической на первый взгляд кажется, что различными физическими методами решается одна задача — разделение материалов по электропроводности. Однако при реализации конкретных устройств оказывается, что как раз в силу различий в физическом принципе разделения в одном и другом случаях Граница понятия проводник — непроводник совершенно различна. Если в электростатической сепарации к проводникам относят минералы с электропроводностью не менее $10^{-1} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$, то на существующих устройствах ЭС в проводящую фракцию удастся выделить материалы с электропроводностью не менее $10^6 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$, а также разделить немагнитные металлы по электропроводности, что осуществить

электростатической separацией невозможно.

Существующее ограничение по крупности сырья при электростатической separации (не более 3 мм), не имеет места при ЭС. Напротив, при ЭС сложности технического характера возрастают с уменьшением крупности сырья.

Говоря об абсолютной величине осуществляющих разделение усилий, отметим, что по оценкам авторов [3] силы, развиваемые при ЭС, соизмеримы с магнитными силами на сильномагнитные минералы в магнитной separации при прочих равных условиях.

Одной из задач настоящего обзора является проведение, по возможности, наиболее полной классификации методов и устройств электродинамической separации. На рис. 1 представлена структурная схема предлагаемой общей классификации по ряду признаков.

Достаточно обширный ряд известных в настоящее время технических решений по способам и устройствам электродинамической separации может быть классифицирован, в первую очередь, на два обширных класса по принципу создания извлекающего электродинамического усилия. К первому из них относятся сепараторы, использующие бегущее МП, а ко второму—устройства со стационарным переменным магнитным полем. Правомерность такой классификации подтверждается, в частности, различной качественной зависимостью электродинамических усилий в бегущем и стационарном МП от параметра частоты периодического изменения поля [2, 3], что позволяет говорить о некотором различии в описании физических процессов создания усилий для этих двух классов separации.

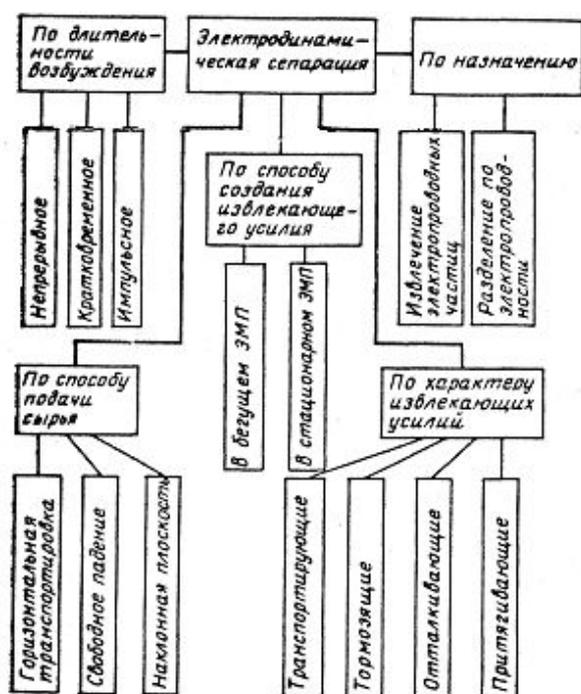


Рис. 1. Общая классификация способов электродинамической separации

Бегущее магнитное поле можно представить как непрерывное перемещение в заданном направлении некоторой картины распределения магнитного поля в пространстве. При этом факт перемещения определяется относительно сепарируемой смеси, что при конкретном выполнении может быть реализовано как движением МП по отношению к смеси частиц, так и перемещением сепарируемого материала относительно неподвижного источника поля (рис. 2 а, б).

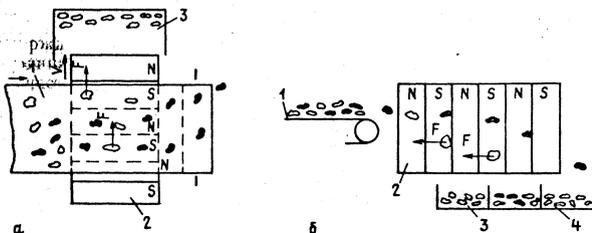


Рис. 2. Варианты separации в бегущем ЭМП с перемещением поля относительно сырья (а) и с перемещением сырья относительно источника поля (б):

1 — транспортер; 2 — источник поля; 3 — бункер электропроводных частиц; 4 — бункер неэлектропроводных частиц

Стационарное переменное МП представляется как периодическое изменение во времени модуля вектора магнитной индукции B при неизменной картине распределения поля в пространстве относительно сепарируемых частиц. В этом случае имеет место лишь транспортирование исходной смеси в зону separации и это перемещение не участвует в механизме создания извлекающих усилий. Необходимым условием возникновения

электродинамической силы в этом случае, как следует из выражения (1), является наличие неоднородности поля в зоне разделения материалов. Направление максимальной неоднородности (интегральной в объеме частицы) определяет направление электродинамического усилия, как противоположное направлению интегрального градиента. Таким образом, разделение материалов осуществляется за счет выталкивания электропроводных частиц из области более интенсивного МП, что в большинстве случаев совпадает с отталкиванием их от источника поля (рис. 3).

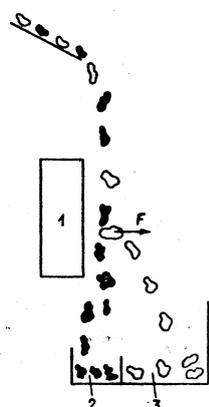


Рис. 3. Вариант сепарации в стационарном ЭМП:
1 — индуктор; 2 — бункер не-электропроводных частиц; 3 — бункер электропроводных частиц

Рассматривая области возможного использования электродинамической сепарации, можно выделить две достаточно самостоятельных задачи: извлечение цветных металлов из смеси и их разделение между собой. Первая из названных задач встречается при переработке твердых бытовых отходов, где цветные металлы представлены в основном алюминиевыми сплавами (на первом этапе переработки немагнитных промышленных отходов на предприятиях «Вторчермет», для извлечения немагнитных остатков литья из формовочных смесей и т. п.). Вторая задача, более сложная, требующая предварительной подготовки сырья и определенной контрастности электромагнитных свойств разделяемых металлов, имеет место, в частности, на предприятиях «Вторцветмет».

При рассмотрении временных режимов целесообразно выделять сепараторы с непрерывным, кратковременным и импульсным возбуждением МП в зоне сепарации. Кратковременный и импульсный режимы следует использовать при низком уровне содержания металлов в исходном сырье. Возбуждение МП в этом случае осуществляется по сигналу металлоискателя. Кратковременным называется режим, при котором поле возбуждается до момента попадания объекта извлечения в зону сепарации, а прекращается после окончания процесса извлечения частицы из смеси. Импульсным следует считать режим сепарации, когда МП создается на короткий промежуток времени, начало которого совпадает с моментом попадания электропроводной частицы в зону наиболее высоких значений электродинамических усилий, а длительность не превышает времени нахождения частицы в этой зоне.

Использование кратковременного и особенно импульсного режимов позволяет повысить экономичность процесса разделения и добиться получения исключительно высоких значений электродинамических усилий.

Переходя к классификации сепараторов по пространственно-геометрическим характеристикам, следует предварительно отметить, что осуществляющие сепарацию электродинамические силы имеют значительно более низкие значения по сравнению с магнитными силами, действующими на ферромагнитные тела в той же области МП. Эффективное и экономичное разделение частиц в электродинамических сепараторах возможно при максимальном приближении исходного материала к источнику поля, что применительно к сыпучему сырью, достигается монослойным его распределением в зоне сепарации. Таким образом, здесь целесообразно говорить о плоскости разделения материалов или плоскости сепарации.

По способу подачи сырья в зону сепарации можно выделить три группы устройств: сепараторы с подачей сырья на горизонтальном транспортирующем органе (конвейерная лента, вибропитатель); устройства с разделением частиц в свободном падении; устройства, использующие наклонную плоскость, по которой частицы скользят в зону сепарации. При использовании транспортирующего органа извлечение электропроводных частиц осуществляется в плоскости сепарации под некоторым углом к направлению движения сырья на транспортере (см. рис. 2а) [4], что характеризуется длительным временем извлечения и негативными явлениями, связанными с соударением извлекаемых частиц с неэлектропроводными.

Подача сырья в зону сепарации в свободном падении позволяет осуществлять извлечение частиц в направлении, перпендикулярном плоскости сепарации, при этом разделение осуществляется в стационарном переменном неоднородном МП (см. рис. 3) [5]. Недостатки такого способа подачи: сложно организовать монослойное распределение сырья на плоскости сепарации и максимальное приближение всех частиц к источнику поля; при сепарации частиц с существенной анизотропией формы, ориентация которых в зоне сепарации хаотическая, происходит значительный разброс значений электродинамических усилий на одинаковые частицы.

В значительной степени устранить недостатки позволяет использование устройства с наклонной плоскостью (рис. 4) [6]. При этом возможно извлечение частиц в направлении, перпендикулярном плоскости сепарации и обеспечение монослойной подачи сырья. Устраняется и недостаток, обусловленный анизотропией формы электропроводных частиц, поскольку перпендикулярная наклонной плоскости составляющая силы тяжести не

равна нулю, вследствие чего частица своей максимальной плоскостью ложится на поверхность индуктора.

По характеру извлекающих усилий можно выделить сепараторы с транспортировкой извлекаемых частиц (см. рис. 2а), с торможением извлекаемых частиц (см. рис. 2б), с отталкиванием частиц от источника поля (см. рис. 3, 4) и притягиванием частиц к источнику (рис. 5). Реализация сепаратора с притягиванием частиц весьма затруднительна, поскольку зона притягивающих усилий мала, а их величина значительно ниже отталкивающих, действующих за пределами этой зоны. Транспортировка и торможение извлекаемых частиц характерны для сепараторов с бегущим МП, а отталкивание и притяжение — для сепараторов, использующих стационарное МП.

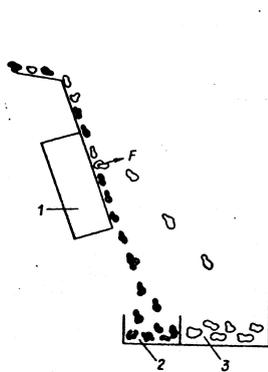


Рис. 4. Сепаратор с наклонной плоскостью:
1 — индуктор; 2, 3 — приемные бункера

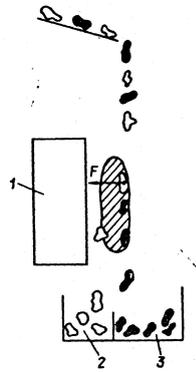


Рис. 5. Сепаратор с притягивающими усилиями:
1 — индуктор со специальной обмоткой; 2, 3 — приемные бункера

Отдельная схема классификации устройств, использующих для извлечения электропроводных частиц бегущее МП, приведена на рис. 6. Необходимость в проведении дальнейшей классификации продиктована широким разнообразием известных технических решений по реализации устройств с бегущим магнитным полем.

Источники бегущего МП могут исполняться с односторонними и двухсторонними индукторными системами. В одностороннем исполнении источник поля устанавливается с одной стороны (чаще снизу) транспортирующего органа (см. рис. 2а). В двухстороннем варианте дополнительный источник поля устанавливается над транспортирующим органом, что приводит к повышению эффективности сепарации за счет возрастания величины и равномерности распределения бегущего поля в зоне сепарации. Однако при двухстороннем исполнении достаточно жесткие требования предъявляются к крупности исходного сырья.

Ранее было отмечено, что реализация бегущего МП предполагает взаимное перемещение сырья и определенного распределения поля в пространстве. При конкретном выполнении устройств возможны два вида электродинамических сепараторов: с неподвижным распределением МП и движущимися частицами (см. рис. 2б) и с перемещением МП относительно исходной смеси (см. рис. 2а).

По способу создания МП следует выделить устройства с электромагнитами и постоянными магнитами. Электромагнитные устройства создания бегущего поля можно, в свою очередь, разделить на многофазные неподвижные индукторные системы (наиболее характерное исполнение — индуктор линейного электродвигателя) и механическое перемещение электромагнитов постоянного тока.

Постоянные магниты, в целях создания бегущего МП, укладываются с чередующейся полярностью на поверхности диска, ролика (для осуществления их перемещения относительно исходной смеси), или на поверхности неподвижной плоскости, относительно которой движется сырье [7].

Отметим, что при использовании постоянных магнитов имеется существенное ограничение значений электродинамических усилий в силу наличия предельного значения остаточной магнитной индукции у известных магнитотвердых материалов.

Количество технических решений по реализации сепараторов со стационарным МП значительно меньше по сравнению с устройствами, использующими бегущее МП. Такое соотношение объясняется целым рядом причин. Во-первых, у сепараторов со стационарным полем принципиально отсутствует признак перемещения МП, вариация которого дает целый спектр технических решений для сепараторов с бегущим МП. Во-вторых, не существует принципиальной возможности создать переменное стационарное МП с помощью постоянных магнитов, а именно устройства сепарации с постоянными магнитами составляют большую часть решений с использованием бегущего поля, что обусловлено отсутствием в необходимости электропитания сепаратора. Кроме того, при использовании сепараторов с бегущим полем нет необходимости в самой незначительной перестройке технологического процесса в имеющихся технологических линиях переработки вторичного сырья.

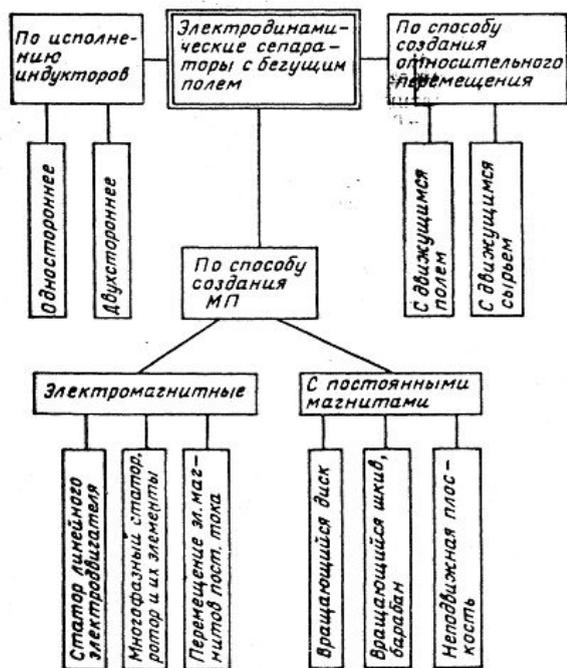


Рис. 6. Классификация сепараторов с бегущим полем

В качестве источников поля в устройствах со стационарным МП используются электромагниты переменного тока (рис. 7).

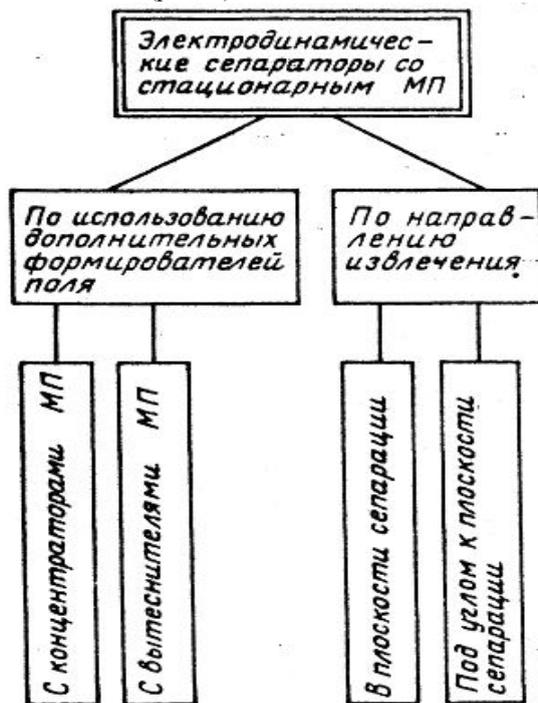


Рис. 7. Классификация сепараторов со стационарным переменным МП

В целях обеспечения заданных характеристик сепаратора можно использовать дополнительные формирователи МП, в качестве которых применяются концентраторы поля (ферромагнитные сердечники) и вытеснители (немагнитные металлические элементы с высокой электропроводностью).

Дополнительные формирователи поля целесообразны при сепарации относительно мелких частиц, в целом же, их использование не приводит к значительному увеличению магнитной индукции в силу разомкнутости магнитной системы сепараторов.

Использование эффектов, связанных с взаимодействием электропроводных частиц со стационарным МП, позволяет осуществлять извлечение как в плоскости сепарации, так и в направлении, перпендикулярном плоскости сепарации, что наиболее предпочтительно при монослойной подаче материала.

В заключение отметим, что методика выбора способа электродинамической сепарации для определенных условий применения и конкретной задачи (извлечения металлов или их разделения по электропроводности) в

настоящее время не разработана, так как активные исследовательские работы по электродинамической сепарации ведутся только с середины семидесятых годов и на настоящий момент еще далеко не завершился процесс накопления информации о возможностях различных способов сепарации. О том же свидетельствует и повышенная патентная активность по этому вопросу в последние годы, пик которой приходится на начало восьмидесятых годов.

Настоящую работу следует рассматривать как попытку сделать первый шаг в направлении разработки общего описания процессов электродинамической сепарации материалов.

Выводы

1. Метод электродинамической сепарации следует считать перспективным для решения задач извлечения из смеси или разделения материалов с высокой (металлической) электропроводностью.

2. Предложена подробная классификация известных способов реализации электродинамической сепарации сыпучих материалов.

3. Общую классификацию методов сепарации следует производить по назначению, способу создания электродинамических усилий, характеру извлекающих усилий, способу подачи сырья в зону сепарации, длительности возбуждения МП.

Литература.

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. — М.: Наука, 1982. — 620 с.
2. Круминь Ю. К. Основы теории и расчета устройств с бегущим магнитным полем. — Рига: Зинатне, 1983. — 278 с.
3. Лапицкий В. Н. Исследование электродинамической сепарации# золотосодержащих шлиховых концентратов и вторичных цветных металлов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.08. Днепропетровск, 1979. — 134 с.
4. А. с. 1197218 (СССР). Электродинамический сепаратор/В. Н. Лапицкий, А. Е. Спринчук, А. В. Кондратенко, А. В. Горб, заявлено 16.05.84, опубликовано 8.08.85.
5. А. с. 954103 (СССР). Электродинамический сепаратор/В. А. Подольский, М. С. Захарова, В. Н. Лапицкий и др., заявлено 11.12.73, опубликовано 4.05.82.
6. А. с. 1282398 (СССР). Электродинамический сепаратор/В. А. Бунько, В. Н. Лапицкий, А. В. Горб, заявлено 6.03.84, опубликовано 8.09.86.
7. Шлеманн Е. Метод вихретоковой сепарации. — Оксфорд, 1979. — 82 с.

Рекомендовано к опубликованию д.т.н., проф. Долговой Т.И. 15.05.07.