

Пусть количество тока будет c' , длина рассматриваемой части l , ее сечение s , так что $\frac{c'}{s}$ есть плотность тока. Подставляя это количество вместо r в уравнения (12), (13), (14), мы находим [16]

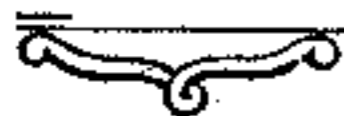
$$X = -\mu\beta \frac{c'}{s}$$

на единицу объема; умножая на ls —объем рассматриваемой части проводника, мы находим:

$$Xls = -\mu\beta c'l = -2\mu \frac{Cc'l}{\rho}, \quad (26)$$

откуда следует, что второй проводник будет притягиваться к первому с силой, обратно пропорциональной расстоянию. Мы видим, что и в этом случае сила притяжения зависит от величины μ , однако притяжение прямо пропорционально μ вместо того, чтобы быть обратно пропорциональным, так что притяжение между двумя проводниками с током будет больше в кислороде, чем в воздухе, и больше в воздухе, чем в воде.

В дальнейшем мы рассмотрим природу электрических токов и электродвижущих сил в связи с теорией молекулярных вихрей.



ЧАСТЬ II

ТЕОРИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ВИХРЕЙ В ПРИМЕНЕНИИ К ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКАМ*)

Мы уже показали, что все силы, действующие между магнитами, намагничивающимися путем индукции веществами и электрическими токами, можно механически объяснить, предполагая, что окружающая среда находится в таком состоянии, что в каждой точке давления различны в различных направлениях, причем направление наименьшего давления является направлением наблюдаемых силовых линий, а разность наибольшего и наименьшего давлений пропорциональна квадрату интенсивности силы в этой точке.

Если предположить существование в среде такого состояния напряжения, соответствующего известным законам распределения силовых линий, то среда будет действовать на магниты, токи и т. д. в точности с теми же результирующими силами, что и силы, вычисленные на основании обычной гипотезы непосредственного действия на расстоянии. Это верно независимо от какой-либо частной теории, касающейся причины этого состояния напряжения или способа, которым это состояние может быть поддерживаемо в среде. Мы поэтому можем дать положительный ответ на вопрос: «имеется ли какая-нибудь механическая гипотеза,

*) Phil. Mag., т. XXI, стр. 281—291, 338—348.

касающаяся определяемого линиями силы состояния среды, при помощи которой могли бы быть выведены наблюдаемые результирующие силы?» Ответ таков, что силовые линии указывают направление *минимального давления* в каждой точке среды.

Вторым вопросом должен быть следующий: «какова механическая причина этого различия давления в различных направлениях?» В первой части этого труда мы предположили, что эта разница в давлениях вызывается молекулярными вихрями, оси которых параллельны силовым линиям.

Мы также допустили совершенно произвольно, что направление этих вихрей таково, что, смотря вдоль силовой линии по направлению с юга на север, мы видим вихри вращающимися в направлении часовой стрелки.

Мы нашли, что скорость на окружности каждого вихря должна быть пропорциональной интенсивности магнитной силы и что плотность вещества вихря должна быть пропорциональной индуктивной магнитной емкости среды.

Мы до сего времени не дали ответов на вопросы: «каким образом эти вихри приводятся во вращательное движение?» и «почему их распределение соответствует известным законам распределения силовых линий около магнитов и токов?» Эти последние вопросы, конечно, являются вопросами более высокой степени трудности, чем какой-либо из двух первых вопросов. И я хочу отделить те мысли, которые можно предложить в порядке предварительного ответа на последние вопросы, от механических соображений, которые разрешают самый первый из наших вопросов, и гипотезы вихрей, которая дает вероятный ответ на второй вопрос.

Мы, действительно, сейчас должны обратиться к исследованию физической связи этих вихрей с электрическими токами, хотя мы до сего времени находимся в неведении относительно природы электричества: является ли электричество одной субстанцией, двумя

субстанциями или, может быть, оно вовсе не является субстанцией, чем оно отличается от материи и как связано с ней?

Мы знаем, что на силовые линии влияют электрические токи, и знаем распределение этих линий около тока, так что, исходя из магнитных сил, мы можем определить величину тока. Если наше объяснение силовых линий при помощи молекулярных вихрей правильно, то спрашивается: почему данное распределение магнитных сил указывает на наличие одного определенного электрического тока? Удовлетворительный ответ на этот вопрос был бы значительным шагом к ответу на другой весьма важный вопрос, а именно, «что такое электрический ток?» (9).

Я встретился с большими затруднениями, предполагая существование вихрей в среде, которые располагаются непосредственно друг около друга и вращаются в одном и том же направлении около параллельных осей [17]. Соприкасающиеся части смежных вихрей должны двигаться в противоположных направлениях, и трудно представить себе, как могут сосуществовать противоположные движения двух соседних частей среды; как движение одной части среды может даже вызывать прямо противоположное движение другой части, с ней соприкасающейся.

Единственное предположение, которое помогло мне представить такого рода движения, заключается в том, что вихри разделены слоем частиц, вращающихся каждая вокруг своей собственной оси в направлении, противоположном направлению вихрей, так что соприкасающиеся поверхности частиц и вихрей имеют одно и то же направление движения.

Если хотят, чтобы в механизме два колеса вращались в одном и том же направлении, то между ними ставят третье колесо, находящееся в сцеплении с обоими (это колесо называется «холостым»). Указанное выше предположение является гипотезой о существовании слоя частиц, действующих наподобие этих холостых колес, слоя, который находится между соседними

вихрями, так что каждый вихрь стремится вращать соседние вихри в том же направлении, в котором он сам вращается^[10].

В обычных механизмах холостое колесо, вообще говоря, вращается около *неподвижной* оси. Но в эпиклических дифференциальных зубчатых передачах и других приспособлениях, как, например, в регуляторе Сименса для паровых машин*), мы находим холостые колеса с подвижными центрами^[18].

Во всех этих случаях скорость движения центра является средней арифметической скоростей движения окружностей колес, между которыми оно поставлено. Исследуем отношения, которые должны существовать между движениями наших вихрей и движениями слоев частиц, расположенных между ними наподобие холостых колес.

Предложение IV. Определить движение слоя частиц, разделяющего два вихря.

Пусть произведения скорости на окружности вихря на три направляющих косинуса его оси будут соответственно α , β , γ , как в предложении II. Пусть l , m , n — направляющие косинусы внешней нормали к какому-нибудь элементу поверхности этого вихря. Тогда составляющие скорости прилегающего к этому элементу поверхности элемента объема вихря будут:

$$\left. \begin{array}{l} n\beta - m\gamma \text{ параллельно } x, \\ l\gamma - na \text{ параллельно } y, \\ ma - l\beta \text{ параллельно } z \text{ [19].} \end{array} \right\} \quad [26a]$$

Если этот элемент поверхности находится в контакте с другим вихрем, для которого величины α , β , γ равны α' , β' , γ' , тогда слой очень малых частиц, помещенных между ними, будет иметь скорость, которая представит собой среднюю арифметическую скоростей обоих вихрей; следовательно, компонента u ско-

рости частиц в направлении x [20]

$$u = \frac{1}{2} m (\gamma' - \gamma) - \frac{1}{2} n (\beta' - \beta), \quad (27)$$

так как нормаль к элементу поверхности второго вихря имеет направление, противоположное нормали к соответствующему элементу поверхности первого вихря.

Предложение V. Определить общее количество промежуточных частиц, проходящих через единицу площади в направлении x в единицу времени.

Пусть x_1 , y_1 , z_1 будут координаты центра первого вихря, x_2 , y_2 , z_2 — координаты центра второго вихря и т. д. Пусть V_1 , V_2 и т. д. будут объемы первого, второго и т. д. вихрей и \bar{V} — сумма этих объемов [21]. Далее, пусть dS будет элемент поверхности, отделяющей первый вихрь от второго, x , y , z — его координаты. Пусть p будет количество промежуточных частиц на единицу поверхности [22]. Тогда, если через p обозначить полное количество частиц, проходящих через единицу площади в единицу времени в направлении x , то полное, параллельное оси x количество движения частиц внутри объема \bar{V} , будет $\bar{V}p$, и мы получим:

$$\bar{V}p = \sum u_p dS, \quad (28)$$

причем суммирование распространяется на поверхности, разделяющие каждые два вихря в пределах объема \bar{V} [23]. Рассмотрим поверхность, отделяющую первый вихрь от второго. Обозначим элемент площади через dS ; пусть направляющие косинусы, относящиеся к первому и второму вихрям, будут соответственно l_1 , m_1 , n_1 и l_2 , m_2 , n_2 . Известно, что

$$l_1 + l_2 = 0, \quad m_1 + m_2 = 0, \quad n_1 + n_2 = 0. \quad (29)$$

Значения α , β , γ являются функциями положения центра вихря, так что мы можем написать [ограничившись]

*) См. G o o d e n e, Elements of Mechanism, стр. 118.

первыми членами разложения в ряд Тейлора]:

$$a_2 = a_1 + \frac{da}{dx}(x_2 - x_1) + \frac{da}{dy}(y_2 - y_1) + \frac{da}{dz}(z_2 - z_1) \quad (30)$$

и подобные же уравнения для β и γ [24].

Значение u может быть написано так:

$$\begin{aligned} u = & \frac{1}{2} \frac{d\gamma}{dx} [m_1(x - x_1) + m_2(x - x_2)] + \\ & + \frac{1}{2} \frac{d\gamma}{dy} [m_1(y - y_1) + m_2(y - y_2)] + \\ & + \frac{1}{2} \frac{d\gamma}{dz} [m_1(z - z_1) + m_2(z - z_2)] - \\ & - \frac{1}{2} \frac{d\beta}{dx} [n_1(x - x_1) + n_2(x - x_2)] - \\ & - \frac{1}{2} \frac{d\beta}{dy} [n_1(y - y_1) + n_2(y - y_2)] - \\ & - \frac{1}{2} \frac{d\beta}{dz} [n_1(z - z_1) + n_2(z - z_2)]. \quad (31) \end{aligned}$$

Производя суммирование $\sum up dS$, мы должны помнить, что взятые по замкнутой поверхности выражения $\sum l dS$ и все аналогичные им исчезают; также исчезают члены, имеющие форму $\sum ly dS$, где l и y относятся к различным координатным направлениям; только члены формы $\sum lx dS$, где l и x относятся к той же самой оси координат, не исчезают, но равны заключенному в поверхности объему. Отсюда следует [25]:

$$\bar{V}p = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz} \right) (V_1 + V_2 + \dots), \quad (32)$$

или, деля на $\bar{V} = V_1 + V_2 + \dots$,

$$p = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz} \right). \quad (33)$$

Если мы положим [26]

$$\rho = \frac{1}{2\pi}, \quad (34)$$

тогда уравнение (33) будет идентично с первым из уравнений (9), которое выражает соотношение между количеством электрического тока и интенсивностью окружающих его силовых линий.

Из сказанного ясно, что согласно нашей гипотезе электрический ток может быть представлен как поступательное движение частиц, расположенных между соседними вихрями. Мы можем считать, что эти частички очень малы по сравнению с размером вихря, что их массы в сумме дают ничтожно малую величину по сравнению с массой вихря и что очень большое количество вихрей с окружающими их частицами содержится в одной единственной цельной молекуле [27]. Частицы необходимо предположить вращающимися без трения между вихрями, которые они разделяют, не соприкасаясь друг с другом, так что в течение того времени, пока они остаются внутри одной и той же целой молекулы, нет потерь энергии в результате преодоления каких-либо сил сопротивления; однако, когда имеется постоянное передвижение частиц в определенном направлении, они должны переходить от одной молекулы к другой и при этом испытывать сопротивление, в результате чего теряется электрическая энергия и порождается тепло.

Теперь предположим, что вихри расположены в среде каким-нибудь произвольным образом. Величины $\frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz}$ и т. д. будут тогда, вообще говоря, иметь какие-то отличные от нуля значения, так что вначале в среде будут иметься электрические токи. При наличии электрического сопротивления среды и отсутствии постоянного источника электродвижущей силы они быстро исчезнут, и тогда мы будем иметь $\frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz} = 0$ и т. д., т. е. $a dx + \beta dy + \gamma dz$ будет полным дифференциалом [см. уравнения (15) и (16)]. Таким образом, наша гипотеза объясняет механическое происхождение распределения силовых линий.

На рис. 7 вертикальный круг представляет электрический ток, текущий от меди C к цинку Z через проводник EE' , как показано стрелками.

Пусть горизонтальный кружок MM' представляет магнитную силовую линию, охватывающую электрический ток; направления на север и на юг указываются стрелками SN и NS . Пусть вертикальные кружки V и V' представляют молекулярные вихри, осью которых является магнитная силовая линия.

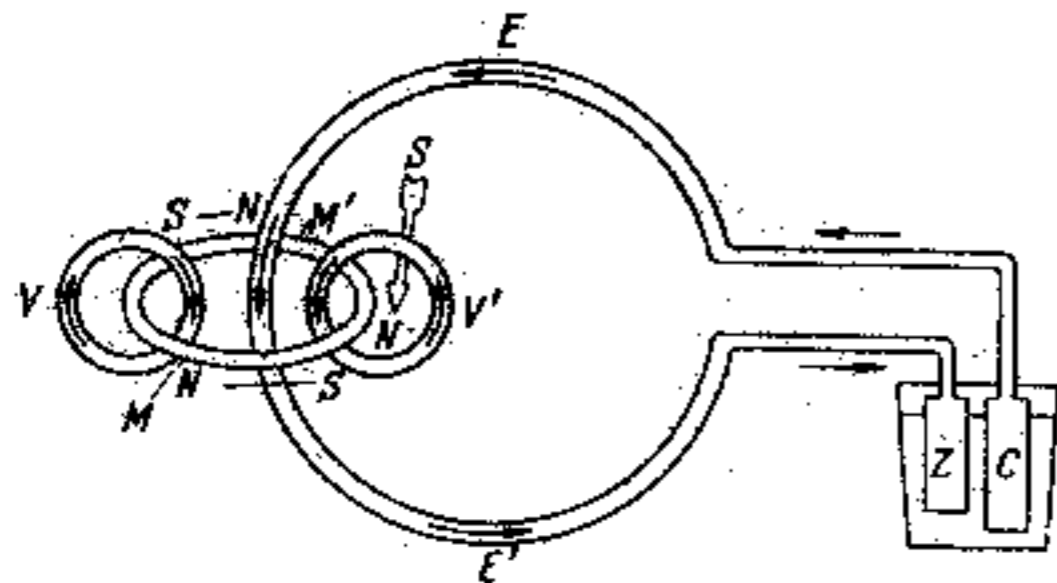


Рис. 7.

V вращается по часовой стрелке, а V' — в противоположном направлении.

Из диаграммы видно, что если V и V' были бы соседними вихрями, то частички, помещенные между ними, должны были бы двигаться вниз и что, наоборот, если бы частички по какой-либо причине вынуждены были двигаться вниз, они заставили бы вихри вращаться так, как указано на рисунке. С изложенной точки зрения мы можем рассматривать отношение электрического тока к его силовым линиям аналогично отношению зубчатого колеса к сцепленным с ним колесам.

В первой части этого труда мы исследовали отношения между статическими силами системы. Во второй части мы до сих пор исследовали связь стационарных движений частей системы, рассматриваемой как некоторый механизм. Нам остается еще исследовать динамику системы и определить силы, необ-

ходимые для производства данных изменений в движениях различных частей.

Предложение VI. Определить кинетическую энергию вихревого движения данной части среды.

Пусть α , β , γ будут, как и в предложении II, составляющими скорости на окружности, тогда кинетическая энергия вихрей в единице объема будет пропорциональна плотности и квадрату скорости. Так как мы не знаем распределения плотности и скорости внутри отдельного вихря, мы не можем непосредственно определить численное значение энергии. Поскольку, однако, μ находится в определенном, хотя и неизвестном, отношении к средней плотности, мы можем предположить, что кинетическая энергия в единице объема есть

$$E = C\mu(\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2),$$

где C — подлежащая определению константа. Чтобы ее определить, достаточно рассмотреть специальный случай, когда

$$\alpha = \frac{d\varphi}{dx}, \quad \beta = \frac{d\varphi}{dy}, \quad \gamma = \frac{d\varphi}{dz}. \quad (35)$$

Пусть

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 \quad (36)$$

и

$$\left. \begin{aligned} \frac{\mu}{4\pi} \left(\frac{d^2\varphi_1}{dx^2} + \frac{d^2\varphi_1}{dy^2} + \frac{d^2\varphi_1}{dz^2} \right) &= m_1, \\ \frac{\mu}{4\pi} \left(\frac{d^2\varphi_2}{dx^2} + \frac{d^2\varphi_2}{dy^2} + \frac{d^2\varphi_2}{dz^2} \right) &= m_2. \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

Тогда φ_1 есть потенциал, обусловленный магнитной системой m_1 , а φ_2 — потенциал, обусловленный системой m_2 . Кинетическая энергия всех вихрей будет:

$$E = \sum C\mu(\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2) dV, \quad (38)$$

причем суммирование производится по всему пространству. Путем интегрирования по частям (см. G r e e n, Essay on Electricity, стр. 10) получаем:

$$E = -4\pi C \sum (\varphi_1 m_1 + \varphi_2 m_2 + \varphi_1 m_2 + \varphi_2 m_1) dV, \quad (39)$$

а так как [28]

$$\left. \begin{aligned} \sum \varphi_1 m_2 dV &= \sum \varphi_2 m_1 dV, \\ E &= -4\pi C \sum (\varphi_1 m_1 + \varphi_2 m_2 + 2\varphi_1 m_2) dV. \end{aligned} \right\} (40)$$

Пусть теперь магнитная система m_1 остается в покое и пусть система m_2 переместится параллельно самой себе в направлении оси x на расстояние δx . Тогда, так как φ_1 зависит только от m_1 , оно останется тем же, и величина $\varphi_1 m_1$ будет постоянной; так как, далее, φ_2 зависит только от m_2 , распределение φ_2 относительно m_2 останется тем же; следовательно, произведение $\varphi_2 m_2$ останется таким, как и до изменения положения m_2 .

Единственным переменным членом в выражении для E будет член, который зависит от $2\varphi_1 m_2$, так как φ_1 переходит в $\varphi_1 + \frac{d\varphi_1}{dx} \delta x$ вследствие смещения магнитной массы m_2 . Увеличение кинетической энергии, вызванное этим смещением, будет равно:

$$\delta E = -4\pi C \sum \left(2 \frac{d\varphi_1}{dx} m_2 \right) dV \delta x. \quad (41)$$

Но по уравнению (12) работа, произведенная механическими силами, действующими на m_2 во время ее движения, есть:

$$\delta W = \sum \left(\frac{d\varphi_1}{dx} m_2 dV \right) \delta x. \quad (42)$$

Так как наша гипотеза является чисто механической, мы должны по закону сохранения силы иметь:

$$\delta E + \delta W = 0, \quad (43)$$

т. е. потеря энергии вихрей должна быть возмещена работой, произведенной в движущихся магнитах, так что

$$-4\pi C \sum \left(2 \frac{d\varphi_1}{dx} m_2 dV \right) \delta x + \sum \left(\frac{d\varphi_1}{dx} m_2 dV \right) \delta x = 0, \quad (44)$$

или

$$C = \frac{1}{8\pi}.$$

Таким образом, энергия вихрей в единице объема есть:

$$\frac{1}{8\pi} \mu (\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2), \quad (45)$$

и энергия вихря, имеющего объем V , есть [29]:

$$\frac{1}{8\pi} \mu (\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2) V. \quad (46)$$

Для того чтобы произвести или уничтожить эту энергию, вихрю должна быть сообщена или отнята у него кинетическая энергия, будь то при помощи тангенциального воздействия прилегающего к поверхности вихря слоя частиц или при помощи изменения формы вихря. Мы прежде всего исследуем тангенциальное взаимодействие между вихрями и слоем частиц, находящимся в соприкосновении с ними.

Предложение VII. Найти энергию, переданную вихрю в единицу времени слоем окружающих его частиц.

Пусть P , Q , R будут силы, действующие на единицу количества частиц в направлениях трех осей координат (11), причем очевидно, что эти величины являются функциями от x , y и z [30]. Так как каждая частица касается двух вихрей противоположными концами своего диаметра, то обратное действие частиц на оба вихря будет разделено пополам; единица количества частиц будет действовать на каждый вихрь с силой, компоненты которой равны: $-\frac{1}{2} P$, $-\frac{1}{2} Q$, $-\frac{1}{2} R$. Так как поверхностная плотность частиц равна $\frac{1}{2\pi}$ [см. уравнение (34)], то компоненты силы, действующей на единицу поверхности вихря, будут:

$$-\frac{1}{4\pi} P, \quad -\frac{1}{4\pi} Q, \quad -\frac{1}{4\pi} R.$$

Обозначим через dS элемент поверхности вихря, l , m , n — направляющие косинусы нормали к нему, x , y , z —

координаты элемента, а u , v , w — составляющие скоростей элемента поверхности. Тогда работа, затраченная на этот элемент поверхности, будет:

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{1}{4\pi} (Pu + Qv + R\omega) dS. \quad (47)$$

Начнем с первого члена $Pu dS$; P может быть написано в виде

$$P_0 + \frac{dP}{dx} x + \frac{dP}{dy} y + \frac{dP}{dz} z \quad (48)$$

и [31]

$$u = n\beta - m\gamma. \quad (48a)$$

Так как поверхность вихря является замкнутой, то

$$\sum nx dS = \sum mx dS = \sum ny dS = \sum mz dS = 0$$

и

$$\sum my dS = \sum nz dS = V. \quad (48b)$$

Мы находим отсюда

$$\sum Pu dS = \left(\frac{dP}{dz} \beta - \frac{dP}{dy} \gamma \right) V. \quad (49)$$

Теперь мы можем выразить всю работу, переданную вихрю в единицу времени, так:

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} &= -\frac{1}{4\pi} \sum (Pu + Qv + R\omega) dS = \\ &= -\frac{V}{4\pi} \left[\alpha \left(\frac{dQ}{dz} - \frac{dR}{dy} \right) + \beta \left(\frac{dR}{dx} - \frac{dP}{dz} \right) + \gamma \left(\frac{dP}{dy} - \frac{dQ}{dx} \right) \right]. \quad (50) \end{aligned}$$

Предложение VIII. Найти отношения между изменениями скоростей движения вихрей и силами P , Q , R , с которыми они действуют на слой частиц между ними.

Пусть V — объем вихря, тогда согласно уравнению (46) его энергия будет:

$$E = \frac{1}{8\pi} \mu (\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2) V, \quad (51)$$

откуда

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{4\pi} \mu V \left(\alpha \frac{d\alpha}{dt} + \beta \frac{d\beta}{dt} + \gamma \frac{d\gamma}{dt} \right). \quad (52)$$

Сравнивая это выражение с выражением из уравнения (50), находим:

$$\begin{aligned} \alpha \left(\frac{dQ}{dz} - \frac{dR}{dy} - \mu \frac{d\alpha}{dt} \right) + \beta \left(\frac{dR}{dx} - \frac{dP}{dz} - \mu \frac{d\beta}{dt} \right) + \\ + \gamma \left(\frac{dP}{dy} - \frac{dQ}{dx} - \mu \frac{d\gamma}{dt} \right) = 0. \quad (53) \end{aligned}$$

Поскольку это уравнение верно для всех значений α , β и γ [32], то, положив β и γ равными нулю, а затем разделив на α , получим (12):

$$\left. \begin{aligned} \frac{dQ}{dz} - \frac{dR}{dy} &= \mu \frac{d\alpha}{dt}, \\ \frac{dR}{dx} - \frac{dP}{dz} &= \mu \frac{d\beta}{dt}, \\ \frac{dP}{dy} - \frac{dQ}{dx} &= \mu \frac{d\gamma}{dt}. \end{aligned} \right\} \text{аналогично} \quad (54)$$

Из этих уравнений мы можем определить отношения между изменениями скоростей вращения вихря $\frac{d\alpha}{dt}$ и т. д. и силами, действующими на слой частиц между вихрями, или, говоря на языке нашей гипотезы, отношения между изменениями состояния магнитного поля и электродвижущими силами, ими обусловленными.

В работе «О динамической теории диффракции» (Cambridge Philosophical Transactions, т. IX, часть I, секция 6) профессор Стокс (Stokes) дал метод, при помощи которого мы можем решить уравнения (54) и найти P , Q и R как функции величин, стоящих в правой части этих уравнений.

Я применил этот метод к вопросам электричества и магнетизма в одной своей прежней работе *).

*) Camb. Phil. Trans., т. X, часть I, гл. 3, «О фарадеевых силовых линиях», см. стр. 11 этой книги.

Мы должны найти три величины F , G , H из уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{dG}{dz} - \frac{dH}{dy} &= \mu\alpha, \\ \frac{dH}{dx} - \frac{dF}{dz} &= \mu\beta, \\ \frac{dF}{dy} - \frac{dG}{dx} &= \mu\gamma \end{aligned} \right\} \quad (55)$$

при условии [33]

$$\frac{1}{4\pi} \left(\frac{d}{dx} \mu\alpha + \frac{d}{dy} \mu\beta + \frac{d}{dz} \mu\gamma \right) = m = 0 \quad (56)$$

и

$$\frac{dF}{dx} + \frac{dG}{dy} + \frac{dH}{dz} = 0. \quad (57)$$

Дифференцируя (55) по времени t и сравнивая с уравнением (54), находим:

$$P = \frac{dF}{dt}, \quad Q = \frac{dG}{dt}, \quad R = \frac{dH}{dt}. \quad (58)$$

Таким образом, мы определили три величины F , G , H (13), из которых мы можем найти P , Q и R простым дифференцированием по времени. В работе, на которую я уже ссылался, я привел соображения в пользу концепции величин F , G , H как составляющих состояния, существование которого предполагал Фарадей и которое он назвал электротоническим состоянием. В этой работе я установил математические отношения между электротоническим состоянием и магнитными силовыми линиями в том виде, как это выражено в уравнениях (55), а также между электротоническим состоянием и электродвижущей силой, как это выражено в уравнениях (58). Мы должны теперь попытаться истолковать эти уравнения с механической точки зрения в связи с нашей гипотезой.

Сначала мы изучим процесс, при помощи которого силовые линии производятся электрическим током.

Пусть AB на рис. 8 представляет электрический ток, текущий в направлении от A к B . Пусть большие шести-

угольники выше и ниже AB изображают вихри, а малые окружности, разделяющие их, изображают слои частиц, которые по нашей гипотезе представляют электричество.

Пусть электрический ток течет слева направо в направлении AB . Ряд вихрей gh , находящихся выше AB , будет приведен в движение в направлении, противоположном ходу часов. (Это направление мы будем на-

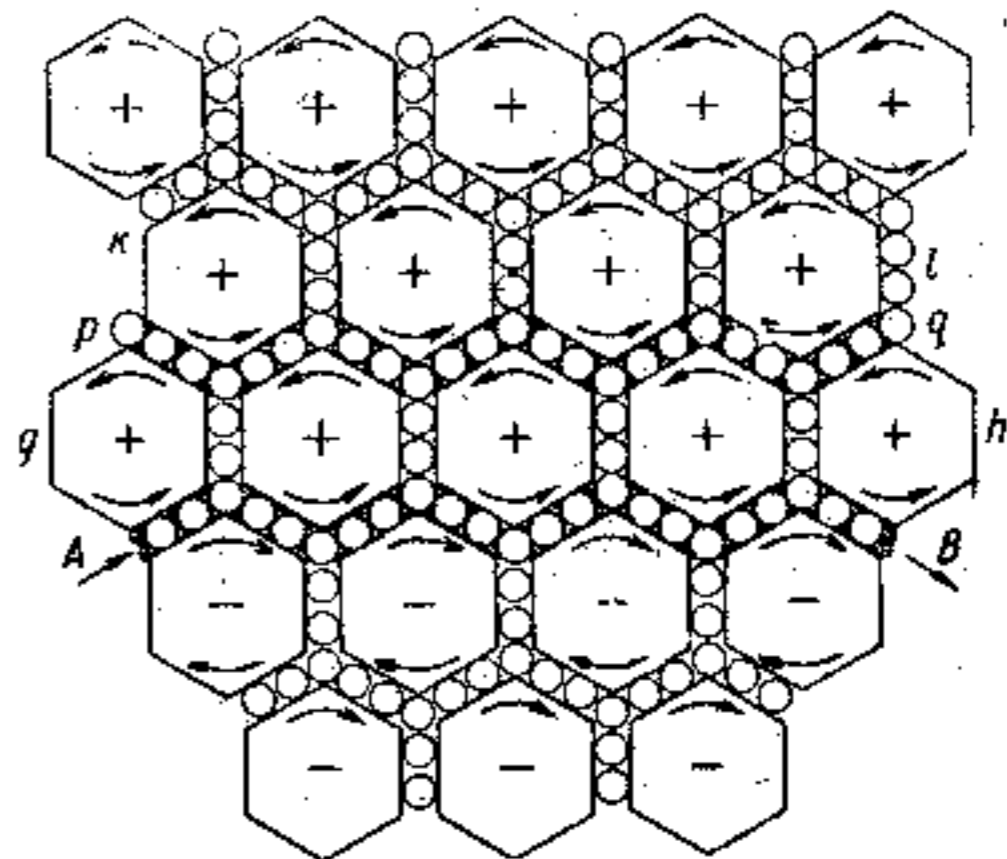


Рис. 8.

зывать положительным (+), а противоположное направление, т. е. по ходу часов, — отрицательным (—). Предположим, что ряд вихрей kl все еще остается в покое; тогда ряд вихрей gh будет действовать на нижние стороны частиц, расположенных между этим рядом и рядом kl , а верхние стороны останутся в покое. Если частицы могут свободно двигаться, то они будут вращаться в отрицательном направлении и одновременно перемещаться справа налево, именно в том направлении (противоположном току AB), в котором возникает индуктированный электрический ток. Если этот ток прекратится из-за электрического сопротивления среды, тогда вращающиеся частицы слоя pq действуют

на ряд вихрей kl и заставляют их вращаться в положительном направлении со скоростью, которая возрастает до тех пор, пока не прекратится перемещение частиц и они будут только вращаться; это соответствует исчезновению индуктированного тока.

Если теперь внезапно прервать первичный ток AB , то вихри ряда gh остановятся, в то время как в ряду kl они все еще будут продолжать свое вращение; вследствие этого частицы слоя pq придут в движение в направлении первичного тока (слева направо). Если среда окажет сопротивление этому движению, то и движение вихрей над pq постепенно прекратится.

Отсюда ясно, что явление индукции токов составляет часть процесса переноса вращательной скорости вихрей от одной части поля к другой.

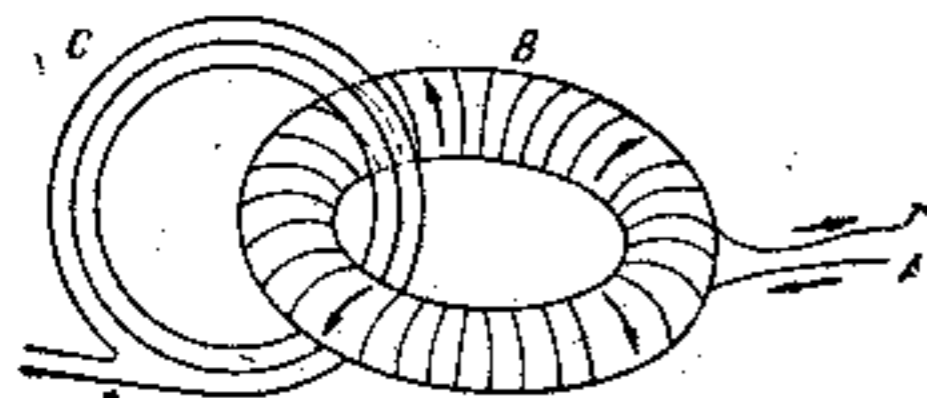


Рис. 9.

В качестве примера образования индуктированных токов действием вихрей возьмем следующий случай: пусть B на рис. 9—круговое кольцо одинакового по всей длине сечения, равномерно обмотанное изолированной проволокой. Можно показать, что при пропускании электрического тока через проволоку помещенный внутри спирали магнит будет испытывать сильное воздействие, в то время как в любой внешней точке никакого магнитного действия не обнаруживается. Спираль действует как магнит, средняя линия которого образует замкнутую кривую, так что его оба полюса соприкасаются.

Если катушка сделана хорошо, то нельзя обнаружить никакого действия на помещенный снаружи магнит,

независимо от того, является ли ток постоянным или же меняется по силе; но если кольцо охватывается некоторое число раз проводником C , то в последнем электродвижущая сила будет действовать каждый раз, как только ток в катушке меняется, и если цепь будет замкнута, то в проволоке C возникнет ток.

Этот опыт показывает, что, для того чтобы получить электродвижущую силу, вовсе не нужно, чтобы проводник был помещен в магнитное силовое поле или чтобы магнитные силовые линии проходили через вещество проволоки или поблизости от нее. Требуется лишь, чтобы силовые линии проходили через охватываемую проводящей цепью поверхность и чтобы эти силовые линии изменялись по своей интенсивности во время опыта.

В ранее рассмотренных случаях вихри, которые согласно нашей гипотезе представляют магнитные силовые линии, находятся все в пределах сечения кольца, а вне кольца все находится в покое. Если нет охватывающей кольцо замкнутой проводящей цепи, то, если первичный ток возникает или прекращается, никакого действия вне кольца не наблюдается, за исключением мгновенного давления между частицами и прилегающими к ним вихрями. Если же имеется непрерывная проводящая цепь, охватывающая кольцо, тогда при включении первичного тока появляется ток в цепи C противоположного направления; когда же первичный ток прерывается, то появляется ток в C того же самого направления, что и первичный ток.

Мы видим, таким образом, что индуктированные токи возникают благодаря тому, что электричество поддается действию электродвижущей силы, причем эта сила имеет место и в том случае, когда образованию заметного тока препятствует сопротивление цепи. Электродвижущая сила с компонентами P , Q , R возникает при взаимодействии между вихрями и находящимися между ними частицами, когда скорость вращения вихрей изменяется в какой-нибудь части поля. Эта сила соответствует давлению на ось колеса в машине, когда скорость ведущего колеса увеличивается или уменьшается.

Электротоническое состояние, составляющие которого суть F , G , H , является той электродвижущей силой, которая потребовалась бы, если бы токи и другие величины мгновенно возросли до конечных значений. Оно соответствует импульсу, который действовал бы на ось колеса машины, если бы ведущему колесу покоящейся машины была внезапно сообщена его действительная скорость.

Если бы машина была внезапно остановлена путем остановки ведущего колеса, то каждое колесо ее получило бы импульс, равный и противоположный тому, который оно получило бы в момент мгновенного пуска машины в ход. Этот импульс может быть рассчитан для любой части механизма и может быть назван приведенным моментом [количеством движения] машины для данной точки [34]. При изменении движения машины фактическая сила, действующая на каждую часть, вследствие этого изменения может быть найдена путем дифференцирования приведенного момента по времени, совершенно так же, как электродвижущая сила может быть выведена из электротонического состояния при помощи того же самого процесса вычисления.

После того как мы нашли отношение между скоростями вихрей и электродвижущими силами для случая, когда оси вихрей находятся в покое, мы должны теперь распространить нашу теорию на случай жидкой среды, содержащей вихри и подверженной всему разнообразию движения жидкостей. Если мы обратим внимание на какую-нибудь элементарную часть жидкости, мы найдем, что она не только переходит от одного места в другое, но также и изменяет свою форму и ориентацию [35], так что она может удлиняться в некоторых направлениях и сокращаться в других, кроме того, в наиболее общем случае ее перемещение сопровождается вращением.

Эти изменения формы и ориентации элемента объема производят изменение скорости вращения содержащихся в нем молекулярных вихрей, к изучению чего мы должны сейчас приступить.

Изменения формы и ориентации элемента объема могут всегда быть сведены к трем простым удлинениям или сжатиям в направлении трех находящихся под прямыми углами осей и к трем угловым вращениям около любых трех осей, не находящихся в одной плоскости. Мы сначала рассмотрим эффект трех простых растяжений или сжатий.

Предложение IX. Найти изменения α , β и γ в параллелепипеде x , y , z , которые вызываются изменением x до $x + \delta x$, y до $y + \delta y$ и z до $z + \delta z$, причем объем параллелепипеда остается тем же самым.

Согласно предложению II работа, производимая вихрями при преодолении давления, выразится:

$$\delta W = p_1 \delta (xyz) - \frac{\mu}{4\pi} (\alpha^2 yz \delta x + \beta^2 zx \delta y + \gamma^2 xy \delta z), \quad (59)$$

а по предложению VI изменение энергии

$$\delta E = \frac{\mu}{4\pi} (\alpha \delta \alpha + \beta \delta \beta + \gamma \delta \gamma) xy. \quad (60)$$

Сумма $\delta W + \delta E$ должна равняться нулю по закону сохранения энергии; также должно быть $\delta (xyz) = 0$, так как объем xyz есть величина постоянная.

Согласно выражениям (59) и (60) получаем:

$$\alpha \left(\delta \alpha - \alpha \frac{\delta x}{x} \right) + \beta \left(\delta \beta - \beta \frac{\delta y}{y} \right) + \gamma \left(\delta \gamma - \gamma \frac{\delta z}{z} \right) = 0. \quad (61)$$

Так как это уравнение должно быть верным при всех отношениях между α , β и γ , мы должны иметь [36]:

$$\delta \alpha = \alpha \frac{\delta x}{x}, \quad \delta \beta = \beta \frac{\delta y}{y}, \quad \delta \gamma = \gamma \frac{\delta z}{z}. \quad (62)$$

Предложение X. Найти изменения α , β , γ , происходящие вследствие поворота на угол θ_1 около оси x по направлению от y к z , поворота на θ_2 около оси y от z к x и поворота на θ_3 около оси z от x к y .

Если ось β будет удалена от оси x на угол θ_3 , то составляющая от β в направлении x изменится от 0 до $-\beta \theta_3$. Ось γ приближается к оси x на угол θ_2 , так что [37] величина составляющей вращения γ в направ-

лении x изменяется от 0 до $\gamma\theta_2$. Значение составляющей α в направлении x изменяется на величину, которой можно пренебречь, так как она представляет по порядку вторую степень углов поворота. Таким образом, изменения α , β , γ , вызванные указанной причиной, будут:

$$\delta\alpha = \gamma\theta_2 - \beta\theta_3, \quad \delta\beta = \alpha\theta_3 - \gamma\theta_1, \quad \delta\gamma = \beta\theta_1 - \alpha\theta_2. \quad (63)$$

Наиболее общие выражения для изменения формы и ориентации элемента объема вследствие смещения его различных частей зависят от девяти величин [38]:

$$\frac{d}{dx} \delta x, \quad \frac{d}{dy} \delta x, \quad \frac{d}{dz} \delta x; \quad \frac{d}{dx} \delta y, \quad \frac{d}{dy} \delta y, \quad \frac{d}{dz} \delta y;$$

$$\frac{d}{dx} \delta z, \quad \frac{d}{dy} \delta z, \quad \frac{d}{dz} \delta z.$$

Эти величины всегда могут быть выражены через девять других величин, а именно: через три простых расширения или сжатия:

$$\frac{\delta x'}{x'}, \quad \frac{\delta y'}{y'}, \quad \frac{\delta z'}{z'}$$

вдоль трех соответствующим образом выбранных осей x' , y' , z' , девять направляющих косинусов этих осей, связанных между собой шестью уравнениями и, следовательно, эквивалентных трем независимым переменным, и три вращения: θ_1 , θ_2 , θ_3 вокруг осей x , y и z .

Пусть направляющие косинусы x' относительно x , y , z будут l_1 , m_1 , n_1 ; направляющие косинусы y' — l_2 , m_2 , n_2 ; направляющие косинусы z' — l_3 , m_3 , n_3 . Тогда имеют место уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dx} \delta x &= l_1^2 \frac{\delta x'}{x'} + l_2^2 \frac{\delta y'}{y'} + l_3^2 \frac{\delta z'}{z'}, \\ \frac{d}{dy} \delta x &= l_1 m_1 \frac{\delta x'}{x'} + l_2 m_2 \frac{\delta y'}{y'} + l_3 m_3 \frac{\delta z'}{z'} + \theta_3, \\ \frac{d}{dz} \delta x &= l_1 n_1 \frac{\delta x'}{x'} + l_2 n_2 \frac{\delta y'}{y'} + l_3 n_3 \frac{\delta z'}{z'} + \theta_2 \end{aligned} \right\} \quad (64)$$

и аналогичные уравнения для производных от δy и δz .

Пусть α' , β' , γ' будут значения α , β , γ , отнесенные к осям x' , y' , z' . Тогда

$$\left. \begin{aligned} \alpha' &= l_1 \alpha + m_1 \beta + n_1 \gamma, \\ \beta' &= l_2 \alpha + m_2 \beta + n_2 \gamma, \\ \gamma' &= l_3 \alpha + m_3 \beta + n_3 \gamma. \end{aligned} \right\} \quad (65)$$

Отсюда находим:

$$\delta\alpha = l_1 \delta\alpha' + l_2 \delta\beta' + l_3 \delta\gamma' + \gamma\theta_2 - \beta\theta_3 = \quad (66)$$

$$= l_1 \alpha' \frac{\delta x'}{x'} + l_2 \beta' \frac{\delta y'}{y'} + l_3 \gamma' \frac{\delta z'}{z'} + \gamma\theta_2 - \beta\theta_3. \quad (67)$$

Подставляя значения α' , β' , γ' из (65) и сравнивая с уравнениями (64), получаем [39]:

$$\delta\alpha = \alpha \frac{d}{dx} \delta x + \beta \frac{d}{dy} \delta x + \gamma \frac{d}{dz} \delta x \quad (68)$$

для изменения α , обусловленного изменением формы и ориентации элемента объема. Изменения для β и γ даются подобными же выражениями.

Предложение XI. Найти электродвижущие силы в движущемся проводнике.

Изменение скорости вихрей в движущемся элементе объема обусловлено двумя причинами: действием электродвижущих сил и изменением формы и ориентации элемента. Полное изменение α поэтому будет:

$$\delta\alpha = \frac{1}{\mu} \left(\frac{dQ}{dz} - \frac{dR}{dy} \right) \delta t + \alpha \frac{d}{dx} \delta x + \beta \frac{d}{dy} \delta x + \gamma \frac{d}{dz} \delta x. \quad (69)$$

Так как α есть функция x , y , z и t , то изменение α может также быть написано в форме [40]:

$$\delta\alpha = \frac{d\alpha}{dx} \delta x + \frac{d\alpha}{dy} \delta y + \frac{d\alpha}{dz} \delta z + \frac{d\alpha}{dt} \delta t. \quad (70)$$

Приравнявая два значения $\delta\alpha$, деля на δt и принимая во внимание, что для движения несжимаемой среды

$$\frac{d}{dx} \frac{dx}{dt} + \frac{d}{dy} \frac{dy}{dt} + \frac{d}{dz} \frac{dz}{dt} = 0, \quad (71)$$

и, кроме того, вследствие отсутствия свободного магнетизма

$$\frac{d\alpha}{dx} + \frac{d\beta}{dy} + \frac{d\gamma}{dz} = 0 \quad (72)$$

мы находим:

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{dQ}{dz} - \frac{dR}{dy} \right) + \gamma \frac{d}{dz} \frac{dx}{dt} - \alpha \frac{d}{dz} \frac{dz}{dt} - \alpha \frac{d}{dy} \frac{dy}{dt} + \beta \frac{d}{dy} \frac{dx}{dt} + \\ + \frac{d\gamma}{dz} \frac{dx}{dt} - \frac{d\alpha}{dz} \frac{dz}{dt} - \frac{d\alpha}{dy} \frac{dy}{dt} + \frac{d\beta}{dy} \frac{dx}{dt} - \frac{d\alpha}{dt} = 0. \quad (73)$$

Если положить

$$\alpha = \frac{1}{\mu} \left(\frac{dG}{dz} - \frac{dH}{dy} \right) \quad (74)$$

и

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{d^2G}{dz dt} - \frac{d^2H}{dy dt} \right), \quad (75)$$

где F , G , H являются значениями электростатических составляющих для неподвижной точки пространства, наше уравнение (73) переходит в [41]

$$\frac{d}{dz} \left(Q + \mu\gamma \frac{dx}{dt} - \mu\alpha \frac{dz}{dt} - \frac{dG}{dt} \right) - \\ - \frac{d}{dy} \left(R + \mu\alpha \frac{dy}{dt} - \mu\beta \frac{dx}{dt} - \frac{dH}{dt} \right) = 0. \quad (76)$$

Выражения для изменений β и γ дают нам два других уравнения, которые могут быть написаны при помощи циклических перестановок. Полное решение этих трех уравнений будет (14):

$$\left. \begin{aligned} P &= \mu\gamma \frac{dy}{dt} - \mu\beta \frac{dz}{dt} + \frac{dF}{dt} - \frac{d\Psi}{dx}, \\ Q &= \mu\alpha \frac{dz}{dt} - \mu\gamma \frac{dx}{dt} + \frac{dG}{dt} - \frac{d\Psi}{dy}, \\ R &= \mu\beta \frac{dx}{dt} - \mu\alpha \frac{dy}{dt} + \frac{dH}{dt} - \frac{d\Psi}{dz}. \end{aligned} \right\} \quad (77)$$

Первый и второй члены правой части каждого уравнения выражают эффект движения тела в магнитном поле; третий член указывает на изменения электрото-

нического состояния вследствие изменения положения или интенсивности магнитов или токов, находящихся в поле; Ψ есть функция от x , y , z и t , которую первоначально установленные нами уравнения оставляют неопределенной, но она может быть определена в каждом отдельном случае из условий задачи. Физическая интерпретация Ψ заключается в том, что эта величина определяет электрическое натяжение в каждой точке пространства.

Физическое значение членов, которые выражают электродвижущую силу, зависящую от движения тела, становится более простым в случае однородного магнитного поля. Пусть в поле с интенсивностью α магнитные силы направлены по оси абсцисс. Тогда если l , m , n будут направляющие косинусы какой-нибудь части линейного проводника, а S —его длина, то составляющая электродвижущей силы в направлении проводника будет:

$$e = S(Pl + Qm + Rn), \quad (78)$$

или

$$e = S\mu\alpha \left(m \frac{dz}{dt} - n \frac{dy}{dt} \right), \quad (79)$$

т. е. является произведением $\mu\alpha$ —количества магнитной индукции через единицу поверхности—на величину $S \left(m \frac{dz}{dt} - n \frac{dy}{dt} \right)$, т. е. проекцию [42] вычерчиваемой проводником S в единицу времени площади на плоскость, перпендикулярную к направлению магнитной силы [43].

Электродвижущая сила в какой-нибудь части проводника, образующаяся вследствие его движения, измеряется поэтому числом магнитных силовых линий, которую эта часть пересекает в единицу времени, а полная электродвижущая сила в замкнутом проводнике измеряется изменением в единицу времени числа силовых линий, которые проходят через контур, охватываемый проводником; это остается верным независимо от того, производятся ли изменения в результате движения проводника или вследствие какой-либо другой внешней причины.

Для того чтобы понять механизм, благодаря которому движение проводника через магнитные силовые линии порождает электродвижущую силу в этом проводнике, мы должны вспомнить, что в предложении X мы доказали, что изменение формы части среды, содержащей вихри, приводит к изменению скоростей этих вихрей, а именно, растяжение среды в направлении осей вихрей, сочетаемое со сжатием по всем перпендикулярным к ним направлениям, вызывает увеличение скорости вихрей, тогда как укорачивание осей и боковое расширение приводят к уменьшению скорости вихрей.

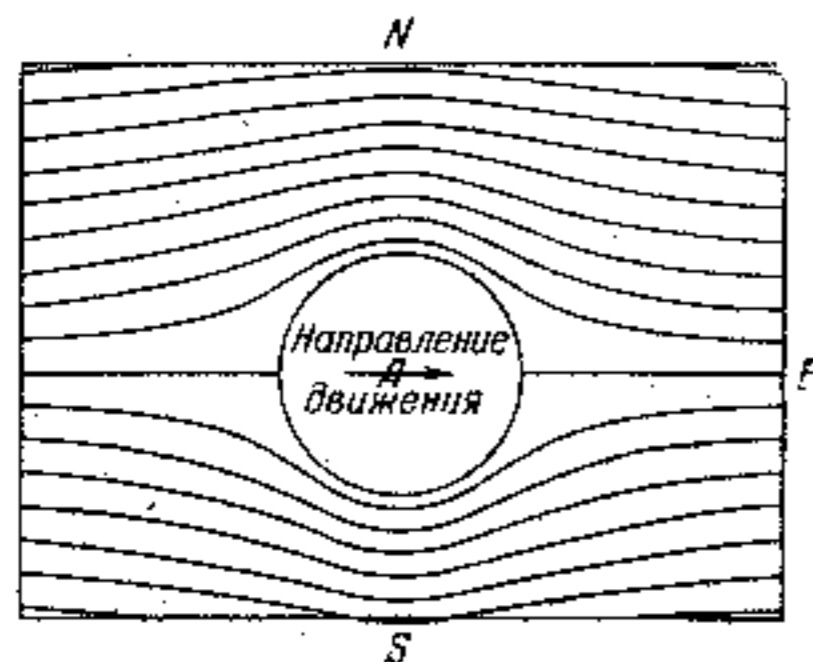


Рис. 10.

Это изменение скорости вихрей возникает благодаря внутренним эффектам изменения формы и не зависит от действия внешних электродвижущих сил. Если, следовательно, изменения скорости тормозятся или внезапно прекращаются, то возникают электродвижущие силы, потому что каждый вихрь будет давить на окружающие частички в том направлении, в котором он стремится изменить свое движение.

Пусть *A* на рис. 10 представляет сечение вертикального провода, движущегося в направлении стрелки с запада на восток через систему магнитных силовых линий, идущих с юга на север (рис. 11).

Изогнутые линии на рис. 10 представляют линии тока жидкой среды около провода, причем провод рас-

сматривается как неподвижный, а жидкость как движущаяся относительно провода. Очевидно, что с помощью этого рисунка мы можем проследить изменение формы элемента жидкости, поскольку форма элемента зависит не от абсолютного движения всей системы, но от относительного движения ее частей.

Впереди провода, т. е. на его восточной стороне, по мере приближения проволоки к каждой части [элементу объема] среды эта часть все более и более сжимается в направлении от востока к западу и растягивается в направлении от севера к югу. Так как оси

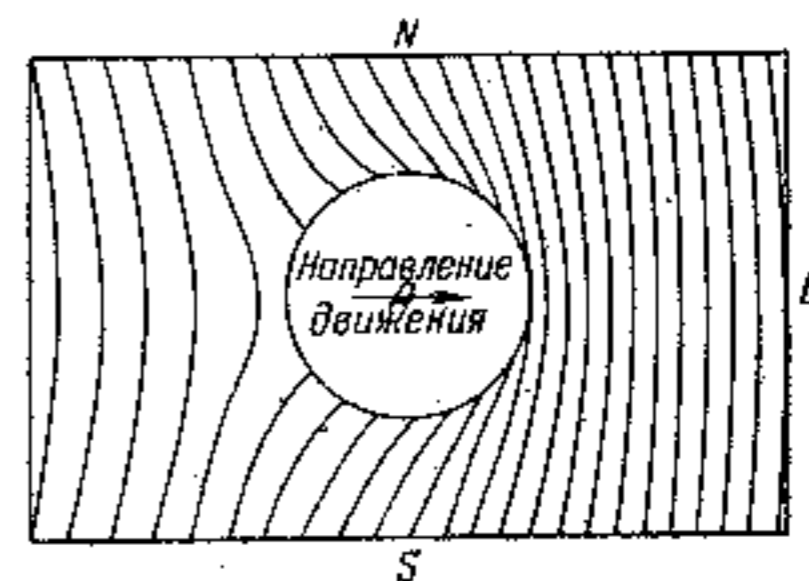


Рис. 11.

вихрей лежат в направлении север—юг, их скорости будут непрерывно расти согласно предложению X, если только этому не помешают электродвижущие силы, действующие на окружность каждого вихря.

Будем считать электродвижущую силу положительной, когда вихри стремятся двигать находящиеся между ними частицы вверх перпендикулярно к плоскости рисунка. Если мы смотрим на вихри с юга на север, то они представляются вращающимися по часовой стрелке, так что каждый вихрь движется вверх по западной стороне и вниз по восточной стороне. Следовательно, впереди провода, где каждый вихрь стремится увеличить свою скорость, электродвижущая сила, направленная вверх, должна быть большей на его за-

падной, чем на его восточной стороне. Там, следовательно, имеет место постоянное увеличение направленной вверх электродвижущей силы от удаленных точек востока, где она равна нулю, до лобовой стороны движущегося провода, где сила, действующая вверх, будет наибольшей.

За проводом имеет место другое явление. Так как провод удаляется от последовательно расположенных частей среды, эти части расширяются по направлению от востока к западу и сжимаются по направлению от севера к югу, что приводит к уменьшению скорости вихрей и к образованию направленной вверх электродвижущей силы, которая больше на восточной, чем на западной стороне каждого вихря. Направленная вверх электродвижущая сила поэтому будет непрерывно увеличиваться от очень удаленных точек запада, где она равна нулю, до задней стороны движущегося провода, где она будет наибольшей. Отсюда вытекает, что на вертикальный провод, движущийся на восток, будет действовать электродвижущая сила, стремящаяся произвести в ней направленный вверх ток. Если провод не является частью замкнутой цепи, то никакого тока произведено не будет и магнитные силы не будут изменены; но если такая цепь существует, там возникнет ток, причем расположение магнитных силовых линий и скорости вихрей будут отличаться от того состояния, в котором они находились до начала движения провода. Изменение силовых линий показано на рис. 11. Вихри, находящиеся впереди провода, увеличивают свою скорость, в то время как вихри, находящиеся за проволокой, имеют уменьшенную скорость, а вихри, находящиеся по бокам, изменяют направление своих осей; таким образом, конечным результатом является сила сопротивления движению провода.

Повторим кратко теперь сделанные нами допущения и полученные результаты.

(1) Магнитно-электрические явления порождаются средой, находящейся в известном состоянии движения

или давления в каждой части магнитного поля, но отнюдь не непосредственным взаимодействием на расстоянии магнитов или электрических токов. Субстанция, производящая эти эффекты, может быть некоторой частью обычного вещества или она может быть эфиром, связанным с веществом. Ее плотность—наибольшая в железе и наименьшая в диамагнитных веществах; но во всех случаях за исключением железа [также никеля, кобальта и др.] она должна быть весьма мала, так как магнитная индуктивная емкость большинства веществ не отличается заметно от магнитной индуктивной емкости того, что мы называем вакуумом.

(2) В каждой части поля, через которое проходят магнитные силовые линии, имеет место состояние неравного в различных направлениях давления, причем направление силовой линии является направлением наименьшего давления, так что силовые линии могут рассматриваться как направления натяжения [налагающегося на давление].

(3) Неравенство давления обусловлено существованием в среде вихрей или водоворотов, оси которых расположены в направлении силовых линий и направления вращения которых определяются направлением силовых линий.

Мы предположили, что это направление является направлением движения по часовой стрелке для наблюдателя, смотрящего с юга на север. Мы могли бы с равным правом избрать обратное направление, поскольку речь идет об известных фактах, считая смоляное электричество положительным, вместо того, чтобы считать положительным стеклянное электричество. Действие этих вихрей зависит от их плотности и от их скорости по окружности и не зависит от их диаметра. Плотность должна быть пропорциональной емкости субстанции в отношении магнитной индукции, принимая плотность вихрей в воздухе равной единице. Скорость должна быть очень значительной для того, чтобы производить столь мощные эффекты в среде ничтожной плотности. Размер вихрей неопределенный, но он,

повидимому, весьма мал по сравнению с размерами целой молекулы обычной материи *).

(4) Между вихрями находятся одиночные слои круглых частичек, так что образуется система ячеек, которые отделены друг от друга слоями частиц и вещество каждой ячейки может вращаться, как вихрь.

(5) Частицы, образующие слои, находятся в *соприкосновении качения* (без трения и скольжения) с обоими вихрями, которые они разделяют. Они могут совершенно свободно катиться между вихрями и, таким образом, изменять свое местоположение при условии, что они остаются в пределах *одной целой молекулы* среды. Переходя, однако, из одной молекулы в другую, они испытывают сопротивление и порождают нерегулярные движения, которые проявляют себя в качестве тепла. Эти частицы в нашей теории играют роль электричества. Их поступательное движение составляет электрический ток, их вращение служит для передачи движения вихрей от одной части поля к другой; возникающие при этом тангенциальные давления выражают электродвижущую силу. Представление о частицах, которые, соприкасаясь со сторонами вихрей, катятся без скольжения, не может показаться удовлетворительным. Я не выставляю эту концепцию как истинное отображение связей, существующих в действительности, и даже в качестве гипотезы о сущности электричества. Этот способ связи, однако, механически мыслим, и он легко может быть исследован и приспособлен к выявлению действительных механических отношений между известными электромагнитными явлениями. Я осмеливаюсь поэтому утверждать, что всякий, кто понимает предварительный и временный характер этой гипотезы, найдет, что

*) Вращательный момент системы вихрей зависит от их среднего диаметра, так что если бы диаметр был не столь мал, мы могли ожидать, что магнит вел бы себя так, как если бы он содержал внутри себя вращающееся тело. Существование такого вращения могло бы быть обнаружено опытами по свободному вращению магнита. Я делал опыты с целью исследования этого вопроса, но еще не полностью проверил аппарат (15).

она ему скорее помогает, чем мешает в его поисках истинного истолкования явлений [44].

Действие между вихрями и слоями частичек в некоторой части является тангенциальным, так что если бы было какое-нибудь скольжение или относительное движение между соприкасающимися частями, тогда была бы потеря энергии в силовых линиях и постепенное превращение этой энергии в тепло. Мы знаем, однако, что силовые линии около магнита существуют в течение неограниченного времени без какого-либо расхода энергии. Отсюда мы должны заключить, что там, где имеет место тангенциальное действие между различными частями среды, нет скольжения между этими частями. Мы должны, следовательно, допустить, что вихри и частицы катятся без скольжения и что внутренние слои каждого вихря получают присущую им скорость от наружных слоев без скольжения, иначе говоря, что угловая скорость должна быть одной и той же во всем вихре [45].

Единственный процесс, в котором электромагнитная энергия теряется и превращается в тепло, заключается в переходе электричества от одной молекулы к другой. Во всех прочих случаях энергия вихрей может быть уменьшена только в том случае, если магнитным действием производится эквивалентное количество механической работы.

(6) Действие электрического тока на окружающую среду заключается в том, что он приводит вихри, находящиеся в контакте с током, во вращательное движение, так что части, близко расположенные к току, движутся в том же направлении, что и ток, а части, находящиеся дальше от тока, будут вращаться в противоположном направлении. Если среда является проводником электричества, так что промежуточные частицы могут свободно двигаться в любом направлении, то частицы, касающиеся внешней стороны этих вихрей, будут двигаться в направлении, противоположном направлению тока; таким образом, возникает индуктированный ток в направлении, противоположном первичному току.

Если бы не было сопротивления движению частиц,

наведенный ток был бы равен и противоположен первичному току и продолжался до тех пор, пока длится первичный ток; таким образом, это исключило бы всякое действие первичного тока на расстоянии. Если имеется сопротивление наведенному току, его частицы действуют на вихри, находящиеся за ними, и передают им вращательное движение до тех пор, пока, наконец, все вихри в среде приводятся в движение с такими скоростями вращения, что частицы между ними не имеют никакого другого движения, кроме вращательного, и не образуют поэтому токов.

При передаче движения от одного вихря к другому возникает сила между частицами и вихрями, которая сдвигает частицы в одном направлении, а вихри в противоположном. Силу, действующую на частицы, мы называем электродвижущей силой. Реакция на вихри равна и противоположна ей, так что электродвижущая сила не может переместить какую-либо часть среды как целое, она может только производить ток. Когда первичный ток прерывается, все электродвижущие силы действуют в обратном направлении.

(7) Когда электрический ток или магнит движется вблизи проводника, то вследствие этого движения скорость вращения вихрей в каждой части поля изменяется. Сила, с которой надлежащее количество вращения передается каждому вихрю, в этом случае представляет собой также электродвижущую силу, и она может возбудить электрический ток в замкнутой цепи.

(8) Если проводник движется в магнитном поле, то возбуждается движение вихрей и внутри них и на периферии, причем происходят изменения их формы. Сила, которая вызывает эти изменения формы, представляет электродвижущую силу, действующую на перемещающийся проводник; вычислениями мы находили, что величина ее соответствует данным эксперимента.

Мы показали, каким образом электромагнитные явления могут быть представлены воображаемой системой молекулярных вихрей. Те, кто склоняется к принятию гипотезы такого рода, найдут здесь условия,

которые должны быть выполнены для того, чтобы придать ей математическую последовательность и установить насколько возможно удовлетворительное сравнение между вытекающими из нее следствиями и известными фактами. Но кто ищет объяснения фактов на другом пути, те имеют возможность сравнить эту теорию с теорией токов, свободно циркулирующих в телах, теорией, предполагающей, что электричество действует на расстоянии с силой, зависящей от скорости и, следовательно, не подчиняющейся закону сохранения энергии [46].

Факты электромагнетизма так сложны и разнообразны, что объяснение какого-нибудь числа их несколькими различными гипотезами должно представлять интерес не только для физиков, но и для всех, кто хочет понять, в какой мере подходящее объяснение данных явлений служит признаком истинности теории или в какой мере мы должны рассматривать совпадение математического выражения двух рядов явлений в качестве указания на то, что эти явления—одного и того же рода. Мы знаем, что частичные совпадения такого рода были обнаружены, и тот факт, что эти совпадения только частичны, подтверждается расхождением законов двух рядов явлений в других отношениях. В процессе дальнейшего развития физики мы можем встретиться со случаями более полного совпадения, которые потребуют длительных исследований для вскрытия существенных различий (16).

Примечание. После того как была написана первая часть этой работы, я в Crelle's Journal за 1858 год *) увидел статью профессора Гельмгольца о движении жидкости. В этой статье он устанавливает, что линии тока в жидкости распределяются сообразно тем же самым законам, как магнитные силовые линии, причем линия электрического тока соответствует осевой линии элементов объемов жидкости, которые находятся в состоянии вращения. Это—дополнительный пример *физической аналогии*, исследование которой может служить выяснению одновременно двух рядов явлений—электромагнетизма и гидродинамики (17).

*) Crelle's Journal, 55, стр. 25, 1858.

