

Ферромагнетики.

Магнитная восприимчивость диамагнетиков

Вещество	$K_{\text{мол}} \cdot 10^{-6}$
He	-2,02
Cu	-5,41
Zn	-11,40
Ag	-21,50
Au	-29,59
Bi	-284,0
CO ₂	-21

Магнитная восприимчивость парамагнетиков в расчете на один моль (атом)

Вещество	$K_{\text{МОЛ}} \cdot 10^{-6}$	Вещество	$K_{\text{МОЛ}} \cdot 10^{-6}$
Mg	13,25	Sr	91,2
Na	15,1	Ti	161,0
Rb	18,2	U	414,0
Ba	20,4	Pu	627,0
K	21,25	FeS	1074,0
Li	24,6	EuCl ₃	2650,0
Ca	44,0	CoCl ₃	121660,0
W	55,0		

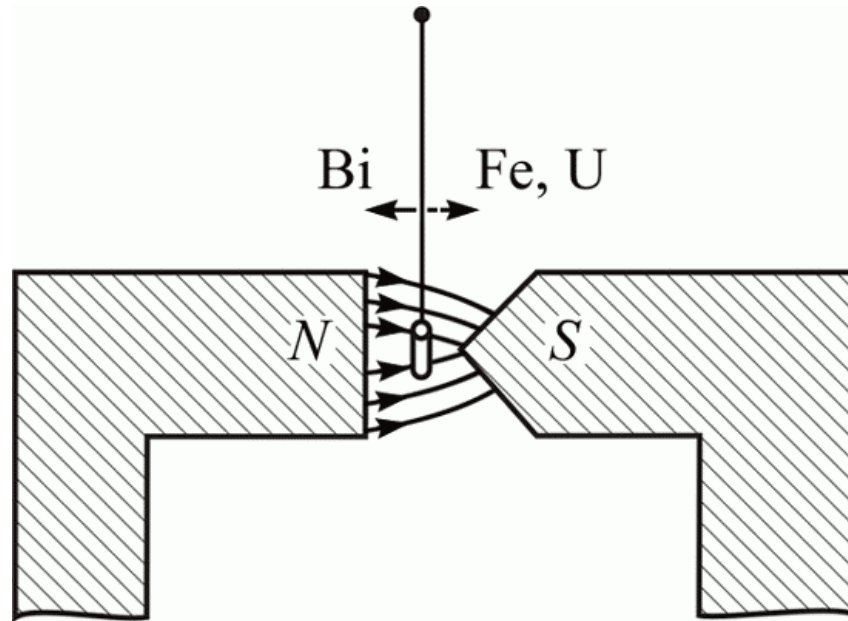
Ферромагнетики.

- *К ферромагнетикам* (*ferrum* – железо) относятся вещества, магнитная восприимчивость ***K*** которых положительна и очень велика $-10^4 \div 10^5$.

Ферромагнетики.

- Намагниченность \vec{J} и магнитная индукция $\vec{B} = (\vec{H} + \vec{J})\mu_0$ ферромагнетиков растут с увеличением напряженности магнитного поля \vec{H} нелинейно, и в полях $\sim 8 \cdot 10^3$ А/м намагниченность ферромагнетиков достигает предельного значения \vec{J}_s , а вектор магнитной индукции затем растет линейно с \vec{H} : $\vec{B} = \vec{J}_s\mu_0 + \vec{H}\mu_0$.
- Наличие у ферромагнетиков самопроизвольного магнитного момента в отсутствие внешнего магнитного поля связано с тем, что электронные спины и магнитные моменты атомных носителей магнетизма ориентированы в веществе упорядоченным образом.

- **Ферромагнетики** это вещества, обладающие самопроизвольной намагниченностью, которая сильно изменяется под влиянием внешних воздействий – магнитного поля, деформации, температуры. Поскольку у ферромагнетиков *магнитная восприимчивость положительна и очень велика*, в ферромагнетиках происходит резкое усиление внешних магнитных полей.
- Для ферромагнетиков *K* сложным образом зависит от величины магнитного поля.
- *Типичными ферромагнетиками* являются Fe, Co, Ni, Gd, Dy, Ho, Er, Tm, а также соединения ферромагнитных материалов с неферромагнитными: Fe_3Al , Ni_3Mn , $ZnCMn_3$
- Ферромагнетики, в отличие от слабо магнитных диа- и парамагнетиков, являются *сильно магнитными веществами*: внутреннее магнитное поле в них может в сотни раз превосходить внешнее поле.

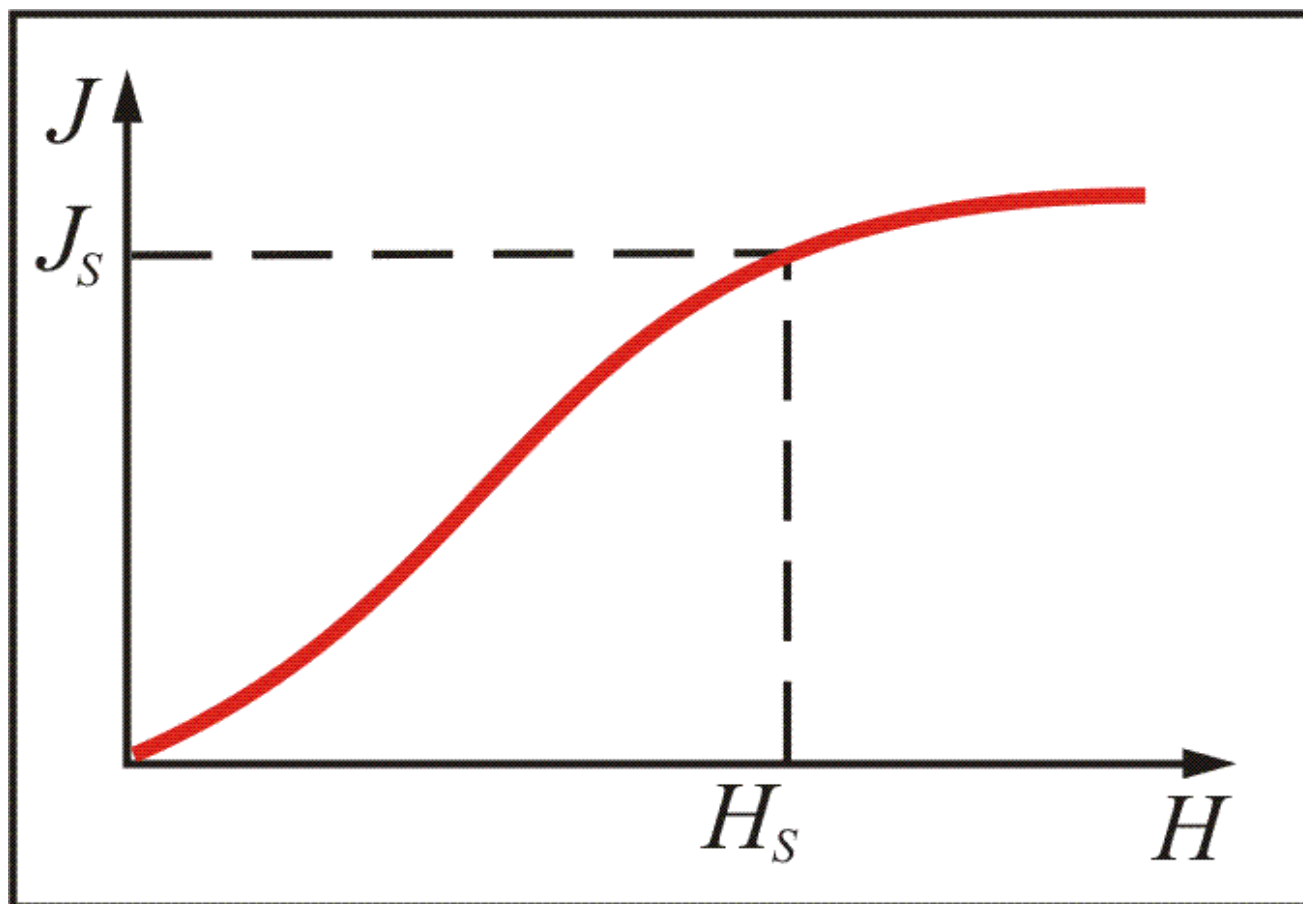


Ферромагнетики (Fe, Co, Ni и др.) и **парамагнетики** (U, Pu, FeS) втягиваются в область более сильного поля, **диамагнетики** (Bi и др.)— выталкиваются из области сильного поля.

Основные особенности магнитных свойств ферромагнетиков.

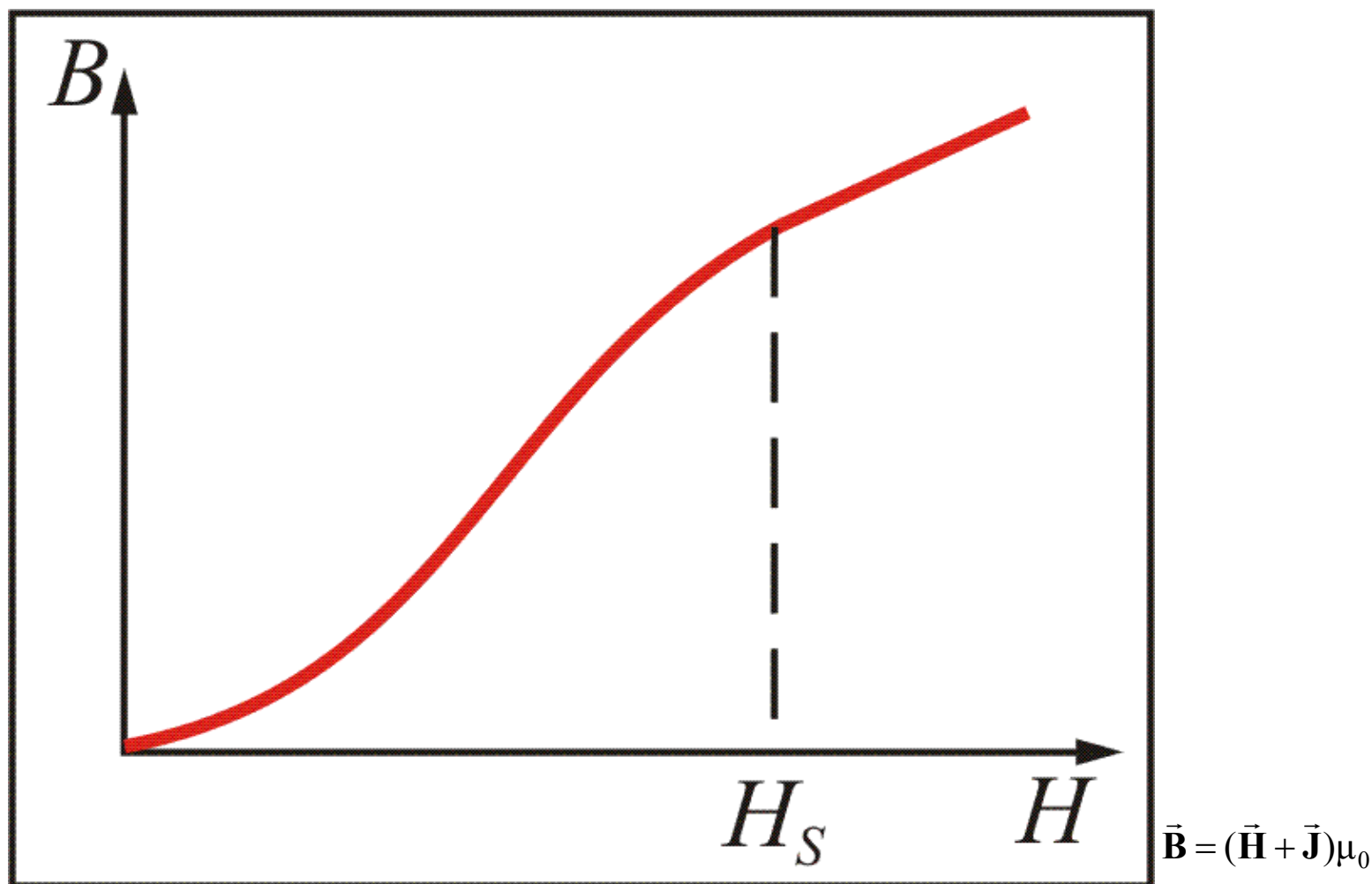
1) Нелинейная зависимость намагниченности от напряженности магнитного поля H

Как видно из рисунка, при $H > H_S$ наблюдается *магнитное насыщение.*

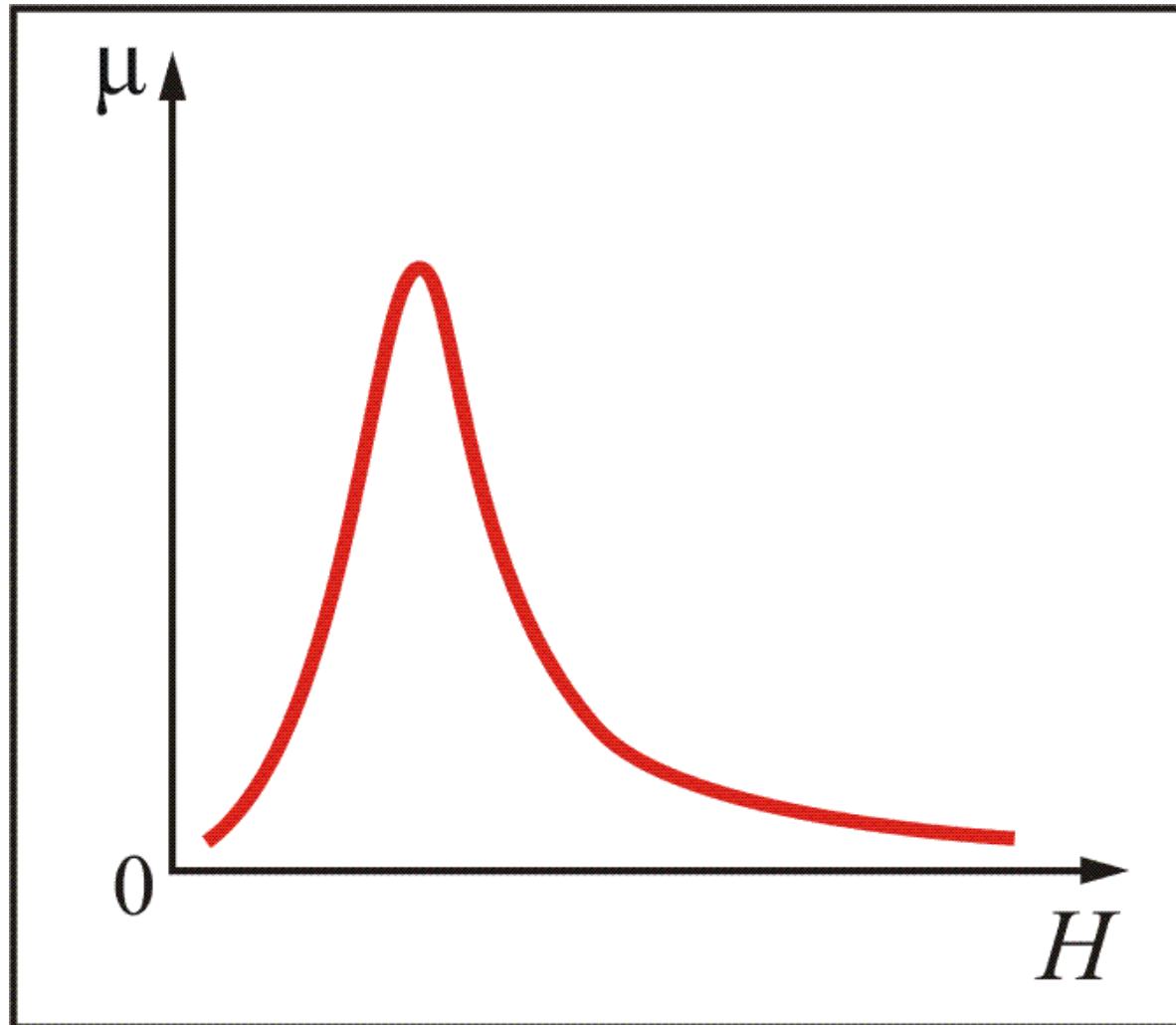


$$\vec{J} = \kappa \vec{H}$$

2) При $H < H_S$ зависимость магнитной индукции B от H - нелинейная, а при $H > H_S$ - линейна



3) Зависимость относительной магнитной проницаемости μ от H имеет сложный характер (рис.), причем максимальные значения μ очень велики ($10^3 \div 10^6$).



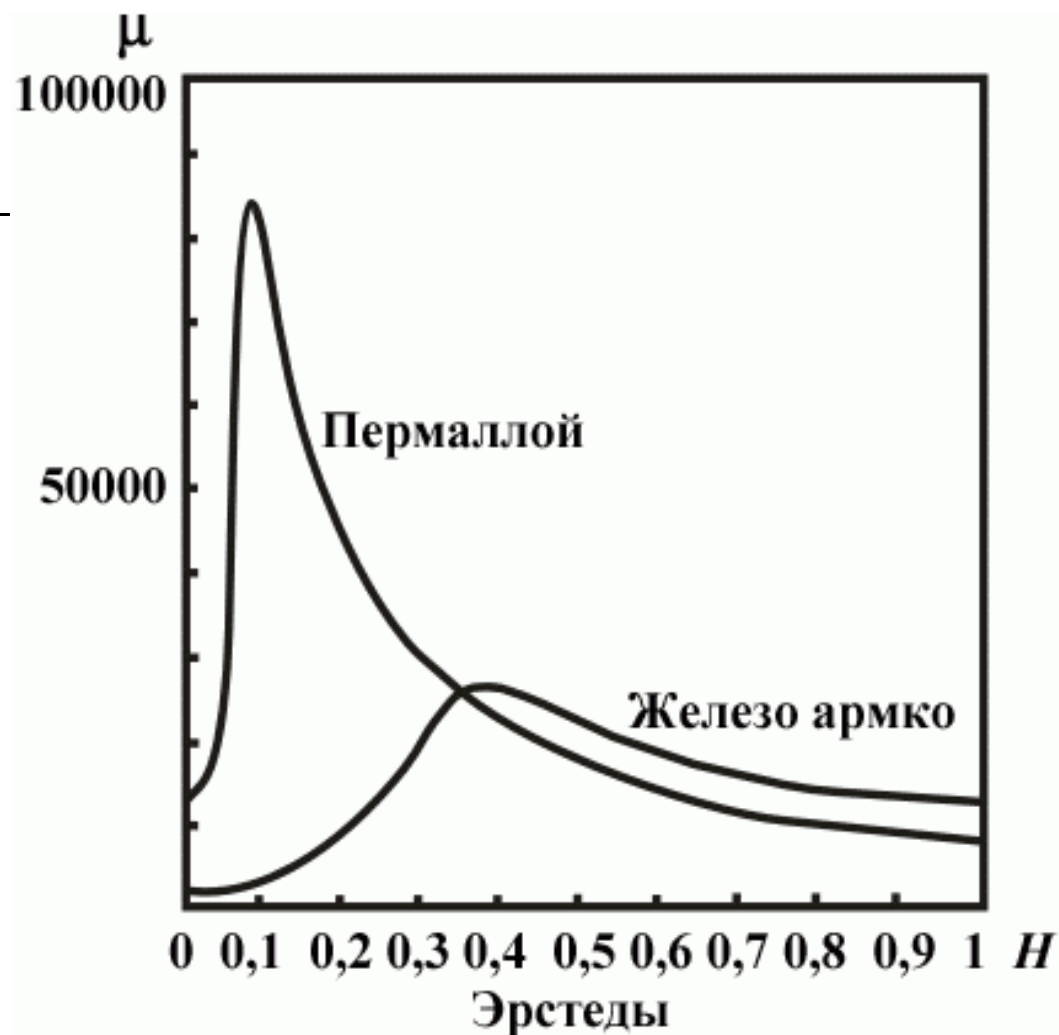
$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}$$

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

- Впервые систематические исследования μ от H были проведены в 1872 г.

А. Г. Столетовым (1839–1896) – выдающимся русским физиком.

- На рис. изображена зависимость магнитной проницаемости ферромагнетиков от напряженности магнитного поля – **кривая Столетова**.

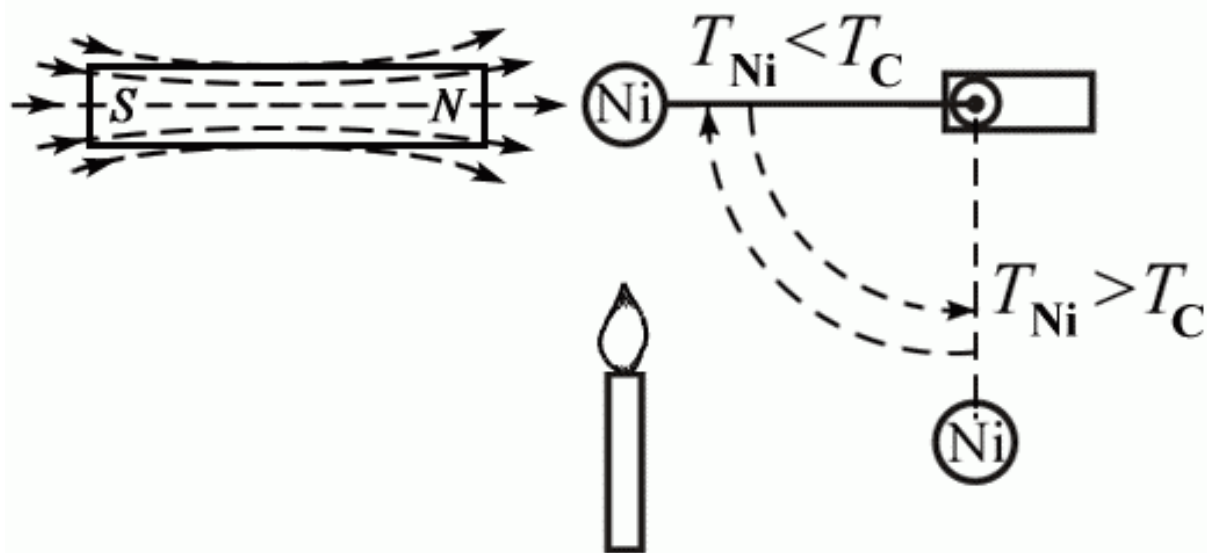


4) У каждого ферромагнетика имеется такая температура называемая точкой Кюри (T_K), выше которой это вещество теряет свои особые магнитные свойства.

Наличие температуры Кюри связано с разрушением при $T > T_K$ упорядоченного состояния в магнитной подсистеме кристалла – параллельной ориентации магнитных моментов.

Для никеля температура Кюри равна $360\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Если подвесить образец никеля вблизи пламени горелки так, чтобы он находился в поле сильного постоянного магнита, то не нагретый образец может располагаться горизонтально, сильно притягиваясь к магниту.



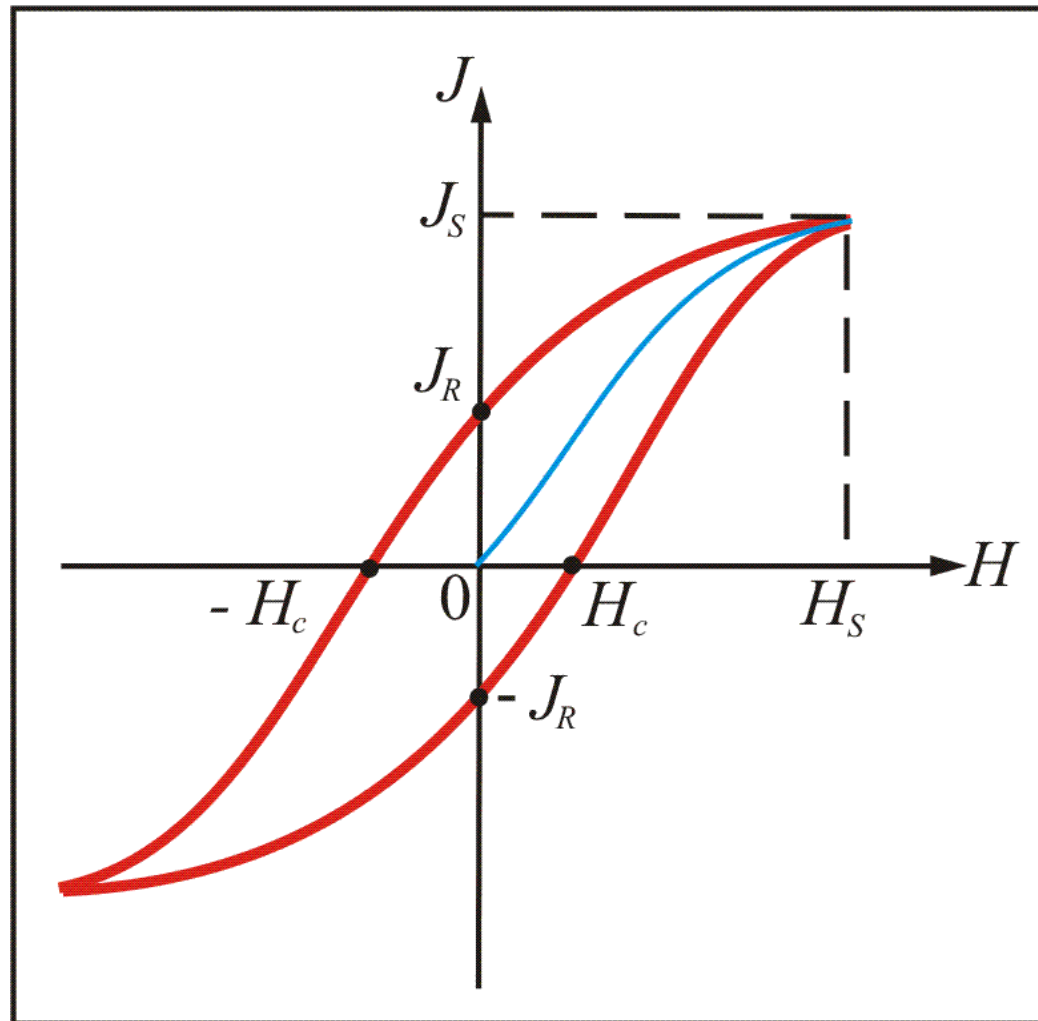
По мере нагрева образца и достижения температуры $T > T_K$ ферромагнитные свойства у никеля исчезают и образец никеля падает. Остыв до температуры ниже точки Кюри, образец вновь притянется к магниту. Нагревшись, вновь падает и т. д. Эти периодические колебания будут продолжаться все время, пока горит свеча или горелка .

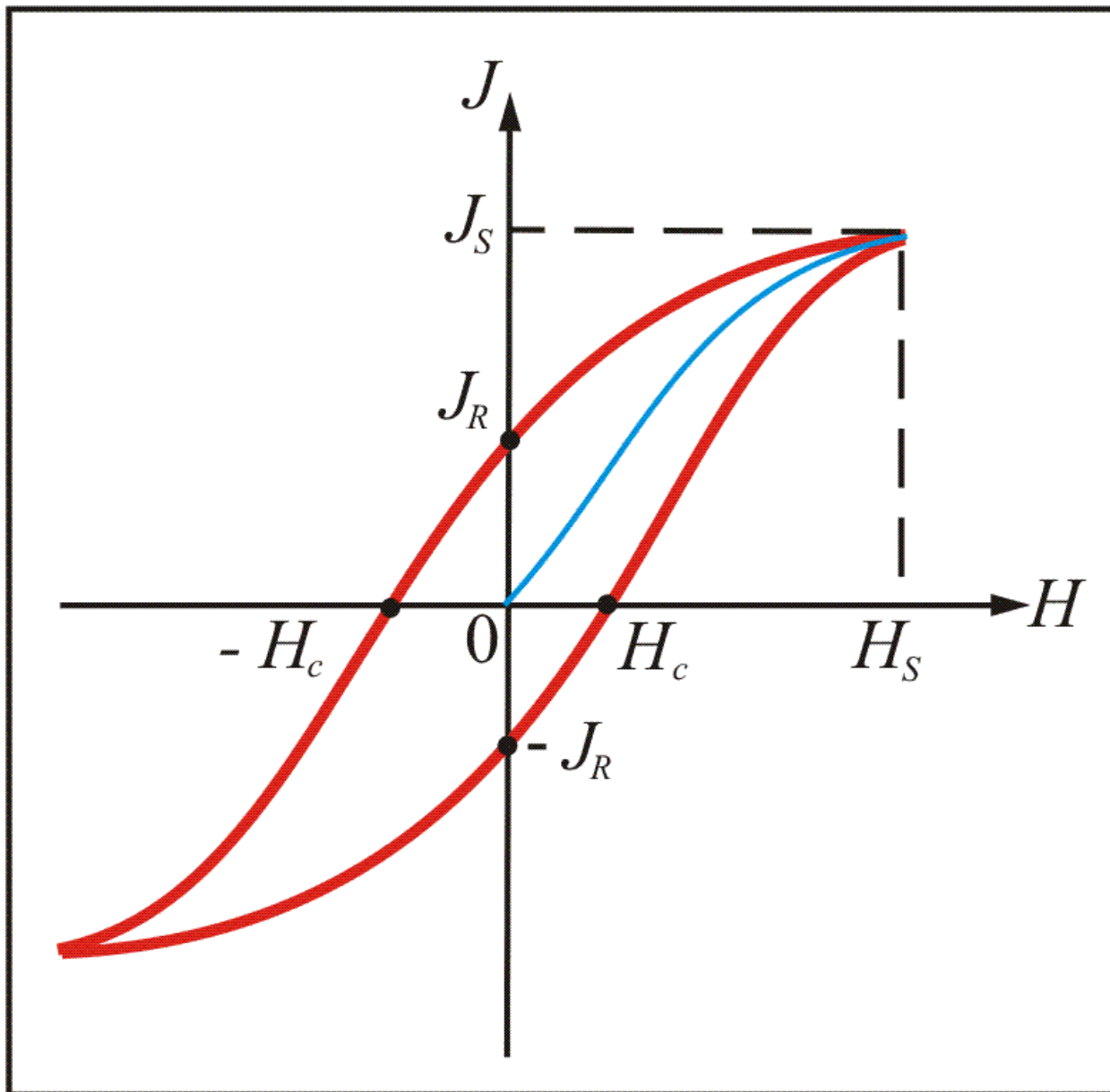
Температура Кюри T_C ферромагнетиков

Материал	Fe	Co	Ni	Gd	Dy	Ho	Tb	Er
Температура Кюри, К	1043	1403	631	289	87	20	25	19,6

5) *Существование магнитного гистерезиса.*

На (рис) показана *петля гистерезиса* – график зависимости **намагниченности** вещества от напряженности магнитного поля H .





J_S - намагниченность насыщения

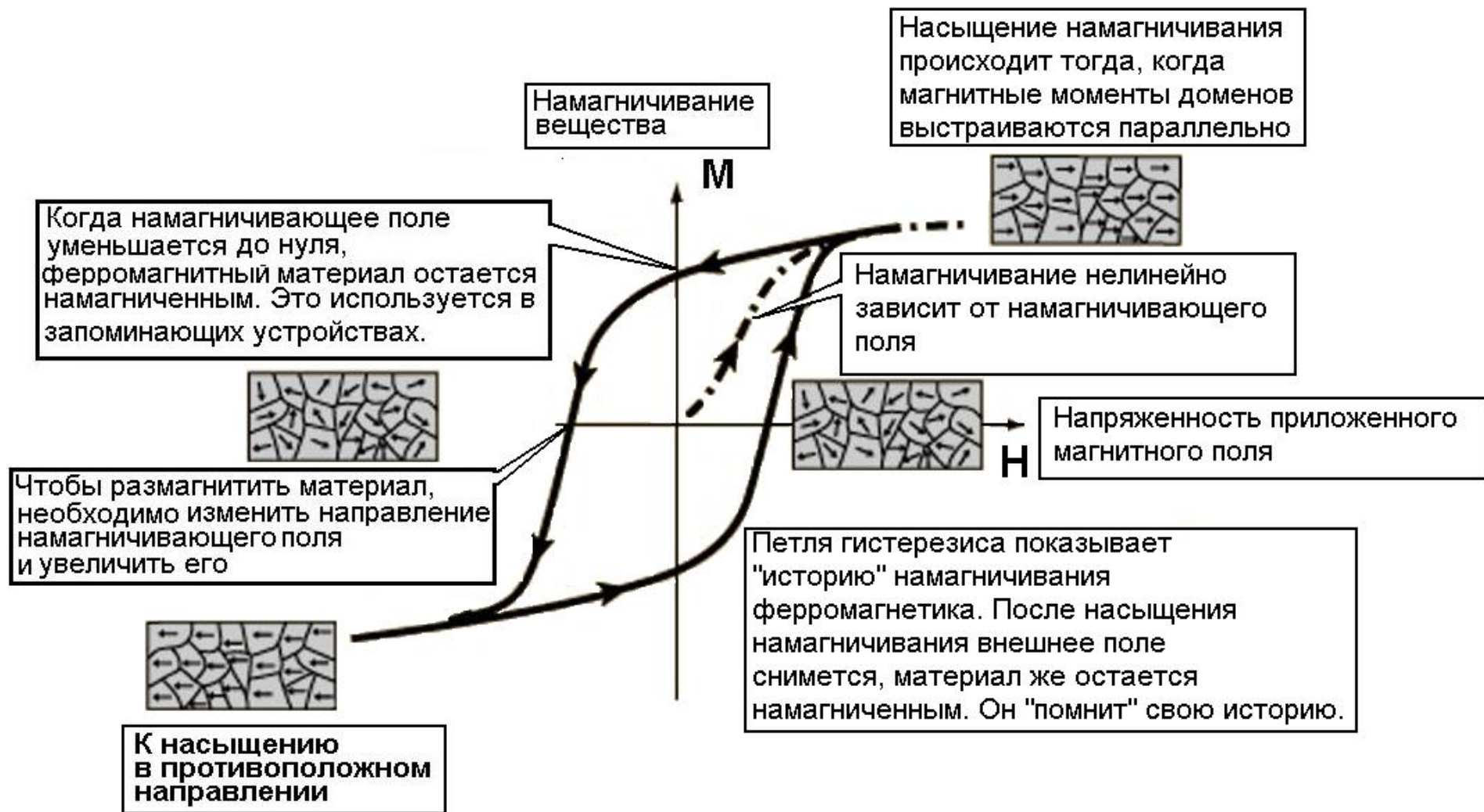
J_R - остаточная намагниченность

H_c - коэрцитивная сила.

Намагниченность J_S при $H = H_S$ называется ***намагниченностью насыщения***.

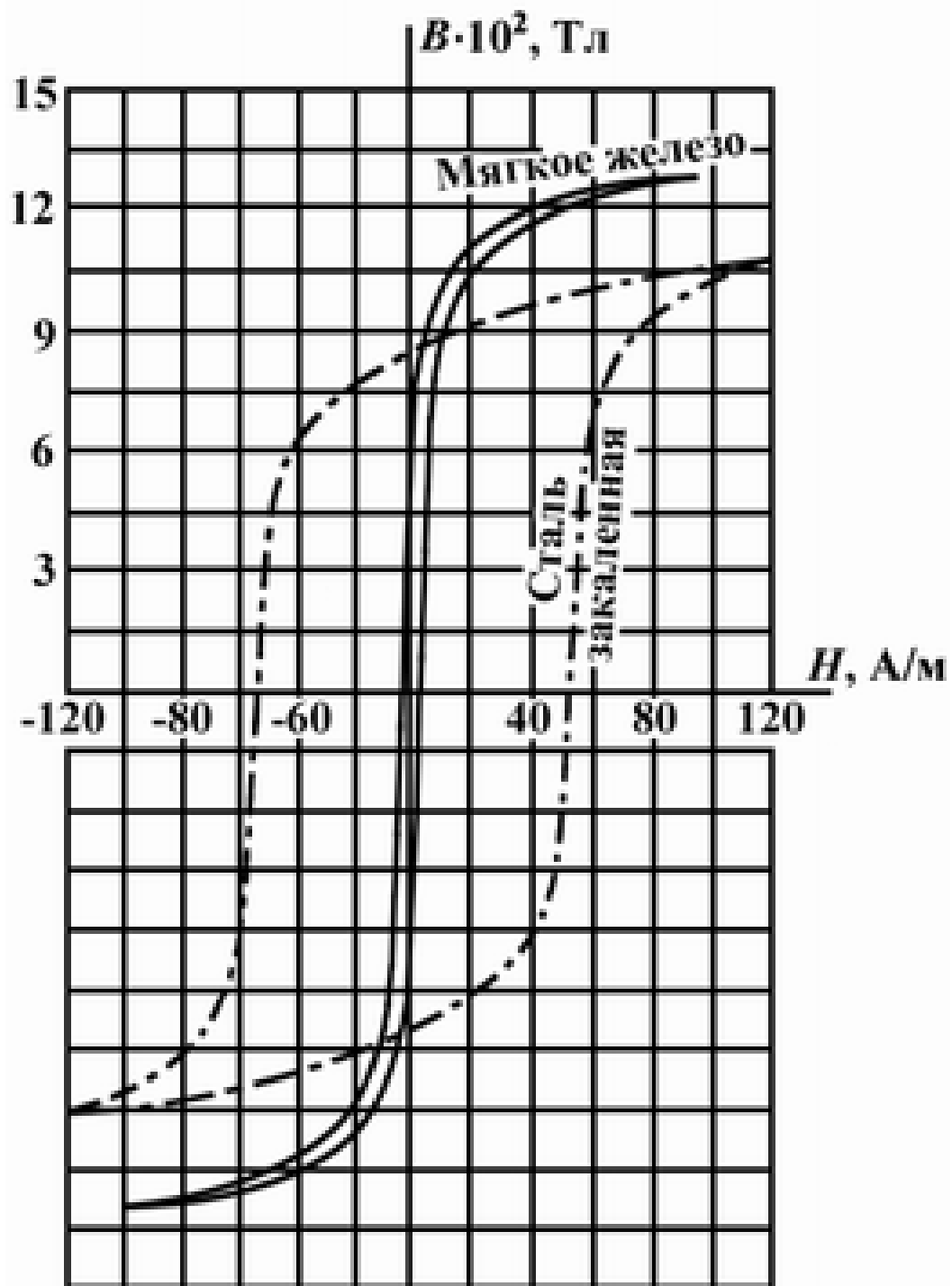
Намагниченность J_R при $H = 0$ называется ***остаточной намагниченностью*** (что служит для создания постоянных магнитов)

Напряженность H_c магнитного поля, полностью размагниченного ферромагнетика, называется коэрцитивной силой. Она характеризует способность ферромагнетика сохранять намагниченное состояние.



Большой коэрцитивной силой (широкой петлей гистерезиса) обладают *магнитотвердые материалы*, используемые для изготовления постоянных магнитов

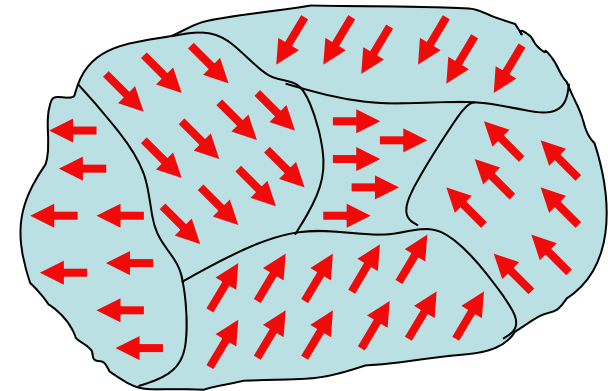
Малую коэрцитивную силу имеют *магнитомягкие материалы* (используются для изготовления трансформаторов).



Ферромагнетизм

Ферромагнитные материалы - наиболее магнитоактивные вещества в мире, и имеют очень большую магнитную восприимчивость, в пределах от 1000 до 100 000

Атомы этих материалов имеют **ПОСТОЯННЫЙ** магнитный момент и они могут образовать систему с другими атомами (с **параллельным** магнитным моментом) в состоянии с более низкой энергией - возникают **микроскопические области**, в которых миллиарды магнитных диполей **объединяются** - эти области называют **магнитными доменами**

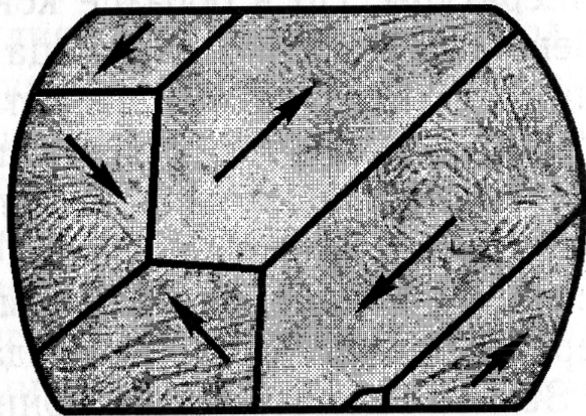


Выше некоторой **критической температуры**, называемой **температурой Кюри**, тепловое движение атомов становится настолько сильным, что **ферромагнитный материал прекращает быть ферромагнетиком**

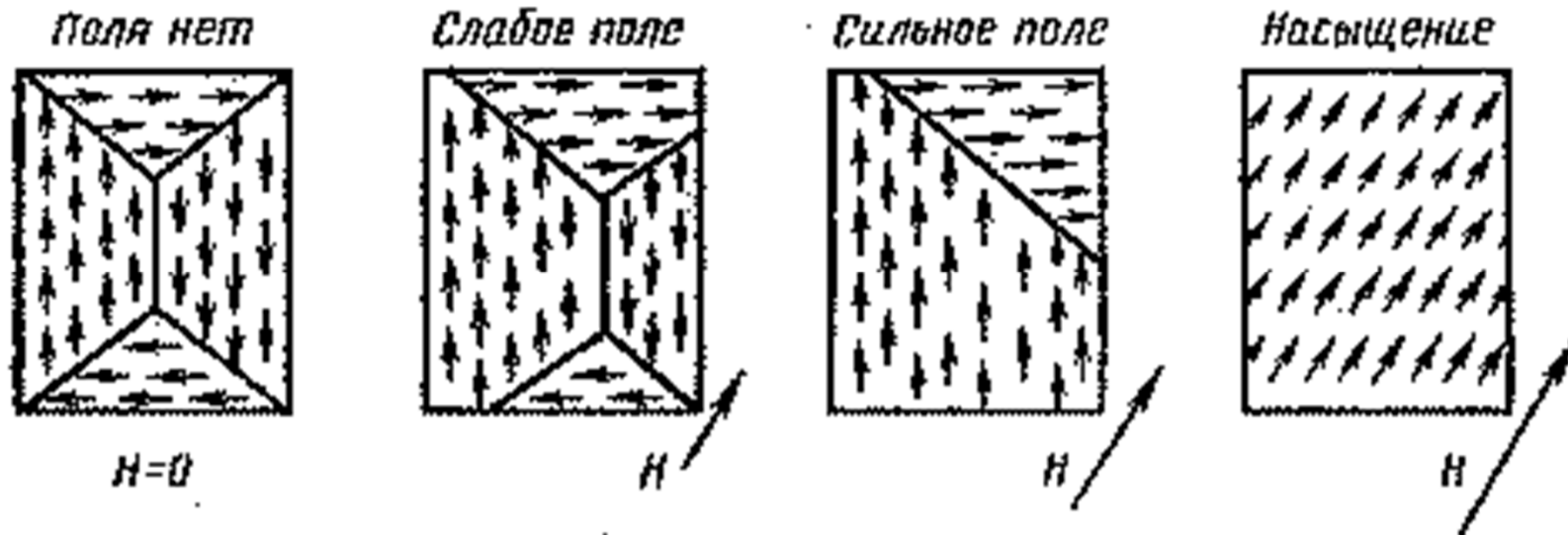
В сильном магнитном поле домены **вынуждены соединяться** в большие области, выровненные по внешнему полю - когда внешнее поле выключают, электроны в оболочках **поддерживают выравнивание**, и магнетизм **ОСТАЕТСЯ** - эту особенность называют **гистерезисом**

Ферромагнетик состоит из доменов.

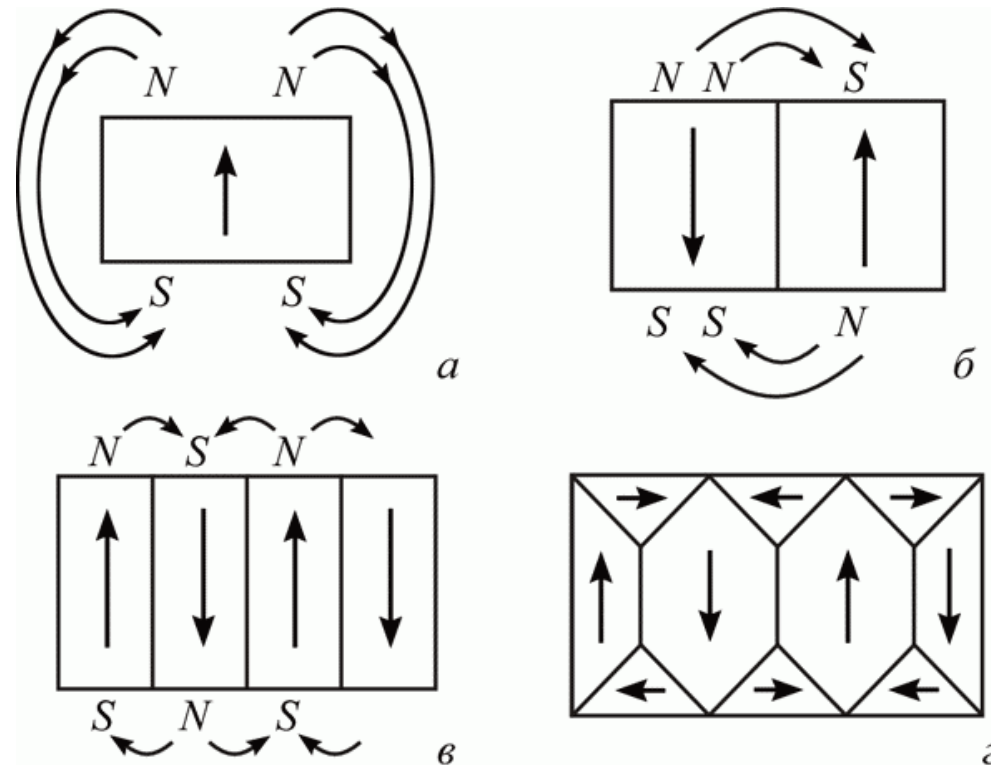
Причина их образования: **сильное взаимодействие спиновых магнитных моментов соседних атомов, которые, стремясь стать параллельными, ориентируются в пределах достаточно большой области – домена.**



б



- Если бы в отсутствие поля кристалл железа был бы единым доменом, то это привело бы к возникновению значительного внешнего магнитного поля, содержащего значительную энергию
- Разбиваясь на домены, ферромагнитный кристалл уменьшает энергию магнитного поля.
- При этом, разбиваясь на косоугольные области, можно получить состояние ферромагнитного кристалла, из которого магнитное поле вообще не выходит.



В монокристалле реализуется такое разбиение на доменные структуры, которое соответствует минимуму свободной энергии ферромагнетика.

Если поместить ферромагнетик, разбитый на домены, во внешнее магнитное поле, то в нем начинается движение доменных стенок. Они перемещаются таким образом, чтобы областей с ориентацией вектора намагниченности по полю стало больше, чем областей с противоположной ориентацией.

По мере нарастания магнитного поля весь кристалл превращается в один большой домен с магнитным моментом, ориентированным по полю

Уравнения Максвелла

Электромагнитная теория
Максвелла (60-е годы 19 века)

Электромагнитная теория Максвелла

- Это последовательная теория единого электромагнитного поля, создаваемого произвольной системой зарядов и токов.
- В ней решается *основная задача электродинамики*: по заданному распределению зарядов и токов отыскиваются основные характеристики создаваемых ими электрических и магнитных полей.

Электромагнитная теория Максвелла

- **феноменологическая теория**, т.е. она не рассматривает механизмы явлений, происходящих в среде и вызывающих появление полей.
- Электрические и магнитные свойства среды характеризуются:

ϵ – относительной диэлектрической проницаемостью (диэлектрическая проницаемость среды — физическая величина, характеризующая свойства изолирующей (диэлектрической) среды и показывающая зависимость электрической индукции от напряжённости электрического поля)

$$D = \epsilon E$$

Электромагнитная теория Максвелла

- **феноменологическая теория**, т.е. она не рассматривает механизмы явлений, происходящих в среде и вызывающих появление полей.
- Электрические и магнитные свойства среды характеризуются:

ϵ – относительной диэлектрической проницаемостью

μ – относительной магнитной проницаемостью

(магнитная проницаемость — физическая величина, коэффициент, зависящий от свойств среды и характеризующий связь между магнитной индукцией и напряжённостью магнитного поля в веществе)

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \qquad \mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

μ_r - относительная, μ - абсолютная магнитная проницаемость

Электромагнитная теория Максвелла

- **феноменологическая теория**, т.е. она не рассматривает механизмы явлений, происходящих в среде и вызывающих появление полей.
- Электрические и магнитные свойства среды характеризуются:

ϵ – относительной диэлектрической проницаемостью

μ – относительной магнитной проницаемостью

σ – удельной электрической проводимостью
(электрическая проводимость — способность тела проводить электрический ток)

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

\vec{J} - плотность тока

Электромагнитная теория Максвелла

рассматривает **макроскопические поля**,

- (а) которые создаются макроскопическими зарядами и токами, сосредоточенными в объемах много больших, чем объем атомов и молекул,
- (б) расстояние от источников полей до рассматриваемой точки пространства много больше размеров атомов и молекул,
- (в) период изменения переменных электрических и магнитных полей много больше периода внутримолекулярных процессов.

Теория Максвелла –

теория *близкодействия*, т.е.
электромагнитное взаимодействие
происходит с конечной скоростью,
равной скорости света c .

Основные положения теории Максвелла

1.

$$\oint_L \vec{E}_B d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S},$$

$$\oint_L \vec{E}_B d\vec{l} = \mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi_B}{dt} (*)$$

Фарадей обнаружил, что в замкнутом контуре возникает индукционный ток: переменное магнитное поле создает в проводящем замкнутом контуре ***вихревое электрическое поле.***

Максвелл предположил, что уравнение (*) справедливо не только для проводящего контура, но и для любого замкнутого контура в пространстве.

Следовательно:

Циркуляция вектора напряженности электрического поля по произвольному замкнутому контуру L равна взятой с обратным знаком скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, натянутую на контур.

$$\oint_L \vec{E}_B d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}.$$

Основные положения теории Максвелла

2. Закон полного тока

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 (I_{\text{макро}} + I_{\text{микро}}), \quad (**)$$

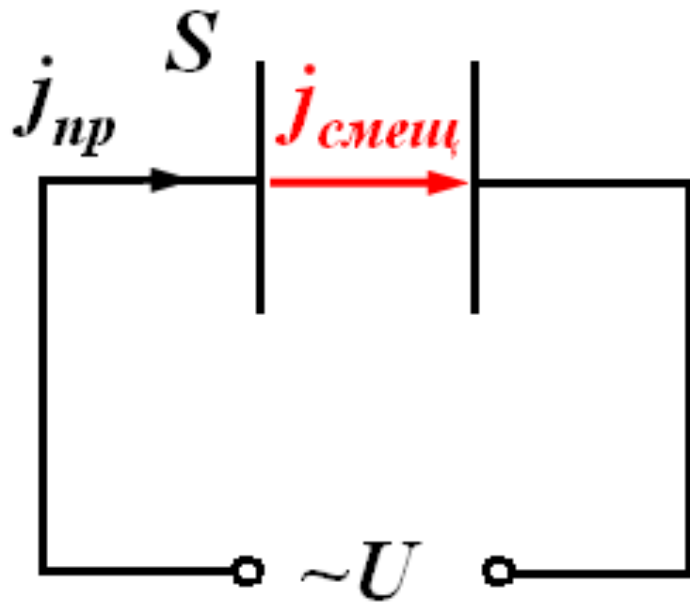
где $I_{\text{макро}}$ – результирующий макроток,

$I_{\text{микро}}$ – микроток сквозь поверхность, натянутую на замкнутый контур L .

- Электрический ток порождает магнитное поле.

Ток смещения

Максвелл предположил, что **переменное электрическое поле подобно электрическому току порождает магнитное поле**, и ввел понятие ***ток смещения***.



Постулируется: линии тока проводимости на границах обкладок конденсатора переходят в линии тока смещения.

Ток смещения

$$j_{np} = j_{см}. \quad (1)$$

$$j_{np} = \frac{I}{S}. \quad (2)$$

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (3)$$

Уравнение (3) показывает, как увеличивается заряд q на обкладках конденсатора C .

Заряд на обкладках конденсатора

$$q = \sigma S. \quad (4)$$

Ток смещения

Ток в цепи $I = S \frac{d\sigma}{dt}$. (5)

С учетом уравнений (1), (2) получаем:

$$j_{см} = \frac{I}{S} = \frac{d\sigma}{dt}. \quad (6)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}, \quad (7)$$

$$D = \varepsilon_0 E = \sigma. \quad (8)$$

$$j_{см} = \frac{dD}{dt}. \quad (9)$$

$$\vec{j}_{см} = \frac{d\vec{D}}{dt}. \quad (10)$$

D - [электрическая индукция](#)

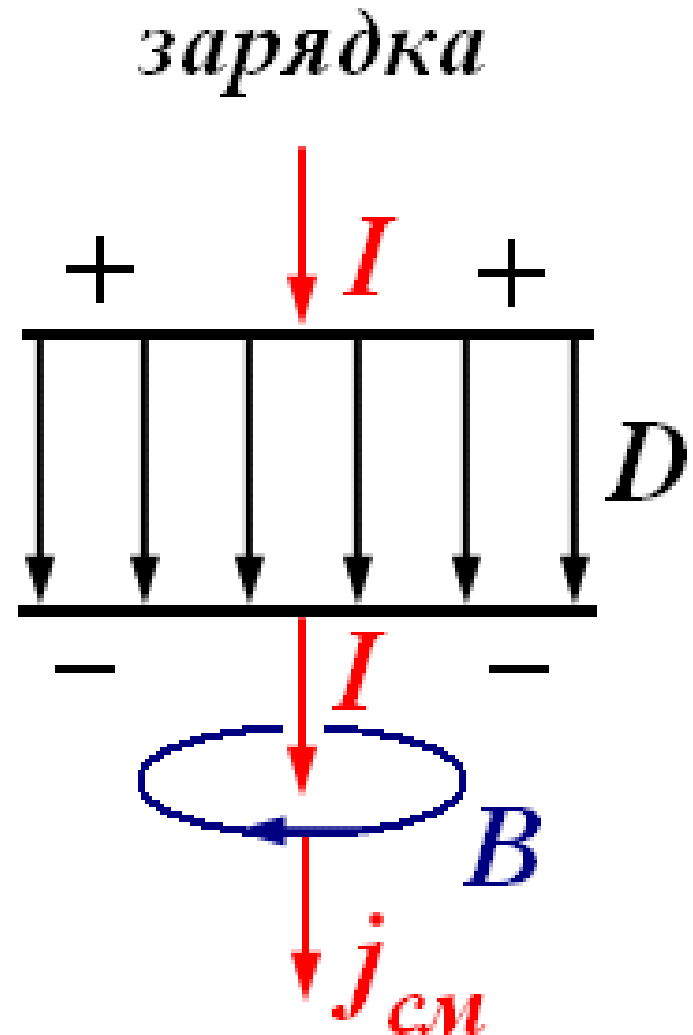
$$\vec{j}_{см} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\vec{D} \uparrow \uparrow \vec{E}$$

- Конденсатор заряжается

Электрическое поле
возрастает,
вектор \mathbf{D}
увеличивается,

$$\vec{j}_{см} \uparrow \uparrow \vec{D}.$$

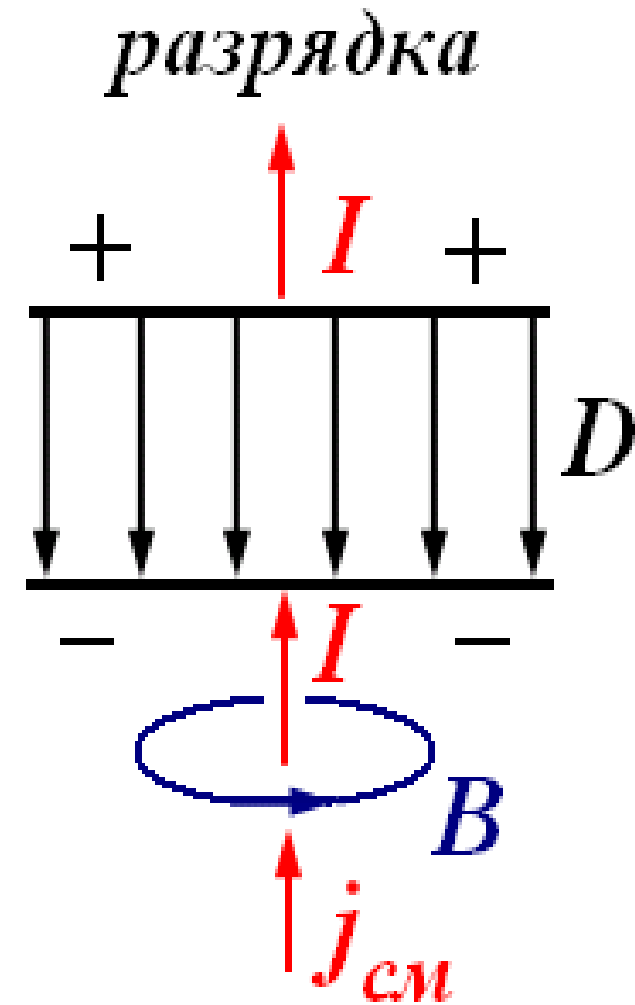


- Конденсатор разряжается.

Электрическое поле
убывает,
вектор \mathbf{D} уменьшается,

$$\vec{j}_{см} \uparrow \downarrow \vec{D}.$$

$$\begin{aligned} I_{смиц} &= \int_S \vec{j}_{смиц} d\vec{S} = \\ &= \int_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} d\vec{S} = \frac{\partial}{\partial t} \oint_S \vec{D} d\vec{S} = \frac{\partial \Phi_D}{\partial t} \end{aligned}$$



Максвелл приписал току смещения только одно общее свойство с током проводимости – *способность создавать в окружающем пространстве магнитное поле.*

Следствия:

- 1) ток смещения не является направленным движением заряженных частиц, поэтому может существовать в вакууме,
- 2) протекание тока смещения не приводит к выделению тепла, поэтому проводник не нагревается.

Закон полного тока: $\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S (j_{полн}) d\vec{S}.$

В нашем случае:

$$j_{полн} = j_{пр} + j_{см} = j + \frac{\partial D}{\partial t} \quad \Rightarrow$$

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}.$$

Циркуляция вектора **H** напряженности магнитного поля по произвольному замкнутому контуру L равна алгебраической сумме макротоков и тока смещения сквозь поверхность, натянутую на этот контур.

Система уравнений Максвелла в интегральной форме

1.
$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}.$$

2.
$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0.$$

3.
$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}.$$

4.
$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV.$$

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}.$$

1. Циркуляция вектора напряженности ***E*** вихревого электрического поля по замкнутому контуру равна скорости изменения магнитного потока через площадь контура, взятую с обратным знаком.
 - закон электромагнитной индукции,
 - первое положение теории Максвелла.

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0.$$

2. Поток вектора индукции **B** магнитного поля через любую замкнутую поверхность равен нулю.
- силовые линии магнитного поля замкнуты.

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}.$$

3. Циркуляция вектора напряженности ***H*** магнитного поля по замкнутому контуру равна алгебраической сумме токов, пронизывающих этот контур.

Закон полного тока.

Физический смысл: магнитное поле порождается не только током проводимости, но и переменным электрическим полем.

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV.$$

4. Поток вектора электрической индукции \mathbf{D} через любую замкнутую поверхность равен сумме свободных зарядов, охватываемых этой поверхностью.

Теорема Гаусса для вектора \mathbf{D} .

Физический смысл: электрическое поле может создаваться нескомпенсированными электрическими зарядами.

Уравнения Максвелла в дифференциальной форме

Переход к уравнениям Максвелла в
дифференциальной форме осуществляется
на основании

теоремы Остроградского-Гаусса:

$$\oint_S \vec{A} d\vec{S} = \int_V \operatorname{div} \vec{A} dV,$$

теоремы Стокса:

$$\oint_L \vec{A} d\vec{l} = \int_S \operatorname{rot} \vec{A} d\vec{S}.$$

Уравнения Максвелла в дифференциальной форме

1.
$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}.$$

2.
$$\operatorname{div} \vec{B} = 0.$$

3.
$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}.$$

4.
$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho.$$

Из уравнений Максвелла следует

- 1) Электрическое и магнитное поля взаимосвязаны, т.е. в общем случае электрическое и магнитное поля не могут существовать независимо друг от друга. Следовательно, существует единое *электромагнитное поле*.
- 2) Уравнения Максвелла являются инвариантными относительно преобразований Лоренца, т.е. их вид не меняется при переходе от одной ИСО к другой.

Из уравнений Максвелла следует

3) В общем случае уравнения Максвелла не симметричны.

$$\operatorname{rot}\vec{E} = - \underbrace{\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}}_{\substack{\text{одно} \\ \text{слагаемое}}} ; \quad \operatorname{rot}\vec{H} = \underbrace{\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}}_{\substack{\text{два} \\ \text{слагаемых}}}.$$

Если среда не содержит свободных зарядов ($\rho = 0$) и в ней нет токов проводимости ($j = 0$), то уравнения становятся более

симметричными

$$\operatorname{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}; \quad \operatorname{rot}\vec{H} = \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}.$$

$$\operatorname{div}\vec{B} = 0; \quad \operatorname{div}\vec{D} = 0.$$

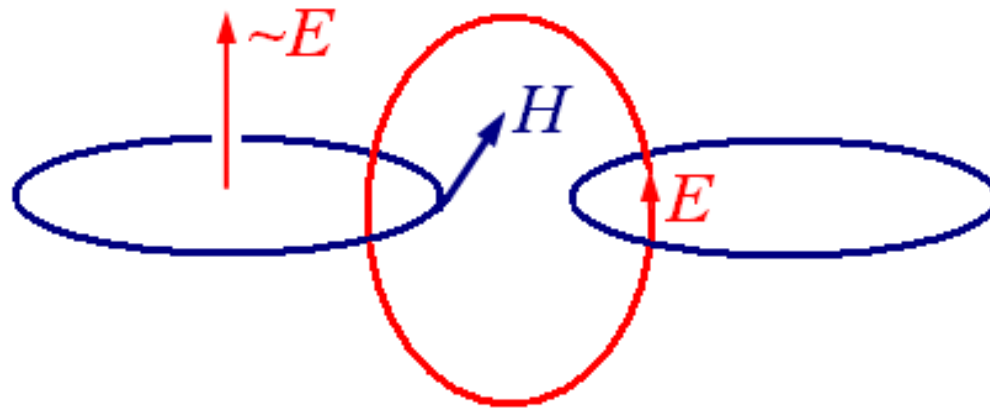
и отличаются только знаками первых двух уравнений

Различие в знаках правых частей уравнений Максвелла является необходимым условием существования устойчивого электромагнитного поля.

Если бы знаки при $\partial \mathbf{B} / \partial t$ и $\partial \mathbf{D} / \partial t$ были одинаковы, то бесконечно малое увеличение одного из полей привело бы к неограниченному возрастанию обоих полей, и наоборот.

Из уравнений Максвелла следует

4) Возникновение электромагнитной волны.



Для расчета полей в среде система уравнений Максвелла дополняется уравнениями, которые характеризуют электрические и магнитные свойства среды – *материальные уравнения Максвелла*:

$$\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E},$$

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H},$$

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E}_{\text{кул}} + \vec{E}_i).$$

Система статических уравнений Максвелла

В случае, когда вектора \mathbf{D} и \mathbf{B} не зависят от времени, т.е. \mathbf{D} и $\mathbf{B} = const$, система уравнений Максвелла принимает вид:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0, \quad \text{rot} \vec{E} = 0.$$

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0, \quad \text{div} \vec{B} = 0.$$

$$\oint_S \vec{H} d\vec{l} = \int_S \vec{j} d\vec{S}, \quad \text{rot} \vec{H} = \vec{j}.$$

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV, \quad \text{div} \vec{D} = \rho.$$

Значение теории Максвелла

1. Показал, что электромагнитное поле – это совокупность взаимосвязанных электрических и магнитных полей.
2. Предсказал существование электромагнитных волн, распространяющихся от точки к точке с конечной скоростью.
3. Показал, что световые волны являются электромагнитными волнами.
4. Связал воедино электричество, магнетизм и оптику.