37 Магнитное поле в неферромагнитной среде

Электромагнитное поле представляет собой совокупность взаимно связанных электрического и магнитного полей. Таким образом, магнитное поле есть одна из сторон электромагнитного поля. Магнитное поле постоянного тока создается неизменными во времени токами, протекающими по проводящим телам, неподвижным в пространстве по отношению к наблюдателю. Магнитное поле постоянного тока можно рассматривать отдельно от электрического поля.

Основное свойство неизменного во времени магнитного поля – силовое воздействие его на проводник с током. Интенсивность магнитного поля в каждой точке пространства характеризуется вектором магнитной индукции $\vec{B}$, $[B]$ = Тл (тесла). Индукцию $\vec{B}$ можно определить по силе, с которой действует магнитное поле на проводник длиной $d\vec{l}$ с током согласно закону Ампера:

Закон магнитной индукции Ампера устанавливает взаимосвязь между током I в проводнике и силой F_m, действующей на этот проводник, если он находится в равномерном магнитном поле с индукцией B:

$$F_m = I\,B\,l\,\sin\alpha, \qquad (3)$$

где l – длина проводника;

α – угол между током и магнитной индукцией (рисунок 1).

Сила Ампера направлена перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы dl и B.

Магнитная индукция – это силовая характеристика магнитного поля. Для определения направления силы, действующей на проводник с током, помещенный в магнитное поле, применяется правило левой руки (см. рисунок 1).

Магнитная индукция – векторная физическая **величина**, являющаяся силовой характеристикой магнитного поля.

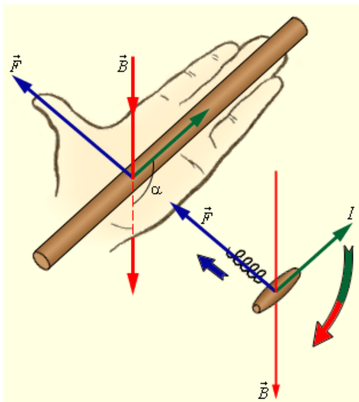

Рисунок 1 – Правило левой руки и правило буравчика

)

Механическое воздействие магнитного поля на проводник с током максимально, когда $\vec{B}$ и $d\vec{l}$ взаимно перпендикулярны.

Большой практический интерес представляет выражение силы, действующей на прямолинейный проводник с током в равномерном магнитном поле, в котором на элемент длины провода (в любом месте) действует одинаковая электромагнитная сила. На основании выражения (5.1) можно записать выражение силы, действующей на часть провода l, расположенного в пределах магнитного поля:

$$F = BIl\sin\alpha, \tag{5.2}$$

где α – угол между направлением вектора магнитной индукции $\vec{B}$ и длиной провода l с током I.

Если α = 90°, т. е. провод с током расположен перпендикулярно линиям магнитной индукции, то

$$F = BIl. \tag{5.3}$$

На провод с током, расположенный вдоль линий магнитной индукции, магнитное поле не действует.

Сила F направлена всегда перпендикулярно плоскости, в которой лежит провод и находятся линии магнитной индукции. Направление электромагнитной силы наиболее удобно определять по правилу левой руки: необходимо расположить левую руку так, чтобы вытянутые четыре пальца показывали направление тока в проводе, а линии магнитной индукции «входили» в ладонь, тогда большой палец, отогнутый перпендикулярно остальным четырем, покажет направление электромагнитной силы.

5.2. Линии магнитной индукции

Графически магнитное поле изображают при помощи линий магнитной индукции.

Линии вектора магнитной индукции проводника с током имеют вид концентрических окружностей с центром на оси провода (рис. 5.2).

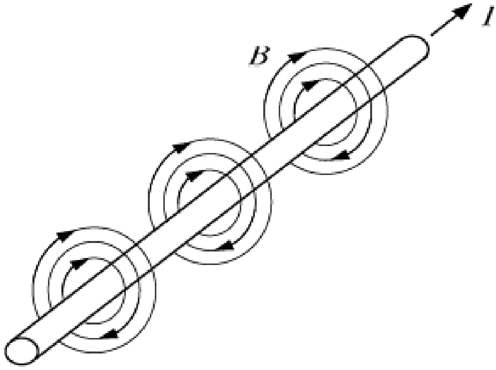

Рис. 5.2. Магнитное поле проводника с током

Касательная, проведенная к каждой точке линии магнитной индукции, совпадает по направлению с вектором $\vec{B}$. Направление линий магнитной индукции определяется правилом правоходового винта: если вращать винт так, чтобы острие его перемещалось по току, то направление вращение головки винта совпадет с направлением линий.

Практический интерес представляет картина магнитного поля тока катушек, так как во многих электротехнических устройствах (трансформаторы, электрические машины, электромагнитные реле и т. д.) магнитное поле создается токами в катушках различной формы.

Магнитное поле тока цилиндрической катушки изображено на рисунке 5.3. Если длина катушки значительно больше ее диаметра, то линии магнитной индукции имеют внутри катушки одинаковое направление (вдоль оси катушки) и величина магнитной индукции во всех точках одинакова, за исключением точек, расположенных у краев.

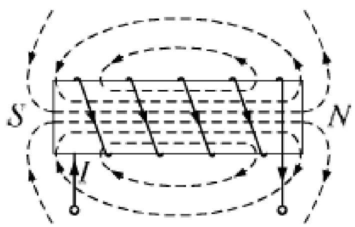

Рис. 5.3. Магнитное поле цилиндрической катушки

Магнитное поле, имеющее во всех точках одинаковую по величине и направлению магнитную индукцию, называется *однородным* (*равномерным*).

По форме магнитного поля цилиндрическая катушка подобна постоянному магниту. На конце катушки, где линии магнитной индукции выходят из нее, образуется северный полюс, а на противоположном конце – южный.

Направление линий магнитной индукции поля тока катушки или контура определяется правилом правого буравчика в следующей формулировке: если рукоятку буравчика вращать по направлению тока в витках, то поступательное перемещение острия буравчика совпадает с направлением линий магнитной индукции внутри катушки.

Линии индукции магнитного поля всегда замкнуты на себя, т. е. не имеют ни начала, ни конца.

5.3. Напряженность магнитного поля. Магнитная проницаемость среды

Величина индукции магнитного поля зависит как от значения тока, так и от среды, окружающей проводник. Опыт показывает, что любое вещество, внесенное в магнитное поле, намагничивается. Внутримолекулярные токи под действием внешнего поля определенным образом ориентируются, и их магнитное поле в сочетании с внешним образует результирующее магнитное поле.

Если хотят охарактеризовать магнитный эффект тока вне зависимости от среды, то рассматривают другую векторную величину – напряженность магнитного поля $\vec{H}$, связанную с вектором магнитной индукции $\vec{B}$ соотношением

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_a},$$

где μ_a – абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м.

Напряженность магнитного поля H измеряется в амперах на метр (А/м).

Абсолютная магнитная проницаемость $\mu_а$ характеризует магнитные свойства вещества, в котором существует магнитное поле:

$$\mu_а = \mu_0 \mu_r,$$

где μ_0 – магнитная постоянная, или магнитная проницаемость, вакуума;

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}.$$

Величина μ_r называется относительной магнитной проницаемостью и показывает, во сколько раз магнитное поле в веществе получается сильнее (или слабее), чем в вакууме, при прочих равных условиях, т. е.

$$\mu_r = \frac{\mu_а}{\mu_0}.$$

При решении большинства электротехнических задач достаточно подразделять все вещества на сильномагнитные (ферромагнитные), у которых $\mu_r >> 1$, и слабомагнитные (практически немагнитные), у которых $\mu_r = 1$.

К ферромагнитным веществам относятся железо, никель, кобальт и некоторые их сплавы. Ферромагнитные вещества имеют особое значение в электротехнике, поэтому их магнитные свойства будут рассмотрены в пп. 5.10, 5.11.

5.4. Магнитный поток

Магнитное поле можно характеризовать скалярной величиной – магнитным потоком

$$\Phi = \int \vec{B} d\vec{S},$$

где $d\vec{S}$ – вектор элементарной площадки поверхности S.

В практике бывают случаи, когда магнитное поле можно считать равномерным, а поверхность, через которую определяют магнитный поток, – плоскостью, тогда

$$\Phi = BS\cos\alpha,$$

где α – угол между линией магнитной индукции и перпендикуляром к поверхности S.

Если угол $\alpha = 0$, т. е. линии магнитной индукции направлены перпендикулярно к плоскости S, то магнитный поток

$$\Phi = BS. \tag{5.3}$$

Согласно формуле (5.3), магнитная индукция является плотностью магнитного потока в данной точке поля.

Единица измерения магнитного потока – вебер (Вб).

5.5. Закон полного тока. Магнитное поле прямолинейного проводника с током

Закон полного тока устанавливает связь между электрическим током и его магнитным полем. Читается он следующим образом: линейный интеграл от вектора напряженности магнитного поля вдоль замкнутого контура равен алгебраической сумме токов, охватываемых этим контуром:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \sum I.$$

Положительное направление тока связано с обходом контура правилом буравчика.

Данная интегральная форма записи закона полного тока используется для расчета магнитных полей, имеющих симметрию, например поля уединенного проводника с током.

Пусть требуется определить напряженность магнитного поля в точке, удаленной от центра проводника на расстояние R (рис. 5.4).

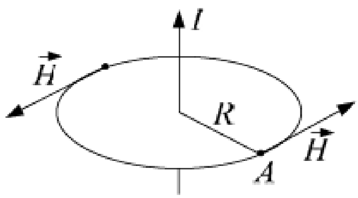

Рис. 5.4. Определение напряженности магнитного поля в точке A

Проведем окружность вокруг проводника радиусом R и возьмем линейный интеграл от вектора напряженности магнитного поля вдоль этой окружности. В силу симметрии значение H на расстоянии R от оси проводника будет одинаковым. Векторы $\vec{H}$ и $d\vec{l}$ будут совпадать по направлению, поскольку они направлены по касательной к окружности. Поэтому

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \oint H dl \cos\ 0° = H \oint dl = H 2\pi R = I;$$

$$H = \frac{I}{2\pi R}, \qquad (5.4)$$

где l – длина окружности; $l = 2\pi R$.

По мере удаления от провода напряженность магнитного поля убывает.

5.6. Сила взаимодействия двух проводов с током в линии электропередачи

Определим силу взаимодействия двух параллельных проводов с током (рис. 5.5).

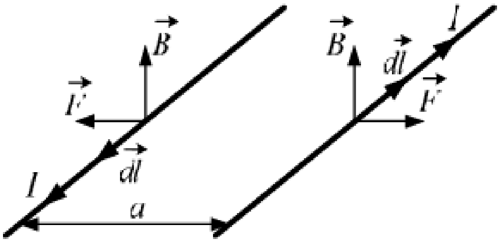

Рис. 5.5. Двухпроводная линия электропередачи

В двухпроводной линии электропередачи токи в проводах направлены навстречу друг другу. Каждый провод находится в магнитном поле, созданном током соседнего провода. Направление вектора магнитной индукции $\vec{B}$ определяется по правилу правоходового винта.

Согласно закону Ампера (уравнение (5.2)), сила, действующая на правый провод,

$$F = IlB\sin\alpha,$$

где α – угол между вектором $\vec{B}$ и вектором $d\vec{l}$.

Вектор $d\vec{l}$ и ток в элементе длины проводника имеют одинаковое направление. В рассматриваемом случае $\alpha = 90°$, следовательно,

$$F = BIl,$$

где l – длина провода.

Согласно закону полного тока, напряженность магнитного поля от тока левого провода на расстоянии a находится из выражения (5.4), учитывая, что для рассматриваемого случая $R = a$:

$$H = \frac{I}{2\pi a}.$$

Соответственно магнитная индукция

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi a},$$

а сила, действующая на правый провод,

$$F = \mu_0 \frac{I^2 l}{2\pi a}.$$

Такая же сила будет действовать и на левый провод. Направление силы определяется по правилу левой руки. Действующие силы (см. рис. 5.5) отталкивают провода друг от друга.

5.7. Магнитное потокосцепление. Собственная индуктивность

Если на прямоугольную рамку намотать N витков из проводника и пропустить по ним ток I, то магнитный поток Φ, созданный этим током, будет пронизывать поверхность, ограниченную контуром рамки, т. е. магнитный поток Φ будет сцеплен с этим контуром.

Произведение числа витков и сцепленного с этими витками магнитного потока называется *потокосцеплением*:

$$\Psi = N\Phi.$$

Потокосцепление, характеризующее связь тока с собственным магнитным полем, называется *собственным* или *потокосцеплением самоиндукции*.

Магнитный поток Ф создан электрическим током, следовательно, собственное потокосцепление Ψ катушки прежде всего зависит от тока в катушке. Кроме того, на потокосцепление будут влиять число витков, форма, размеры контура и среда, в которой создается магнитное поле. Для учета этого влияния введено понятие индуктивности катушки (контура):

$$\Psi = LI, \tag{5.5}$$

где L – индуктивность, Гн.

Из выражения (5.5) видно, что собственная индуктивность катушки, характеризующая связь собственного потокосцепления и тока, численно равна отношению собственного потокосцепления катушки к току в ней:

$$L = \frac{\Psi}{I}. \tag{5.6}$$

В неферромагнитной среде отношение (5.6) для данной катушки (контура) остается неизменным, т. е. не зависит от значений тока и потокосцепления.

В практических расчетах индуктивность часто выражается в долях генри: миллигенри (мГн) или микрогенри (мкГн).

1 мГн = 10^{-3} Гн; 1 мкГн = 10^{-6} Гн.

5.8. Взаимная индуктивность. Коэффициент связи

Рассмотрим магнитную связь двух катушек (контуров), удаленных друг от друга на некоторое расстояние (рис. 5.6).

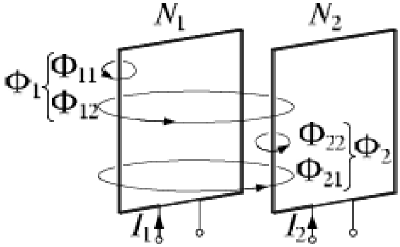

Рис. 5.6. Магнитная связь между катушками

В первой катушке с числом витков N_1 протекает ток I_1, во второй с числом витков N_2 – ток I_2.

Поток Φ_1, создаваемый током I_1, частично замыкается, минуя второй контур (Φ_{11}), частично проходит через него (Φ_{12}). Для удобства на рисунке 5.6 изображено только по одной линии магнитной индукции каждого из потоков.

В свою очередь поток Φ_2, созданный током I_2, частично замыкается, минуя первый контур (Φ_{22}), частично проходит через него (Φ_{21}).

Собственное потокосцепление первой катушки

$$\Psi_1 = \Phi_1 N_1 = L_1 I_1.$$

Взаимное потокосцепление первой катушки

$$\Psi_{21} = \Phi_{21} N_1.$$

Взаимное потокосцепление первой катушки можно записать пропорционально току I_2, создающему поток Φ_{21}:

$$\Psi_{21} = MI_2. \tag{5.7}$$

Собственное потокосцепление второй катушки

$$\Psi_2 = \Phi_2 N_2 = L_2 I_2.$$

Взаимное потокосцепление второй катушки

$$\Psi_{12} = \Phi_{12} N_2.$$

Взаимное потокосцепление второй катушки пропорционально току I_1, создающему поток Φ_{12}:

$$\Psi_{12} = MI_1. \tag{5.8}$$

Коэффициент M называют взаимной индуктивностью контуров (катушек). Он зависит от размеров и формы контуров, от их взаимного расположения, числа витков и от магнитных свойств среды. Взаимная индуктивность измеряется в генри (Гн).

Из выражений (5.7) и (5.8) видно, что взаимная индуктивность двух катушек (контуров) численно равна отношению взаимного потокосцепления одной катушки к току в другой катушке:

$$M = \frac{\Psi_{21}}{I_2} = \frac{\Psi_{12}}{I_1}.$$

Под коэффициентом связи K двух магнитно-связанных контуров с индутивностями L_1, L_2 и взаимной индуктивностью M понимают отношение M к $\sqrt{L_1 L_2}$:

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}.$$

Коэффициент связи теоретически может изменяться от 0 до 1.

Коэффициент связи $K = 1$, если весь поток, создаваемый первым контуром, будет сцепляться со вторым. Практически такого достигнуть сложно, поэтому всегда $K < 1$.

В системе магнитно-связанных контуров (катушек) различают согласное и встречное включение.

В общем случае полное потокосцепление первой катушки

$$\Psi_{1\text{полн}} = (\Phi_1 \pm \Phi_{21})N_1 = \Psi_1 \pm \Psi_{21}. \tag{5.9}$$

Полное потокосцепление второй катушки

$$\Psi_{2\text{полн}} = (\Phi_2 \pm \Phi_{12})N_2 = \Psi_2 \pm \Psi_{12}. \tag{5.10}$$

Знак «+» в выражениях (5.9) и (5.10) следует ставить в том случае, если взаимный поток будет направлен согласно с собственным потоком, создаваемым током данного контура. При несогласном (встречном) направлении следует ставить знак «–».

Изменяя направление тока или направление намотки одной из катушек, получают согласное или встречное включение.

При встречном включении катушек можно добиться такого положения, когда потоки обеих катушек, определенные порознь, равны, а результирующий поток равен нулю.

Если требуется получить катушку практически без индуктивности, можно применить бифилярную обмотку, которая выполняется проводом, сложенным вдвое.

Магнитный поток, а следовательно, и индуктивность бифилярно намотанной катушки практически равны нулю, так как каждый виток ее состоит из двух проводников с противоположным направлением тока (рис. 5.7).

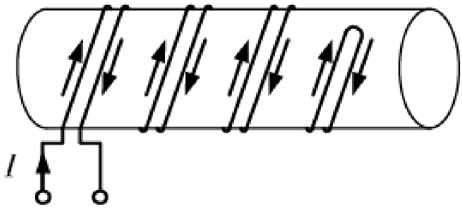

Рис. 5.7. Катушка с бифилярной обмоткой

5.9. Магнитное поле, индуктивность катушки на кольцевом сердечнике и цилиндрической катушки

Если на кольцевой сердечник – тороид, выполненный из материала с магнитной проницаемостью $\mu_а > \mu_0$, нанести обмотку так, что витки будут плотно охватывать тороид по всей длине, то весь магнитный поток практически будет сосредоточен в сердечнике (рис. 5.8). Линии вектора напряженности $\vec{H}$ представляют собой окружности, сцепляющиеся со всеми витками.

По закону полного тока

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \oint H dl \cos 0 = H \oint dl = H 2\pi R = IN;$$

$$H = \frac{IN}{2\pi R};$$

$$B = \mu_а H = \frac{\mu_а IN}{2\pi R}.$$

Как видим, магнитное поле в сердечнике неравномерное. Магнитная индукция B зависит от R.

Если $\frac{R_2}{R_1} < 1{,}5$, т. е. R_1 и R_2 незначительно отличаются друг от друга, то можно считать, что магнитное поле в тороиде распределено равномерно, и расчет следует вести по средней линии сердечника l и площади сечения тороида S.

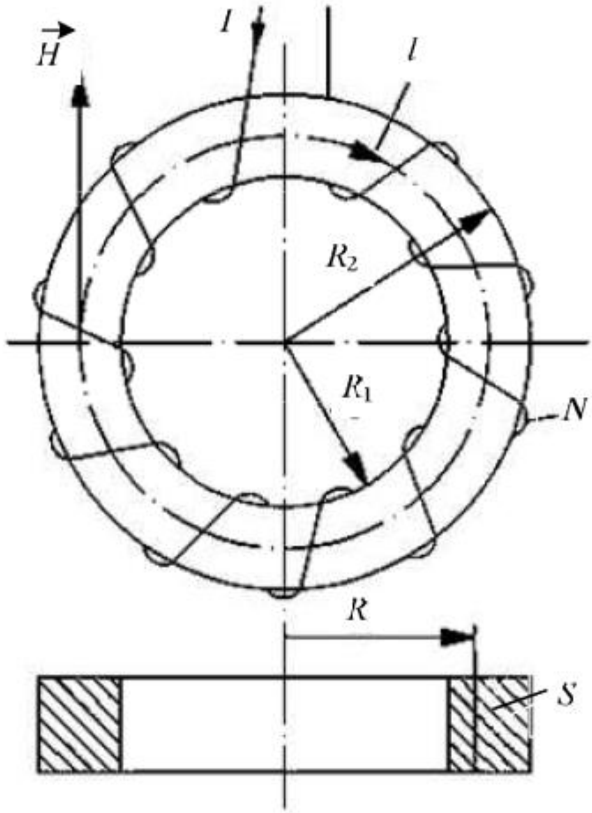

Рис. 5.8. К расчету индуктивности катушки на кольцевом сердечнике

Тогда напряженность магнитного поля

$$H = \frac{IN}{l}.$$

Магнитная индукция

$$B = \mu_а H = \frac{\mu_а IN}{l}. \tag{5.11}$$

Магнитный поток

$$\Phi = BS = \frac{\mu_а NS}{l}.$$

Потокосцепление $\Psi = \Phi N$.

Индуктивность кольцевой катушки

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{\mu_a N^2 S}{l}. \qquad (5.12)$$

Формула (5.12) может быть использована также для определения индуктивности катушки на цилиндрическом сердечнике (соленоиде) (рис. 5.9), рассматривая его как тороид бесконечно большого радиуса.

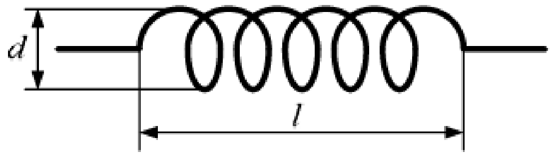

Рис. 5.9. Катушка на цилиндрическом сердечнике

Для катушки конечной длины l с $\mu_a = \mu_0$, т. е. с неферромагнитным сердечником, можно записать

$$L = K\frac{\mu_0 N^2 S}{l},$$

где коэффициент $K < 1$, учитывающий, что не весь магнитный поток в такой катушке пронизывает все витки. Он зависит от отношения диаметра d витков катушки к ее длине l; при $\frac{d}{l} = 0{,}1$ коэффициент $K = 0{,}96$, при $\frac{d}{l} < 0{,}1$ принимают $K \approx 1$.

Пример 5.1. Определить индуктивность катушки на кольцевом неферромагнитном сердечнике прямоугольного поперечного сечения $S =$ $= 8$ см^2, имеющем наружный радиус $R_2 = 11$ см, внутренний $R_1 = 9$ см, число витков $N = 1000$ (см. рис. 5.8).

Решение. По формуле (5.12) индуктивность кольцевой катушки

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l}.$$

Длина средней линии кольцевого сердечника

$$l = 2\pi\frac{(R_1 + R_2)}{2} = 2\pi\frac{(0{,}11 + 0{,}09)}{2} = 2\pi\cdot 10\cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Находим

$$L = 4\pi\cdot 10^{-7}\frac{1000^2\cdot 8\cdot 10^{-4}}{2\pi\cdot 10\cdot 10^{-2}} = 16\cdot 10^{-4} \text{ Гн} = 1{,}6 \text{ мГн.}$$

Пример 5.2. На кольцевой сердечник из неферромагнитного материала, диаметр которого по средней линии D = 20 см, намотаны две обмотки с числом витков N_1 = 800 и N_2 = 300. Определить магнитную индукцию в центре сечения сердечника при согласном и встречном включении обмоток и токе в них I = 5 А.

Решение. В соответствии с формулами (5.9)–(5.11) магнитная индукция при согласном включении обмоток

$$B_{\text{согл}} = \mu_0 I\frac{N_1 + N_2}{l}.$$

При встречном включении обмоток

$$B_{\text{встр}} = \mu_0 I\frac{N_1 - N_2}{l}.$$

Длина средней линии сердечника $l = \pi D = \pi\cdot 20\cdot 10^{-2}$ м.

Находим

$$B_{\text{согл}} = 4\pi\cdot 10^{-7}\cdot 5\cdot\frac{800 + 300}{\pi\cdot 20\cdot 10^{-2}} = 1{,}1\cdot 10^{-2} \text{ Тл;}$$

$$B_{\text{встр}} = 4\pi\cdot 10^{-7}\cdot 5\cdot\frac{800 - 300}{\pi\cdot 20\cdot 10^{-2}} = 0{,}5\cdot 10^{-2} \text{ Тл.}$$