

формула $F = \Phi R_m$, где Φ – магнитный поток, R_m – магнитное сопротивление, F – магнитодвижущая сила. К М. ц. применимы *Кирхгофа правила*. Существует, однако, и принципиальное различие между М. ц. и электрич. цепью: в М. ц. с неизменным во времени магнитным потоком F не выделяется джоулева теплота, т. е. нет рассеяния электромагнитной энергии. Понятие «М. ц.» широко используется при расчётах постоянных магнитов, электромагнитов, реле, магнитных усилителей, электроизмерительных и др. приборов.

Лит.: Калашников С. Г. Электричество. 6-е изд. М., 2008.

МАГНИТНОЕ КВАНТОВОЕ ЧИСЛО, квантовое число m , определяющее проекцию M_z углового момента количества движения $\mathbf{M}$ квантовой системы (напр., атома или атомного ядра) на выделенную ось z : $M_z = m\hbar$, где $\hbar$ – постоянная Планка. В роли $\mathbf{M}$ может выступать орбитальный момент $\mathbf{L}$, спин $\mathbf{S}$ или полный угловой момент $\mathbf{J}$, равный их сумме. Соответствующие М. к. ч. обозначаются m_l , m_s , m_j и принимают соответственно $2L+1$, $2S+1$, $2J+1$ значений. М. к. ч. может быть целым или полуцелым (для орбитального момента – только целым). В магнитном поле уровни энергии атома расщепляются в соответствии с величиной m_j (см. *Зеемана эффект*).

Э. Е. Саперштейн.

МАГНИТНОЕ НАКЛОНЕНИЕ, см. *Наклонение магнитное*.

МАГНИТНОЕ НАСЫЩЕНИЕ, состояние магнетика при темп-ре 0 К, в котором векторы намагниченности $\mathbf{M}$ всех магнитных подрешёток коллинеарны вектору напряжённости намагничивающего поля $\mathbf{H}$ и результирующий вектор намагниченности совпадает с $\mathbf{H}$ по направлению. Модуль вектора результирующей намагниченности в состоянии М. н. называют намагниченностью насыщения. Под М. н. обычно понимают такое состояние, в котором все имеющиеся в веществе элементарные *магнитные моменты* ориентированы вдоль $\mathbf{H}$.

В парамагнетиках значение $\mathbf{M}$ в соответствии с формулой Бриллюэна стремится к пределу $\mathbf{M}_\infty$ при $H \rightarrow \infty$, и при низких темп-рах (1–10 К) состояние, близкое к М. н., реализуется в магнитных полях напряжённостью порядка 10^5 – 10^6 А/м.

При намагничивании ферромагнетиков после завершения процессов смещения доменных границ и вращения векторов спонтанной намагниченности $\mathbf{M}_s$ от доменов к направлению $\mathbf{H}$ наступает техническое М. н. (см. *Намагничивание*). Увеличение намагниченности при дальнейшем возрастании H связано с *парапроцессом*.

При намагничивании многоподрешёточных коллинеарных *ферромагнетиков* может существовать неск. изолированных областей состояния М. н., которые соответствуют разл. взаимной ориентации коллинеарных векторов намагниченности подрешёток; их абсолютное М. н.

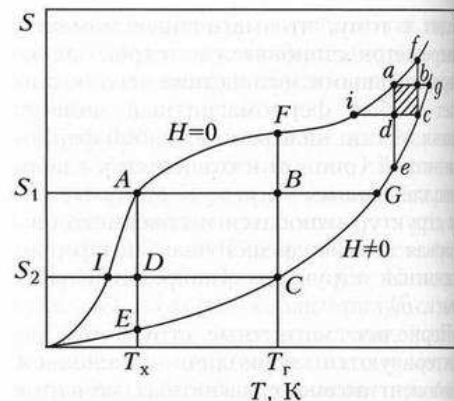
достигается в сверхсильных магнитных полях. М. н. антиферромагнетиков также достигается в сверхсильных магнитных полях, напряжённость которых превышает напряжённость поля *стин-флип перехода*.

Лит. см. при ст. *Намагничивание*.

А. И. Абрамович.

МАГНИТНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ, метод охлаждения, основанный на использовании *магнитокалорического эффекта*, благодаря которому магнитный материал при намагничивании в адиабатич. условиях изменяет свою темп-ру. Так, напр., ферромагнетики и парамагнетики нагреваются при намагничивании и охлаждаются при размагничивании. Изначально М. о. как метод получения низких и сверхнизких температур (1–0,01 К) путём адиабатич. размагничивания парамагнитных солей был предложен П. Дебаем (1926) и У. Ф. Джоком (1927). Соль, содержащую магнитные ионы с большим магнитным моментом (как правило, редкоземельных металлов), намагничивали при относительно высокой темп-ре, затем её охлаждали до минимально возможной темп-ры, после чего магнитное поле выключали. В результате затрат тепловой энергии на разориентацию магнитных моментов ионов соль охлаждалась, что позволяло получать темп-ры, близкие к абсолютному нулю. Использование парамагнитных свойств ядер даёт возможность получать темп-ры порядка 10^{-6} К.

Во 2-й пол. 20 – нач. 21 вв. была теоретически рассмотрена и экспериментально продемонстрирована возможность использования М. о. не только в области криогенных температур, но и при значительно более высоких темп-рах, вплоть до комнатных и выше. Используя магнитный материал в качестве рабочего тела, а также циклы намагничивания – размагничивания (магнитные тепловые циклы) с соответствующим отводом теплоты на разных стадиях цикла, можно организовать работу магнитного холодильника, аналогично тому, как организована работа традиц. холодильника, принцип действия которого основан на применении циклов сжатия – расширения и испарения – конденсации газов. Принцип действия магнитного холодильника основан на изменении энтропии магнитного материала под действием магнитного поля. На рис. приведены зависимости полной энтропии S ферромагнитного материала от темп-ры T в магнитном поле ($H \neq 0$) и в отсутствие магнитного поля ($H = 0$). Абсолютная величина изменения магнитной части энтропии $\Delta S_m(T) = S(H) - S(0)$ достигает своего максимума в области темп-ры Кюри и невелика вдали от этой темп-ры. Магнитный *Карно цикл*, осуществляемый от темп-ры T_x (темп-ра охлаждаемой нагрузки) до темп-ры T_r (темп-ра горячего теплообменника), представлен четырёхугольником $ABCD$. За один цикл от нагрузки поглощается (при размагничивании) количество теплоты, равное $\Delta S_m T_x$, где



Принцип действия магнитного холодильника: зависимость полной энтропии S ферромагнитного материала от температуры T в магнитном поле ($H \neq 0$) и в отсутствие магнитного поля ($H = 0$).

$\Delta S_m = S_2 - S_1$, и отводится в теплообменник (при намагничивании) количество теплоты, равное $\Delta S_m T_r$, на что затрачивается работа, равная $\Delta S_m \cdot (T_r - T_x)$. Рабочий интервал температур холодильника, работающего по этому циклу ($T_r - T_x$), ограничен уменьшением величины ΔS_m при удалении от Кюри точки, приводящим к уменьшению его эффективности.

В простейшем случае полную энтропию магнитного материала можно рассматривать как сумму энтропий, одна из которых связана с магнитной подсистемой материала, а другая – с его кристаллич. решёткой. При увеличении темп-ры решёточный вклад в энтропию быстро возрастает, что приводит к уменьшению эффективности магнитного цикла Карно (прямоугольник $abcd$ на рис.). Поэтому магнитный цикл Карно применяется при темп-рах, не превышающих 20 К. Адиабатич. размагничивание можно отнести к типу М. о., в котором используют магнитный цикл Карно. При более высоких темп-рах применяются магнитные циклы Эриксона и Брайтона, представленные на рис. фигурами $AFCE$ (намагничивание осуществляется изотермически) и $AGCI$ (намагничивание осуществляется адиабатически), а также активный магнитный цикл охлаждения, в котором магнитный материал используется не только как холодильный агент, но и как регенератор, т. е. этот цикл является регенеративным циклом.

По сравнению с традиц. холодильниками магнитные холодильники характеризуются рядом преимуществ. Прежде всего эти преимущества обусловлены гораздо более высокой плотностью рабочего тела в случае магнитного холодильника, в котором используется твёрдый материал в отличие от газа в традиц. холодильниках. Кроме того, магнитные холодильники не нуждаются в компрессорах, могут работать при более низких частотах, что уменьшает их износ, и теоретически характеризуются гораздо большей суммарной эффективностью, компактностью и энергосбережением, чем парогазовые аналоги. В кон. 20 – нач. 21 вв. создан целый ряд работающих

ших лабораторных образцов магнитных холодильников.

Лит.: Андреев А. С. и др. Магнитокалорический эффект в редкоземельных магнитных материалах // Успехи физических наук. 1989. Т. 158. Вып. 4; Tishin A. M., Spichkin Y. I. The magnetocaloric effect and its application. Bristol; Phil., 2003.

Ю. И. Спичкин, А. М. Тишин.

МАГНИТНОЕ ПОДВЕШИВАНИЕ, см. в ст. *Магнитный подвес*.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ, магнитная составляющая электромагнитного поля; физич. поле, оказывающее механич. силовое воздействие на движущиеся электрич. заряды, проводники, по которым проходит электрич. ток, постоянные магниты и др. физич. объекты, обладающие магнитным моментом. Изменяющееся во времени М.п. создаёт *электрическое поле* (см. *Максвелла уравнения*). Термин «М.п.» ввёл М. Фарадей (1845), автор концепции физич. поля – ключевого понятия совр. физики.

Силовой характеристикой М.п. является вектор *магнитной индукции* **B**, с помощью которого определяются механич. силы и вращательные моменты сил, действующие со стороны М.п. на движущиеся заряды, токи и тела, обладающие магнитным моментом. М.п. также характеризуется напряжённостью магнитного поля **H**: $H = B/\mu_0$, где μ – *магнитная проницаемость* среды, в которой существует М.п., μ_0 – *магнитная постоянная*. Объёмная плотность w энергии М.п. в среде $w = \int H dB$, где пределы интегрирования являются функцией **H**, и значение w зависит от вида связи между **B** и **H**. Так, в случае линейной связи между этими параметрами (в вакууме, диа- и парамагнитных средах) $w = HB/2$. Осн. физич. проявлениями М.п. являются *Лоренца сила* и явление *электромагнитной индукции*.

Источники М.п. – проводники с током (см. *Био – Савара закон*), движущиеся заряды, физич. объекты и тела, обладающие магнитным моментом (о природе источников М.п. в разл. средах см. в статьях *Магнетизм*, *Магнетизм микрочастиц*). Кроме того, М.п. создаётся переменным электрич. полем.

В технич. приложениях М.п. по величине магнитной индукции **B** подразделяют на слабые (до 0,05 Тл), средние (0,05–4 Тл), сильные (4–100 Тл) и *сверхсильные магнитные поля* (св. 100 Тл). Слабые и средние М.п. широко используются в радиотехнике и электронике, электротехнике и электроэнергетике. Их получают с помощью постоянных магнитов и электромагнитов (в т. ч. сверхпроводящих). Сильные М.п. применяются в мощных электротехнич. и электрофизич. установках, в т. ч. в *ускорителях заряженных частиц* и в разрабатываемых энергетич. установках *управляемого термоядерного синтеза*. Для получения постоянного сильного М.п. (с индукцией до 20–30 Тл) применяют сверхпроводящие соленоиды с допол-

нит. теплоотводом; более сильные М.п. удаётся получать только в течение коротких промежутков времени с помощью импульсных соленоидов (до 160 Тл) или магнитокумулятивных (взрывомангнитных) генераторов (до 10^3 Тл). Для измерения характеристик М.п. используют разл. *магнитометры*.

Природные М.п. имеют разные величины. Так, индукция М.п. Земли на её поверхности составляет ок. $5 \cdot 10^{-5}$ Тл, М.п. Юпитера – порядка 10^{-3} Тл, индукция М.п. внутри солнечных пятен (активных областей на Солнце) составляет доли Тл, отд. звёзды обладают М.п. с индукцией порядка нескольких Тл. Наибольшими М.п. обладают звёзды, находящиеся в конце своей эволюции, когда их размеры значительно уменьшаются (магнитокумулятивный механизм усиления М.п.). Лит.: Сахаров А. Д. Взрывомангнитные генераторы // Успехи физических наук. 1966. Т. 88. Вып. 4; Сивухин Д. В. Общий курс физики. 5-е изд. М., 2006. Т. 3: Электричество; Калашников С. Г. Электричество. 6-е изд. М., 2008.

В. С. Булыгин.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ, см. в ст. *Земной магнетизм*.

МАГНИТНОЕ ПОСЛЕДЁЙСТВИЕ, то же, что *магнитная вязкость*.

МАГНИТНОЕ СКЛОНЕНИЕ, см. *Склонение магнитное*.

МАГНИТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, характеристика магнитной цепи; М.с. R_m равно отношению магнитодвижущей силы F , действующей в магнитной цепи, к созданному в цепи магнитному потоку Φ . М.с. однородного участка *магнитной цепи* может быть вычислено по формуле $R_m = l/(\mu\mu_0 S)$, где l и S – длина и поперечное сечение участка магнитной цепи, μ – относит. магнитная проницаемость материала цепи, μ_0 – магнитная постоянная. В случае неоднородной магнитной цепи (состоящей из однородных последовательных участков с различными l , S , μ) её М.с. равно сумме R_m однородных участков. Расчёт М.с. по приведённой формуле является приближённым, т. к. формула не учитывает «магнитные утечки» (рассеяние магнитного потока в окружающем цепь пространстве), неоднородности магнитного поля в цепи, нелинейную зависимость М.с. от поля. В переменном магнитном поле М.с. – комплексная величина, т. к. в этом случае μ зависит от частоты электромагнитных колебаний. Единицей М.с. в СИ служит ампер (или ампер-виток) на вебер (А/Вб), в СГС – гильберт на максвелл (Гб/Мкс); $1 \text{ А/Вб} = 4\pi \cdot 10^{-9} \text{ Гб/Мкс}$.

МАГНИТНОЕ СТАРЕНИЕ, изменение магнитных свойств ферро- и ферромагнитных материалов во времени, происходящее самопроизвольно или под воздействием разл. внешних факторов: постоянных и переменных магнитных полей, колебаний темп-ры, механич. ударов, вибраций, радиации. М.с. наиболее характерно для материалов с метастабильными *магнитной структурой атомной* и/или *магнитной доменной структурой*. Напр.,

постоянные магниты могут частично размагничиваться за счёт изменения их доменной структуры. Изменения магнитных свойств в результате М.с. в ряде случаев обратимы, т. е. их первоначальные значения могут быть восстановлены путём соответствующего воздействия магнитного поля. М.с. включает также необратимые изменения магнитных свойств, связанные с т. н. структурным старением вещества, т. е. с изменением его кристаллич. структуры, дисперсности фаз и др. элементов структуры в результате диффузии, распада твёрдого раствора, упорядочения или др. фазовых превращений. Напр., в технич. железе в размагниченном состоянии существенно уменьшается магнитная проницаемость и возрастает коэрцитивная сила после его нагрева до 130°C . Это происходит вследствие выделения в нём частиц карбидов и нитридов.

Для стабилизации магнитных свойств, в частности доменной структуры, на практике применяют искусственное состаривание материала. Так, постоянные магниты подвергают частичному размагничиванию переменным полем с убывающей до нуля амплитудой, циклич. воздействиям темп-ры, вибрациям. Обычно применяют тот вид воздействия, которому должно в осн. противостоять изделие в процессе эксплуатации.

Лит. см. при ст. *Магнитные материалы*.

А. С. Ермоленко.

МАГНИТНОЕ УДЕРЖАНИЕ плазмы, удержание в ограниченном объёме высокотемпературной плазмы (с темп-рой $T > 10$ кэВ) достаточно высокой плотности в течение времени, необходимого для возможного осуществления управляемого термоядерного синтеза, с помощью особых конфигураций магнитных полей. Подробнее см. *Магнитные ловушки*, *Открытые ловушки*, *Удержание плазмы*.

МАГНИТНОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ, предназначено для уменьшения напряжённости постоянного или низкочастотного магнитного поля в к.-л. области пространства либо для локализации магнитного поля в заданной области пространства. В отличие от экранирования электрич. поля, ослабление магнитного поля до его полного исчезновения невозможно. Магнитное экранирование с целью ослабления внешнего магнитного поля широко используют в медицине и ряде областей науки и техники, связанных с измерениями сверхслабых (с магнитной индукцией до 10^{-14} Тл) магнитных полей. Локализация магнитных полей (экранирование магнитных полей рассеяния) используется в силовой электротехнике и электронике в тех случаях, когда магнитные поля трансформаторов, постоянных магнитов, силовоточных цепей и др. могут оказывать вредное воздействие на окружающую среду или нарушать нормальную работу соседних устройств или элементов. Наиболее распространённые методы М.э. – использование ферромагнитных и сверхпроводящих экранов, а также компенсационный метод.