



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Электротехника и электроника»

Монография

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

Бондарь И.М.,
Дударев К.Г.

Ростов-на-Дону, 2018

Аннотация

В книге изложены результаты многолетних исследований, анализ собранных материалов и перспективы применения электродинамической сепарации.

Рассмотрены проблемы переработки отходов производства и потребления в современных условиях. Приведена авторская концепция процессов разделения электропроводных и неэлектропроводных материалов в магнитных полях.

Монография может быть использована как учебное пособие по разделу «Магнитные цепи» дисциплин «Электротехника и электроника», «Общая электротехника и электроника», изучаемых бакалаврами, при выполнении УИРС и НИРС, в курсовом и дипломном проектировании на кафедре «Электротехника и электроника».

Авторы

к.т.н., доцент кафедры «Электротехника и электроника»

Бондарь И.М.,

к.т.н., доцент кафедры «Электротехника и электроника»

Дударев К.Г.



Оглавление

К читателям.....	4
Глава 1. Современное состояние и теоретические основы извлечения металлов из вторичного сырья.....	5
1.1. Вторичное сырьё и основные методы его переработки.....	5
1.2. Теоретические основы электродинамической сепарации.....	11
1.3. Применение электродинамической сепарации для извлечения электропроводных металлов.....	17
Глава 2. Разработка электродинамических сепараторов для извлечения электропроводных металлов.....	25
2.1. Влияние формы электропроводных частиц и частоты магнитного поля на процесс электродинамической сепарации.....	25
2.2. Моделирование магнитных полей электродинамических сепараторов.....	29
2.3. Разработка конструкций сепараторов.....	35
Глава 3. Расчёт параметров и конструктивных элементов электродинамических сепараторов.....	42
3.1. Взаимосвязь параметров сырья и электродинамических сепараторов.....	42
3.2. Исследование и расчёт параметров магнитной системы.....	46
3.3. Механизм и расчёт действующих сил в процессе электродинамической сепарации.....	53
Список литературы.....	58

К читателям

Концепцией долгосрочного социально-экономического развития РФ на период до 2020 года предусмотрено сокращение и использование отходов производства, создание развитой индустрии их утилизации.

При производстве промышленной продукции образуются отходы, не являющиеся целью данного производственного процесса. Оборудование, детали, узлы, запасные части и различные изделия производственного и бытового назначения после использования и истечения установленного срока службы, определяемого физическим и моральным износом, превращаются в отходы потребления (амортизационный лом). Отходы производства и потребления являются потенциальным сырьем и поэтому рассматриваются как вторичные материальные ресурсы (ВМР).

Значительным источником вторичных металлов являются отходы цветной металлургии. В отрасли накоплено огромное количество отходов горного производства, хвостов обогатительных фабрик, металлургических шлаков, песчано-галечных отвалов промывки золотосодержащих россыпей. Во многих случаях шлаки, пыли, клинкеры и кеки содержат цветные металлы в большей концентрации, чем исходные руды.

Другим значительным ресурсом является лом и отходы электротехнической и радиоэлектронной промышленности (лом кабеля и проводов, лампы накаливания, галогеновые лампы, пульты управления, печатные платы, антенны и т. д.).

Твёрдые бытовые отходы (ТБО) – «городские руды», как и отработанные электротехнические, электронные и другие приборы, аппараты, кабели, лом и т. д., согласно расчётам специалистов, могут удовлетворить свыше половины потребности в меди, алюминии, свинце, ртути, олове, цинке. Кроме того, освоение техногенного сырья, его сортировка и последующая утилизация имеет важное экологическое значение.

В последние годы значительно повысился интерес к электродинамическим методам сепарации в связи с определившейся необходимостью извлечения и разделения немагнитных электропроводных металлов и их сплавов при переработке промышленных и бытовых отходов. Электродинамическая сепарация позволяет разделять смеси материалов, не разделяющиеся другими методами или разделяющиеся с получением грубых концентратов, например, смеси с близкими значениями плотности и магнитной

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

восприимчивости. Подобные процессы перспективны на предприятиях любых отраслей промышленности, перерабатывающих цветные металлы, в частности, в схемах безотходных и малоотходных технологий.

Детальное изучение и разработка процессов электродинамической сепарации расширяет область ее применения в первую очередь в направлении конструирования сепарационных устройств, позволяющих получить высокие показатели разделения при значительной пропускной способности

Глава 1. Современное состояние и теоретические основы извлечения цветных металлов из вторичного сырья

1.1. Вторичное сырье и основные методы его переработки

Характерной особенностью сырья цветной металлургии является сравнительно низкое содержание металлов в рудах. Вследствие этого цветная металлургия имеет наибольший выход отходов по сравнению с другими добывающими отраслями. С каждым годом возрастают объёмы переработки сырья, следовательно, увеличиваются объёмы отходов производства. Складируемые отходы во многих случаях значительно видоизменяются, теряют свои технологические свойства и практическую ценность.

Значительным, но малоиспользуемым источником сырья является лом электротехнической и радиоэлектронной аппаратуры. Он представляет собой сложную смесь цветных и черных металлов, покрытых различными неметаллическими компонентами. Плавка такого многокомпонентного лома без предварительного разделения на группы сплавов и виды металлов приводит к большим потерям цветных металлов. Так, из лома бытовой радиоэлектронной аппаратуры в процессе плавки в шахтной печи извлекается только медь. При этом теряется 50–55% железа, 5–7% алюминия, а также никель, цинк, олово и другие ценные компоненты [1]. Расчеты показывают [2], что при годовой переработке 175 тыс. тонн лома электротехнической и радиоэлектронной аппаратуры с применением технологии разделения на виды металлов, может быть извлечено около 40 тыс. тонн цветных металлов. При разделении 50 тыс. тонн кусковых отходов на медной основе на группы сплавов может быть возвращено в производство 8 тыс. тонн цветных металлов.

Недостаточно эффективно в настоящее время используется

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

лом и отходы твердосплавных инструментов, бытовой техники, средств измерительной техники, в которых применяются драгоценные металлы: золото, серебро, платина, палладий, ниобий и сплавы на их основе; пылевидных отходов вольфрама и др.

Для извлечения из лома и кусковых отходов ферромагнитных предметов применяют электромагнитные шкивы и железоотделители с механической разгрузкой извлеченных материалов. Подвесные железоотделители устанавливают над ленточными конвейерами, шкивы – в качестве приводного барабана сортировочного конвейера в зоне разгрузки материала [3].

Первичную обработку стружки и кусковых отходов цветных металлов крупностью до 20 мм осуществляют на технологической линии, разработанной украинским институтом «Вторцветмет» в г. Донецке.

Продукты класса $-20+3$ мм алюминиевой стружки и класса $-20+0$ мм медной стружки поступают на магнитные сепараторы с бегущим магнитным полем, которое создается в магнитном сепараторе поочередно магнитами разной полярности. В результате переработки получают сыпучую стружку цветных металлов, содержащую до 0,08% железа, и стружку черных металлов с содержанием до 2% цветных металлов.

Исходное сырье (отдельно по видам и сортам металлов) загружают в бункер емкостью $2,5 \text{ м}^3$, из которого лотковым питателем равномерно подается на двухситный вибрационный грохот. На грохоте производится рассев отходов по классам крупности $+20$ мм, $-20+3$ мм и $-3+0$ мм. Надрешетный продукт крупностью $+20$ мм, представленный вьюнообразной стружкой, ломом или кусковыми отходами цветных и черных металлов и неметаллическими предметами, поступает на сортировочный конвейер, на котором лом и кусковые отходы цветных металлов отделяются от неметаллических предметов. Лом черных металлов извлекается электромагнитным шкивом.

На Мценском, Сухоложском и Подольском заводах «Вторцветмет» для переработки лома и кусковых отходов алюминиевых сплавов смонтированы специальные линии. Лом и кусковые отходы с помощью грейферного крана

загружают в бункер, из которого пластинчатым питателем подают в дробилку. Равномерность поступления сырья в дробилку обеспечивается специальными загрузочными устройствами. Дробленый лом и отходы ленточным конвейером подают в магнитные

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

сепараторы, в которых происходит отделение включений железа от алюминиевого сырья. После сепарации алюминиевое сырье с содержанием механического железа 0,35–0,5% ленточным конвейером подают в бункер или вагоны, а магнитную фракцию направляют в отвал.

Наиболее широкое применение для переработки литейных алюминиевых шлаков нашли установки «Реметалл». Шлак подвергают дроблению в дробилке ударного действия, а затем сушке до содержания влаги 1%. Сухой шлак разделяют в барабанном грохоте на классы +80 мм и –80 мм.

Класс +80 мм представляет практически чистый алюминиевый сплав и после удаления из него железных включений является готовым продуктом.

Класс –80 мм доизмельчают в шаровой мельнице с непрерывной продувкой. Мелкие частицы, выносимые из мельницы, поступают в статический воздушный классификатор, в котором осаждаются частицы крупностью +0,15 мм, а мелкая фракция (–0,15 мм) содержащаяся в воздушном потоке, улавливается в системе очистки. Пыль из системы пылеулавливания направляется в отвал, а очищенный воздух – в атмосферу.

Частицы класса +15 мм подвергают рассеву на виброгрохоте на классы +1,25 мм и –1,25 мм. Частицы класса +1,25 мм после удаления из них железа представляют готовый продукт с содержанием металлического сплава 80%. Продукт класса –1,25 мм содержит 25–30% металла.

Донецкий институт «Вторцветмет» разработал технологию первичной обработки лома электроламп, в результате которой достигают разделение всех составляющих на фракции, пригодные для дальнейшего использования.

Все разновидности ламп накаливания, число видов которых достигает более 2000, состоит из однотипных частей, различающихся размерами и формой. Примерно 90% массы ламп составляет стекло, остальное – железо, латунь, медь, никель, оловянный припой, вольфрам и молибден. Лом электроламп дробят на молотковой дробилке, а затем измельченный продукт подвергают магнитной сепарации. Магнитная фракция, состоящая из железа (90%) и никеля (10%), пригодна для производства ферроникеля.

Немагнитную фракцию подвергают классификации через сито с диаметром отверстий 2,5 мм. Надрешетный продукт, состоящий из сплавов меди (50%) и свинца с оловом (10%), может быть использован для выпуска бронзы. Во фракцию –2,5 мм пе-

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

реходит вольфрам, молибден и основная часть стекла. С помощью электрической сепарации вольфрам и молибден отделяют от стекла для дальнейшего использования в производстве вольфрама и молибдена. Стекланные отходы могут быть использованы в производстве строительных материалов.

Лом и отходы кабельной продукции представляют собой сложную сырьевую группу: кабель бронированный и небронированный в свинцовой или алюминиевой оболочке; кабель в резиновой или полимерной оболочке; проводники тока в резиновой, полимерной, бумажной, тканной оболочке. Во всех типах кабельных отходов токопроводящие жилы изготовлены из меди марки М0 и М1 или алюминия марки А1 и А2, а свинцовая оболочка – из свинца марки С-3. Металлическая оплетка выполняется из стальной ленты различных марок легированных сталей толщиной 0,3–1,0 мм и шириной 55–60 мм, либо проволоки диаметром 4–5 мм. В качестве изоляционных материалов применяют резину, полимеры, различные ткани, бумагу, битум, смолы [4].

Разделку кабеля и проводников тока производят на механических станках и специализированных линиях с получением товарных продуктов по видам металла и отделением изоляционных материалов, пригодных для вторичного использования в промышленности. Однако, эффективность выделения металла недостаточно высокая.

Известны также установки, в которых извлечение металла из кабельного лома достигается путем сжигания изоляции во вращающейся печи барабанного типа. Время сжигания изоляции 5–15 мин. Для предотвращения перегрева проволоки в печи впрыскивают воду. Нагрев проволоки в печи производят до температуры, не превышающей температуру окисления металла [5].

Металлургическая переработка кабеля (как и обжиг) приводит к полной потере изоляционных материалов, стоимость которых в отдельных случаях, не уступает стоимости извлеченного металла. Серьезным недостатком этого способа переработки является высокие (до 30%) потери металла.

Комплексно использовать исходное сырье позволяют технологии электродинамической сепарации, разработанные УГТУ и УПИ по разделению лома медных сплавов по сортам, отделению фольги от дробленых пластиковых отходов, обогащению алюминиевых шлаков [6,7].

Серийно электродинамические сепараторы выпускаются двумя предприятиями в РФ. НПО «Эрга» в г. Калуге производит

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

вихретоковый магнитный сепаратор СМВТ для выделения включений цветных токопроводящих металлов из непроводящих материалов, самородного золота, цветных металлов из дробленого кабеля и ТБО [8]. ГУЛ «Станкоснаб» в г. Москве производит сепаратор цветных металлов МСК 3101 [9].

Задача повышения извлечения, как крупного, так и мелкого золота всегда была главной в золотодобывающей промышленности. Эта задача противоречива по способам решения и вероятно не может быть решена при использовании только традиционных обоганительных устройств – шлюзов [10].

Член корр. РАН Богданов Е.И. считает, что шлюзы глубокого наполнения не являются надежным и эффективным аппаратом для обогащения песков крупных классов. По принципу своего действия они не могут улавливать ноздреватое золото и золото, находящееся в прочной механической связи с породой. Кроме того, чем больше размер самородка, тем больше вероятность его сноса со шлюза. Справедливость этого положения подтверждается переработкой галечных отвалов на отсадочных машинах ОМТ, которыми улавливали 5-21% золота [11].

Показательны в этом отношении опыты по установке электронных самородкоуловителей в конце шлюзов глубокого наполнения, проводимых на приисках Лензолота. При переработке дражных отвалов драгой, специально оборудованной устройствами для улавливания крупного золота, в том числе и электронным самородкоуловителем, было установлено, что количество золота, представленного самородками более 8 мм, составляет 35,6%. Из них 59,4% было извлечено самородкоуловителем [12]. В процессе исследований наблюдались ложные срабатывания самородкоуловителя вследствие влияния промышленных и атмосферных радиопомех, недостаточной эффективности распознавания немагнитных и ферромагнитных металлов, нестабильности работы электронной схемы в режиме оптимальной чувствительности к обнаружению металлических включений.

За последние десятилетия содержание и крупность золота в перерабатываемых песках россыпных месторождений России уменьшилась в 2,5 раза. В зависимости от крупности, потери полезного металла с хвостами промывки песков на промприборах составляют от 10 до 36% . При повторной переработке песков на установках, оснащенных шлюзами и отсадочными машинами старой модификации, потери превышают 50% [13]. Результаты исследований по промывке техногенных отвалов прошлых лет в до-

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

лине реки Хомолхо показали наличие свободного золота с содержанием от 112 до 233 мг/м³ во фракциях крупностью менее 2 мм, а пробы эфелей и галечных отвалов осенней промывки показали содержание золота от 365 до 450 мг/м³ [14]. Приведенные факты свидетельствуют о целесообразности переработки песчано-галечных отвалов и актуальности создания новых аппаратов, например, электродинамической сепарации.

Исследования Дядина В.И. по переработке золотосодержащих металлоносных песков прибрежно-морского россыпного месторождения западного побережья Камчатки показывают эффективность применения импульсных бегущих магнитных полей для извлечения труднообогатимого золота крупностью свыше 50 мкм. Разработанные технологии и устройства являются основой современных электродинамических методов обогащения россыпных месторождений и способствуют созданию нового поколения высокопроизводительных и эффективных аппаратов безреагентной добычи золота и других электропроводных минералов [15].

Минерально-сырьевая база россыпных месторождений золота за счет техногенных россыпей постоянно увеличивается и составляет порядка 30% всех имеющихся запасов россыпных месторождений. Необходимость переработки отвалов прошлых лет на примере россыпных месторождений золота Магаданской области экономически обосновал Кидун Ю.Ю. [16]. Вовлечение в переработку отвалов, несмотря на ухудшение их состояния и качества, экономически привлекательней, чем освоение коренных месторождений золота, а сроки возврата вложенных средств, при этом, значительно короче.

По данным Росприроднадзора в России ежегодно образуется около 60 млн. тонн ТБО, в составе которых: бумага и картон – 35%, пищевые отходы – 41%, пластмассы – 3%, стекло – 8%, металлы – 4%, текстиль и другое – 9%. В среднем перерабатывается 10 % – 15 % мусора. Твёрдые бытовые отходы подвергаются переработке только на 3 % – 4 %, промышленные на 35 %. В основном мусор свозится на свалки – их в России около 11 тысяч. В них захоронено около 82 млрд. тонн отходов [17].

Содержащиеся в ТБО цветные металлы являются одним из основных ценных компонентов. Цветной металлолом в ТБО в основном представлен различными видами отслужившей упаковки и посуды из алюминия (банки из-под напитков, баллончики, тубики, тарелки, ложки, вилки, кастрюли, крышки и пр.), значительно реже – сантехническими изделиями из сплавов на медной основе

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

(бронзы, латуни). Содержание цветных металлов в ТБО – на уровне 3% [18].

В настоящее время преобладают термические методы переработки ТБО, так как в его составе около 80% горючей фракции. Преимущество данного способа заключается в уничтожении патогенной микрофлоры и уменьшении объема и массы отходов, но при этом теряются многие ценные компоненты, в том числе и металлы [19,20].

Наиболее активно промышленная переработка ТБО реализуется в странах с малой площадью и высокой плотностью населения (Япония, Швейцария, Бельгия и др.), где захоронению подвергается всего 25-30% образующихся городских отходов. Исходя из состава муниципальных отходов, схемы промышленной переработки представляют собой комбинацию технологических операций разделения на отдельные фракции и компоненты с последующей их утилизацией [21]. При этом широко применяются методы электронной и электродинамической сортировки [22,23].

Проблема переработки ТБО является весьма актуальной, поскольку ее решение связано с необходимостью обеспечения нормальной жизнедеятельности населения, санитарной очистки городов, охраны окружающей среды и ресурсосбережения.

1.2. Теоретические основы электродинамической сепарации

Метод извлечения электропроводных немагнитных частиц в переменном магнитном поле, основанный на силовом взаимодействии вихревых токов частиц с переменным магнитным полем, получил название – электродинамическая сепарация.

Первые работы по электродинамической сепарации проведены Т.Эдисоном, который в 1882 году предложил смесь немагнитных электропроводных и неэлектропроводных частиц пропускать через магнитное поле вращающихся электромагнитов постоянного тока. В результате взаимодействия вращающегося магнитного поля и вихревых токов электропроводных частиц последние отклоняются, а неэлектропроводные движутся по первоначальной траектории.

В 1925 году Р. Ли предложил переменное магнитное поле создавать соленоидом, питаемым током высокой частоты. Исходный поток частиц направлялся в плоскости торца соленоида и электропроводные частицы отклонялись в сторону уменьшения напряженности магнитного поля.

В СССР в 1930 году предложено устройство аппарата для

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

добычи золота из россыпей, принцип действия которого заключается в силовом взаимодействии бегущего магнитного поля, созданного линейным электродвигателем с вихревыми токами частиц золота. В предложенном аппарате частицы золота увлекаются бегущим магнитным полем, отделяясь, таким образом, от песков. Однако ввиду низкого уровня техники и незначительного объема перерабатываемого сырья, которое могло быть переработано такими методами, указанное выше изобретение не было реализовано в практике обогащения минерального сырья. В последние годы значительно повысился интерес к электродинамическим методам сепарации в связи с определившейся в настоящее время необходимостью извлечения и разделения немагнитных цветных металлов и их сплавов при переработке металлургических и промышленных отходов. В этом направлении усиленно ведутся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в США, Японии и Германии и других странах.

На рис. 1.1 изображена схема взаимодействия частицы цветного металла и магнитного поля. Максимальная электродвижущая сила (э.д.с.) возникает в частице при пересечении границы между магнитами. Электродинамическая сила F_3 направлена перпендикулярно установленным магнитам [24]:

$$F_3 = m \cdot a_y, \quad (1.1)$$

где m – масса частицы;
 a_y – ускорение.

Ускорение a_y , приобретенное телом под действием выталкивающей силы, пропорционально скорости V_x перемещения частицы:

$$a_y = a \cdot V_x. \quad (1.2)$$

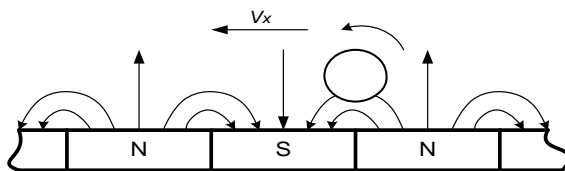


Рис. 1.1. Схема взаимодействия частицы цветного металла и магнитного поля

Коэффициент пропорциональности a зависит от удельной электрической проводимости материала частицы γ , плотности частицы ρ , формы и размера частицы, индукции магнитного поля B и полюсного шага τ . Для тонких дисков, радиус r кото-

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

рых меньше полюсного шага, коэффициент α можно приближенно определить по формуле:

$$\alpha \approx \left(\frac{\gamma}{\rho}\right) \cdot \left(\frac{r}{\tau}\right)^2 \cdot B^2 \quad (1.3)$$

Физические свойства металла входят в это выражение как отношение γ/ρ . В таблице 1.3 металлы расположены в ряд по убывающему значению γ/ρ [25], которое характеризует способность металла подвергаться электродинамической сепарации: чем выше отношение, тем легче, при прочих равных условиях, извлекается металл электродинамической сепарацией.

Таблица 1.3 – Значение параметра γ/ρ для различных металлов при 20°C

Металл	$\gamma \cdot 10^6$, (Ом·м) ⁻¹	$\rho \cdot 10^3$, кг/м ³	$\gamma/\rho \cdot 10^2$
Алюминий	35,4	2,7	130
Магний	23,0	1,74	130
Медь	59,1	8,93	66
Серебро	68,1	10,49	65
Цинк	17,4	6,92	25
Латунь	15,6	8,47	18
Олово	8,8	7,29	12
Свинец	5,0	11,34	4,5
Нержавеющая сталь	1,4	7,9	1,8

Плоские частицы легко поддаются действию отклоняющих сил, однако в исходных смесях содержится довольно много металлических частиц сферической или цилиндрической формы, которые под влиянием вихревых токов совершают вращательное движение.

При прохождении частицей границы южного и северного полюсов (рис. 1.2), в ней возбуждается вихревой ток I_i , направленный по часовой стрелке.

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

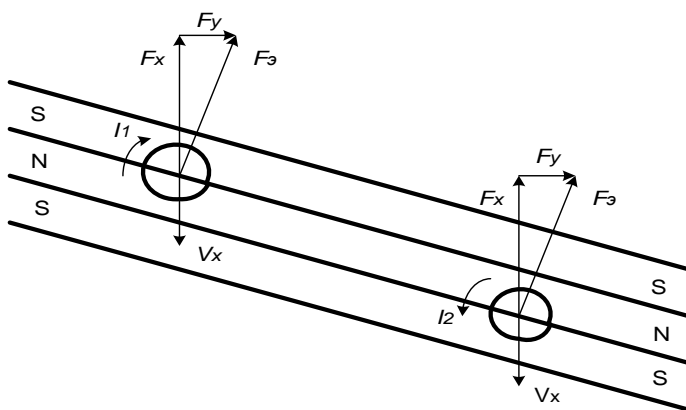


Рис. 1.2. Схема сил и направление тока в частице на границе полюсов

В результате взаимодействия магнитного поля магнитов и магнитного поля частицы возникает электродинамическая сила $F_{\text{э}}$, действующая в плоскости магнитов и направленная перпендикулярно им. Силу $F_{\text{э}}$ можно разложить на две составляющие: F_x и F_y .

Аналогично, когда частица проходит границу северного и южного полюсов, в ней возбуждается вихревой ток I_2 , направленный против часовой стрелки. В результате на частицу действует сила $F_{\text{э}}$, которую также можно разложить на две силы: F_x и F_y (рис. 1.2). Составляющая F_x силы $F_{\text{э}}$ замедляет скорость движения частицы, однако составляющая F_y малозначима по сравнению с силой тяжести. Решающее влияние на движение частицы оказывает составляющая F_y , поскольку она действует последовательно в одном направлении и перемещает частицу по оси y . На рис. 1.3 показана зависимость отклонения электропроводной частицы от ширины индуктора $2b$.

Нижняя часть кривой показывает, что когда ширина индуктора $2b$ меньше полюсного шага τ , боковое смещение пропорционально квадрату величины $2b$. Верхняя часть кривой показывает, что боковое смещение стремится к определенной величине при $2b > \tau$. Таким образом, отклонение частицы существенно зависит от размеров индуктора.

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

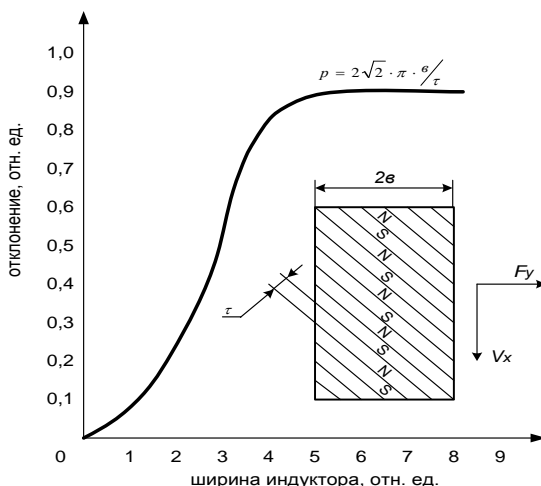


Рис. 1.3. Зависимость отклонения электропроводной частицы от ширины индуктора 2ε

В.Н.Лапицким предложена модель расчета действующих в переменном неоднородном магнитном поле сил, которая сводится к рассмотрению немагнитного электропроводного шара в неоднородном переменном магнитном поле. Указанная задача решается при следующих допущениях: электродинамическая сепарация происходит в неоднородном магнитном поле, но ввиду малых размеров частиц поле в пределах каждой частицы считается квазиоднородным; вторичные эффекты, связанные с движением частицы в поле ввиду их малости не учитываются; предполагается выполнение условия квазистационарности поля, так как длина волны λ , соответствующая круговой частоте поля ω , велика по сравнению с диаметром шара d .

Исходя из приведенных допущений, согласно [26] получено выражение силы, действующей на шар [27]:

$$F_{\mathcal{D}} = \mu_0 \cdot V \cdot \chi_q \cdot H \text{grad} H, \quad (1.4)$$

где μ_0 - магнитная постоянная;

V - объем;

χ_q - квазивосприимчивость тела;

H - напряженность магнитного поля.

Очевидно, что формула (1.4) аналогична формуле магнитной силы в магнитной сепарации [28], поэтому коэффициент χ_q назван квазивосприимчивостью тела. Такое название введено

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

в связи с тем, что в электродинамической сепарации рассматриваются немагнитные тела, у которых магнитная восприимчивость тела в постоянном магнитном поле $\chi \approx 0$, а при помещении их в переменное магнитное поле они приобретают искусственным путем (за счет вихревых токов) отрицательную «магнитную» восприимчивость.

Квазивосприимчивость шара определяется однозначно зависимостью от параметра j , равного отношению диаметра шара d к глубине проникновения магнитного поля δ в материал шара:

$$\chi_q = -\frac{3}{2} \left[1 - \frac{3}{j} \left(\frac{shj - \sin j}{chj - \cos j} \right) \right] \quad (1.5)$$

и является безразмерной величиной.

Влияние формы частиц на квазивосприимчивость тела рассмотрено на модели: немагнитный электропроводный эллипсоид вращения в однородном переменном поле с частотой $\omega \rightarrow \infty$ [29], где была установлена зависимость предельного значения квазивосприимчивости тела $\chi_{q(n.p.)}$ от размагничивающего фактора N_i (в направлении i -й оси эллипсоида)

$$\chi_{q(n.p.)} = \frac{1}{N_i - 1}. \quad (1.6)$$

По аналогии с магнитной сепарацией В.Н.Лапицкий ввел понятие удельной квазивосприимчивости тела:

$$\chi_{q(y.d.)} = \frac{\chi_q}{\rho}, \quad (1.7)$$

где ρ - плотность.

Оценка возможности разделения частиц различных немагнитных металлов может быть определена расчетом, путем сравнения их удельных квазивосприимчивостей.

Сравнение удельной квазивосприимчивости медного шара плотностью $\rho = 8,9 \cdot 10^3$ кг/м³ при $\omega \rightarrow \infty$, $\chi_{q(y.d.)} = 1,7 \cdot 10^{-4}$ м³/кг с удельными магнитными восприимчивостями сильномагнитных и слабомагнитных минералов, например, магнетита Лебединского месторождения $\chi = 6,8 \cdot 10^{-4}$ м³/кг и пиролюзита Никопольского месторождения $\chi = 3,8 \cdot 10^{-7}$ м³/кг позволяет сделать вывод, что электромагнитные силы в электродинамической сепарации соизмеримы с магнитными силами, действующими на сильномагнитные рудные минералы в магнитной сепарации при прочих равных условиях [30].

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

Электродинамическая сила, действующая на частицу в магнитных полях линейных двигателей и постоянных магнитов чередующейся полярности определяется следующей формулой [31]:

$$F_{\tau} = 2\tau^2 \cdot f_1 \cdot \gamma \cdot B^2 \cdot a \cdot h, \quad (1.8)$$

где τ – полюсный шаг;

f_1 – частота магнитного поля;

γ – удельная электрическая проводимость материала частицы;

B – магнитная индукция;

a – ширина частицы;

h – толщина частицы.

Аналогичная формула получена В.Г.Гейером для частицы длиной τ [32]:

$$F_{\tau} = B_m^2 \cdot \tau^2 \cdot f_1 \cdot S \cdot \gamma \cdot a \cdot h, \quad (1.9)$$

где B_m – максимальное значение магнитной индукции;

S – скольжение;

Если длина частицы l больше полюсного шага τ и $l' = k \cdot \tau + l''$, где k – целое число, то

$$F_{\tau} = F_{\tau} (k + \frac{l''}{\tau} \sin^2 \frac{\pi \cdot l''}{2 \cdot \tau}) \quad (1.10)$$

Частица может двигаться под действием электродинамической силы при условии, что сила сопротивления движению частицы будет меньше силы F_{τ} .

Например, сила сопротивления движению частицы, находящейся на ленточном транспортере:

$$F_{\text{сопр.}} = 9,8 \cdot \rho \cdot l' \cdot a \cdot h \cdot f_{\text{мп.}}, \quad (1.11)$$

Тогда, с учетом (1.9) условие транспортирования частицы записывается в виде:

$$\frac{F_{\tau}}{F_{\text{сопр.}}} = \frac{B_m^2 \cdot \tau \cdot f_1 \cdot S \cdot \gamma \cdot \sin^2 \frac{\pi \cdot l''}{2 \cdot \tau} \cdot 10^{-6}}{9,8 \cdot \rho \cdot f_{\text{мп.}}} > 1 \quad (1.12)$$

Из условия (1.12) можно определить минимальный размер частицы, при котором еще возможно её извлечение на ленточном транспортере.

1.3. Применение электродинамической сепарации для извлечения электропроводных металлов

Анализ известных разработок показывает, что электродинамическая сепарация может быть реализована при помощи различных устройств, основанных на силовом взаимодействии магнитного поля индуктора с магнитным полем вихревых токов электропроводных частиц. Все устройства можно классифицировать на три основные группы. Вихревые токи возникают в электропроводных частицах в следующих случаях:

1. При перемещении частиц относительно неподвижного в пространстве постоянного неоднородного магнитного поля.
2. При перемещении частиц в изменяющемся во времени и неподвижном в пространстве магнитном поле.
3. При перемещении частиц в бегущем или вращающемся магнитном поле.

К первой группе относятся сепараторы, в которых постоянное магнитное поле создается неподвижными в пространстве постоянными магнитами или электромагнитами.

На рис. 1.4 показан электродинамический сепаратор, состоящий из конвейера 1, под которым расположены постоянные магниты чередующейся полярности 2, приемника электропроводной фракции 3 и приемника неэлектропроводной фракции 4.

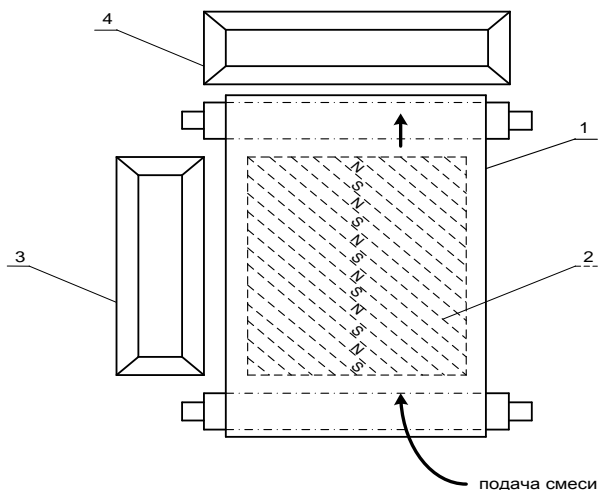


Рис. 1.4. Электродинамический сепаратор: 1 – конвейер; 2 – дека с постоянными магнитами; 3 – приемник электропроводной фракции; 4 – приемник неэлектропроводной фракции.

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

Исходная смесь, содержащая электропроводные и неэлектропроводные частицы подается на правую часть конвейерной ленты 1. Под действием поля постоянных магнитов 2 в электропроводных частицах наводятся вихревые токи. В результате взаимодействия поля постоянных магнитов с полем вихревых токов, последние смещаются на левую часть конвейерной ленты и попадают в приемник электропроводной фракции 3. Неэлектропроводные частицы транспортируются лентой в приемник 4 [33].

Аналогичная конструкция разработана Райтон Реемарч Дэвижен (исследовательский отдел Валхтем, Массачусет). Лабораторная модель этого сепаратора, производительностью 90 кг/ч, извлекала алюминий из разнородного исходного материала, содержанием около 15% цветного металла. Система (рис. 1.5) состоит из наклонной деки 1, длиной 2,44 м и шириной 0,9 м на которой вмонтированы постоянные магниты 2 под углом 45° к исходному потоку. Когда поток скользит вниз по наклонной плоскости, электропроводные частицы под действием магнитного поля отклоняются в сторону от потока, неэлектропроводный материал скользит прямо вниз [34].

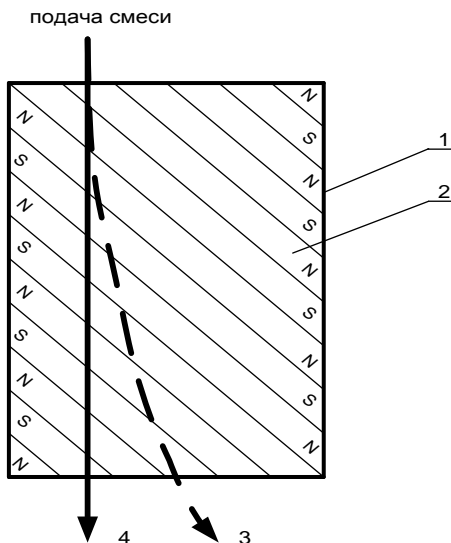


Рис. 1.5. Электродинамический сепаратор: 1 – наклонная дека; постоянные магниты; 3 – направление движения цветных металлов; 4 – направление движения неметаллических частиц.

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

К достоинствам данных методов относится возможность полной механизации процесса обогащения цветных металлов, непрерывность процесса, простота конструкции и обслуживания.

К основным недостаткам следует отнести значительную металлоемкость, отсутствие возможности регулирования процесса, засоренность металла отходами вследствие незначительного отклонения.

Вторая группа представлена большим числом разработок, к ней относятся сепараторы, в которых магнитное поле создается различными катушками, питаемыми от высокочастотных генераторов. Наиболее простая модель этой группы состоит из соленоида, создающего высокочастотное магнитное поле. Исходная смесь находится в свободном падении вблизи соленоида. Под действием магнитного поля электропроводные частицы изменяют траекторию падения, отделяясь, таким образом, от общего массопотока [35].

Для увеличения напряженности магнитного поля в зоне сепарации применяются катушки с сердечниками, что позволяет улучшить показатели сепарации [36].

На рис. 1.6 показан электродинамический сепаратор с кольцевой магнитной системой. Исходная смесь подается из бункера 1 на неподвижный барабан 2 и далее в зону действия переменного магнитного поля, которое создается электромагнитом 3. Под действием магнитного поля электропроводные частицы отскакивают от поверхности барабана. Экранирующая вставка 4, выполненная из немагнитного электропроводного материала, способствует вытеснению магнитного потока на поверхность барабана. Делителем 5 регулируется качество концентрата [37].

Следующая разработка Днепропетровского горного института предусматривает компенсацию гравитационных сил. Устройство (рис. 1.7) состоит из двух катушек, расположенных под углом 90° . Электропроводные частицы, попадая в зону действия магнитного поля катушки 1, отклоняются от траектории свободного падения.

Электродинамическая separация вторичного сырья цветной металлургии

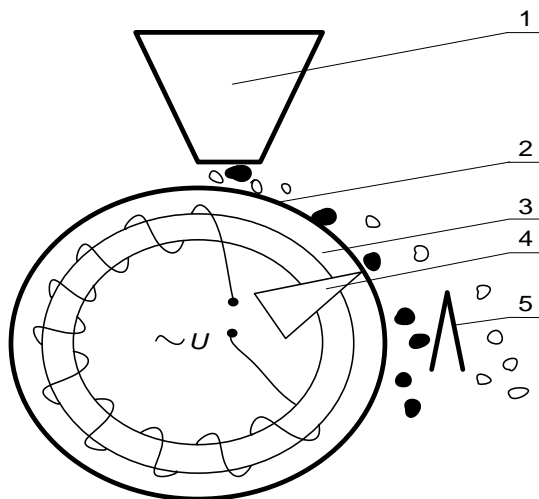


Рис. 1.6. Электродинамический сепаратор: 1 – бункер; 2 – неподвижный барабан; 3 – электромагнит; 4 – вставка из немагнитного электропроводного материала; 5 – делитель

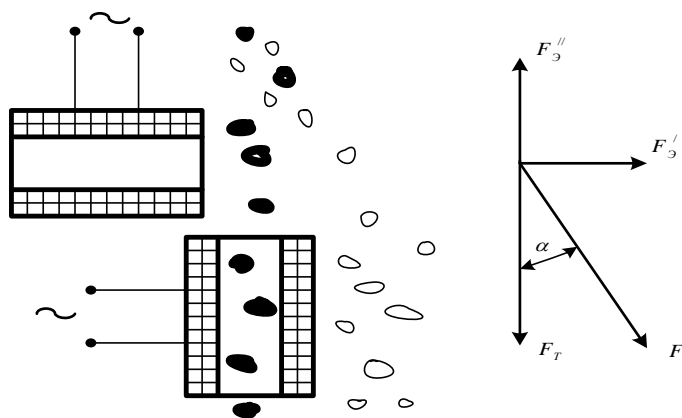


Рис. 1.7. Электродинамический сепаратор: 1 – отклоняющая катушка; 2 – компенсирующая катушка

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

Одновременно на частицу цветного металла действует магнитное поле катушки 2, которое частично компенсирует силу тяжести. Сила $F_{\text{з}}$ направлена перпендикулярно исходному потоку, сила $F_{\text{з}}''$ компенсирует силу тяжести F_T .

В результате электропроводная частица движется под действием силы

$$F = \sqrt{(F_T - F_{\text{з}}'')^2 + F_{\text{з}}'^2} \quad (1.13)$$

и отклоняется от вертикали под углом α .

Действие силы $F_{\text{з}}''$ уменьшает скорость падения электропроводной частицы, поэтому данный способ целесообразно применять при обогащении материалов с высокой плотностью, таких как, золото, платина и т.д.

Изменяя напряженность магнитного поля в зоне сепарации можно разделять смеси цветных металлов. Например, при сепарации смеси состава, %: медь 50, свинец 50, получен концентрат, %: медь 99,9, свинец 0,1. Частицы, в основном, имели форму шара, диаметром 2-3 мм [38].

Применение замкнутой магнитной системы с полюсными наконечниками, выполненными в виде прямых треугольных призм, обращенных ребрами друг к другу, позволяет увеличить индукцию в зоне сепарации (рис. 1.8). Исходный материал подается ленточным питателем в межполюсное пространство. Электропроводные частицы под действием магнитного поля отклоняются от траектории свободного падения по обе стороны магнитной системы [39].

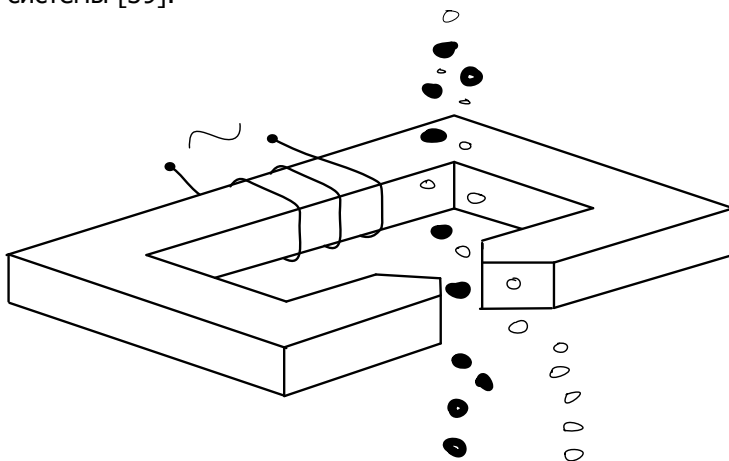


Рис. 1.8. Замкнутая магнитная система

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

Известны другие формы полюсных наконечников, например, в виде треугольных призм с усеченной вершиной [40]. Такая конфигурация наконечников создает неравномерное магнитное поле по вертикали для компенсации силы тяжести.

Повышение эффективности процесса сепарации в воздушной среде можно достичь за счет предварительной ориентации частиц в однородном переменном магнитном поле [41, 42]. Частицы асимметричной формы ориентируются вдоль силовых линий однородного переменного поля и попадают в зону сепарации перпендикулярно расположенные силовым линиям основного поля.

К достоинствам данного типа сепараторов относится возможность механизации и непрерывность сепарации цветных металлов, возможность установки в существующие схемы и регулирование процесса обогащения.

Основными недостатками являются: малая производительность и необходимость в источнике питания высокой частоты достаточно большой мощности.

К третьей группе относятся сепараторы с бегущими магнитными полями, создаваемыми линейными двигателями и с вращающимися полями постоянных магнитов.

На рис. 1.9 изображен электродинамический сепаратор, состоящий из двух линейных двигателей 1 и трех ленточных транспортеров 2. Исходная смесь, состоящая из электропроводных и неэлектропроводных частиц, подается на первый ленточный транспортер.

Под действием магнитного поля индуктора электропроводные частицы отбрасываются на второй транспортер, где происходит перечистка концентрата. Готовый концентрат транспортируется далее третьим конвейером.

Линейные двигатели питаются от источника переменного напряжения частотой 400-800 Гц, крупность исходного сырья 6,4-25,4 мм [43].

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

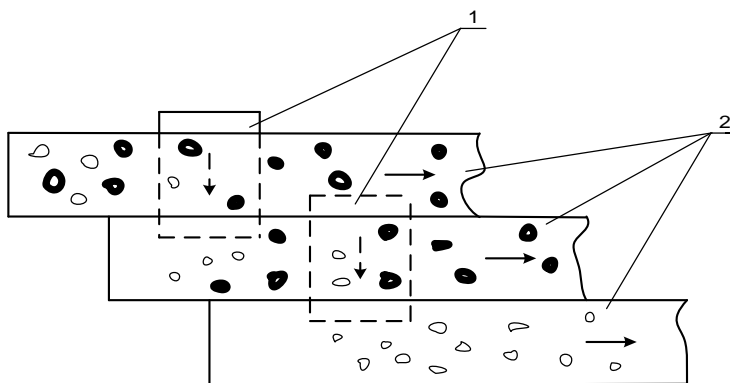


Рис. 1.9. Электродинамический сепаратор: 1 – линейные двигатели; 2 – ленточные транспортеры

Наложение вибраций на сепарируемый материал позволяет повысить эффективность разделения [44]. Под секциями виброротка, по которому движутся отходы, установлено несколько рядов линейных двигателей, создающих бегущее поле в направлении, перпендикулярном направлению движения отходов, причем двигатели в каждом ряду установлены попарно таким образом, что их магнитные поля направлены в противоположные стороны от оси симметрии виброротка, что позволяет существенно повысить эффект отделения металлов при неизменном потреблении электроэнергии двигателями.

Применением постоянных магнитов в электродинамических сепараторах достигается уменьшение полюсного шага, а в некоторых случаях – увеличение индукции в зоне сепарации.

Сепаратор, разработанный Днепропетровским горным институтом, состоит (рис. 1.10) из индуктора вращающегося магнитного поля 1, выполненного в виде ролика с пазами, в которых расположены постоянные магниты чередующейся полярности и ленточного транспортера 2. Ролик приводится во вращение любым известным способом. Исходный материал, состоящий из электропроводных и неэлектропроводных частиц, подается ленточным транспортером в зону сепарации, которая определяется геометрическими размерами индуктора. Под действием вращающегося магнитного поля электропроводные частицы сбрасываются с конвейерной ленты, неэлектропроводные – транспортируются далее в приемный бункер [45].

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

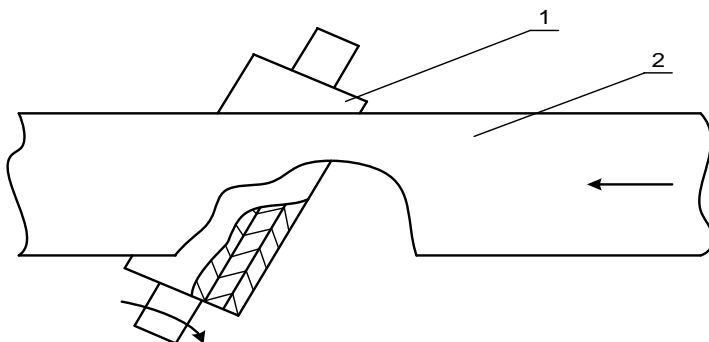


Рис. 1.10. Электродинамический сепаратор: 1 – индуктор; 2 – ленточный транспортер

Другие конструкции предусматривают различное положение индуктора относительно продольной оси ленточного транспортера: параллельно плоскости транспортирования сепарируемого материала [46], перпендикулярно [47,48], при этом магниты на ролике располагаются под углом к продольной его оси.

Использование двух индукторов, расположенных под лентой, достигается

разделение исходного потока на две части, что позволяет увеличить ширину зоны сепарации [49].

Для равномерного распределения индукции в зоне сепарации, один индуктор располагается под лентой, другой – над ней, в результате на частицы действуют силы одного порядка [50].

Японская фирма «Хитати Сейсакусё», специализирующаяся на создании роликовых и дисковых сепараторов предложила систему переработки с выделением черных цветных металлов. На первом этапе сортировки магнитной сепарацией выделяются черные металлы, затем – цветные металлы с применением комбинации методов электродинамической сепарации и седиментационного разделения в магнитной жидкости, плотность которой доводят до заданного значения воздействием регулируемого магнитного поля.

Дисковые сепараторы, в которых вращающееся магнитное поле создается между двумя синхронно и соосно вращающимися дисками с постоянными магнитами, обладают лучшими характеристиками и повышенной зоной сепарации. Сепараторы с дисками различаются способом транспортирования сепарируемого мате-

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

риала. Так, в одном варианте сепаратора фирмы «Когё Гидзюцу Интё» материал, подлежащий разделению, транспортируется конвейерной лентой между вращающимися дисками. Электропроводные частицы сбрасываются с конвейерной ленты под действием поля, а неэлектропроводные – остаются на ней. В другом варианте для облегчения перемещения электропроводных частиц, конвейерную ленту подвергают вибрации, в третьем – для перемещения исходного сырья между магнитными дисками используют свободное падение частиц в поле гравитации. При этом на извлечение электропроводных частиц из общего потока затрачивается меньше энергии, чем в сепараторах с конвейерной лентой, в которых силы трения, возникающие при перемещении материала по ленте, противодействуют процессу разделения.

К достоинствам сепараторов этой группы следует отнести простоту конструкции, высокую производительность и возможность регулировки процесса разделения. К недостаткам – применение постоянных магнитов, стоимость которых в настоящее время довольно высока.

Глава 2. Разработка электродинамических сепараторов для извлечения электропроводных металлов

2.1. Влияние формы электропроводных частиц и частоты магнитного поля на процесс электродинамической сепарации

Анализ изобретений и исследований отечественных и зарубежных специалистов в области электродинамической сепарации указывает на то, что наиболее перспективным направлением обогащения класса минус 40 мм является применение электродинамических сепараторов с вращающимся полем постоянных магнитов.

Электродинамическая сила зависит не только от величины индукции и характера ее распределения в рабочем пространстве, но и от степени неоднородности, величины полюсного шага и частоты магнитного поля, а также от электропроводности частицы, ее размера, формы, плотности, скорости транспортирования в зону сепарации.

Разнообразие форм электропроводных частиц создает определенные сложности для электродинамической сепарации [51]. В переменном магнитном поле в немагнитных электропроводных частицах индуктируются вихревые токи, магнитное поле которых направлено навстречу основному, следовательно, напряженность

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

результатирующего поля H_{\ominus} будет меньше напряженности основного поля H_0 на величину H_{\ominus} :

$$H_{\ominus} = H_0 - H_{\ominus} = H_0 - H_{\ominus} e^{j\alpha}, \quad (2.1)$$

где α угол между векторами H_0 и H_{\ominus} .

Величина напряженности размагничивающего поля H_{\ominus} определяется коэффициентом размагничивания N , который зависит от формы и ориентации электропроводной частицы в поле.

При обогащении класса минус 40 мм электродинамическая сила, действующая на частицу незначительна, так как действующее усилие пропорционально объему тела. Действующее усилие может быть увеличено за счет предварительной ориентации частицы в магнитном поле и оптимального выбора частоты.

В электродинамической сепарации сепарируемые частицы можно приближенно привести к различным формам эллипсоида вращения, предельными формами которого являются: шар, вытянутый эллипсоид (цилиндр) и сплюснутый эллипсоид (диск). На рис. 2.1 показаны зависимости коэффициента размагничивания N от геометрии образцов D/h в продольном (кривая 1) и поперечном (кривая 2) полях.

Для бесконечной пластины, расположенной перпендикулярно силовым линиям поля, которую можно рассматривать как сплюснутый эллипсоид, $N=1$.

Это наивысшее значение N . Для шара $N=1/3$, для бесконечно длинного стержня, расположенного параллельно силовым линиям $N=0$. Из рассмотренных форм наиболее благоприятной для электродинамической сепарации является диск в поле, перпендикулярном его плоскости.

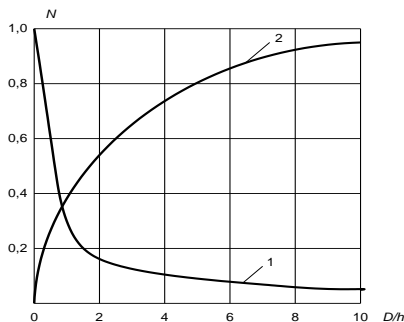


Рис. 2.1. Зависимость коэффициента размагничивания N от геометрии образцов D/h : 1-в продольном поле; 2-в поперечном поле

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

Влияние формы наиболее резко выражено при частоте $f_i \rightarrow \infty$, в этом случае магнитное поле вовнутрь частицы не проникает [52].

На рис. 2.2 показаны графики зависимости электродинамической силы F от геометрии образцов D/h при частоте магнитного поля $f_i = 100$ Гц.

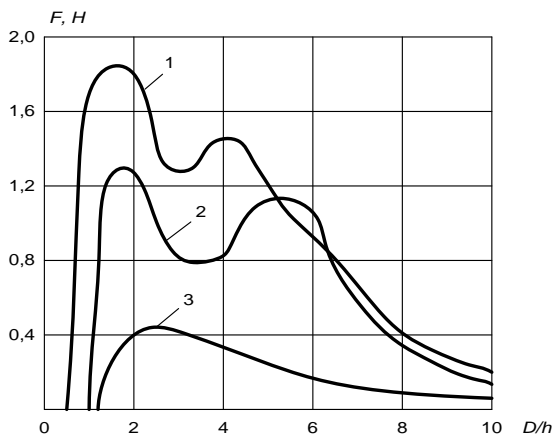


Рис. 2.2. Зависимость электродинамической силы F от геометрии образцов D/h алюминия (1), меди (2), латуни (3) при частоте магнитного поля $f_i = 100$ Гц

Кривые начинаются с некоторого значения D/h , при котором электродинамическая сила F превышает силу сопротивления движению частицы $F_{сопр.}$ [53]:

$$F \geq \rho \cdot V \cdot F_{сопр.} \quad (2.2)$$

Далее сила возрастает, достигает максимального значения, а затем уменьшается пропорционально коэффициенту размагничивания N . Второй максимум силы на кривой 1 и 2 соответствует равенству двух величин: глубины проникновения вихревых токов в материал частицы и высоты частицы h . На кривой 3 максимумы силы совпадают.

Зависимость частоты магнитного поля f_i от геометрии образцов D/h при максимальной действующей на образец электродинамической силы представлены на рис. 2.3. С увеличением отношения D/h частоту необходимо увеличивать, при этом наибольшее увеличение частоты наблюдается для образцов с

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

меньшей удельной электрической проводимостью.

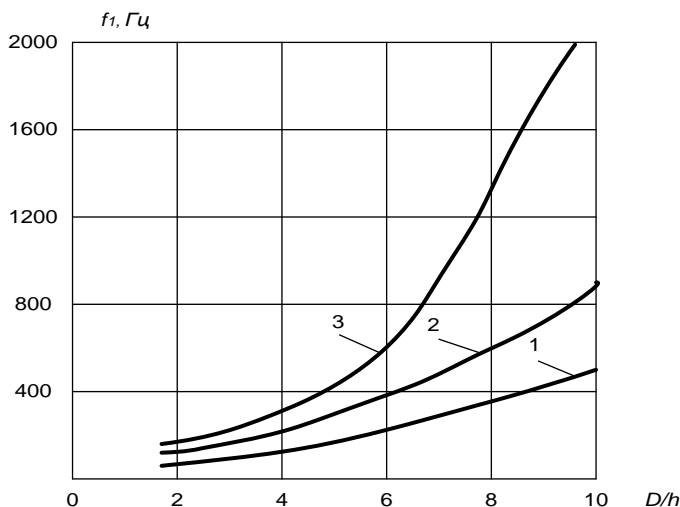


Рис. 2.3. Зависимость частоты магнитного поля f_1 от геометрии образцов D/h алюминия (1), меди (2), латуни (3) при максимальной электродинамической силе F

Оптимальная частота магнитного поля f_1 , Гц, определяется по экспериментально полученной формуле [54]:

$$f_1 = \frac{25,3 \cdot 10^4}{h^2 \cdot \gamma}, \quad (2.3)$$

где h – высота частицы, мм;

γ – удельная электрическая проводимость материала частицы, 1/МОм·м.

Используя данную формулу по электропроводности и крупности сепарируемого материала можно определить оптимальную частоту.

Если $l < \tau$ или $l > \tau$ (где l – длина частицы) необходимо вводить соответствующую коррекцию, так при $l/\tau = 0,5$ частота должна быть уменьшена в два раза по сравнению со значением для $l = \tau$. Однако, при $l < \tau$ усилие, действующее на частицу уменьшается по экспоненциальному закону, а при $l > \tau$, увеличивается, но для частиц малой крупности условие $l > \tau$ не всегда выполнимо по техническим причинам.

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

Таким образом, используя оптимальные условия сепарации можно не только повысить эффективность извлечения электропроводных частиц, но и вовлечь в переработку металлы с относительно низкой электрической проводимостью, а также разделять металлы, различающиеся электропроводностью и плотностью.

2.2. Моделирование магнитных полей электродинамических сепараторов

Для успешного решения уравнений динамики разделительного массопереноса при разработке и интенсификации процессов электродинамической сепарации необходимо знать распределение и интенсивность магнитного поля в рабочем пространстве, а, следовательно, и электродинамическую силу, действующую на электропроводную частицу в любой точке этого пространства. Создание и поддержание поля во время работы сепаратора осуществляется специальной магнитной или электромагнитной системой, на которую приходится большая часть стоимости сепаратора. В связи с этим требуется оптимизация системы – она должна обеспечивать необходимые параметры поля и эксплуатационные характеристики при минимальной капитальной и эксплуатационной стоимости сепаратора. Это, прежде всего, относится к сепараторам с постоянными магнитами из интерметаллических соединений редкоземельных металлов с кобальтом, ввиду их относительно высокой стоимости.

В основу моделирования магнитного поля сепаратора положен тот факт, что постоянное магнитное поле в области вне токов и постоянное электрическое поле в проводящей среде в области вне источников электродвижущих сил описываются аналогичными уравнениями, имеющими соответственно вид [55]:

$$\operatorname{rot} H = 0 (H = -\operatorname{grad} U_M); B = \mu \cdot H, \operatorname{div} B = 0 \quad (2.4)$$

$$\operatorname{rot} E = 0 (E = -\operatorname{grad} U); \delta = \gamma \cdot E, \operatorname{div} \delta = 0 \quad (2.5)$$

Поэтому, при подобии геометрических конфигураций областей пространства, в которых существуют эти поля, при аналогии граничных условий на границах областей и подобии относительных распределений значений μ и γ внутри областей, картины полей подобны друг другу.

Исследование магнитного поля осуществлено в листе из однородного и изотропного в отношении электрической проводимости материала и, следовательно, между векторами плотности тока δ и напряженности электрического поля E существует простая зависимость: $\delta = \gamma \cdot E$. Очертание листа (рис. 2.4) имеет характер очертания пространства около полюсов индуктора в сечении,

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

перпендикулярном к продольной оси индуктора.

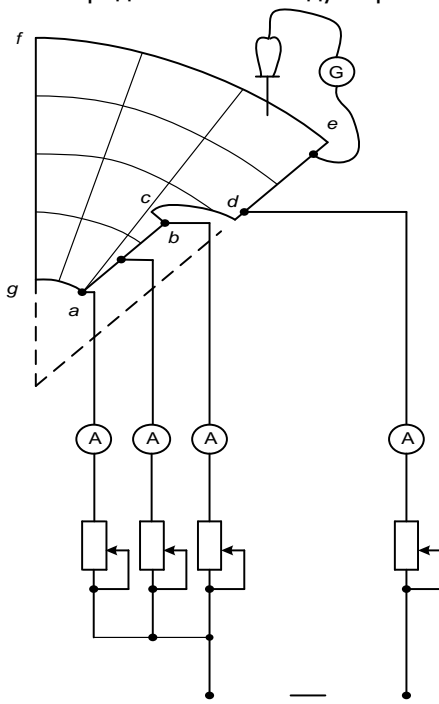


Рис. 2.4. Схема моделирования магнитного поля электродинамического сепаратора

Линия $abcd$ представляет собой очертание полюса; линия ef обозначает границу зоны сепарации; линия de пересекает воздушный зазор под серединой полюса; линия fg проходит по середине межполюсного пространства и линия ga обозначает границу магнитопровода. К листу подводится регулируемое напряжение постоянного тока. Для нахождения линий равного потенциала на поверхности листа при прохождении по нему тока используется гальванометр с щупом.

Линия тока в листе соответствует линиям равного магнитного потенциала, а линии равного электрического потенциала соответствуют линиям напряженности магнитного поля. Линии равного потенциала наносятся одна за другой так, чтобы приращение потенциала между соседними линиями всюду было одним и тем же. Это соответствует разделению картины поля на трубки

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

равного магнитного потока.

При этом должны быть соблюдены следующие условия:

1) линии напряженности поля и линии равного магнитного потенциала должны пересекаться всюду под прямым углом;

2) поверхности железных частей индуктора, вдоль которых не протекают электрические токи, следует считать поверхностями равного магнитного потенциала, а линии напряженности поля в воздухе – перпендикулярны к ним;

3) ячейки сетки, образованной линиями напряженности поля и линиями равного потенциала, при достаточной густоте сетки, должны быть подобны друг другу, т.е. отношение средней длины Δl ячейки в направлении линий напряженности поля к средней ширине Δa ячейки в направлении линий равного потенциала одинаково для всех ячеек.

В целом картина поля должна удовлетворять уравнению Лапласа плоскопараллельного поля [56]:

$$\frac{\partial^2 V_M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_M}{\partial y^2} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial^2 U_M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_M}{\partial y^2} = 0 \quad (2.6)$$

Уравнение линий напряженности магнитного поля

$$V_M = \text{const}$$

Уравнение линий равного магнитного потенциала

$$U_M = \text{const}$$

Исследуя магнитное поле в воздухе около полюса, магнитная проницаемость железных частей принимается равной бесконечности. В этом случае линии dcb , ef и ga являются линиями равного магнитного потенциала. Линия fg является также линией равного магнитного потенциала. Магнитные линии потока рассеивания, идущие от северного полюса к южному в пространстве между полюсами пересекают линию fg под углом 90° , вследствие симметричного расположения полюсов по отношению к ней. Следовательно, линия fg есть линия равного магнитного потенциала, и потенциал этой линии такой же, как и на линиях ef и ag .

При принятом предположении, что магнитная проницаемость стали бесконечно велика по сравнению с магнитной проницаемостью воздуха, линия $efga$ есть линия одного и того же магнитного потенциала и линия dcb – линия другого потенциала. Разность магнитных потенциалов между этими линиями равна той части магнитодвижущей силы, которая определяется магнитным потоком в воздушном зазоре и магнитным сопротивлением воздушного зазора.

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

Принятое допущение, что магнитная проницаемость стали бесконечно велика по сравнению с магнитной проницаемостью воздуха, эквивалентно допущению, что магнитное сопротивление пути потока по стальным частям бесконечно мало по сравнению с магнитным сопротивлением воздушного зазора. В этом случае разность магнитных потенциалов между линиями dcb и $efga$ равна полному току $I \cdot W$ катушки, расположенной на одном полюсе, причем I – ток в обмотке этой катушки, а W – число ее витков. Так как в пространстве, занятом самой катушкой, понятие скалярного магнитного потенциала не применимо ввиду того, что в этом пространстве протекает электрический ток, то для построения картины поля предполагают, что катушка имеет бесконечно малую толщину и прилегает непосредственно к поверхности сердечника полюса. При построении картины поля во всем пространстве, ограниченном контуром $abcdefga$, можно пользоваться понятием скалярного магнитного потенциала, так как во всем этом пространстве нет электрических токов. Вдоль линии ab магнитный потенциал в воздухе изменяется на величину магнитодвижущей силы, развиваемой катушкой. Распределение магнитодвижущей силы вдоль линии ab зависит от распределения витков катушки вдоль сердечника полюса. Магнитные линии в воздухе должны подходить перпендикулярно к линиям dcb и $efga$, как к линиям равного потенциала. К линии ab магнитные линии подходят не под прямым углом, так как вдоль линии ab в воздухе магнитный потенциал изменяется [57,58].

Моделирование магнитного поля проведено для различных значений высоты зоны сепарации z , высоты полюса h_M , ширины полюса a_M и полюсного шага τ . При удалении от поверхности полюса напряженность электрического поля уменьшается по экспоненциальному закону (рис. 2.5). Наиболее оптимальные размеры полюсов $h_M/a_M = 4$ (рис. 2.6 и рис. 2.7). Увеличение высоты зоны сепарации достигается увеличением полюсного шага, однако при этом наблюдается снижение напряженности электрического поля (рис. 2.8).

За базовое значение напряженности электрического поля E_0 принято значение напряженности на поверхности полюса.

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

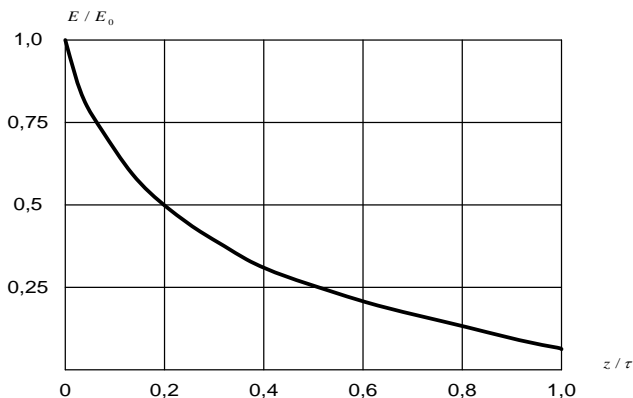


Рис. 2.5. Зависимость напряженности E/E_0 электрического поля от отношения высоты z зоны сепарации к полюсному шагу τ

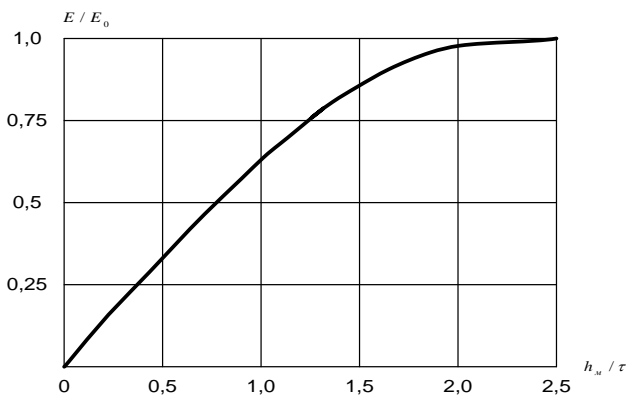


Рис. 2.6. Зависимость напряженности электрического поля E/E_0 от отношения высоты полюса h_M к полюсному шагу τ

Электродинамическая separация вторичного сырья цветной металлургии

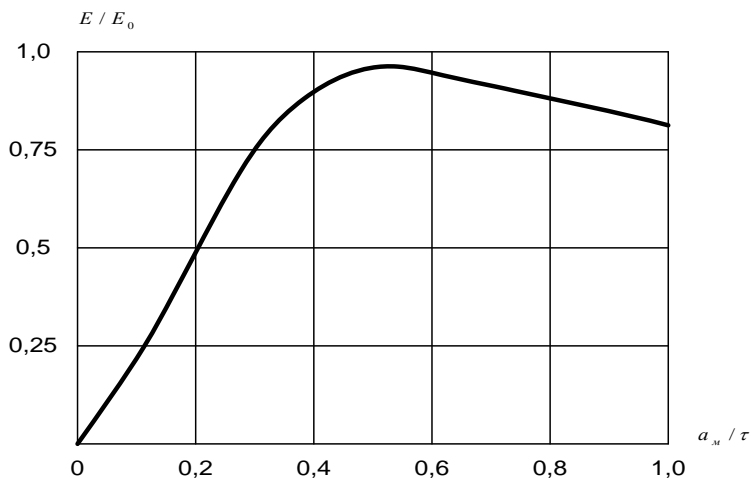


Рис. 2.7. Зависимость напряженности электрического поля E/E_0 от отношения ширины полюса a_m к полюсному шагу τ

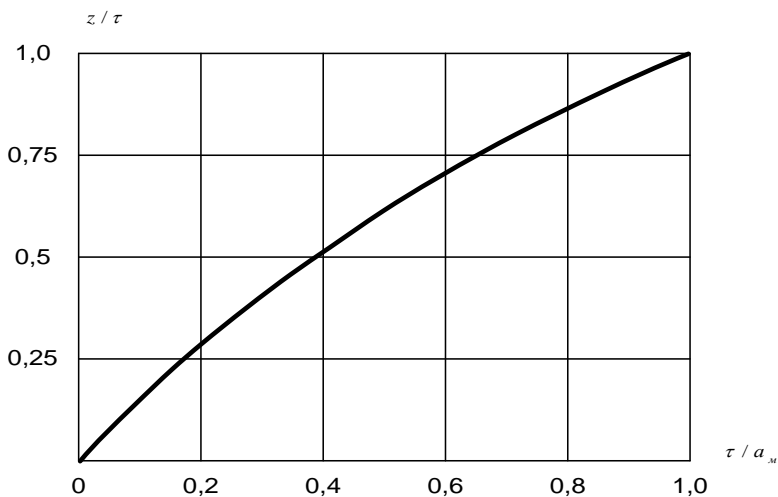


Рис. 2.8. Зависимость высоты зоны separации от величины полюсного шага τ

2.3. Разработка конструкций сепараторов

В большинстве случаев электродинамические сепараторы состоят из следующих основных частей: магнитной системы; устройства для разделения электропроводной и неэлектропроводной фракции, в котором создается силовое поле и находится разделительная перегородка; устройство для транспортирования материала относительно поля; питателя для равномерного распределения исходного материала по ширине рабочего пространства. Сепараторы могут быть снабжены вспомогательными механизмами (привод, блоки питания, контрольно-измерительные приборы).

Выход V извлекаемой части расчетного класса зависит от: нагрузки по объему питания сепаратора на 1 м длины B_{σ} барабана $q = Q_{об}/B_{\sigma}$; энергонапряженности рабочего объема $N/Q_{об}$, где N – мощность, потребляемая сепаратором; плотности среды Π ; диаметра барабана D ; относительной величины активной зоны сепаратора ψ :

$$V = f\left(\frac{Q_{об}}{B_{\sigma}}, \frac{N}{Q_{об}}, \Pi, D, \psi\right) \quad (2.7)$$

Эта зависимость выражается через степенные сомножители [59]:

$$\begin{aligned} V &= X_0 \cdot \left(\frac{Q_{об}}{B_{\sigma}}\right)^{X_1} \cdot \left(\frac{N}{Q_{об}}\right)^{X_2} \cdot \Pi^{X_3} \cdot D^{X_4} \cdot \psi^{X_5} = \\ &= X_0 \cdot \left(\frac{Q_{об}}{B_{\sigma}}\right)^{-2X_2} \cdot \left(\frac{N}{Q_{об}}\right)^{X_2} \cdot \left(\frac{D^2}{\Pi}\right)^{-X_2} \cdot \psi^{X_5} = \\ &= \left[\left(\frac{B_{\sigma}}{Q_{об}}\right)^3 \cdot \frac{N}{B_{\sigma}} \cdot \frac{D^2}{\Pi}\right]^{X_2} \cdot \psi^{X_5}, \end{aligned} \quad (2.8)$$

удельная нагрузка на сепаратор

$$q = \frac{Q_{об}}{B_{\sigma}} = \sqrt[3]{\frac{N}{B_{\sigma}} \cdot \frac{D^2}{\Pi} \cdot \left(\frac{X_0}{V}\right)^{1/X_1}} \cdot \psi^{X_5/X_1} \quad (2.9)$$

Для электродинамических сепараторов с постоянными маг-

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

нитями энергонапряженность можно рассматривать как отношение величины магнитного потока Φ , приходящегося на единицу объема активной зоны сепаратора, т.е. $\Phi/S \cdot z$, где S – площадь активной зоны барабана; z – высота зоны сепарации.

Удельный магнитный поток на единицу объема имеет ту же размерность, что и $N/Q_{об}$, поэтому уравнение (2.8) для V будет идентичным:

$$V = X_0 \cdot \left(\frac{Q_{об}}{B_0} \right)^{-2X_2} \cdot \left(\frac{\Phi}{S \cdot z} \right)^{X_2} \cdot \left(\frac{D^2}{\Pi} \right)^{X_2} \cdot \psi^{X_5} \quad (2.10)$$

При малом расстоянии между полюсами напряженность поля численно равна индукции $H = \Phi/S$ [60], тогда

$$V = X_0 \cdot \left(\frac{H \cdot D^2}{q^2 \cdot z \cdot \Pi} \right)^{X_2} \cdot \psi^{X_5}, \quad (2.11)$$

откуда

$$q = \sqrt{\frac{H}{\Pi \cdot z} \cdot \left(\frac{\psi^{X_5} \cdot X_0}{V} \right)^{1/X_2}} \cdot D \quad (2.12)$$

Из последней формулы следует, что в технологически подобных сепараторах ($V = \text{const}$) отношение высоты рабочей зоны должно быть обратно пропорционально квадрату диаметров барабанов D^2 :

$$\frac{D_1^2}{D_2^2} = \frac{z_2}{z_1} = \text{const} \quad (2.13)$$

При $\psi_1 = \psi_2 = \text{const}$ отношение удельных производительностей обратно пропорционально плотности питания:

$$\psi[V] = \frac{q_2}{q_1} = \sqrt{\frac{\Pi_1}{\Pi_2}} \quad (2.14)$$

Надежность работы электродинамических сепараторов (при прочих равных условиях) характеризуется коэффициентом использования оборудования (КИО), который должен быть не менее 0,9, и коэффициентом корреляции между среднесменным содержанием ценного компонента в продуктах сепарации и в продуктах магнитного анализа. Коэффициент корреляции при устойчивой работе сепаратора должен быть не менее 0,9 [61]. Надежность сепараторов определяется числом факторов, влияющих на его работу. Так, электромагнитные сепараторы, питаемые постоян-

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

ным током, менее надежны и имеют меньший КИО по сравнению с электромагнитными сепараторами, питаемыми переменным током, в связи с тем, что их работа зависит от состояния преобразователей и пускорегулирующей аппаратуры сети постоянного тока.

Большую роль в надежности работы сепараторов играет их конструкция и, в частности, конструкция магнитных систем. Например, закрытые магнитные системы барабанных сепараторов наиболее надежны, так как магниты находятся внутри барабана и полностью защищены от механических воздействий.

Наиболее надежными являются сепараторы с магнитными системами, набранными из постоянных магнитов. Магнитные системы из литых постоянных магнитов более надежны, чем, например, из феррито-бариевых. Это объясняется тем, что магниты из феррита бария склеиваются из отдельных хрупких плиток, которые при небольших динамических нагрузках могут раскалываться по самой плитке или по месту их склеивания.

С учетом вышеизложенных рекомендаций разработана серия электродинамических сепараторов с постоянными магнитами.

На рис. 2.9 изображен электродинамический сепаратор для разделения материалов крупностью от 5 до 10 мм в воздушной среде.

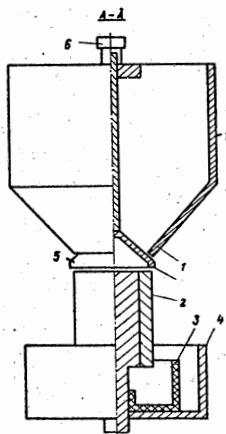


Рис. 2.9. Электродинамический сепаратор: 1– загрузочный бункер; 2 – индуктор; 3 – камера для неэлектропроводных частиц; 4 – камера для электропроводных частиц; 5 – конусная за-

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

слонка; 6 – регулятор расхода

Сепаратор состоит из загрузочного цилиндрического бункера 1 с конусным выходом, индуктора вращающегося магнитного поля 2 выполненного в виде ролика с расположенными по окружности постоянными магнитами чередующейся полярности, камеры 3 для неэлектропроводных частиц, камеры 4 для электропроводных частиц, конусной заслонки 5 к которой прикреплен штырь с регулятором 6. Необходимый расход материала устанавливается регулятором 6. Магнитная система приводится во вращение двигателем постоянного тока, с помощью которого можно изменять в широком диапазоне частоту вращения вала, следовательно, изменять частоту магнитного поля индуктора.

Сепарируемая смесь подается из загрузочного бункера 1 в зону действия магнитного поля, которое создается вращающимся индуктором 2. Под действием магнитного поля в электропроводных частицах наводятся вихревые токи. В результате взаимодействия вращающегося магнитного поля с магнитным полем вихревых токов, возникает электродинамическая сила, выталкивающая электропроводные частицы в сторону уменьшения интенсивности магнитного поля. Электропроводные частицы, на которые магнитное поле не действует, находятся в свободном падении и разгружаются в камеру 3.

Сепарация осуществляется по всей окружности индуктора, что способствует наиболее полному использованию магнитного потока и существенно повышает производительность сепаратора.

Электродинамическая сила F_3 направлена перпендикулярно установленным на индукторе магнитам и зависит от электропроводности и размера частиц, а также от частоты вращения индуктора. Результирующая сила $F = F_3 + F_T$, где F_T - сила тяжести, определяет траекторию движения электропроводной частицы [62].

На рис. 2.10 изображен электродинамический сепаратор, в котором исходная смесь разделяется на два потока, что позволяет повысить эффективность процесса сепарации или увеличить производительность устройства за счет увеличения ширины ленты транспортера.

Устройство содержит загрузочный бункер (на рисунке не показан), ленточный транспортер 1, индуктор вращающегося магнитного поля 2, который выполнен в виде ролика с расположенными по окружности магнитами чередующейся полярности,

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

разгрузочный бункер для электропроводных частиц 3 и разгрузочный бункер для неэлектропроводных частиц (на рисунке не показан).

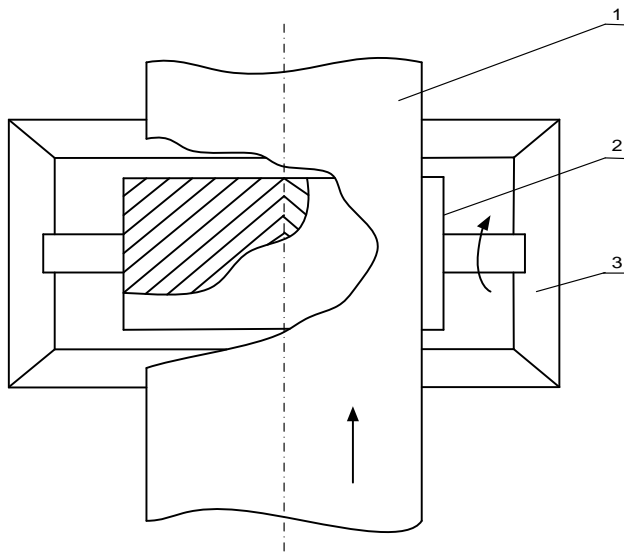


Рис. 2.10. Электродинамический сепаратор: 1 – ленточный транспортер; 2 – индуктор; 3 – бункер для электропроводных частиц

Индуктор 2 установлен под лентой транспортера 1, причем ось вращения индуктора перпендикулярна продольной оси ленты. Магниты на индукторе размещены в два симметричных ряда под углом к продольной оси индуктора.

Сепарируемая смесь, содержащая электропроводные и неэлектропроводные частицы, подается из загрузочного бункера на ленту транспортера 1 и далее в зону сепарации, которая определяется геометрическими размерами индуктора 2. Электродинамическая сила перпендикулярна установленным на ролике магнитам, поэтому электропроводные частицы, находящиеся на ленте транспортера будут разделяться на два потока и сбрасываться в разгрузочный бункер 3. При этом максимальное расстояние, пройденное электропроводной частицей, не превышает расстояния, равное половине ширины конвейерной ленты. В результате засорение концентрата неэлектропроводными частицами будет минимальным [63].

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

На рис. 2.11 изображен сепаратор для разделения смесей электропроводных немагнитных материалов, крупностью от 5 до 40 мм, на виброжелобе.

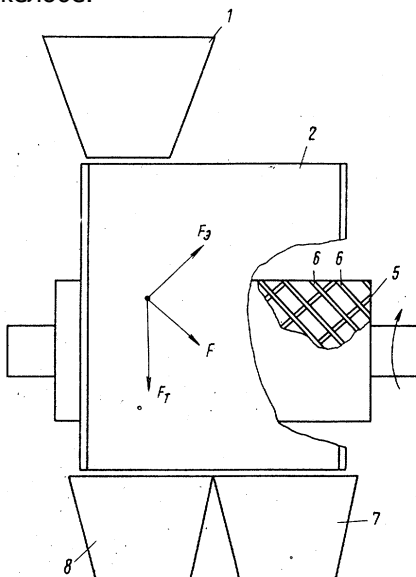


Рис. 2.11. Электродинамический сепаратор: 1 – загрузочный бункер; 2 – криволинейный желоб; 3 – индуктор; 4 – камера для электропроводных частиц; 5 – камера для неэлектропроводных частиц

Устройство содержит загрузочный бункер 1, криволинейный виброжелоб 2, выполненный из неэлектропроводного немагнитного материала. Желоб расположен по переменным углом α , равным $10-40^\circ$, к горизонтальной плоскости, что позволяет регулировать скорость движения исходного материала. Индуктор вращающегося магнитного поля 3 выполнен в виде ролика с пазами на поверхности, при этом пазы выполнены под углом $35-45^\circ$ к оси его вращения. В пазах размещены постоянные магниты чередующейся полярности. Приемный бункер состоит из двух камер. Камера 4 предназначена для электропроводных частиц, а камера 5 для неэлектропроводных частиц.

Сепарируемая смесь подается из загрузочного бункера 1 в криволинейный виброжелоб 2 и далее в зону действия магнитного поля, которое создается вращающимся роликом 3. Под дей-

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

ствием магнитного поля электропроводные частицы смещаются на правую часть виброжелоба и попадают в камеру 4. Наложение вибраций на разделяемый материал улучшает показатели процесса сепарации [64].

Для эффективного извлечения электропроводных частиц различной формы разработан электродинамический сепаратор с тремя рядами магнитов на индукторе (рис. 2.12).

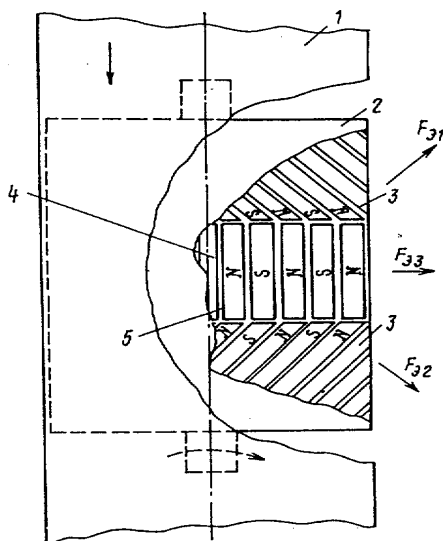


Рис. 2.12. Электродинамический сепаратор: 1 – лента конвейера; 2 – индуктор; 3 – постоянные магниты, размещенные под углом к продольной оси конвейера; 4 – постоянные магниты, размещенные параллельно продольной оси конвейера; 5 – пазы.

Индуктор 2 вращающегося магнитного поля установлен с возможностью вращения под лентой конвейера 1 параллельно продольной оси конвейера и выполнен в виде ролика. На поверхности индуктора 2 в пазах 5 расположены два ряда магнитов 3 под углом к продольной оси конвейера. Постоянные магниты 4 расположены в пазах 5 параллельных продольной оси конвейера.

Исходная смесь подается в зону действия магнитного поля, создаваемого индуктором 2. Это поле наводит в электропроводных частицах вихревые токи. При взаимодействии вращающегося магнитного поля с магнитным полем вихревых токов возникают

электродинамические силы $F_{Э1}$, $F_{Э2}$, $F_{Э3}$, выталкивающие электропроводные частицы перпендикулярно пазам индуктора 2. Под действием сил $F_{Э1}$, $F_{Э2}$, $F_{Э3}$ электропроводные частицы сбрасываются с ленты в зависимости от их ориентации в магнитном поле [65].

Глава 3. Расчет параметров и конструктивных элементов электродинамических сепараторов

3.1. Взаимосвязь параметров сырья и электродинамических сепараторов

Проектирование магнитной системы сепаратора включает выбор и расчет размеров сердечников, постоянных магнитов и объединение их в конструктивные узлы, а также компоновку её с технологическими элементами сепаратора. В отличие от условий проектирования чисто электротехнических устройств (электрических машин, трансформаторов, электромагнитов и т.д.) здесь очень важно увязывать параметры магнитной системы с большим количеством факторов, являющихся технологическими характеристиками сырья и процесса разделения.

В роликовых сепараторах неподвижная магнитная система расположена внутри вращающегося барабана и состоит из нескольких десятков полюсов чередующейся полярности. Характер поля в рабочем пространстве определяется в основном, формой полюсов, а его интенсивность – остаточной индукцией. Предельными формами можно считать дугообразные концы полюсов, создающие неоднородное поле, и «лепестки», создающие силовое поле, направленное по нормали к окружности барабана.

Для наведения синусоидальной э.д.с. в сепарируемом материале полюсам придают такую форму, при которой воздушный зазор увеличивается от середины полюса к его краям. Вследствие неравенства магнитных сопротивлений в различных частях воздушного зазора магнитная индукция имеет максимальное значение у середины полюса (рис. 3.1).

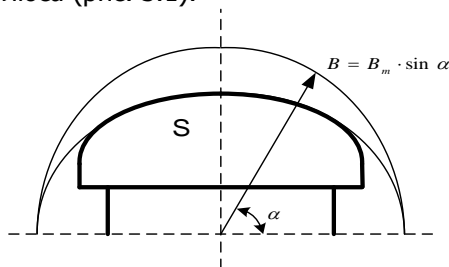


Рис. 3.1. Схема распределения магнитной индукции

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

Магнитное поле пересекает электропроводную частицу со скоростью

$$V_{\text{отн.}} = V_1 - V_2, \quad (3.1)$$

где V_1 - линейная скорость магнитного поля;

V_2 - линейная скорость перемещения частицы.

Частота магнитного поля зависит от линейной скорости V_1 и полюсного шага τ [66]:

$$f_1 = \frac{V_1}{2 \cdot \tau}. \quad (3.2)$$

Частота тока в частице

$$f_2 = \frac{V_1 \cdot S}{2 \cdot \tau} = f_1 \cdot S, \quad (3.3)$$

где $S = \frac{V_1 - V_2}{V_1}$ - скольжение.

При неподвижной частице относительно поля ($V_2 = 0$) частота тока $f_2 = f_1$. При $V_1 = V_2$, $S = 0$ и $f_2 = 0$.

Под действием магнитного поля в частице наводится э.д.с. [67]:

$$E_2 = f_2 \cdot \Phi = f_1 \cdot S \cdot \Phi, \quad (3.4)$$

где Φ - магнитный поток индуктора.

В начальный момент времени, когда частица неподвижна ($V_2 = 0$),

$$E_{2\text{нен}} = f_1 \cdot \Phi. \quad (3.5)$$

Э.д.с., наводимую в движущейся частице можно выразить через э.д.с. $E_{2\text{нен}}$ и скольжение

$$E_2 = E_{2\text{нен}} \cdot S. \quad (3.6)$$

Из выражения (3.6) следует, что э.д.с. имеет максимальное значение в неподвижной частице и уменьшается с увеличением скорости частицы, т.е. с уменьшением S . При $S = 0$, $E_2 = 0$.

Полное сопротивление электропроводной частицы z_2 определяется величиной активного сопротивления R_2 и индуктивного сопротивления X_2 [68]:

$$z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2}. \quad (3.7)$$

Активное сопротивление R_2 , с увеличением частоты f_2 , увеличивается незначительно. Индуктивное сопротивление:

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

$$X_2 = 2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot L_2 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot S \cdot L_2, \quad (3.8)$$

где L_2 - индуктивность электропроводной частицы.

Индуктивное сопротивление неподвижной частицы

$$X_{2\text{неп}} = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L_2, \quad (3.9)$$

тогда, то же сопротивление движущейся частицы

$$X_2 = X_{2\text{неп}} \cdot S. \quad (3.10)$$

Полное сопротивление электропроводной частицы

$$z_2 = \sqrt{R_2^2 + (X_{2\text{неп}} \cdot S)^2}. \quad (3.11)$$

При неподвижной частице X_2 имеет максимальное значение (рис.3.2) и угол ψ_2 (угол, определяющий сдвиг по фазе между током и э.д.с.) приближается к 90° . При $S = 0$ треугольник сопротивлений превращается в прямую ($X_2 = 0$) и угол $\psi_2 = 0$.

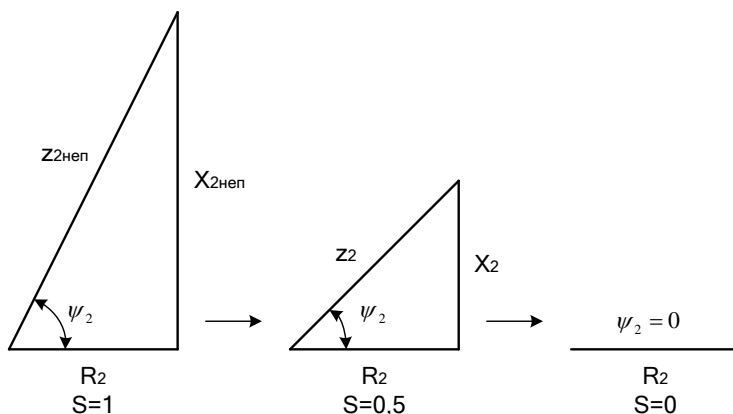


Рис. 3.2. Изменение треугольника сопротивлений электропроводной частицы

Величина тока в электропроводной частице определяется по закону Ома:

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}. \quad (3.12)$$

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

Так как E_2 и X_2 зависят от скольжения, то и ток в частице представляет функцию скольжения:

$$I_2 = \frac{E_{2\text{нен}} \cdot S}{\sqrt{R_2^2 + (X_{2\text{нен}} \cdot S)^2}}. \quad (3.13)$$

Относительно э.д.с. ток в частице сдвинут по фазе на угол ψ_2 , который определяется из треугольника сопротивлений (рис. 3.2):

$$\psi_2 = \arctg \frac{X_2}{R_2}. \quad (3.14)$$

Мгновенное значение электродинамического усилия, действующего на элементарный объем dv проводящей частицы, равно [69]:

$$d\bar{f} = [\bar{\delta} \cdot \bar{B}] dv = \mu_0 [\bar{\delta} \cdot \bar{H}] dv \quad (3.15)$$

В рассматриваемом случае эта сила направлена по касательной к поверхности индуктора и создается в результате взаимодействия вектора плотности тока по ширине активной части индуктора и составляющей вектора магнитной индукции по оси z : $df_{\kappa} = \mu_0 \delta_{iu} H_z dv$. Магнитное поле в частице можно представить в виде суммы двух полей: начального поля индуктора при отсутствии частицы и размагничивающего поля, обусловленного вихревыми токами в частице. Однако, при расчете электродинамической силы учитывается только магнитное поле индуктора, так как от собственного размагничивающего магнитного поля вихревых токов результирующее усилие, действующее по всей длине частицы, равно нулю.

Среднее значение электродинамической силы df_{κ} , подобно расчету средней мощности в цепи переменного тока символическим методом, можно найти, взяв вещественную часть произведения комплекса действующего значения плотности тока на сопряженный комплекс действующего значения магнитной индукции внешнего поля индуктора

$$df_{cp} = \text{Re} \left[\mu_0 \frac{\&E_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{H_m^*}{\sqrt{2}} \right] dv \quad (3.16)$$

Полученные результаты обработаны на компьютере и представлены в виде графиков на рис. 3.3. Задавшись размером извлекаемой частицы и зная высоту рабочей зоны, по кривым рис.

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

3.3 можно определить величину полюсного шага, обеспечивающую наибольшее развиваемое усилие.

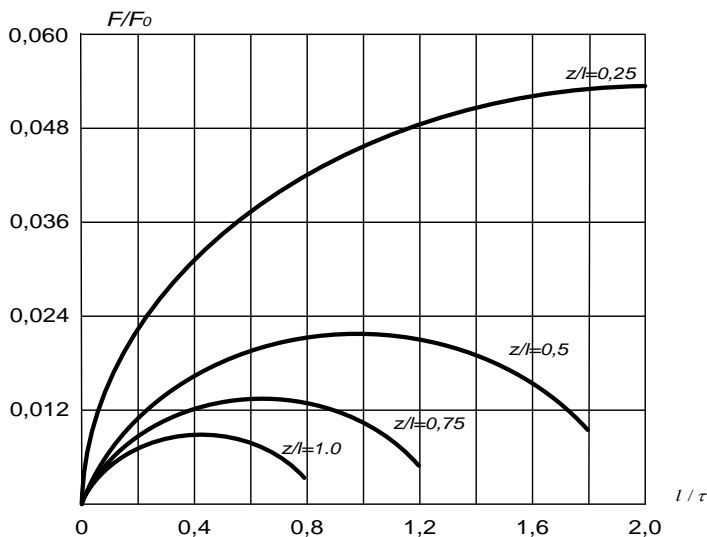


Рис. 3.3. Зависимость электродинамической силы от длины частицы при различных значениях z/l .

3.2. Исследование и расчет параметров магнитной системы

Методы расчета магнитных цепей с постоянными магнитами являлись предметом многих исследований. Наряду с общими трудами имеются работы, излагающие методы расчета систем с постоянными магнитами с учетом специфики устройства, для которого эта система предназначена: для электрических машин, магнитных сепараторов, различных электромагнитных приспособлений, муфт, реле и т.д. Однако условия проектирования электродинамических систем отличаются рядом особенностей. При расчете очень важно увязать параметры магнитной системы с большим количеством факторов, являющихся технологическими характеристиками сырья и процесса обогащения.

Электродинамическая сила зависит не только от величины индукции и характера ее распространения в рабочем пространстве, но и от степени неоднородности, величины полюсного шага и частоты магнитного поля, а также от электропроводности частицы, ее размера, формы, плотности, ориентации в магнитном поле, скорости транспортирования в зону сепарации.

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

Основная задача проектирования электродинамической системы заключается в выборе формы и размеров магнита и деталей магнитной арматуры (полюсные наконечники, сердечники, ярмо и т. д.), обеспечивающих оптимальное соотношение параметров. Наиболее часто в качестве критерия оптимальности принимают или энергию в рабочем зазоре или магнитный момент, или структуру и напряженность поля в рабочем объеме. Однако это не исключает использования в качестве критериев оптимальности технологических и экономических показателей, роль которых особенно велика при проектировании магнитных систем из интерметаллических соединений редкоземельных металлов с кобальтом, обладающие высокими значениями коэрцитивной силы и остаточной индукции. На рис. 3.4, а) по паспортным данным приведены максимальные энергии размагничивания $(BH)_{max}$ ряда сплавов и их эквивалентные объемы при работе в точке $(BH)_{max}$. Применением магнитов из сплава $SmCo_5$ в электродинамических системах можно достичь не только увеличение магнитной индукции в зоне сепарации, но и уменьшить полюсный шаг.

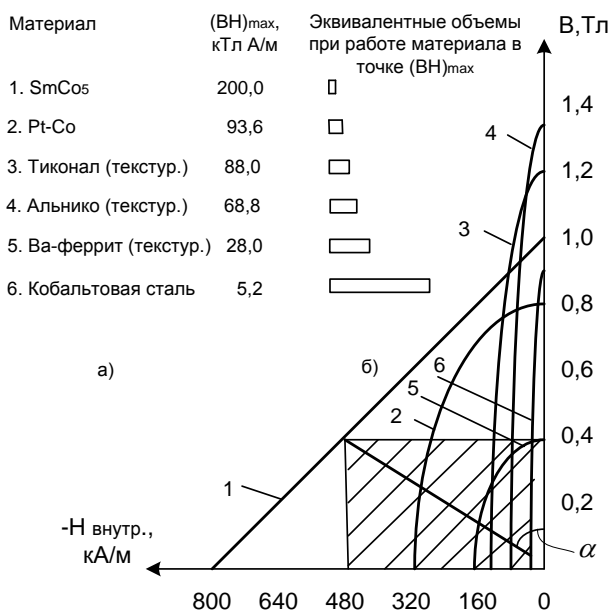


Рис. 3.4. а) максимальные магнитные энергии размагничивания $(BH)_{max}$ некоторых высококоэрцитивных сплавов и их эквивалентные объемы при работе в точке $(BH)_{max}$, б) размагничивающие участки петель магнитного гистерезиса этих сплавов

вов и прямая сдвига для заданного значения угла α

Чем больше полюсный шаг магнитной цепи, тем сильнее эффект размагничивания, тем больше угол сдвига α (рис. 3.4,б) и, следовательно, меньше индукция или намагниченность в магните, т. к. при этом прямая сдвига опускается вниз и пересекает размагничивающие участки петель гистерезиса при более низких значениях остаточных индукций формы Bd . При слабом размагничивающем эффекте угол между прямой сдвига и осью индукции или намагниченности очень мал и главную роль в создании большой остаточной намагниченности будет играть сама остаточная индукция. Таким образом, выбор формы, размеров магнита и полюсного шага должны быть согласованы между собой.

Любой постоянный магнит представляет собой источник магнитного поля с распределенными параметрами, поэтому строгий расчет возможен только по уравнениям теории электромагнитного поля. Однако ввиду трудности применения этих уравнений к расчету магнитных систем сложной формы обычно применяют упрощенные методы.

Проведем расчет индуктора вращающегося магнитного поля, представляющего собой ролик, на поверхности которого установлены постоянные магниты из сплава $SmCo_5$.

Значение магнитной индукции на поверхности индуктора определяется по формуле [70]:

$$B_0 = \sqrt{\frac{F_3}{\frac{\tau^2}{\lambda} \cdot f \cdot \gamma \cdot v \cdot e^{-2\alpha z} \cdot e^{-h^2 \mu_0 \gamma \alpha \lambda} \cdot \sin^2 \frac{\alpha \cdot \lambda}{2}}} = 0,43 \text{ Тл}, \quad (3.17)$$

где λ – длина частицы;

h – толщина частицы;

v – объем частицы;

γ – удельная электропроводность частицы;

μ_0 – магнитная постоянная;

$\alpha = \pi / \tau$;

z – координата точки, в которой определяется индукция.

Полюсный шаг

$$\tau = \pi(\alpha' + \Delta) = \pi(2 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-3}) = 1,25 \cdot 10^{-2} \text{ м}, \quad (3.18)$$

где α' – толщина слоя сепарируемого материала;

Δ – расстояние от поверхности магнитной системы до слоя сепарируемого материала.

На медную частицу размером $0,5 \times 0,25 \times 0,2$ мм действует электродинамическая сила $F_s = 3,5 \cdot 10^{-3}$ Н.

Определяем число полюсов, которые размещаются по окружности ролика:

$$2p = \frac{\pi \cdot d}{\tau} = \frac{\pi \cdot 8 \cdot 10^{-2}}{1,25 \cdot 10^{-2}} = 20, \quad (3.19)$$

где d - диаметр ролика.

Частота вращающегося магнитного поля

$$f_1 = \frac{n \cdot p}{60} = \frac{6000 \cdot 10}{60} = 1000 \text{ Гц}, \quad (3.20)$$

где n - частота вращения ролика;

p - число пар полюсов.

Наиболее целесообразно вести расчет магнитной системы при малом полюсном шаге по методу Ротерса [71], который является относительно несложным, но в то же время достаточно точным методом.

Идея метода состоит в том, что пространство между двумя магнитопроводами разбивается на элементарные объемы, имеющие простую геометрическую форму. Проводимость каждого элементарного объема определяется из геометрических соображений по формуле:

$$\Lambda_{эл} = \mu_0 \frac{s_{ср}}{\lambda_{ср}}, \quad (3.21)$$

где $s_{ср}$ – площадь среднего поперечного сечения элемента;

$\lambda_{ср}$ – длина средней магнитной линии элемента.

Искомая магнитная проводимость Λ определяется как сумма проводимостей элементарных объемов $\Lambda = \sum \Lambda_{эл}$. Основные формулы объемов Ротерс выводит на примере расчета проводимости между элементами двух прямоугольных призм. Пространство между призмами разбивается на пять элементарных объемов: квадрат сферической оболочки, сферический квадрат, полукольцо, параллелепипед и полуцилиндр.

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

Расчетное значение индукции B_3 и напряженность магнитного поля H_3 в рабочем воздушном зазоре:

$$B_3 = K_3 \cdot B_0 = 1,1 \cdot 0,43 = 0,473 \text{ Тл}, \quad (3.22)$$

где K_3 – коэффициент, учитывающий соотношение между средней по сечению зазора в центре воздушного зазора,

$$H_3 = \frac{B_3}{\mu_0} = \frac{0,473}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 376,6 \text{ кА/м}. \quad (3.23)$$

Выбираем марку сплава для магнитных полюсов – КСП37А со следующими данными:

Основные характеристики сплава КСП37А

Таблица 3.1

$H_{св}$	H_d	H_a	H_u	H_k	$H_{см}$	W
кА/м						кДж/м ³
500	290	475	250	290	640	72,5
B_r	B_d	B_a	B_u	θ_l	K_s	$(BH)_d$
Тл					Мк/Гн/м	
0,9	0,5	0,83	0,21	0,9	1,38	1,72

Находим основные размеры магнита: длину λ_m и площадь нейтрального сечения s_m :

$$\lambda_m = \frac{H_3 \cdot f' \cdot \tau}{H_d} = \frac{376,6 \cdot 1,4 \cdot 1,25}{300} = 2,2 \text{ см}, \quad (3.24)$$

$$s_m = \frac{B_3 \cdot K_p \cdot s_3}{B_d} = \frac{0,473 \cdot 10 \cdot 1}{0,5} = 9,46 \text{ см}^2, \quad (3.25)$$

где f' – коэффициент, учитывающий падение магнитодвижущей силы в магнитной арматуре и на стыках;

H_d и B_d – напряженность и индукция поля, соответствующие точке $(BH/2)_{\max}$ кривой размагничивания выбранного материала магнита;

s_3 – площадь поперечного сечения рабочего воздушного зазора;

K_p – коэффициент рассеяния магнитного потока:

$$K_p = \frac{\Phi_m}{\Phi_3} = 10, \quad (3.26)$$

где Φ_m и Φ_3 - соответственно магнитный поток через нейтральное сечение магнита и магнитный поток через сечение рабочего воздушного зазора.

Значение $K_p = 10$ получено экспериментально для магнитных систем электродинамических сепараторов.

По результатам расчета делаем эскиз магнитной системы, на рис. 3.5 изображен фрагмент магнитной системы индуктора (G - удельная магнитная проводимость).

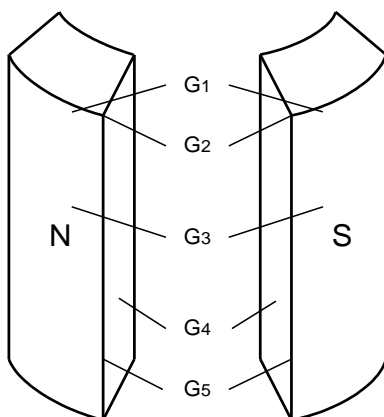


Рис. 3.5 Фрагмент магнитной системы индуктора

Далее определяем проводимость между ребрами, расположенными на одной линии:

$$\Lambda_1 = 2 \cdot 0,25 \cdot a_m \cdot \mu_0 = 2 \cdot 0,25 \cdot 1 \cdot \mu_0 = 0,5 \cdot \mu_0, \quad (3.27)$$

где a_m - ширина магнита.

Проводимость между углами:

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

$$\Lambda_2 = 2 \cdot 0,077 \cdot \tau \cdot \mu_0 = 2 \cdot 0,077 \cdot 1,25 \cdot \mu_0 = 0,19 \cdot \mu_0. \quad (3.28)$$

Проводимость между гранями:

$$\Lambda_3 = \frac{\lambda_m}{\pi} \lambda n \left(1 + \frac{2 \cdot a_m}{\tau}\right) \mu_0 = \frac{2,2}{\pi} \lambda n \left(1 + \frac{2 \cdot 1}{1,25}\right) \mu_0 = 0,6 \cdot \mu_0. \quad (3.29)$$

Проводимость зазора:

$$\Lambda_4 = \frac{s_3}{\tau} \mu_0 = \frac{1}{1,25} \mu_0 = 0,8 \cdot \mu_0. \quad (3.30)$$

Проводимость между внутренними ребрами:

$$\Lambda_5 = 0,26 \cdot \lambda_m \cdot \mu_0 = 0,26 \cdot 2 \cdot \mu_0 = 0,52 \cdot \mu_0. \quad (3.31)$$

Полная геометрическая проводимость определяется как сумма проводимостей:

$$\begin{aligned} \Lambda = \Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3 + \Lambda_4 + \Lambda_5 &= 0,5 \cdot \mu_0 + 0,19 \cdot \mu_0 + \\ &+ 0,6 \cdot \mu_0 + 0,8 \cdot \mu_0 + 0,52 \cdot \mu_0 = 2,61 \cdot \mu_0 \end{aligned} \quad (3.32)$$

Полная приведенная проводимость системы:

$$\Lambda_{пр.} = \Lambda \frac{\lambda_m}{s_m} \mu_0 = 2,61 \cdot \mu_0 \frac{2,2}{9,46} \mu_0 = 0,57 \cdot \mu_0^2. \quad (3.33)$$

Рабочую точку системы находим графически (рис. 3.6) как точку пересечения луча, проведенного из начала координат под углом $\beta = \arctg \Lambda_{пр.}$ до пересечения его с кривой размагничивания. Однако, значение необходимо взять в системе СГСМ. Угол β при этом составит $29^{\circ}40'8''$.

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

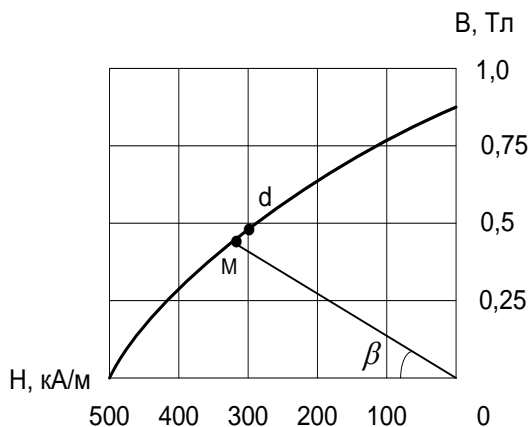


Рис. 3.6. Кривая размагничивания сплава КСП37А

При использовании ролика из магнитного материала необходимо учитывать его проводимость, в этом случае рабочая точка на кривой размагничивания располагается несколько ниже.

Определяем координаты рабочей точки H_M и B_M , сравниваем их с исходными H_d и B_d :

$$H_M = 325 \text{ кА/м} \text{ и } B_M = 0,47 \text{ Тл.}$$

Индукция поля в рабочем зазоре:

$$B_3 = \frac{B_M \cdot s_M}{s_3 \cdot \kappa_p} = \frac{0,47 \cdot 9,46}{1 \cdot 10} = 0,446 \text{ Тл.} \quad (3.34)$$

При несовпадении полученного значения B_3 с заданным, размеры магнитной системы или отдельных ее узлов корректируются, и весь расчет в том же порядке повторяется.

3.3. Механизм и расчет действующих сил в процессе электродинамической сепарации

На основании [32] разработана методика определения электродинамической силы, действующей на электропроводные частицы. Вначале снимается кривая изменения индукции по окружности индуктора, строятся эпюры и по кривой определяется индукция магнитного поля, действующая на электропроводную частицу. Далее определяется электродвижущая сила, наводимая в частице, и по закону Ома вычисляется ток в частице. Удельное сопротивление частицы изме-

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

таблицам. Электродинамическая сила вычисляется как разность сил, действующих на края частицы.

Определим усилие, действующее на частицу, размер которой l' меньше полюсного деления индуктора τ . На стороны частицы ab и cd (рис. 3.7), бегущим со скоростью $V_n = 25$ м/с полем, будут индуцироваться следующие э.д.с.:

$$e_{ab} = B_m \cdot a' \cdot V_n \cdot \sin \frac{\pi}{\tau} x = 0,45 \cdot 0,0025 \cdot 25 \cdot \sin 18^\circ = 8,69 \cdot 10^{-3} \text{ В}; \quad (3.35)$$

$$e_{cd} = B_m \cdot a' \cdot V_n \cdot \sin \frac{\pi}{\tau} (x + l') = 0,45 \cdot 0,0025 \cdot 25 \cdot \sin 126^\circ = 0,022 \text{ В}. \quad (3.36)$$

где a' – ширина частицы;

x – пространственная координата бегущей волны.

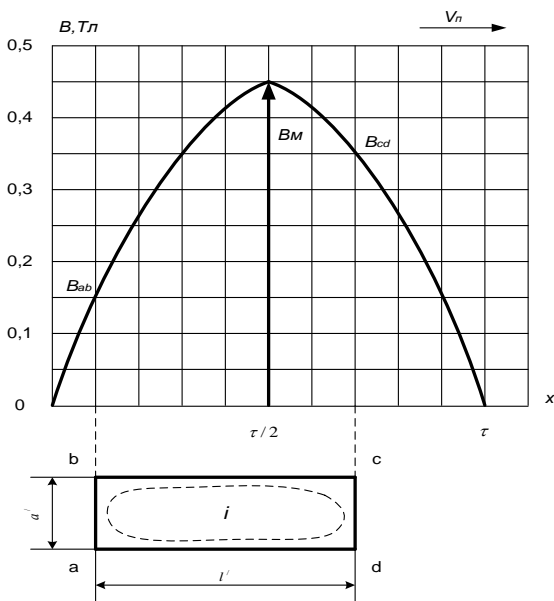


Рис. 3.7. Кривая распределения индукции над индуктором и проекция $abcd$ транспортируемой частицы на поверхность индуктора

По картине вероятных путей растекания тока определяем сопротивление токового контура

$$R_2 = \frac{4 \cdot a'}{\gamma \cdot l' \cdot h'} = \frac{4 \cdot 0,0025}{57 \cdot 10^6 \cdot 0,0075 \cdot 0,002} = 1,169 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.} \quad (3.37)$$

где γ – удельная проводимость материала частицы;
 a' и l' – размеры проекции частицы на поверхность индуктора;
 h' – толщина частицы.

Индуктивность частицы прямоугольного сечения [72]:

$$L_2 = \frac{\mu_0 \cdot l'}{2 \cdot \pi} \left(\ln \frac{2 \cdot l'}{a' + h'} + \frac{1}{2} \right) = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,0075}{2 \cdot \pi} \left(\ln \frac{2 \cdot 0,0075}{0,0025 + 0,002} + \frac{1}{2} \right) = 8,02 \cdot 10^{-9} \text{ Гн.} \quad (3.38)$$

Индуктивное сопротивление частицы

$$X_2 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L_2 = 2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 8,02 \cdot 10^{-9} = 5,03 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.} \quad (3.39)$$

Полное сопротивление частицы

$$z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} = \sqrt{(1,169 \cdot 10^{-5})^2 + (5,03 \cdot 10^{-5})^2} = 5,165 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.} \quad (3.40)$$

Ток в частице, созданный разностью э.д.с. на ее крайних сторонах

$$i = \frac{e_{cd} - e_{ab}}{z_2} = \frac{0,022 - 8,69 \cdot 10^{-3}}{5,165 \cdot 10^{-5}} = 257,74 \text{ А.} \quad (3.41)$$

Усилия, действующие на крайние стороны частицы:

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

$$F_{ab} = i \cdot a' \cdot B_{ab} = i \cdot a' \cdot B_m \cdot \sin \frac{\pi}{\tau} \cdot x = \quad (3.42)$$

$$= 257,74 \cdot 0,0025 \cdot 0,45 \cdot \sin 18^\circ = 0,0896$$

$$F_{cd} = i \cdot a' \cdot B_{cd} = i \cdot a' \cdot B_m \cdot \sin \frac{\pi}{\tau} (x + l') = \quad (3.43)$$

$$= 257,74 \cdot 0,0025 \cdot 0,45 \cdot \sin 126^\circ = 0,2346$$

Мгновенное усилие, приложенное к частице, определяется как разность усилий, действующих на крайние стороны:

$$F_x = F_{cd} - F_{ab} = 0,2346 - 0,0896 = 0,145 \text{ Н.} \quad (3.44)$$

Определяем среднее усилие, действующее на частицу за полупериод

$$F_{cp} = \frac{\int_0^\tau F_x dx}{\tau} = \frac{\int_0^{1,25 \cdot 10^{-2}} 0,145 dx}{1,25 \cdot 10^{-2}} = 9,06 \cdot 10^{-4} \text{ Н.} \quad (3.45)$$

В случае, если длина частицы больше полюсного шага τ и $l' = k\tau + l''$, где k – целое число, то усилие, действующее на частицу

$$F_{cp} = F_\tau \left(k + \frac{l''}{\tau} \sin^2 \frac{\pi \cdot l''}{2 \cdot \tau} \right), \quad (3.46)$$

$$\text{где } F_\tau = B_m^2 \cdot \tau^2 \cdot f_1 \cdot s \cdot \gamma \cdot a' \cdot h' - \quad (3.47)$$

– усилие, действующее на частицу длиной τ , однако следует учитывать зависимость γ от f_1 на высоких частотах.

Индуктивности частиц следует определять по следующим формулам [72].

Индуктивность прямолинейной частицы кругового сечения при низкой частоте (при равномерном распределении тока по сечению частицы)

$$L_2 = \frac{\mu_0 \cdot l}{2 \cdot \pi} \left(\ln \frac{2 \cdot l}{r} - \frac{3}{4} \right), \quad (3.48)$$

где l – длина частицы;

r – радиус поперечного сечения.

Для коротких частиц более точное значение можно найти по формуле

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

$$L_2 = \frac{\mu_0 \cdot l}{2 \cdot \pi} \left(\ln \frac{2 \cdot l}{r} - \frac{3}{4} + \frac{128}{45 \cdot \pi} \cdot \frac{r}{l} - \frac{r^2}{4 \cdot l^2} \right), \quad (3.49)$$

при высокой частоте (при неравномерном распределении тока по сечению частицы)

$$L_2 = \frac{\mu_0 \cdot l}{2 \cdot \pi} \left(\ln \frac{2 \cdot l}{r} - 1 \right), \quad (3.50)$$

для коротких частиц более точное значение

$$L_2 = \frac{\mu_0 \cdot l}{2 \cdot \pi} \left(\ln \frac{2 \cdot l}{r} - 1 + \frac{4}{\pi} \cdot \frac{r}{l} - \frac{r^2}{2 \cdot l^2} \right). \quad (3.51)$$

Индуктивность полой прямолинейной частицы кругового сечения при низкой частоте

$$L_2 = \frac{\mu_0 \cdot l}{2 \cdot \pi} \left(\ln \frac{2 \cdot l}{r' \cdot c} - 1 \right), \quad (3.52)$$

где r' – внешний радиус поперечного сечения; $c = 0,8$; при высокой частоте

$$L_2 = \frac{\mu_0 \cdot l}{2 \cdot \pi} \left(\ln \frac{2 \cdot l}{r'} - 1 \right). \quad (3.53)$$

Индуктивность прямолинейной частицы квадратного сечения при низкой частоте

$$L_2 = \frac{\mu_0 \cdot l}{2 \cdot \pi} \left(\ln \frac{l}{a} + \frac{1}{2} \right), \quad (3.54)$$

где a – сторона квадрата, являющегося поперечным сечением частицы, при высокой частоте

$$L_2 = \frac{\mu_0 \cdot l}{2 \cdot \pi} \left(\ln \frac{2 \cdot l}{\tilde{g}} - 1 \right), \text{ где } \tilde{g} = 0,5902 \cdot a. \quad (3.55)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Research on silver recovery from leaching residue in the zinc hydrometallurgical process by direct floatation process without tailing water discharge. *Non ferrous Metals*, 1983, 35, №2, p. 73-79.

2. Кравченко Н.Д., Кармазин В.И. Магнитная сепарация отходов цветных металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 120 с.

3. Колобов Г.А., Бредихин В.Н., Чернобаев В.М. Сбор и обработка вторичного сырья цветных металлов. – М.: Металлургия, 1993. – 288 с.

4. Раскина Р.Д., Апоначенко С.С., Лаушкина А.Я. Применение программированных методов первичной подготовки лома и отходов цветных металлов. М.: ЦНИИцветмет экономики и информации, 1991. – 32 с.

5. Барский Л.А., Бондарь И.М. Извлечение цветных металлов из отходов электротехнической промышленности методом электродинамической сепарации. – В кн.: Разработка и внедрение энергосберегающих и малоотходных технологий в металлургии цветных и редких металлов: Тез. докл. Всесоюзной научно-технической конференции. – М., 1986. С. 249-250.

6. Коняев Иван Андреевич. Электродинамические сепараторы с вращающимся магнитным полем: диссертация ... кандидата технических наук: 05.09.01 / Коняев Иван Андреевич; [Место защиты: Ур. гос. техн. ун-т]. – Екатеринбург, 2009. – 117 с.

7. Маркин Николай Егорович. Повышение эффективности электродинамических сепараторов с бегущим магнитным полем: диссертация ... кандидата технических наук: 05.09.01 / Маркин Николай Егорович; [Место защиты: Ур. гос. техн. ун-т]. – Екате-

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

ринбург, 2011.– 136 с.

8. Электронный ресурс <http://www.erga.ru>.

9. Проспект ГУЛ «Станкоснаб». Сепаратор цветных металлов МСК 3101.

10. Бондарь И.М. Применение электронных и электродинамических сепараторов для переработки золотосодержащих россыпей и галечных отвалов. В сб. научных трудов РИС ЮРГУЭС: Социально – экономические и технико – технологические проблемы развития сферы услуг. Вып. 2, том 2. Изд-во РГПУ, Ростов-Дону, 2003.

11. Богданов Е.И. Оборудование для транспорта и промывки песков россыпей. – М.: Недра, 1978. – 215 с.

12. Богданов Е.И. Вопросы технического прогресса на промывке песков россыпных месторождений. – Магадан: Магаданское кн. изд-во, 1967. – 205 с.

13. Жоленц Г.А., Мочкин Е.Г. Новое в производстве. Информационно– рекламный бюллетень Иргиредмета «Золотодобыча», №150, май, 2011.

14. Меледин И.В. Практические результаты по промывке техногенных отвалов прошлых лет в долине реки Хомолхо. Информационно – рекламный бюллетень Иргиредмета «Золотодобыча», №137, апрель, 2010.

15. Дядин Валерий Иванович. Обоснование и разработка электродинамической сепарации труднообогатимых металлоносных песков: диссертация ... кандидата технических наук: 25.00.13 / Дядин Валерий Иванович; [Место защиты: Чит. гос. ун-т]. – Чита, 2010.– 179 с.

16. Кидун Юрий Юрьевич. Экономическое обоснование эффективности повторной разработки россыпных месторождений золота: диссертация ... кандидата технических наук: 08.00.05 / Кидун Юрий Юрьевич; [Место защиты: Моск. гос. горный ун-т]. – Москва, 2003. – 166 с.

17. Электронный ресурс <http://www.rpn.gov.ru>.

18. Бондарь И.М. Влияние формы электропроводных частиц на процесс извлечения цветных металлов из твёрдых бытовых отходов. В сб.: Материалы международной научно-практической конф.: Строительство-2011. Изд-во РГСУ, Ростов-на Дону, 2011.

19. Шубов Л.Я., Ставровский М.Е., Шехирев Д.В. Технологии отходов (технологические процессы в сервисе). – М.: МГУС, 2006. – 411 с.

20. Шубов Л.Я., Ставровский М.Е., Олейник А.В. Технология

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

отходов. – М.: Альфа-М, 2011. – 349 с.

21. Электронный ресурс <http://www.environmental-expert.com>.

22. Электронный ресурс <http://www.tomra.com>.

23. Электронный ресурс <http://www.waste-management-world.com>.

24. Шубов Л.Я., Хворостяной С.И., Ройзман В.Я. Техника и технология извлечения цветных металлов из твердых бытовых отходов. –М. ЦНИИцветмет экономики и информации вторичных металлов, 1985, вып. 1. – 76 с.

25. Schliemann E. Application of Ferrites to Environmental Problems Recovery of nonferrous Metals from Waste Using Barium-Ferrite Magnets. FERRITES: Proceedings of the International Conference, September-October 1980, Japan – “Dordrecht”, 1982, p. 867-873.

26. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Гостехиздат, 1957. – 532 с.

27. Лапицкий В.Н. Извлечение немагнитных частиц в переменном магнитном поле. – В кн.: Новые способы сепарации руд в магнитных полях. Апатиты. Изд-во Кольского филиала АН СССР, 1981. С. 56-60.

28. Кармазин В.И., Кармазин В.В. Магнитные методы обогащения. –М.: Недра, 1978. – 253 с.

29. Лапицкий В.Н. Влияние формы немагнитных электропроводных частиц на магнитную поляризуемость в высокочастотном магнитном поле. – В кн.: Интенсификация подготовительных, магнитных и гравитационных процессов обогащения. Тез. докл. – М.: Изд-во ИПКОН АН СССР, 1980. С. 87-88.

30. Ломовцев Л.А., Нестерова Н.А., Дробченко Л.А. Магнитное обогащение сильномагнитных руд. – М.: Недра, 1979. – 235 с.

31. Штокман И.Г. Основы создания магнитных транспортных установок. – М.: Недра, 1972. – 176 с.

32. Гейер В.Г. Начала магнитного транспорта. – М.: Недра, 1966. – 172 с.

33. Патент 4248700 (США).

34. Recovery of non-ferrous metals from municipal Waste “Public Works”, 1975, June, p. 130.

35. Патент 1829565 (США).

36. Патент 4157297 (США).

37. А.С. 537698 (СССР). Электродинамический сепаратор./В.Н.Лапицкий. – Опубл. в Б.И., 1976, №45.

38. А.С. 940848 (СССР). Способ электродинамической сепарации

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

рации. /В.А.Подольский, М.С.Захарова, В.Н.Лапицкий, Р.К.Калнынь. – Опул. в Б.И., 1982, №25.

39. А.С. 784922 (СССР). Электродинамический сепаратор./ В.А.Подольский, М.С.Захарова, Н.Г.Поляков, В.Н.Лапицкий, Б.А.Иоффе, Р.К.Калнынь. – Опул. в Б.И., 1980, №45.

40. Патент 2447228 (Франция).

41. А.С. 933114 (СССР). Способ электродинамической сепарации. /В.А.Подольский, М.С.Захарова, В.Н.Лапицкий, А.В.Крымцов. – Опул. в Б.И., 1982, №21.

42. А.С. 954104 (СССР). Электродинамический сепаратор./М.С.Захарова, В.Н.Лапицкий. – Опул. в Б.И., 1982, №32.

43. Патент 4137156 (США).

44. Заявка 57-15853 (Япония).

45. А.С. 956012 (СССР). Электродинамический сепаратор./В.А.Бунько, В.Н.Лапицкий, В.В.Бабец, С.А.Стоянов. – Опул. в Б.И., 1982, №33.

46. Патент 3448857 (США).

47. Патент 2116430 (Франция).

48. А.С. 961784 (СССР). Электродинамический сепаратор./В.А.Бунько, В.Н.Лапицкий, В.В.Бабец, С.А.Стоянов. – Опул. в Б.И., 1982, №36.

49. А.С. 1169746 (СССР). Электродинамический сепаратор./В.А.Бунько, В.Н.Лапицкий, В.В.Бабец, Ф.Я.Иванченко. – Опул. в Б.И. 1985, №26.

50. Патент 2659655 (ФРГ).

51. Черепнин О.М., Шевелев А.И., Шаимова И.Г. Сепарация немагнитных цветных металлов бегущем магнитном поле. – Цветные металлы, 1985, №11, с. 85-87.

52. Калашников С. Г. Электричество. – М.: Наука, 1985. – 576 с.

53. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1980. – 512 с.

54. А.С. 1447408 (СССР). Способ электродинамической сепарации. /Л.А.Барский, И.М.Бондарь. – Опул. в Б.И. 1988, №48.

55. Демирчян К.С. Моделирование магнитных полей. – М.-Л.: Энергия, 1974. – 285 с.

56. Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. – М.: Энергия, 1971. – 517 с.

57. Бондарь И.М. Моделирование магнитных полей электродинамических сепараторов. В кн.: Разработка и обогащение рудных и нерудных месторождений при их комплексном освоении:

Электродинамическая сепарация вторичного сырья цветной металлургии

Тез. докл. XV конф. молодых ученых ИПКОН АН СССР, Москва, 1986.

58. Бондарь И.М., Степанов М.Л. Моделирование технологических процессов асинхронным двигателем с изменяющимися параметрами. Инф. Листок №25-90. Северо-Осетинский ЦНТИ, 1990.

59. Шупов Л.П. Моделирование и расчет на ЭВМ схем обогащения. – М.: Недра, 1980. – 288 с.

60. Кармазин В.И., Серго Е.Е., Жендринский А.П. Процессы и машины для обогащения полезных ископаемых. – М.: Недра, 1974. – 326 с.

61. Шупов Л.П. Прикладные математические методы в обогащении полезных ископаемых. – М.: Недра, 1972. – 196 с.

62. А.С. 1313509 (СССР). Электродинамический сепаратор. /Л.А.Барский, И.М.Бондарь, Н.К. Фролова. – Оpubл. в Б.И. 1987, №20.

63. А.С. 1407550 (СССР). Электродинамический сепаратор. /Л.А.Барский, И.М.Бондарь. – Оpubл. в Б.И. 1988, №25.

64. А.С. 1411039 (СССР). Электродинамический сепаратор. /Л.А.Барский, И.М.Бондарь. – Оpubл. в Б.И. 1988, №27.

65. А.С. 1488006 (СССР). Электродинамический сепаратор. /Л.А.Барский, И.М.Бондарь. – Оpubл. в Б.И. 1989, №23.

66. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.

67. Атабеков Г.И., Купалян С.Д., Тимофеев А.Б., Хухриков С.С. Электромагнитное поле. – М.: Энергия, 1979. – 432 с.

68. Бондарь И.М. Электротехника и электроника. – М.: ИКЦ «МарТ»; Ростов н/Д: «Феникс», 2010. – 340 с.

69. Дорофеев А. Л. Вихревые токи. – М.: Энергия, 1977. – 72 с.

70. Бондарь И.М., Бондарь А.И. Расчет параметров магнитной системы электродинамического сепаратора. В сб. Научных трудов РИС ЮРГУЭС: Социально-экономические и технико-технологические проблемы развития сферы услуг. Вып. 5. Ч. 2. Т. 1. Изд-во РИС ЮРГУЭС, Ростов-на-Дону, 2006.

71. Пятин Ю. М. Постоянные магниты. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.

72. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.