

случае тремя скалярными величинами. Для диамагнетиков и парамагнетиков $M. п.$ близка к 1, при этом для диамагнетиков $M. п.$ меньше 1, для парамагнетиков – больше 1. Для ферромагнетиков $M. п.$ значительно превышает 1. В электродинамике $M. п.$ аналогична *диэлектрической проницаемости* ϵ и симметрично с ней входит в материальные уравнения, дополняющие систему *Максвелла уравнений*, определяя, в частности, показатель преломления среды $n = \sqrt{\epsilon}$.

Лит.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. 4-е изд. М., 2005; Калашиников С. Г. Электричество. 6-е изд. М., 2008.

В. С. Булыгин.

МАГНИТНАЯ РАЗВЁДКА, один из геофизических методов разведки полезных ископаемых и изучения геологии строения Земли. Заключается в дистанционном исследовании намагниченности горных пород в их естеств. залегании на основе анализа распределения магнитного поля Земли в пространстве. В $M. р.$ выделяют два осн. этапа работ: магнитометрич. съёмку (измерение распределения в пространстве некоторых элементов магнитного поля) и интерпретацию (геологич. истолкование) результатов съёмки. Магнитометрич. съёмка проводится с использованием *магнитометров* и по условиям проведения подразделяется на космич., аэромагнитную, гидромагнитную, наземную, подземную (в горных выработках) и скважинную.

Осн. элемент вектора индукции магнитного поля Земли, измеряемый в $M. р.$, – его модуль; измерение отд. компонент этого вектора позволяет установить его величину и направление в пространстве. Проводится также магнитная градиентометрия, при которой изучается изменение элементов поля в горизонтальном или вертикальном направлении.

Для выделения *магнитных аномалий*, связанных с распределением намагниченности горных пород в верхних слоях Земли, из измеренных значений магнитной индукции вычитают их нормальное значение (величину т. н. нормального геомагнитного поля). За нормальное поле в $M. р.$ принимают сумму полей геомагнитного диполя и мировых магнитных аномалий, представляемую в виде отрезка ряда Гаусса по сферич. функциям. Это поле изменяется во времени, поэтому через каждые 5 лет коэффициенты ряда Гаусса пересматриваются и утверждаются Междунар. ассоциацией по геомагнетизму и аэронамии (IAGA). Результаты магнитометрич. съёмок отображают в виде карт магнитных аномалий.

В процессе интерпретации материалы магнитометрич. съёмки анализируются с помощью спец. компьютерных технологий и сопоставляются с геологич. данными. Результаты интерпретации неоднозначны: магнитная аномалия того или иного вида может быть создана разл. распределением горных пород. Поэтому для регионального изучения территорий, по-

исков и разведки разнообразных полезных ископаемых особое значение имеет использование $M. р.$ в комплексе с другими геофизич., геохимич. и геологич. методами.

Намагниченность пород, изучаемая с помощью $M. р.$, складывается из естественной остаточной намагниченности (приобретённой породой в процессе её образования и изменяющейся под действием разл. факторов) и индуктивной намагниченности (зависящей от магнитной восприимчивости породы, формы её залегания и совр. геомагнитного поля). Комплексная $M. р.$ позволяет исследовать эти два вида намагниченности раздельно. Для этого $M. р.$ дополняется др. геофизич. методами (магнитовариационным, методом искусств. подмагничивания и низкочастотной индуктивной электроразведкой), данные которых могут при определённых условиях зависеть только от индуктивной намагниченности. Лит.: Магниторазведка: справочник геофизика / Под ред. В. Е. Никитского, Ю. С. Глебовского. М., 1990; Серкерев С. А. Гравиразведка и магниторазведка. М., 1999.

Ю. И. Блох.

МАГНИТНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ, см. *Релаксация магнитная*.

МАГНИТНАЯ СЕПАРАЦИЯ, способ отделения магнитных материалов от немагнитных; основан на использовании различия магнитных свойств (магнитной восприимчивости, остаточной индукции, коэрцитивной силы и др.) компонентов механ. смеси в неоднородном поле постоянных магнитов или электромагнитов. Осуществляется в магнитных сепараторах, в которых магнитные или сильномагнитные (магнитная восприимчивость св. $3 \cdot 10^{-6}$) материалы под действием магнитного поля выделяются в магнитную фракцию, а немагнитные или слабомагнитные материалы (магнитная восприимчивость ок. $1,2 \cdot 10^{-7}$) – в немагнитную. Наиболее широко $M. с.$ применяется для обогащения руд чёрных и цветных металлов и регенерации магнитных суспензий, используемых при гравитац. обогащении руд и углей, а также для разделения материалов в металлургич., химич., стекольной, пищевой и др. отраслях промышленности, при переработке вторичного сырья, в медицине.

Впервые $M. с.$ подробно описал Г. Агрикола в трактате «О горном деле и металлургии». В кон. 19 в. началось пром. внедрение магнитного метода для обогащения полезных ископаемых (гл. обр. железных руд) в Швеции, Италии, США и др. странах. В России первый магнитный сепаратор для обогащения магнетитовой руды создан в 1911 на Урале инж. В. А. Петровым. С кон. 1960-х гг. $M. с.$ получила распространение для обогащения железных, марганцевых, вольфрамовых, хромитовых, редкометалльных руд, угля и др. полезных ископаемых. $M. с.$ называется *прямой*, если магнитная фракция (концентрат) представляет собой очищенные от пустой породы и при-

месей минералы, или *обратной*, если минералы магнитной фракции являются вредной примесью (напр., при «перечистке» оловянных, циркониевых, лентевых, бериллиевых, полевовишатовых, кварцевых и др. концентратов). $M. с.$ подразделяют: в зависимости от среды, в которой производится разделение, – на мокрую и сухую; по величине магнитной восприимчивости материала на слабо- и сильномагнитную.

Устройство и параметры работы магнитных сепараторов определяются типом магнитной системы, числом, формой и расположением полюсов, составом магнитных материалов, диаметром роторов, частотой их вращения, крупностью руды, содержанием и вкраплением магнитных минералов, а при мокрой $M. с.$ – также количеством воды, типом ванны и пр. Магнитные системы изготавливаются на основе постоянных магнитов или электромагнитов, в т. ч. сверхпроводящих. Из магнитных материалов используются аллико, ферриты, неодим–железо–бор и др. Сепараторы со слабым магнитным полем (напряжённостью 80–150 кА/м) предназначены для обогащения сильномагнитных руд, а сепараторы с сильным магнитным полем (800–1600 кА/м) – для обогащения слабомагнитных руд. Как правило, слабое поле создаётся открытой многополюсной системой, сильное поле – замкнутой магнитной системой. В зависимости от физико-химич. характеристик разделяемого материала (и его крупности) для сильномагнитных материалов применяются преим. барабанные сепараторы, для слабомагнитных – валковые, роторные и др. При сухой $M. с.$ руда (напр., магнетитовая) загружается на верхние барабаны сепаратора, в которые помещены разомкнутые постоянные магниты, создающие поле напряжённостью ок. 90 кА/м; руда притягивается к полюсам (поверхности барабана), а слабомагнитная фракция отрывается (ссыпается с барабана), попадая на нижние барабаны с более сильным полем

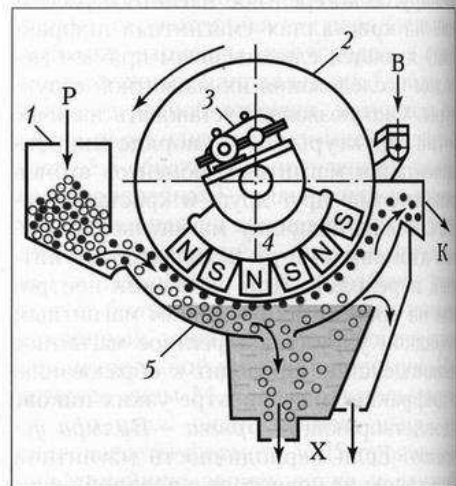


Схема магнитного сепаратора: 1 – питатель; 2 – барабан; 3 – привод барабана; 4 – магнитная система; 5 – прямооточная ванна; P – руда; В – вода; К – концентрат; X – хвосты (пустая порода).

(110 кА/м), где происходит доизвлечение менее магнитных кусков руды. При мокрой М. с. тонкоизмельчённая магнетитовая руда с водой поступает под вращающиеся навстречу потоку пульпы барабаны, притягивающие ферромагнитные минералы (рис.). В случае мокрой М. с. марганцевых и др. слабомагнитных руд применяют сепараторы со значительно более сильным высокоградиентным полем (1500 кА/м), создаваемым замкнутой электромагнитной системой.

Производительность магнитных сепараторов для кусковых руд достигает 500 т/ч, для тонкоизмельчённых сильномагнитных руд – 200 т/ч, для слабомагнитных руд – 40 т/ч. Извлечение полезного минерала, переходящего в концентрат (магнитную фракцию), обычно составляет не менее 75% от его исходной массы (для сильномагнитных руд – до 95% и более). На обогатит. фабриках России с помощью М. с. ежегодно перерабатывается ок. 500 млн. т полезных ископаемых. Часто М. с. комбинируют с др. методами обогащения (электрич., гравитац., центробежными, флотационными). М. с. применяют не только для произ-ва рудных, но и металлург. концентратов, выпуск которых резко возрастает в связи с развитием бездомной металлургии (процессов прямого восстановления руд и горячего брикетирования концентратов).

В пищевой пром-сти и произ-ве с.-х. продукции М. с. используется для очистки сырья и конечного продукта (чая, муки, кофе, сахара, комбикормов, кормовых добавок, гранул, сенажа, травяной муки) от металл. (ферромагнитных) предметов. Для этого над лентами транспортеров или в трубопроводах, с помощью которых транспортируются сыпучие материалы, устанавливаются устройства, называемые магнитными ловушками (железоотделителями или линиями магнитной задержки), которые формируют магнитное поле, позволяющее извлекать металл. включения из потока материала. Для очистки магнитной системы таких устройств от накопленных магнитных примесей используются постоянные магниты на основе редкоземельных магнитных материалов (напр., NdFeB), поскольку применение электромагнитов стало экономически нецелесообразным из-за существенного расхода электроэнергии.

При произ-ве строит. и пром. материалов на предприятиях стекольной и керамич. пром-сти М. с. применяется для очистки песка от оксидов железа и др. слабомагнитных примесей, которые придают стеклу нежелательные оттенки, снижают его прозрачность, а также являются причиной появления «мушек» на керамич. плитке. Использование М. с. для обогащения шликера (фарфоровой суспензии) и глазури при произ-ве высококачественного фарфора позволяет повысить белизну, прочность и улучшить диэлектрич. свойства изделий. Особен-

ностью очистки песка от оксидов железа и др. слабомагнитных примесей является необходимость создания высокоградиентных магнитных полей большой напряжённости.

В мусороперерабатывающей пром-сти при утилизации автомобилей, автопокрышек, жел.-бетон. конструкций и др. М. с. используется как при извлечении для дальнейшей переработки ферромагнитных (изготовленных из чёрных металлов) предметов и деталей, так и при сепарации включений из цветных металлов (как правило, это предварительно измельчённые детали бытовых приборов, радиодетали и т. п.). Для извлечения ферромагнитного лома применяются либо подвесные железоотделители, установленные над конвейерной лентой, либо барабанные сепараторы, состоящие из вращающегося барабана и неподвижной системы постоянных магнитов, формирующей магнитное поле в рабочей области сепаратора. Попадая в зону действия магнитного поля, куски лома притягиваются к поверхности барабана и переносятся им в зону со слабым магнитным полем, где происходит разгрузка. Для извлечения лома цветных металлов используются электродинамич. магнитные сепараторы, с помощью которых в частях из цветного металла, обладающих высокой электропроводностью, под воздействием переменного магнитного поля наводятся вихревые токи (токи Фуко). В свою очередь, токи Фуко формируют в окружающем пространстве индуцированное магнитное поле. Взаимодействие магнитных полей токов Фуко и магнитной системы сепаратора приводит к возникновению сил, выталкивающих частицы цветного металла из рабочей области сепаратора. Наиболее широкое распространение получили электродинамич. сепараторы с вращающимися магнитными системами на постоянных высокоэнергетичных редкоземельных магнитах.

В нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей пром-сти М. с. используется для очистки нефтепродуктов и др. жидких или вязких материалов от мелких металл. включений при транспортировке продуктов по трубам. В металлообрабатывающей пром-сти – для очистки смазочных охлаждающих жидкостей металлорезающих и шлифовальных станков (основу конструкций для этих целей составляют магнитные системы на постоянных магнитах). Тонкая очистка жидкостей от оксидов металлов производится с помощью электромагнитных сепараторов (фильтров), позволяющих доводить содержание оксидов до сотых долей процента.

В медицине М. с. эффективно используется для разделения клеток с помощью специфичной иммуносорбции на магнитоуправляемых сорбентах. Последние представляют собой ферромагнитные частицы (напр., микроскопич. стальные шарики в оболочке из полистирола), покрытые ковалентно связанными

с молекулами поверхностного слоя моноклональными антителами – искусств. образованиями, способными взаимодействовать с мембранными антигенами клеток-мишеней, притягивая либо здоровые, либо поражённые клетки. Иммуносорбция, предшествующая извлечению с помощью магнитного поля здоровых клеток, носит назв. позитивной иммуносорбции, а поражённых клеток – негативной иммуносорбции. Позитивная и негативная селекция материала используется для предтрансплантационного разделения и получения чистых фракций стволовых кроветворных клеток для их криоконсервации при онкологич. поражениях костного мозга. На основе иммуносорбции разработан метод борьбы с рядом патогенных микроорганизмов (напр., с возбудителем сепсиса дрожжеподобным грибом *Candida albicans*), которые после присоединения к антителам, нанесённым на стальные микросферы, удаляются магнитным полем из крови, предварительно выведенной из организма. Парамагнитные свойства красных кровяных телец, содержащих в своём составе железо, позволили разработать методику выделения их из крови высокоградиентными магнитными сепараторами, магнитное поле которых формируется с помощью ферромагнитных микропроволок или стальной ваты. С помощью М. с. можно, подбирая подходящий рецептор, удалять из крови любые нежелательные примеси. Напр., для очистки крови от свинца подобран рецептор, который в соединении с магнитными наночастицами никеля, покрытого диоксидом кремния, избирательно связывается со свинцом и с помощью магнитного поля выводится из организма. М. с. клеток стала активно развиваться в сер. 1970-х гг. и ныне является широко используемым недорогим методом, который применяется для разделения на более чистые фракции компонентов крови или костного мозга после экстракорпорального разделения (афереза), для очистки крови от радиоактивных токсинов и некоторых видов биологич. ядов, проточной цитометрии, изоляции опухолевых клеток и т. п.

Лит.: Кармазин В. В., Кармазин В. И. Магнитные методы обогащения. М., 1984; они же. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. М., 2005. Т. 1; Inglis D. W. e. a. Microfluidic high gradient magnetic cell separation // Journal of Applied Physics. 2006. Vol. 99. № 8; Tsutsui H., Ho C-M. Cell separation by non-inertial force fields in microfluidic systems // Mechanics Research Communications. 2009. Vol. 36. № 1.

В. В. Кармазин,

Е. Я. Тазунов, А. М. Тишин

МАГНИТНАЯ СИММЕТРИЯ, симметрия кристаллов, учитывающая специфику их магнитных свойств. Понятие о М. с. было введено Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшицем в 1959. Необходимость его введения вызвана тем обстоятельством, что кристаллы, обладающие одинаковой пространственной симметрией (см. *Симметрия кристаллов*), могут как обладать, так и