

# Магнитное поле в веществе. Магнитные свойства вещества.

<http://www.youtube.com/watch?v=a0BEan8qPRI>

<http://www.youtube.com/watch?v=C16OGDDAnO4>

<http://www.youtube.com/watch?v=rp6hdFO87G0>

<http://www.youtube.com/watch?v=V7bayyndHal>

<http://www.youtube.com/watch?v=dbTYezvUNC8>

Экспериментальные исследования показали, что все вещества в большей или меньшей степени обладают магнитными свойствами.

Физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля в однородной среде отличается по модулю от индукции магнитного поля в вакууме, называется *магнитной проницаемостью*:

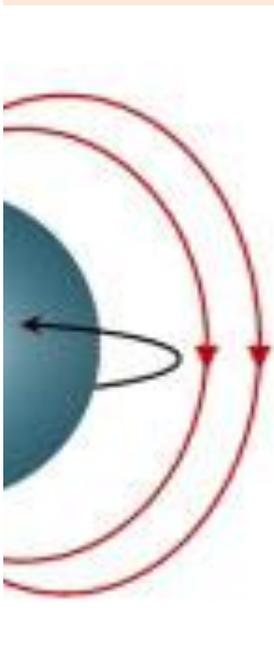
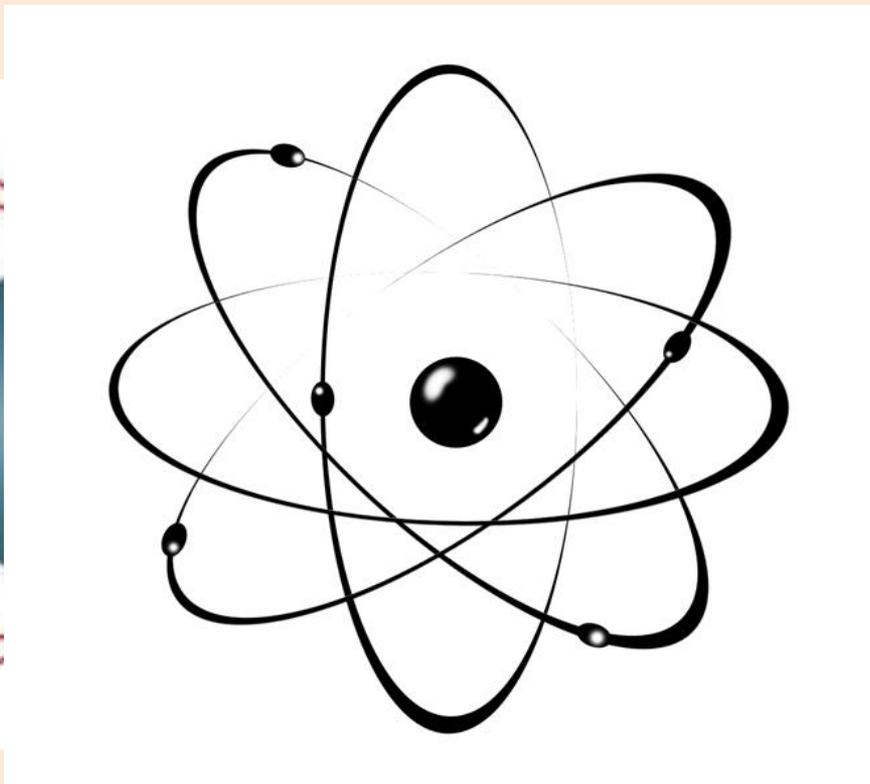
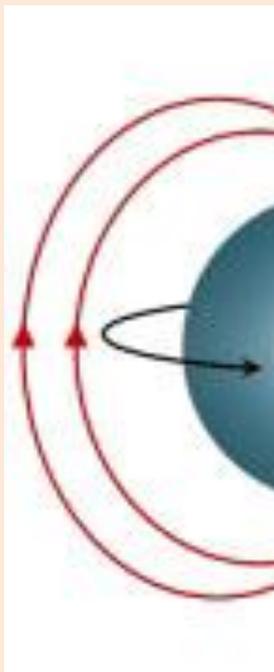
$$\mu = \frac{B}{B_0}$$

Магнитные свойства веществ определяются магнитными свойствами атомов или элементарных частиц (электронов, протонов и нейтронов), входящих в состав атомов. В настоящее время установлено, что магнитные свойства протонов и нейтронов почти в 1000 раз слабее магнитных свойств электронов. Поэтому магнитные свойства веществ в основном определяются **электронами**, входящими в состав атомов.



Одним из важнейших свойств электрона является наличие у него не только электрического, но и собственного магнитного поля.

- Собственное магнитное поле электрона называют *спиновым* (spin – вращение).
- Электрон создает магнитное поле также и за счет орбитального движения вокруг ядра, которое можно уподобить круговому микротоку.



# Магнитные свойства вещества

Слабо-магнитные

Сильные

Диамагнетики  
 $\mu < 1$

Ферромагнетики  
 $\mu \gg 1$

Парамагнетики  
 $\mu > 1$

# Диамagnetики ( $\mu < 1$ )

Явление диамagnetизма было открыто М. Фарадеем в 1845 г.

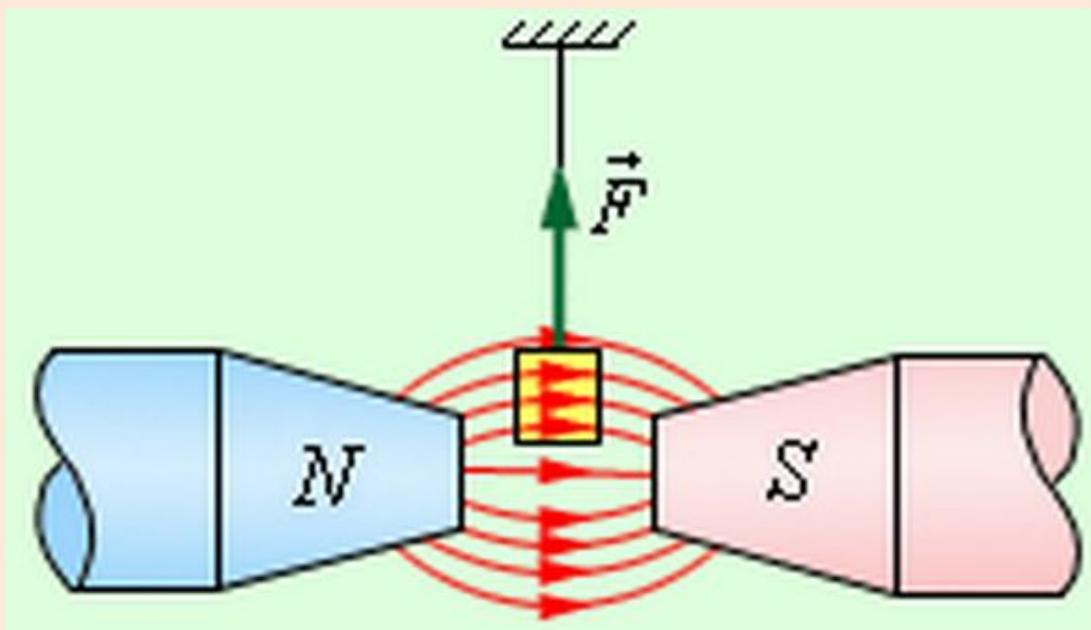
Особенность: диамagnetные образцы намагничиваются против внешнего поля. Диамagnetики выталкиваются из области сильного магнитного поля.

Примеры: вода, висмут, медь, золото, сера, ртуть, хлор, инертные газы и практически все органические соединения.

медь ( $\mu - 1 \approx -3 \cdot 10^{-6}$ ),

вода ( $\mu - 1 \approx -9 \cdot 10^{-6}$ ),

висмут ( $\mu - 1 \approx -1,7 \cdot 10^{-3}$ )



# Парамагнетики ( $\mu > 1$ )

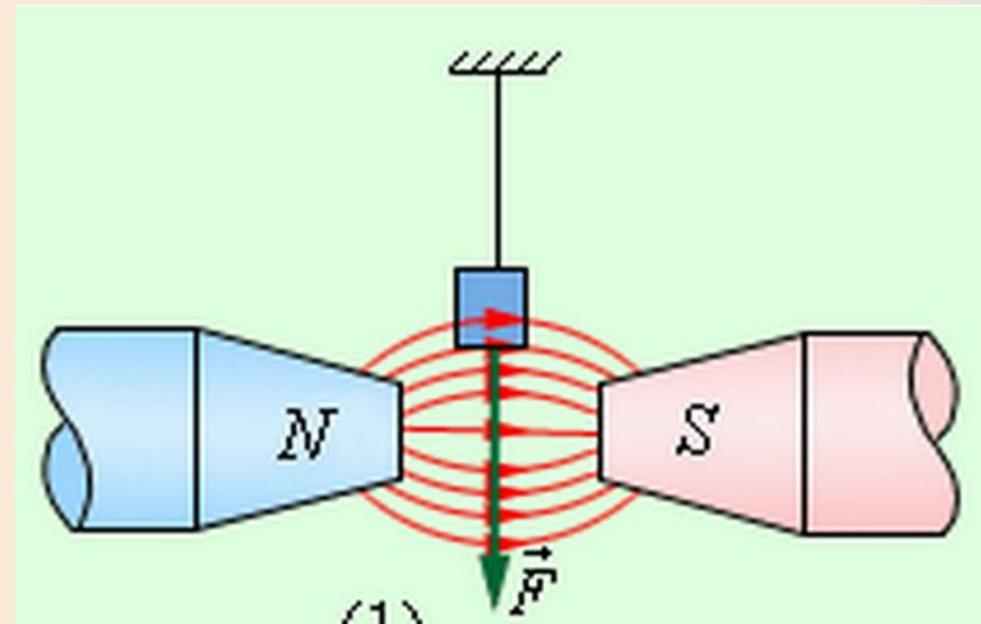
Особенность: при внесении во внешнее магнитное поле парамагнитные образцы намагничиваются так, что их собственное магнитное поле оказывается направленным по внешнему полю.

Парамагнетики втягиваются в область сильного поля.

Примеры: алюминий, кислород, молибден, платина, кальций, хром, соли железа, никеля, марганец

хлористое железо ( $\text{FeCl}_3$ )  $\mu - 1 \approx 2,5 \cdot 10^{-3}$

алюминий  $\mu - 1 \approx 2,1 \cdot 10^{-5}$



Пара- и диамагнетизм объясняется поведением электронных орбит во внешнем магнитном поле.

- У атомов диамагнитных веществ в отсутствие внешнего поля собственные магнитные поля электронов и поля, создаваемые их орбитальным движением, полностью скомпенсированы. Возникновение диамагнетизма связано с действием силы Лоренца на электронные орбиты. Под действием этой силы изменяется характер орбитального движения электронов и нарушается компенсация магнитных полей. Возникающее при этом собственное магнитное поле атома оказывается направленным **против** направления индукции внешнего поля.
- В атомах парамагнитных веществ магнитные поля электронов скомпенсированы не полностью, и атом оказывается подобным маленькому круговому току. В отсутствие внешнего поля эти круговые микротоки ориентированы произвольно, так что суммарная магнитная индукция равна нулю. Внешнее магнитное поле оказывает ориентирующее действие – микротоки стремятся сориентироваться так, чтобы их собственные магнитные поля оказались направленными по направлению индукции внешнего поля.

# Ферромагнетики ( $\mu \gg 1$ )

Примеры: железо, никель, кобальт, гадолиний. Наибольшей магнитной проницаемостью обладает железо. Широкое применение в технике получили керамические ферромагнитные материалы – ферриты (сплавы, содержащие ферромагнитные элементы).

Особенность:

- способность сильно намагничиваться в магнитном поле
- для каждого ферромагнетика существует определенная температура (так называемая *температура или точка Кюри*), выше которой ферромагнитные свойства исчезают, и вещество становится парамагнетиком. У Железо  $-770$  °С, кобальт  $-1130$  °С, никель  $-360$  °С.

# Ферромагнетики

```
graph TD; A[Ферромагнетики] --> B[магнито-мягкие]; A --> C[магнито-жесткие]
```

## магнито-мягкие

Почти полностью размагничиваются, когда внешнее магнитное поле становится равным нулю.

Примеры: чистое железо, электротехническая сталь и некоторые сплавы.

Эти материалы применяются в приборах переменного тока, в которых происходит непрерывное перемагничивание, то есть изменение направления магнитного поля (трансформаторы, электродвигатели).

## магнито-жесткие

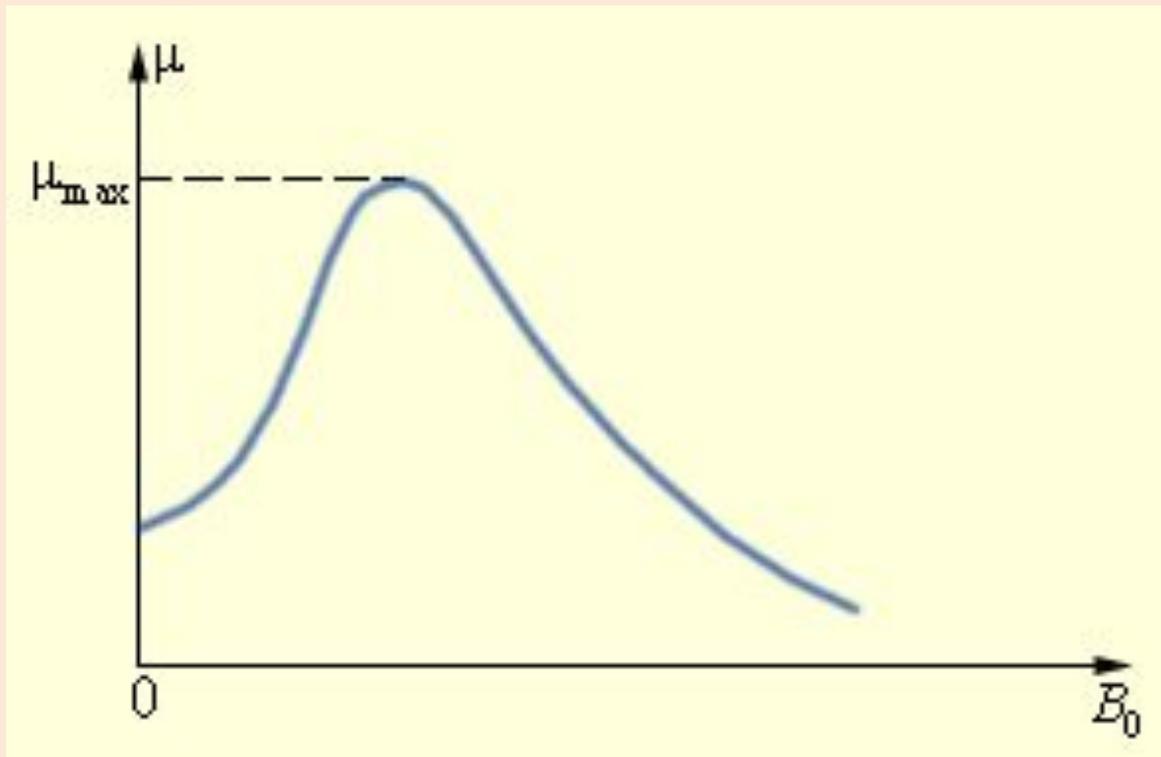
Магнито-жесткие материалы в значительной мере сохраняют свою намагниченность и после удаления их из магнитного поля.

Примеры: углеродистая сталь и ряд специальных сплавов.

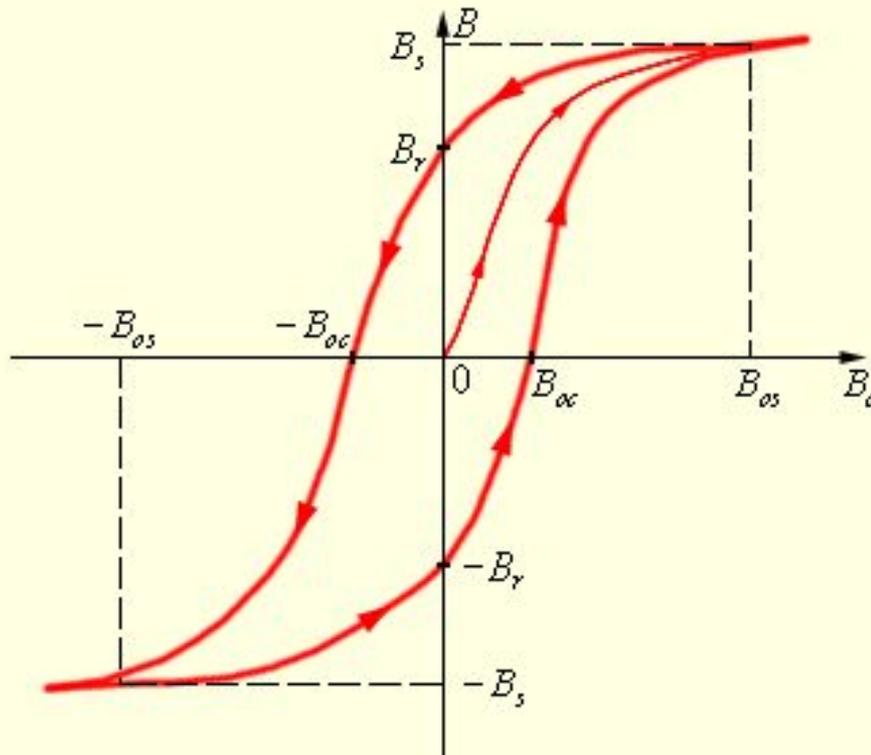
Магнито-жесткие материалы используются в основном для изготовления **постоянных магнитов**.

Магнитная проницаемость  $\mu$  ферромагнетиков **не является постоянной величиной**; она сильно зависит от индукции  $B_0$  внешнего поля.

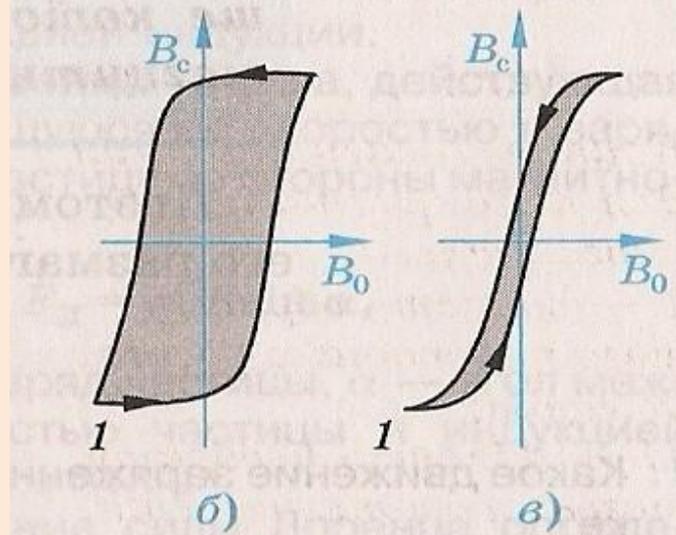
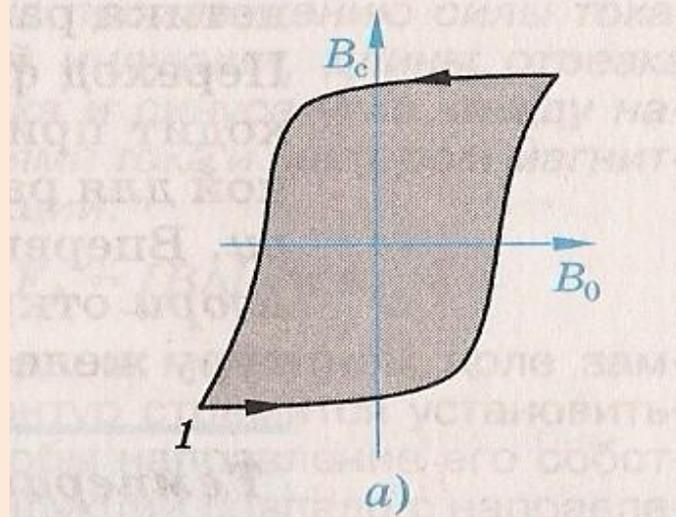
В таблицах обычно приводятся значения максимальной магнитной проницаемости.



Непостоянство магнитной проницаемости приводит к сложной нелинейной зависимости индукции  $B$  магнитного поля в ферромагнетике от индукции  $B_0$  внешнего магнитного поля. Характерной особенностью процесса намагничивания ферромагнетиков является так называемый *гистерезис*, то есть зависимость намагничивания от предыстории образца. Кривая намагничивания  $B(B_0)$  ферромагнитного образца представляет собой петлю сложной формы, которая называется *петлей гистерезиса*.



Чем шире петля,  
тем труднее  
размагнитить  
образец

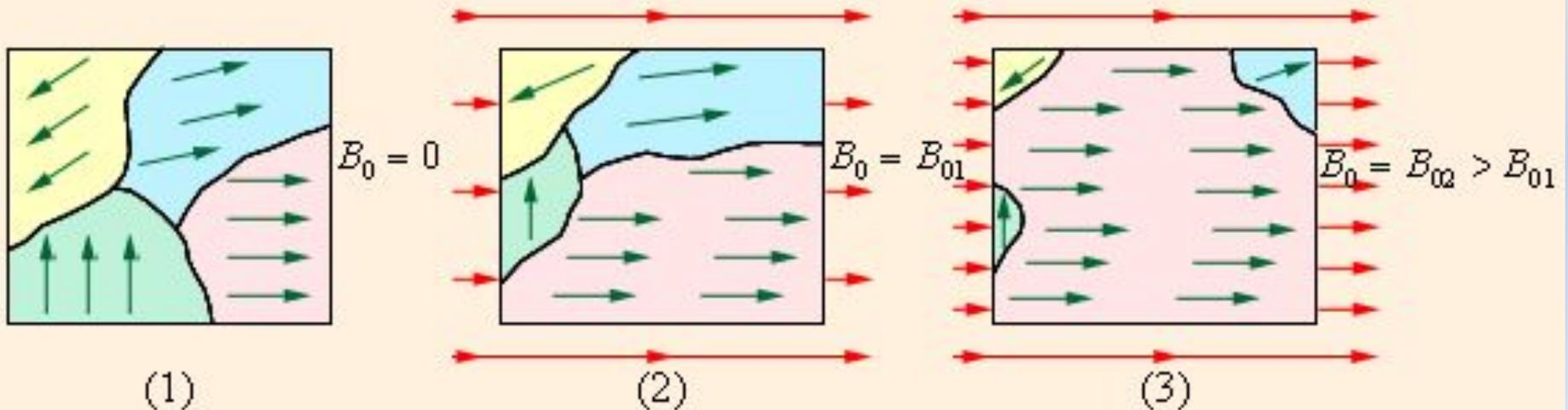


▲ 103

*Петля гистерезиса для  
различных ферромаг-  
нитных материалов*

Природа ферромагнетизма может быть до конца понята только на основе квантовых представлений. Качественно ферромагнетизм объясняется наличием собственных (спиновых) магнитных полей у электронов. В кристаллах ферромагнитных материалов возникают условия, при которых, вследствие сильного взаимодействия спиновых магнитных полей соседних электронов, энергетически выгодной становится их параллельная ориентация. В результате такого взаимодействия внутри кристалла ферромагнетика возникают самопроизвольно намагниченные области размером порядка  $10^{-2}$ – $10^{-4}$  см. Эти области называются *доменами*. Каждый домен представляет из себя небольшой постоянный магнит.

- В отсутствие внешнего магнитного поля направления векторов индукции магнитных полей в различных доменах ориентированы в большом кристалле хаотически. Такой кристалл в среднем оказывается ненамагниченным.
- При наложении внешнего магнитного поля происходит смещение границ доменов так, что объем доменов, ориентированных по внешнему полю, увеличивается.
- С увеличением индукции внешнего поля возрастает магнитная индукция намагниченного вещества.
- В очень сильном внешнем поле домены, в которых собственное магнитное поле совпадает по направлению с внешним полем, поглощают все остальные домены, и наступает магнитное насыщение.



1. Прямолинейный проводник массой  $m = 3$  кг, по которому проходит ток силой  $I = 5$  А, поднимается вертикально вверх в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 3$  Тл, двигаясь под углом  $\alpha = 30^\circ$  к линиям магнитной индукции. Через время  $t = 2$  с после начала движения он приобретает скорость  $v = 10$  м/с. Определить длину проводника.
2. Жесткая проводящая рамка квадратной формы лежит на горизонтальной поверхности и находится в магнитном поле, силовые линии которого параллельны двум сторонам рамки. Масса рамки  $m = 20$  г, длина ее стороны  $a = 4$  см, магнитная индукция  $B = 0,5$  Тл. Какой силы постоянный ток нужно пропускать по рамке, чтобы одна из ее сторон начала приподниматься?
3. Электрон влетает в плоский горизонтальный конденсатор параллельно его пластинам со скоростью  $v_0 = 2 \times 10^7$  м/с. Длина конденсатора  $l = 10$  см, напряженность электростатического поля конденсатора  $E = 200$  В/см. При вылете из конденсатора электрон попадает в магнитное поле, линии которого перпендикулярны силовым линиям электростатического поля. Магнитная индукция поля  $B = 2 \times 10^{-2}$  Тл. Найти радиус винтовой траектории электрона в магнитном поле.
4. Заряженная частица, ускоренная разностью потенциалов  $U = 200$  В, влетела в точке 1 (рис.) в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 4 \times 10^{-3}$  Тл, перпендикулярной скорости частицы, и вылетела в точке 2. Расстояние  $l$  между точками 1 и 2 равно 1 м. Найти отношение заряда частицы к ее массе.

Две параллельные металлические пластины, расстояние между которыми  $d = 40,0$  мм, а площадь каждой пластины  $S = 200 \text{ см}^2$ , помещены в поток проводящей жидкости ( $\rho = 100 \text{ мОм} \times \text{м}$ ). Скорость потока жидкости, модуль которой  $v = 100 \text{ м/с}$ , направлена параллельно плоскости пластин. Пластины находятся в однородном магнитном поле, направленном перпендикулярно скорости жидкости. Модуль индукции магнитного поля  $B = 300 \text{ мТл}$ . Пластины замкнули на резистор сопротивлением  $R = 2,80 \text{ Ом}$ . Какая мощность  $P$  тока будет при этом выделяться в резисторе?

Решение:

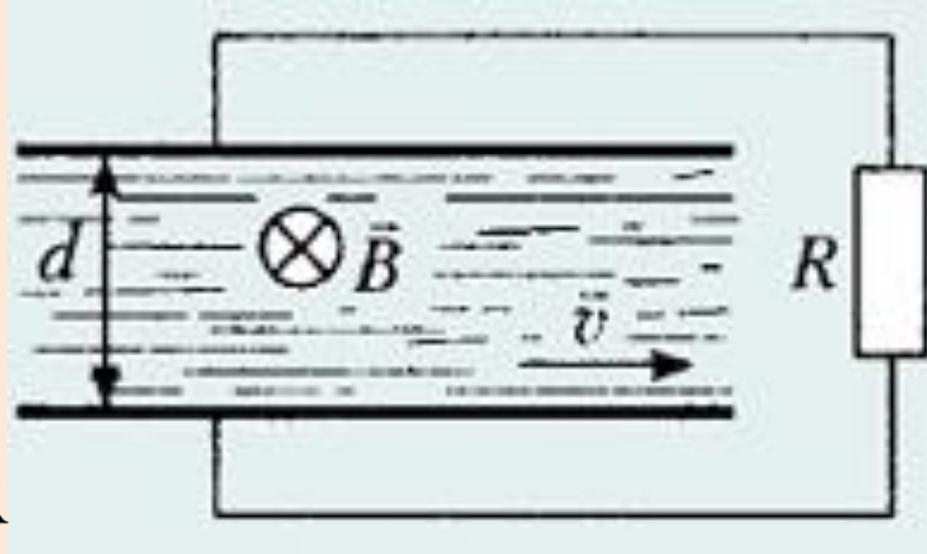
$$P = I^2 R$$

$$I = \frac{U}{R+r} \quad r = \frac{\rho d}{S}$$

$$evB = \frac{Ue}{d} \rightarrow U = vBd$$

$$P = \left( \frac{vBd}{R + \frac{\rho d}{S}} \right)^2 R = \left( \frac{vBds}{SR + \rho d} \right)^2 R$$

$$P = \left( \frac{vBds}{SR + \rho d} \right)^2 R = \left( \frac{100 \cdot 0,3 \cdot 0,04 \cdot 0,02}{0,02 \cdot 2,8 + 0,1 \cdot 0,04} \right)^2 2,8 = \mathbf{0,448 \text{ (Вт)}}$$



Две частицы массами  $m_1 = m_2 = 0,400 \times 10^{-12}$  кг, заряды которых  $q_1 = q_2 = 1,00 \times 10^{-10}$  Кл, движутся в вакууме в однородном магнитном поле, индукция  $\mathbf{B}$  которого перпендикулярна их скоростям. Расстояние  $l = 100$  см между частицами остается постоянным. Модули скоростей частиц  $v_1 = v_2 = 50,0$  м/с, а их направления противоположны в любой момент времени. Пренебрегая влиянием магнитного поля, создаваемого частицами, определите индукции  $\mathbf{B}$  магнитного поля.

**Решение:** По условию задачи расстояние между частицами  $l = 100$  см сохраняется постоянным, а вектора скоростей все время противоположны, следовательно, частицы движутся по окружности радиусом  $R = l/2$ .

$$m\vec{a} = \vec{F}_L + \vec{F}_{Кул}$$

$$Ox: -ma = F_{Кул} - F_L$$

$$F_L - F_{Кул} = qvB - \frac{kqq}{l^2} = \frac{mv^2}{R}$$

$$B = \left( \frac{2mv^2}{l} + \frac{kqq}{l^2} \right) / (qv) = \mathbf{0,418 \text{ (Тл)}}$$

