
ЭЛЕКТРОДИНАМИКА
А. М. АМПЕР

А.-М. АМПЕР.

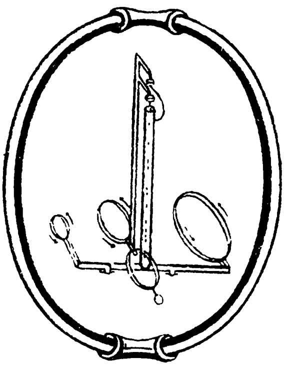
АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА ССР

КЛАССИКИ НАУКИ

А.-М. АМПЕР

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

РЕДАКЦИЯ,
СТАТЬИ И ПРИМЕЧАНИЯ
ПРОФЕССОРА Я. Г. ДОРФМАНА



ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
1954


ЭЛЕКТРОДИНАМИКА
А.М.АМПЕР

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ, ВЫВЕДЕННАЯ ИСКЛЮЧИТЕЛЬНО ИЗ ОПЫТА[1]

Эпоха, отмеченная в истории наук работами Ньютона, — не только эпоха наиболее важного из открытий, какие когда-либо делались человеком о причинах великих явлений природы; это также эпоха, когда человеческий ум проложил себе новую дорогу в области наук, изучающих эти явления.

Причину данных явлений искали ранее почти исключительно в импульсе со стороны неведомой жидкости, увлекающей материальные частицы в направлении движения своих собственных частиц, и всюду, где замечали вращательное движение, воображали себе вихрь, вращающийся в ту же сторону [2].

Ньютон показал, что движение такого рода, как и все движения, которые мы видим в природе, должно быть сведено посредством вычисления к силам, действующим между двумя материальными частицами по прямой, которая их соединяет. При этом действие, оказываемое одной из частиц на другую, равно и противоположно действию, которое эта последняя одновременно оказывает на первую, и потому если предположить, что обе частицы неизменно связаны между собою, то из их взаимных действий не может произойти никакого движения. Именно этот закон, подтвержденный ныне различными опытами и различными вычислениями, был высказан Ньютоном в последней из трех аксиом, данных им в начале „Philosophiae naturalis principia mathematica“ [3]. Но было недостаточно подняться до этой великой идеи, нужно было еще найти закон, по которому изменяются силы в зависимости от взаимного положения частиц, между которыми они действуют, или, что то же, дать их выражение в виде формулы.

Ньютон был далек от предположения, что подобный закон можно измыслить, исходя из более или менее правдоподобных отвлеченных соображений. Он установил, что такой закон должен быть выведен из наблюдаемых фактов, или, вернее, из эмпирических законов, которые, подобно законам Кеплера, являются лишь обобщенными результатами большого числа фактов.

Начать с наблюдения фактов, изменять, по возможности, сопутствующие им условия, сопровождая эту первоначальную работу точными измерениями, чтобы вывести общие законы, основанные всецело на опыте, и в свою очередь вывести из этих законов, независимо от каких-либо предположений о природе сил, вызывающих эти явления, математическое выражение этих сил, т. е. вывести представляющую их формулу, — вот путь, которому следовал Ньютон. Тем же путем обычно шли во Франции ученые, которым физика обязана своими громадными успехами в последнее время. Этим же путем руководился и я во всех моих исследованиях электродинамических явлений. Чтобы установить законы последних, я искал ответа единственно в опыте, и я вывел отсюда формулу, которая одна только может выразить силы, вызывающие указанные явления. Я не сделал ни одного шага к изысканию причины, с которой можно было бы связать происхождение сил, будучи убежден в том, что всем подобным изысканиям должно предшествовать чисто экспериментальное познание законов. Эти законы должны затем служить единственным основанием для вывода формулы, выражающей элементарные силы, направление которых необходимо совпадает с направлением прямой, соединяющей две материальные точки, между которыми они действуют. Вот почему я избегал упоминать о тех представлениях, которые могли у меня сложиться в отношении причины и природы сил, исходящих из вольтаических проводников, и коснулся их только в примечаниях к „Exposé sommaire des nouvelles expériences électro-magnétiques faites par plusieurs physiciens depuis le mois de mars 1821" [4], доложенному мною в открытом заседании Академии наук 8 апреля 1822 г. То, что я сказал тогда по этому вопросу, можно найти на стр. 215 моего „Recueil d'observations électro-dynamiques" [5]. Хотя этот путь — единственный, который может привести к результатам, не зависящим от всяких гипотез, тем не менее физики остальной Европы, повидимому, не оказывают ему того предпочтения, каким он пользуется со стороны французов. Даже знаменитый ученый, увидевший впервые, как полюсы магнита под влиянием проволоки, служащей проводником, стали перемещаться в направлениях, перпендикулярных направлениям проволоки, вывел из этого заключение, что электрическая материя вращается вокруг проводника и толкает эти полюсы в направлении своего движения, в точности подобно тому, как Декарт заставлял материю своих вихрей вращаться в направлении вращения планет [6]. Руководствуясь принципами ньютоновской философии, я свел явление, замеченное г. Эрстедом, как это уже делалось в отношении всех явлений подобного рода, изучаемых нами в природе, к силам, действующим всегда по прямой, соединяющей две частицы, между которыми они проявляются. И если я установил, что то же распределение или то же движение электричества, какое происходит в проводнике, наблюдается и вокруг частичек магнита, то, конечно, не затем, чтобы заставить их действовать импульсами наподобие вихря, а затем, чтобы вычислить, согласно моей формуле, силы, которые в результате должны действовать между этими частичками и частичками проводника или другого магнита по прямым, соединяющим попарно частицы, взаимодействие которых исследуется. Далее, я имел в виду показать, что результаты вычислений полностью подтверждаются: 1) моими опытами, а также опытами, произведенными г. Пулье для точного определения положений, в каких должен находиться подвижной проводник, чтоб он оставался в равновесии, будучи подвержен действию либо другого проводника, либо магнита; 2) согласием, в котором эти результаты находятся с законами, выведенными Кулоном и г. Био из их опытов, первым — относительно взаимодействия двух магнитов, вторым — для взаимодействия магнита и тока [7].

Формулы, выведенные таким образом на основании нескольких общих фактов, о которых заключают из достаточно большого числа наблюдений, так что нет повода сомневаться в их достоверности, — имеют главным образом то преимущество, что они остаются независимыми как от гипотез, которыми могли пользоваться авторы при отыскании этих формул, так и от гипотез, которые впоследствии могут притти им на смену. Выражение для всемирного тяготения, выведенное из законов Кеплера, ни в какой мере не зависит от гипотез о механической его причине, которые пробовали строить некоторые авторы. Теория теплоты действительно основывается на общих фактах, о которых судят непосредственно из наблюдения. А поскольку уравнение, основанное на этих фактах, подтверждается согласием между результатами, получаемыми из этого уравнения, и результатами, полученными из опыта, то его должны признать за выражение истинных законов распространения тепла как те, кто приписывает возникновение тепла излучению теплотворных молекул, так и те, кто прибегает для объяснения того же явления к колебаниям жидкости, разлитой в пространстве. Необходимо только, чтобы первые показали, каким образом уравнение, о котором идет речь, вытекает из их точки зрения, а вторые — вывели его из общих формул колебательного движения. Это необходимо не для того, чтобы подкрепить чем-либо достоверность данного уравнения, а затем, чтобы соответственно обусловить возможность сохранения вышеуказанных гипотез. Физик, который не составил себе определенного мнения по этому вопросу, принимает уравнение как точное отображение фактов, не заботясь о том, как именно оно может быть получено на основании того или другого из объяснений, о которых мы упоминали. И если бы новые явления или новые подсчеты доказали, что действие тепла может быть реально объяснено лишь теорией вибраций, великий физик, который впервые дал это уравнение и создал для приложения к предмету своих исследований новые методы интегрирования, остался бы в той же мере творцом математической теории тепла, как и Ньютон является творцом теории планетных движений, хотя последняя и не была доказана его трудами с той же полнотой, с какой ее доказали впоследствии труды его преемников [8].

То же относится и к формуле, которой я выразил электродинамическое действие. Какова бы ни была физическая причина, к которой мы пожелали бы отнести явления, связанные с этим действием, полученная мною формула всегда останется выражением фактов. Если посредством одного из тех соображений, которые позволили объяснить столько других явлений, например притяжение с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния, удастся объяснить эту формулу с помощью либо притяжения, которое становится неощутимым при любом поддающемся оценке расстоянии между частицами, где оно действует, либо посредством колебания жидкости, разлитой в пространстве, — то этим будет сделан шаг вперед в данной области физики. Однако такое исследование, которым я еще и не занимался, хотя и признаю его весьма важным, не изменит ничего в результатах моей работы. Для соответствия принятой гипотезы фактам, ей будет всегда необходимо находиться в согласии с формулой, столь полно их представляющей.

Как только я нашел, что два проводника с током действуют друг на друга, либо взаимно притягиваясь, либо отталкиваясь; как только я выделил и описал действия, производимые ими в различных положениях, в каких они могут находиться относительно друг друга; как только я констатировал равенство действий, оказываемых прямолинейным проводником и проводником извилистым, если последний удаляется от направления первого лишь на чрезвычайно малые расстояния и заканчивается с обоих концов в одних с ним точках, — я стал пытаться выразить формулой величину силы притяжения или отталкивания между двумя из элементов этих проводников или их бесконечно малых отрезков. Я имел в виду возможность вывести отсюда, посредством известных методов интегрирования, действие, которое происходит между двумя участками проводников, заданными по форме и положению.

Невозможность непосредственно подвергнуть исследованию бесконечно малые отрезки вольтаической цепи [9] заставляет по необходимости исходить из наблюдений над проводниками конечной величины, и требуется при этом удовлетворить двум условиям: чтобы наблюдения могли быть произведены с очень большой точностью и чтобы они давали возможность определить величину взаимодействия двух бесконечно малых отрезков такого проводника. Это может быть достигнуто двумя способами. Один заключается в том, что сначала измеряется, как только возможно точно, величина взаимодействия двух участков конечных размеров, помещенных последовательно в различных расстояниях и различных положениях относительно друг друга, ибо, очевидно, действие зависит здесь не только от расстояния. Далее, нужно сделать некоторое предположение относительно величины взаимодействия двух бесконечно малых отрезков, заключить отсюда о том действии, которое должно иметь место для проводников конечных размеров, с которыми производилось наблюдение, и изменять гипотезу до тех пор, пока результаты вычисления не совпадут с результатами опыта. Это — способ, который я предполагал избрать вначале, как я подробно объяснил в работе, доложенной Академии Наук 9 октября 1820 г.[1]

[1] Эта работа не была опубликована отдельно, но ее важнейшие результаты были включены в другую работу, опубликованную мною в 1820 г., в томе XV „Annales de chimie et de physique“ [10].

Хотя этот путь ведет нас к истине лишь косвенным путем гипотез, но тем не менее он имеет большую ценность, ибо является иногда единственным, какой можно применить в исследованиях такого рода. Один из членов этой Академии, работы которого охватывали все области физики, прекрасно описал его в „Notice sur l'aimantation imprimée aux métaux par l'électricité en mouvement", зачитанной нам 2 апреля 1821 г., и назвал его работой по своего рода угадыванию, которая и является завершением почти всех физических исследований.[1]

Но существует и другой способ более непосредственного достижения той же цели. Это способ, который я применял в дальнейшем и который привел меня к искомому результату. Он состоит в том, чтобы констатировать путем опыта, что подвижной проводник остается точно в равновесии под влиянием равных сил или равных моментов вращения, вызванных участками неподвижных проводников, форма и величина которых могут быть произвольно изменены без нарушения равновесия при соблюдении условий, определяемых опытом. Отсюда можно заключить непосредственно на основании вычисления, какова должна быть величина взаимодействия двух бесконечно малых отрезков, чтобы равновесие на самом деле не зависело от всех изменений формы или размеров, соответствующих этим условиям.

Указанный метод может быть применен только тогда, когда в силу самой природы изучаемого действия имеются случаи равновесия, не зависящие от формы тел. Поэтому он более ограничен в применениях, чем тот метод, о котором я говорил выше. Но поскольку в вольтаических проводниках как раз осуществляется этот род равновесия, естественно предпочесть данный метод всем другим, как более прямой, более простой и допускающий самую большую точность, если только опыты сделаны с соответствующими предосторожностями. К тому же, в отношении действия, производи-

---

[1] См.: Journal des savants, апрель 1821 г., стр. 233 [[11]].

мого такими проводниками, есть еще значительно более решающий довод в пользу описанного метода, когда дело идет об исследованиях, касающихся определения сил, вызывающих данное действие: это — чрезвычайная трудность постановки опытов в том случае, когда, например, имеется в виду измерять силы числом колебаний тела, подвергнутого их действию. Эта трудность зависит от того, что при воздействии неподвижного проводника на подвижную часть вольтаического тока, части приспособления, необходимого для ее связи с батареей, действуют на подвижную часть одновременно с неподвижным проводником и таким образом искажают результаты опыта. Мне, однако, кажется, что мне удалось преодолеть указанную трудность в особом приборе, приспособленном для измерения взаимодействия двух проводников, одного неподвижного, другого подвижного, посредством числа колебаний последнего, причем изменяется форма неподвижного проводника. Я опишу прибор позднее в этом же труде.

Правда, при измерении таким же способом действия проводника с током на магнит эти препятствия не встречаются. Но такой метод не может быть применен в том случае, когда дело идет об определении сил, оказываемых двумя вольтаическими проводниками друг на друга, — определением, которое должно быть первой задачей наших исследований при изучении новых явлений. В самом деле, очевидно, что если бы действие проводника с током на магнит зависело от иной причины, чем взаимодействие двух проводников, то опыты, произведенные в отношении первого, не могли бы нам дать ничего для познания второго. Если же свойства магнитов зависят только от электрических токов, окружающих каждую из их частиц, то, чтобы вывести отсюда определенные следствия в отношении действия, оказываемого на эти токи проводником с током, необходимо было бы знать заранее, обладают ли они той же интенсивностью близ поверхности магнита, что и внутри его, или по какому закону меняется их интенсивность. Далее необходимо было бы знать, являются ли плоскости токов всюду перпендикулярными к оси намагниченного бруска, как я предположил вначале, или же взаимодействие токов одного и того же магнита придает этим плоскостям тем больший наклон относительно его оси, чем дальше они от нее отстоят и чем больше удаляются от ее середины, как я заключил впоследствии на основании разницы в положении полюсов магнита и положениях точек, обладающих теми же свойствами в проводнике, скрученном в виде спирали [12].[1]

---

[1] Я считаю не лишним поместить здесь следующую заметку из обзора работ Академии за 1821 г., опубликованного 8 апреля 1822 г. (см. математическую часть этого обзора, стр. 22 и 23).

„Главная разница между действием магнита и вольтаического проводника, часть которого навита на другой в виде спирали, заключается в том, что полюсы первого расположены ближе к середине магнита, чем его концы, тогда как у спирали точки, имеющие то же свойство, находятся в точности на концах этой спирали. Так оно и должно быть, если интенсивность токов в магните убывает по направлению от середины к концам. Но г. Ампер нашел впоследствии другую причину, которая может дать тот же эффект. После того, как он заключил из своих опытов, что электрические токи магнита проходят вокруг каждой из его частиц, ему было легко убедиться, что нет необходимости предполагать, как он сделал вначале, будто плоскости этих токов всегда перпендикулярны к оси магнита. Их взаимодействие должно стремиться дать этим плоскостям наклон к оси, особенно у ее концов. Таким образом, полюсы оказываются расположенными не в точности на концах оси, как это должно было бы следовать из вычислений по формулам, данным г. Ампером, в предположении, что все токи имеют одинаковую интенсивность и лежат в плоскостях, перпендикулярных к оси. Полюсы должны поэтому приближаться к середине магнита на часть его длины тем бо́льшую, чем большее число токов наклонено таким образом своими плоскостями и чем больше самый наклон. Это происходит в тем большей степени, чем больше толщина магнита по сравнению с его длиной, что и согласуется с опытом. В проводниках с током, имеющих форму спирали, известная часть тока, возвращаясь обратно вдоль оси, уничтожает действие части токов каждого витка, осуществляющееся так, как если бы они были параллельны этой оси. Два указанных обстоятельства при этом безусловно имеют место, хотя, как было сказано

Различные случаи равновесия, установленные мною посредством точных опытов, дают сразу такое же число законов, приводящих прямо к математическому выражению силы, действующей между двумя элементами вольтаических проводников. Вначале выясняется форма этого выражения, затем определяются постоянные, хотя сначала и неизвестные, числа, которые оно содержит. Точно так же законы Кеплера констатируют прежде всего, что сила, удерживающая планеты на их орбитах, направлена всегда к центру солнца, затем — что она для одной и той жа планеты изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от этого центра и, наконец, что постоянный коэффициент, выражающий ее интенсивность, один и тот же для всех планет. Этих случаев равновесия — четыре: первый из них доказывает равенство абсолютных значений притяжения и отталкивания, которые получаются, когда заставляют пробегать один и тот же ток поочередно в двух противоположных направлениях по неподвижному проводнику, причем не меняется ни его положение, ни расстояние от тела, на которое он действует. Это равен-

---

ранее, для магнитов они не обязательны. Поэтому замечено, что у данных спиралей имеются полюсы, подобные полюсам магнита, но находящиеся в точности на концах, как и дает вычисление".

Как видно из этой заметки, уже в 1821 г. я заключил из явлений, наблюдающихся в магнитах: 1) что если рассматривать каждую частичку намагниченного бруска как магнит, то оси этих элементарных магнитов должны быть не параллельны оси магнита, как полагали тогда, а расположены в направлениях, наклонных к этой оси, и в направлениях, определяемых их взаимодействием; 2) что это расположение является одной из причин того, почему полюсы магнита находятся не на его концах, а между концами и серединой магнита. Как то, так и другое из этих предположений в настоящее время вполне подтверждено результатами, выведенными г. Пуассоном [13] из формул, при помощи которых он представил распределение сил, исходящих из каждой частицы магнитов. Эти формулы основаны на законе Кулона, и потому в них не приходится ничего изменять, если принять то истолкование, которое я даю магнитным явлениям, ибо этот закон является следствием моей формулы, как будет видно из дальнейшего изложения.

ство вытекает из следующего простого наблюдения. Представим себе два равных отрезка одного и того же провода, обмотанных шелком для изоляции, причем они оба либо прямолинейные, либо скручены вместе так, что образуют один вокруг другого две спирали, все части которых одинаковы и через которые проходит один и тот же электрический ток, как в одном направлении, так и — в обратном. Такие два отрезка не оказывают никакого действия ни на подвижной проводник, ни на магнит. Это равенство можно также обнаружить при помощи подвижного проводника, изображенного на рис. 9 табл. I тома XVIII „Annales de chimie et de physique", относящейся к описанию одного из моих электродинамических приборов; этот проводник воспроизведен здесь (рис. 1). С указанной целью на некотором расстоянии под нижней частью $dee'd'$ этого проводника помещается в любом направлении прямолинейный горизонтальный проводник AB, изогнутый несколько раз, так что середина его как по длине, так и по толщине находится на вертикали, проходящей через острия x, y, вокруг которых свободно вращается подвижной проводник. Тогда можно видеть, что проводник остается в том положении, в каком его поместили. Это доказывает, что действия, оказываемые неподвижным проводником на два одинаковых и расположенных симметрично отрезка вольтаического проводника $bcde$ и $b'c'd'e'$, взаимно уравновешиваются. Эти две части отличаются только тем, что в одной из них электрический ток проходит, приближаясь к неподвижному проводнику AB, в другой — удаляясь от него. Равновесие осуществляется при любом значении угла, образованного направлением неподвижного проводника с плоскостью подвижного проводника. Если теперь рассмотреть

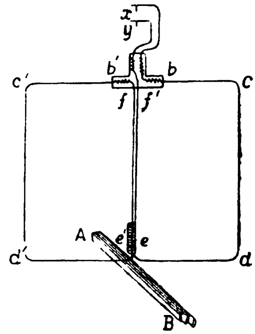


Рис. 1.

сначала два действия, которые происходят между каждым из этих отрезков гальванического контура и той половиной проводника, к которой он всего ближе, а затем два действия между каждым из этих отрезков и половиной того же проводника, от которой он всего дальше, то легко убедимся в том, что: 1) равновесие, о котором мы сейчас говорим, может иметь место для всех значений указанного угла лишь тогда, когда оно осуществляется в отдельности между двумя первыми и двумя последними действиями; 2) если одно из двух первых — притягивающее, потому что стороны острого угла, образованного отрезками проводника, между которыми оно осуществляется, пробегаются электрическим током в одном и том же направлении, то другое будет отталкивающим, потому что оно будет осуществляться между двумя сторонами угла, равного первому и противоположного ему при вершине, которые пробегаются тем же током в противоположных направлениях. Таким образом, для равновесия между ними необходимо, во-первых, чтобы два первых действия, которые приводят во вращение подвижной проводник, одно — в одном направлении, другое — в обратном, были равны между собой. Затем необходимо, чтобы два последних действия, одно притягивающее, другое отталкивающее, которые происходят между сторонами двух тупых углов, противоположных при вершине и дополняющих те, о которых мы только что упоминали, были также равны между собою. Ясно без дальнейших замечаний, что эти действия представляют не что иное, как суммы произведений сил, действующих на каждую бесконечно малую часть подвижного проводника, на расстояния от них до вертикали, вокруг которой он может свободно вращаться. Поскольку, однако, расстояния от соответствующих бесконечно малых отрезков двух ветвей $bcde$, $b'c'd'e'$ до этой вертикали всегда равны между собой, равенство моментов необходимо влечет за собою равенство сил.

Второй из трех общих случаев равновесия — это случай, отмеченный мною в конце 1820 г. Он состоит в равенстве действий, оказываемых на подвижной прямолинейный проводник двумя неподвижными проводниками, расположенными на равных расстояниях от первого, причем один из них прямолинейный, другой изломан и изогнут тем или иным способом, причем форма изгибов произвольна. Вот описание прибора, которым я проверил равенство этих двух действий посредством опытов весьма большой точности. Результаты их я сообщил Академии в заседании 26 декабря 1820 г.

В прорезах двух обращенных друг к другу сторон двух вертикальных деревянных линеек PQ, RS (рис. 2) находятся: в первом — прямолинейная проволока *bc*, во втором — проволока *kl*, образующая в плоскости, перпендикулярной к плоскости, в которой лежат оси обеих линеек, изгибы и изломы по всей своей длине, как показано на чертеже вдоль линейки RS, так что эта проволока в любой из своих точек отходит лишь весьма мало от середины прореза.

Эти две проволоки служат проводниками для двух частей одного и того же тока, который заставляют действовать отталкивающе на часть GH подвижного проводника, составленную из двух прямолинейных, равных и почти замкнутых контуров BCDE, FGHI. Через них проходит электрический ток в противоположных направлениях, чтобы воздействие земли на эти два контура взаимно уничтожилось. На двух концах этого подвижного проводника имеются два острия A и K, погруженные в чашечки M и N со ртутью, припаянные к концам двух медных ответвлений *g*M, *h*N. Эти две ветви, при посредстве медных муфт *g* и *h*, соединяются: первая — с медной проволокой *gfe*, обмотанной по спирали вокруг стеклянной трубки *hgf*, другая — с прямолинейной проволокой L*i*, проходящей внутри той же трубки и заканчивающейся в желобке *ki*, выдолбленном в куске дерева *uw*, который может быть закреплен на любой высоте против стойки Z посредством зажима O. Согласно опыту, о котором я говорил выше, эта часть контура, образованная спиралью *gf* и прямолинейной нитью L*i*, не может оказывать никакого действия на подвижной проводник. Чтобы электрический ток проходил в неподвижных проводниках *bc* и *kl*, проволоки,

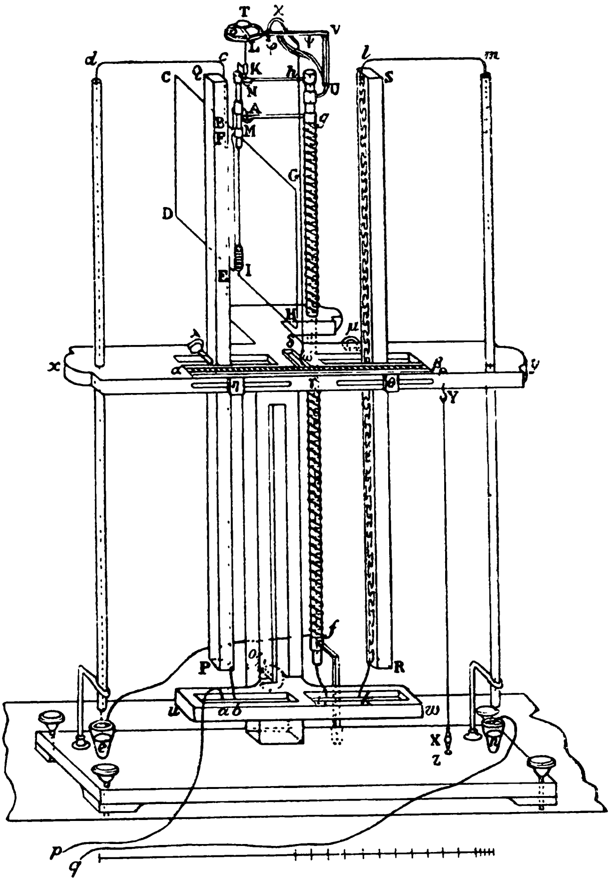


Рис. 2.

которыми образованы эти проводники, продолжаются в *cde* и *lmn* в двух стеклянных трубочках,[1] прикрепленных к под-

[1] Эти трубочки предназначены для того, чтобы воспрепятствовать сгибанию проволок, которые в них заключаются; их удерживают на равных расстояниях от обоих проводников *bc*, *kl*, чтобы их воздействие

ставке *xy*, и оканчиваются первая в чашке *e*, вторая в чашке *n*. Когда все расположено таким образом, наливают ртуть во все чашечки и желобки *ba*, *ki* и погружают положительный реофор[14] *pa* в желобок *ba*, также выдолбленный в деревянной доске *uw*, а отрицательный реофор *qn* — в чашечку *n*. Ток обегает все проводники прибора в следующем порядке: *pabcdefg*MABCDEFGHIKN*hiklmnq*. Таким образом, он является восходящим в двух неподвижных проводниках и нисходящим в части GH подвижного проводника, подверженной их действию и находящейся посреди промежутка между двумя неподвижными проводниками в плоскости, проходящей через их оси. Эта часть GH поэтому отталкивается проводниками *bc* и *kl*. Отсюда следует, что если действие этих двух проводников в одинаковых расстояниях одно и то же, то GH должно остановиться по середине промежутка, их разделяющего, что и происходит в действительности.

Полезно отметить следующее.

1) Хотя оси неподвижных проводников находятся на равных расстояниях от GH, нельзя все же сказать в строгом смысле, что расстояние одно и то же для всех точек проводника *kl* вследствие изгибов и поворотов, образуемых этим проводником. Но так как все эти изгибы и повороты лежат в плоскости, перпендикулярной к той, которая проходит через GH и оси неподвижных проводников, то, очевидно, зависящая от этих изгибов разница в расстояниях будет сколь возможно малой. Она будет настолько меньше половины ширины желобка RS, насколько эта половина меньше промежутка между двумя линейками. Действительно, эта разница в том случае, когда она — наибольшая возможная, равна разнице в длине между радиусом и хордой дуги, для которой касательная составляет половину ширины желобка и которая принадлежит кругу с диаметром, равным расстоянию

на GH, уменьшающее действие этих двух проводников, уменьшало бы их в равной мере.

между линейками. 2) Если разложить каждую бесконечно малую часть проводника kl, как можно было бы разложить силу, на две другие малые части, являющиеся ее проекциями, одна — на вертикальную ось этого проводника, другая — на горизонтальные линии, проведенные через все его точки в плоскости, в которой лежат все образуемые им изгибы и повороты, то сумма первых будет равна длине этой оси, если взять со знаком минус те проекции, которые, имея направление, противоположное направлению остальных, должны дать и обратное действие. Таким образом, общее действие, обусловленное всеми этими проекциями, будет эквивалентно действию прямолинейного проводника, равного длине оси, т. е. действию проводника bc, расположенного по другую сторону в том же расстоянии от GH. Действие же вторых проекций на тот же подвижной проводник GH будет равно нулю, ибо плоскости, восставленные перпендикулярно в серединах каждой из них, будут в основном практически проходить через направление GH. В результате действие этих двух рядов проекций на GH будет равно действию bc. Так как, однако, опыт показывает, что изогнутый проводник kl также производит действие, одинаковое с действием bc, каковы бы ни были изгибы и обороты, им образуемые, то отсюда следует, что он действует во всех случаях как совокупность двух рядов проекций. А это может происходить при любых изгибах и поворотах лишь в том случае, если каждая из частей проводника действует в отдельности как совокупность своих двух проекций [15].

Дабы этот опыт был выполнен со всей возможной точностью, необходимо, чтобы обе линейки были строго вертикальны и находились в точности на одинаковых расстояниях от подвижного проводника. Для выполнения этого условия, перекладину xy снабжают шкалой $\alpha\beta$ и укрепляют линейки двумя гайками η и θ и двумя винтами λ, μ, что позволяет отдалять или сближать их, как угодно. При этом они все время удерживаются на равном расстоянии от середины γ

шкалы $\alpha\beta$. Аппарат построен так, что обе линейки перпендикулярны к перекладине xy, а последняя устанавливается горизонтально при помощи винтов, которые изображены в четырех углах основания прибора, и нитью с грузом XY, точно соответствующей точке Z, которая намечается должным образом на этом основании, когда перекладина xy строго горизонтальна.

Чтобы придать проводнику ABCDEFGHIK подвижность вокруг вертикальной оси, расположенной на равных расстояниях от двух проводников bc, kl, этот проводник подвешивается на очень тонкой металлической нити, закрепленной в центре головки T, которая может вращаться, не изменяя расстояния от этих двух проводников. Эта головка находится в центре маленького циферблата o, указатель которого L показывает, где нужно остановить вращение, чтобы часть GH подвижного проводника соответствовала, при отсутствии кручения нити, середине промежутка между двумя неподвижными проводниками bc, kl. Таким образом, можно немедленно вернуть стрелку в требуемое положение каждый раз, когда хотят повторить опыт. Убедиться в том, что GH действительно находится в равных расстояниях от bc и kl, можно при помощи другой нити с грузиком $\psi\omega$, закрепленной на изогнутом медном стержне $\varphi\chi\psi$, поддерживаемом, как и циферблат o, суппортом UVT, в котором этот стержень $\varphi\chi\psi$ может вращаться вокруг оси головки φ, его заканчивающей. Таким путем можно легко подвести острие грузика ω на среднюю линию $\gamma\delta$ шкалы $\alpha\beta$. Когда проводник занимает должное положение, три вертикали $\psi\omega$, GH и CD находятся в одной плоскости, в чем можно легко убедиться, поместив глаз в этой плоскости впереди $\psi\omega$.

Подвижной проводник, таким образом, оказывается помещенным заранее в положение, при котором должно сохраняться равновесие между отталкивающими воздействиями двух неподвижных проводников, если только эти отталкивания в точности одинаковы. Их можно тогда осуществить, погружая в ртуть желобка *ba* и чашки *n* проволоки *ap*, *nq*, которые присоединяются к двум концам батареи. Тогда мы увидим, что проводник остается в том же положении, несмотря на большую подвижность при этом роде подвешивания. Между тем, если переместить, хотя бы даже очень немного, указатель L, вследствие чего GH примет положение, в котором он уже не будет находиться в равном расстоянии от неподвижных проводников *bc*, *kl*, то мы увидим, что в тот момент, когда устанавливается сообщение с батареей, он сместится, удаляясь от того из проводников, к которому находится ближе. Таким образом, когда я построил свой прибор, я установил равенство действий двух неподвижных проводников посредством опытов, повторенных много раз со всеми необходимыми предосторожностями, так что не могло оставаться никаких сомнений относительно их результатов.

Можно также доказать этот закон посредством очень простого опыта. Для этого достаточно взять обмотанную шелком медную проволоку, часть которой прямолинейна, а другая часть окружает ее, образуя разнообразные изгибы, но не отделяясь от первой, которая от нее изолирована шелковой обмоткой. Тогда можно установить, что некоторая другая часть проводника не оказывает действия на совокупность этих двух частей. Поскольку она не оказывала бы действия на совокупность этих двух прямолинейных проволок, через которые проходит один и тот же электрический ток в двух противоположных направлениях (согласно опыту, которым проще всего устанавливается первый случай равновесия), то отсюда следует, что действие изогнутого проводника в точности равно действию прямолинейного проводника, заключенного между теми же конечными точками, ибо оба эти действия уравновешиваются действием прямолинейного проводника той же длины, что и последний, но в котором тот же ток проходит в обратном направлении [16].

Третий случай равновесия заключается в том, что замкнутый контур любой формы не может привести в движение какую-либо часть проводника, образующего дугу круга с центром на неподвижной оси, вокруг которой он может свободно вращаться и которая перпендикулярна к плоскости круга, часть которого образует эта дуга [17].

На основании TT' (рис. 3) в форме столика возвышаются две колонки EF и E'F', связанные между собою двумя пере-

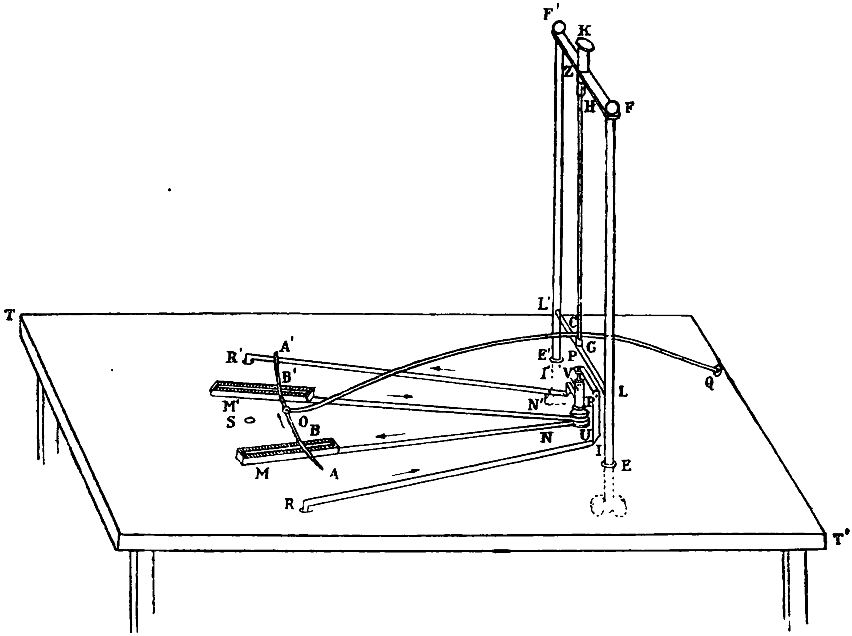


Рис. 3.

кладинами LL' и FF'. Между этими перекладинами поддерживается в вертикальном положении ось GH. Два ее конца G, H, заканчивающиеся остриями, входят в два конических отверстия, сделанных одно в нижней перекладине LL', другое — на конце винта KZ на верхней перекладине FF', который прижимает ось GH, однако без слишком большого усилия. В C к этой оси неподвижно прикреплен суппорт QO; конец

О представляет шарнир, в который вделана своей серединой дуга круга AA′, состоящая из металлической проволоки и постоянно находящаяся в горизонтальном положении. Радиусом ее служит расстояние от точки О до оси GH; эта дуга уравновешена противовесом Q, чтобы уменьшить трение оси GH в конических отверстиях, в которые входят ее концы.

Под дугой AA′ расположены два желобка M и M′, наполненных ртутью, так что поверхность ртути, поднимаясь над их краями, касается дуги AA′ в B и B′. Эти два желобка при помощи металлических проводников MN и M′N′ соединяются с чашками P, P′, наполненными ртутью. Чашка P и проводник MN, соединяющий ее с желобком M, закреплены на вертикальной оси, которая вставлена в столик так, что может свободно вращаться. Через чашку P′, к которой присоединен проводник M′N′, тоже проходит ось, вокруг которой она может вращаться независимо от первой. Чашка изолирована от оси стеклянной трубкой, окружающей эту ось, а стеклянный кружок U отделяет ее от проводника, связанного с желобком M. Таким образом, проводникам MN и M′N′ могут быть приданы любые углы.

Два других проводника IR, I′R′, связанные со столиком, погружены соответственно в чашки P, P′ и соединяют их с выемками, выдолбленными в столике и наполненными ртутью. Наконец, третья выемка S, также наполненная ртутью, находится между двумя первыми.

Вот каким образом надлежит пользоваться этим прибором: погружают один из реофоров, например положительный, в выемку R, а отрицательный — в выемку S, которая приводится в соединение с выемкой R′ посредством криволинейного проводника любой формы. Ток идет по проводнику RI, проходит в чашку P, отсюда в проводник NM, в желобок M, в проводник M′N′, чашку P′, проводник I′R′ и, наконец, из выемки R′ — в криволинейный проводник, который соприкасается со ртутью выемки S, куда погружен отрицательный реофор.

Согласно этому расположению, полный вольтаический контур состоит:

1) из дуги BB′ и проводников MN и M′N′;

2) из контура, образованного частями RIP, P′I′R′ прибора, из криволинейного проводника, идущего из R′ в S, и из самой батареи.

Этот последний контур должен действовать, как замкнутый, ибо он прерывается лишь толщиной стекла, изолирующего две чашки P и P′. Поэтому достаточно наблюдать его действие на дугу BB′, чтобы выяснить на опыте действие замкнутого проводника на дугу в различных положениях, которые можно придать одному и другому.

Если при помощи шарнира O привести дугу AA′ в такое положение, чтобы ее центр находился вне оси GH, эта дуга приходит в движение и скользит по ртути желобков M, M′ вследствие действия замкнутого криволинейного тока, идущего из R′ в S. Если, напротив, ее центр лежит на оси, дуга остается неподвижной. Из этого следует, что две части замкнутого контура, которые стремятся вращать ее вокруг оси в противоположных направлениях, создают моменты вращения, абсолютная величина которых одинакова, притом, независимо от величины части BB′, определяемой углом между проводниками MN, M′N′. Итак, если взять последовательно две дуги BB′, по величине мало отличающиеся одна от другой, то, поскольку момент вращения для обеих равен нулю, он будет равен нулю и для их малой разности и, следовательно, для всякого элемента окружности, центр которого находится на оси. Таким образом, направление действия, оказываемого замкнутым контуром на элемент, проходит через ось, и оно необходимо должно быть перпендикулярно (этому) элементу.

Когда дуга AA′ расположена так, что ее центр находится на оси, части проводника MN и M′N′ оказывают на BB′ отталкивающие действия, равные по величине и противоположные по направлению, так что никакого результата последовать не может. Поскольку движение отсутствует, можно не сомневаться в том, что нет и момента вращения, обусловленного замкнутым контуром.

Когда дуга AA′ перемещается в ином положении, чем мы предположили вначале, действия проводников MN и M′N′ уже не одинаковы. Можне было бы думать, что движение зависит только от этой разности. Однако если мы приближаем или удаляем криволинейный контур, идущий от R′ к S, скорость движения возрастает или убывает, откуда ясно с несомненностью, что замкнутый контур играет большую роль в наблюдаемом эффекте.

Поскольку этот результат осуществляется, какова бы ни была длина дуги AA′, он будет неизбежно иметь место и для каждого из элементов, из которых состоит эта дуга. Мы можем вывести отсюда общее следствие, что действие замкнутого контура или совокупности любых замкнутых контуров на бесконечно малый элемент электрического тока направлено перпендикулярно этому элементу.

При помощи четвертого случая равновесия, о котором мне еще осталось сказать, можно закончить определение постоянных коэффициентов, входящих в мою формулу, не прибегая, как я это сделал вначале, к опытам с взаимодействием магнита и проводника с током. Вот прибор, при помощи которого можно выполнить это определение [16], основываясь единственно на наблюдении явлений, происходящих в том случае, когда исследуется взаимодействие двух проводников.

В столике MN (рис. 4) выдолблено углубление A, наполненное ртутью, откуда выходит неподвижный проводник ABCDEFG, состоящий из медной пластинки; часть CDE имеет форму круга, а части CBA и EFG изолированы друг от друга намотанным на них шелком. Этот проводник припаян в G к медной трубке GH, над которой находится чашечка I, соединяющаяся с трубкой помощью суппорта из того же металла. Из чашечки I выходит подвижной проводник

IKLMNPQRS, часть которого MNP имеет форму круга. Его части MLK и PQR для изоляции обмотаны шелком, и проводник этот поддерживается в горизонтальном положении при помощи противовеса *a*, укрепленного на окружности круга, которую образует вокруг трубки GH продолжение

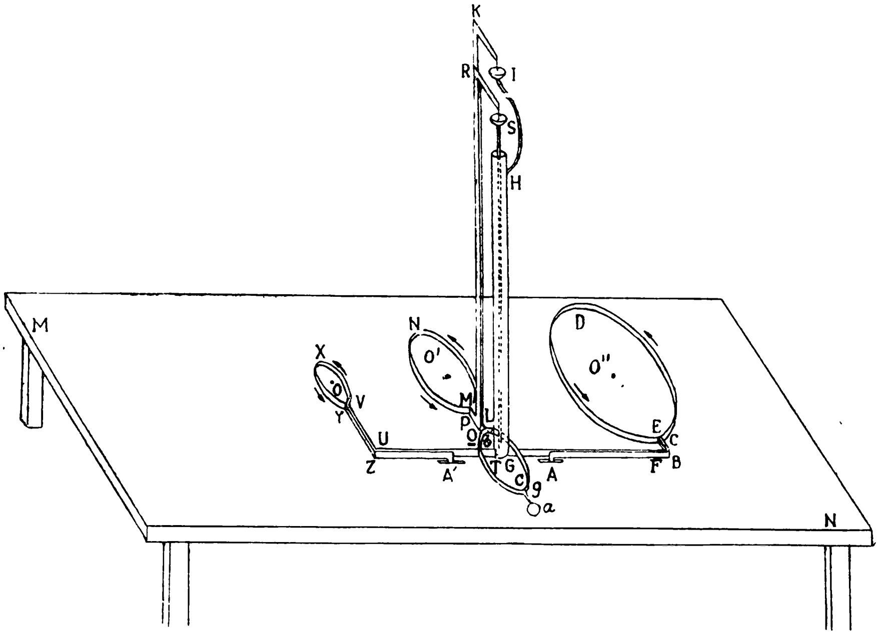


Рис. 4.

bcg пластинки подвижного проводника. Чашка S поддерживается стержнем ST, имеющим общую ось с GH, от которого она изолирована смолистым веществом, налитым в трубку. Основание стержня ST припаяно к неподвижному проводнику TUVXYZA′, выходящему из трубки GH через отверстие достаточно большое, чтобы смола могла изолировать его в данном месте от трубки так же хорошо, как та же смола изолирует остальную часть GH от стержня ST. Этот проводник при выходе из трубки обмотан шелком, чтобы воспрепятствовать соединению части TUV и YZA′. Что касается части VXY, то она имеет форму круга и конец A′ погружен во второе углубление A′, выдолбленное в столике и наполненное ртутью.

Центры O, O′, O″ трех круговых частей лежат на одной прямой; радиусы окружностей, ими образуемых, составляют непрерывную геометрическую пропорцию, и подвижной проводник сначала устанавливается так, чтобы расстояния OO′, O′O″ находились бы в том же отношении, как последовательные члены этой пропорции. Таким образом, круги O и O′ образуют систему, подобную системе кругов O′ и O″. Затем положительный реофор погружается в A, а отрицательный — в A′, ток пробегает последовательно три окружности, имеющие центры в O, O′ и O″, и они попарно отталкиваются, ибо в смежных частях токи идут в противоположном направлении.

Цель опыта, который производится с этим прибором, — доказать, что подвижной проводник сохраняет равновесие в том положении, когда отношение OO′ к O′O″ равно отношению радиусов двух соседних кругов, и если вывести проводник из этого положения, он к нему возвращается, совершая колебания около этого положения [19].

Теперь я поясню, каким образом можно строго вывести из этих случаев равновесия формулу, которой я выразил взаимное действие двух элементов гальванического тока. Для этого нужно показать, что с данными опыта согласуется только предположение о силе, действующей по направлению прямой, которая соединяет середины этих элементов. Прежде всего очевидно, что взаимное действие двух элементов электрического тока пропорционально их длине, ибо если мы представим их себе разделенными на бесконечно малые участки, равные их общей мере, то, поскольку все силы притяжения или отталкивания можно считать направленными по одной и той же прямой, они по необходимости будут суммироваться.

То же действие должно, далее, быть пропорционально силе обоих токов. Чтобы численно выразить силу какого-либо тока, нужно представить себе, что мы выбрали другой какой-либо ток в качестве меры сравнения, что мы взяли два равных элемента в каждом из этих токов, что мы нашли соотношение действий, оказываемых ими на одном и том же расстоянии на один и тот же элемент любого другого тока в том случае, когда он им параллелен и когда его направление перпендикулярно прямым, соединяющим его середину с серединами двух упомянутых элементов. Это отношение и будет мерой одной из интенсивностей, если принять другую за единицу.

Таким образом, если мы обозначим через i, i' отношения силы двух данных токов к силе тока, взятой за единицу, а через ds, ds' длины элементов, которые подвергаются рассмотрению в каждом из них, то их взаимное действие, — когда они будут перпендикулярны к линии, соединяющей их середины, параллельны между собой и расположены на расстоянии друг от друга, равном единице, — выразится через $ii'\,ds\,ds'$. Эту величину мы возьмем со знаком плюс, когда оба тока, имея одно и то же направление, будут притягиваться, и со знаком минус, в обратном случае.

Если бы мы хотели отнести действие обоих элементов к силе тяжести, мы взяли бы за единицу силы вес единицы объема некоторой определенной материи. Но тогда ток, взятый за единицу, уже не был бы произвольным. Он должен был бы быть таким, чтобы притяжение между двумя из его элементов ds и ds', расположенными, как сказано выше, могло поддержать груз, который относился бы к единице веса, как $dsds'$ относится к единице. Когда этот ток будет определен, произведение $ii'dsds'$ будет обозначать отношение притяжения двух элементов тока любой силы, расположенных все в том же положении, к весу, который был бы выбран за единицу силы.

Установив это [20], рассмотрим два элемента, расположенных любым образом. Их взаимодействие будет зависеть от их длины, от силы токов, частью которых они являются, и от их относительного положения. Это положение может быть определено посредством длины r прямой, соединяющей их середины, углов θ и θ', составленных с продолжением той же прямой направлениями двух элементов, совпадающими с направлениями соответствующих им токов, и наконец, угла ω, который образуют между собою плоскости, проведенные через каждое из этих направлений и прямую, соединяющую середины элементов.

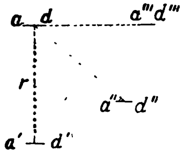


Рис. 5.

Рассмотрение различных притяжений и отталкиваний, наблюдаемых в природе, навело меня на мысль, что сила, выражение которой я ищу, также находится в обратном отношении к расстоянию; для большей общности я предположил ее обратно пропорциональной n-й степени расстояния, где n — постоянная, которую предстояло определить[21]. Тогда, обозначая через ρ неизвестную функцию углов θ, θ', я имел, для общего выражения действия двух элементов ds, ds' двух токов с силами i и i', величину $\frac{\rho i i' ds ds'}{r^n}$. Мне оставалось определить функцию ρ. Для этого я сначала рассмотрел два элемента ad и $a'd'$ (рис. 5), параллельных между собой, перпендикулярных к прямой, соединяющей их середины, и расположенных на известном расстоянии r друг от друга. Их действие, согласно предыдущему, выражается через $\frac{ii' ds ds'}{r^n}$. Затем я предполагаю, что ad остается неподвижным, а $a'd'$ переносится параллельно самому себе так, что его середина находится все время в одном и том же расстоянии от середины (элемента) ad. Поскольку ω всегда равно нулю, величина их взаимодействия может зависеть только от углов, обозначенных выше через θ, θ', которые в этом случае или равны, или являются дополнениями один другого, смотря по тому, направлены ли токи одинаково или же противоположно друг другу. Таким образом я нашел для этой величины $\frac{ii'dsds'\varphi(\theta, \theta')}{r^n}$. Обозначая через k положительную или отрицательную постоянную, к которой сводится $\varphi(\theta, \theta')$, когда элемент $a'd'$ находится в положении $a'''d'''$ на продолжении ad и направлен с ним одинаково, я получил для действия ad на $a'''d'''$ выражение $\frac{kii'dsds'}{r^n}$. В нем постоянная k представляет отношение действия ad на $a'''d'''$ к действию ad на $a'd'$, отношение, которое не зависит от расстояния r, от силы токов i, i' и от длин ds, ds' двух рассматриваемых элементов.

В двух простейших случаях этих выражений электродинамического действия достаточно, чтобы найти общий вид функции ρ, исходя из опыта, согласно которому притяжение бесконечно малого прямолинейного элемента равно притяжению любого криволинейного элемента, оканчивающегося в тех же точках, что и первый, а также из теоремы, которую я далее докажу, а именно, что бесконечно малая часть электрического тока не оказывает никакого действия на другой бесконечно малый участок тока, расположенного в плоскости, проходящей через его середину, и перпендикулярного к его направлению. Действительно, две половины первого элемента оказывают на второй одно и то же действие, но одна — притягивающее, а другая — отталкивающее, ибо в одной из этих половин ток проходит, приближаясь к общему перпендикуляру, а в другой — от него удаляясь. Далее, эти две равные силы составляют между собой угол, который стремится к двум прямым по мере того, как длина элемента стремится к нулю. Их равнодействующая поэтому бесконечно мала по отношению к самим силам, и ею, следовательно, можно пренебречь при вычислении. Установив это, положим, что $Mm = ds$ (рис. 6) и $M'm' = ds'$ представляют собою два элемента электрических токов, середины которых находятся в точках A и A′. Проведем плоскость $MA'm$ через соединяющую их прямую AA′ и через элемент Mm. Заменим участок тока ds, проходящего через этот элемент, его проекцией $Nn = ds\cos\theta$ на прямую AA' и его проекцией $Pp = ds\sin\theta$ на перпендикуляр к AA', восставленный в точке A в плоскости $MA'm$. Далее, заменим часть тока ds', который проходит через $M'm'$, его проекцией $N'n' = ds'\cos\theta$ на прямую AA' и проекцией $P'p' = ds'\sin\theta'$ на перпендикуляр к AA', восставленный в точке A' в плоскости $M'Am'$. Заменим, наконец, эту проекцию двумя проекциями $T't' = ds'\sin\theta'\cos\omega$ на плоскость $MA'm$ и $U'u' = ds'\sin\theta'\sin\omega$ на перпендикуляр к этой плоскости в точке A'. Согласно закону, установленному выше, действие двух элементов ds и ds' будет то же, что и действие совокупности двух частей тока $ds\cos\theta$ и $ds\sin\theta$ на совокупность трех частей $ds'\cos\theta'$, $ds'\sin\theta'\cos\omega$, $ds'\sin\theta'\sin\omega$. Поскольку середина последней находится в плоскости MAm, к которой она перпендикулярна, между нею и двумя частями $ds\cos\theta$, $ds\sin\theta$, лежащими в этой плоскости, не будет никакого взаимодействия. По той же причине не может быть и взаимодействия ни между частями $ds\cos\theta$, $ds'\sin\theta'\cos\omega$, ни между частями $ds\sin\theta$, $ds'\cos\theta$, ибо если мы представим себе плоскость, проходящую через прямую AA' и перпендикулярную к плоскости $MA'm$, то $ds\cos\theta$ и $ds'\cos\theta'$ будут лежать в этой плоскости, а части $ds'\sin\theta'\cos\omega$ и $ds\sin\theta$ будут ей перпендикулярны, причем середины их лежат в этой же плоскости. Таким образом, действие двух элементов ds и ds' сводится к суммированию двух остающихся действий, а именно, взаимодействия $ds\sin\theta$ и $ds'\sin\theta'\cos\omega$ и взаимодействия $ds\cos\theta$ и $ds'\cos\theta'$. Поскольку оба эти действия направлены по прямой AA', соединяющей середины участков токов, между которыми происходят эти взаимодействия, достаточно сложить их, чтобы получить взаимодействие двух элементов ds и ds'. Но части $ds\sin\theta$ и $ds'\sin\theta'\cos\omega$ лежат в одной плоскости и обе перпендикулярны к прямой AA'. Их взаим-

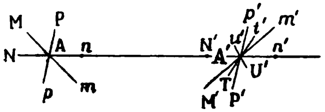


Рис. 6.

ное действие вдоль этой прямой будет, следовательно, согласно сказанному, равно

$$\frac{ii'dsds' \sin\theta \sin\theta' \cos\omega}{r^n},$$

а взаимодействие двух частей $ds\cos\theta$ и $ds'\cos\theta'$, направленное вдоль той же прямой AA', будет равно

$$\frac{kii'dsds' \cos\theta \cos\theta'}{r^n}.$$

Следовательно, действие двух элементов ds, ds' друг на друга по необходимости выразится через

$$\frac{ii'dsds'}{r^n}(\sin\theta \sin\theta' \cos\theta + k\cos\theta \cos\theta').$$

Эту формулу можно упростить, введя в нее вместо ω угол ε между двумя элементами. Ибо если рассмотрим сферический треугольник со сторонами θ, θ', ε, имеем

$$\cos\varepsilon = \cos\theta\cos\theta' + \sin\theta\sin\theta'\cos\omega,$$

откуда

$$\sin\theta\sin\theta'\cos\omega = \cos\varepsilon - \cos\theta\cos\theta';$$

подставляя это выражение в предыдущую формулу и полагая $k - 1 = h$, получаем

$$\frac{ii'dsds'}{r^n}(\cos\varepsilon + h\cos\theta\cos\theta').$$

Полезно заметить, что это выражение меняет знак, если один из токов, например относящийся к элементу ds, принимает направление обратное тому, которое имел первоначально, ибо в этом случае $\cos\theta$ и $\cos\varepsilon$ меняют знак, а $\cos\theta'$ остается без изменения. Эта величина взаимодействия двух элементов была выведена только путем замены самого элемента его проекциями. Однако, как легко убедиться, из нее следует, что элемент можно заменять любым многоугольным контуром, а стало быть, и дугой, заканчивающейся в тех же точках, если только все размеры этого многоугольника или этой дуги бесконечно малы.

Пусть, в самом деле, $ds_1, ds_2, \ldots, ds_m$ — стороны бесконечно малого многоугольника, которым мы заменили ds; направление AA' можно попрежнему рассматривать как направление прямых, соединяющих соответствующие середины этих сторон с A'.

Пусть $\theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_m$ — углы, которые они соответственно образуют с AA'; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \ldots, \varepsilon_m$ — углы, которые они образуют с $M'm'$; если, как принято, обозначим знаком Σ сумму членов одного вида, то сумма действий сторон $ds_1, ds_2, \ldots, ds_m$ на ds' будет

$$\frac{ii'ds'}{r^n}\left(\sum ds_1 \cos \varepsilon_1 + h \cos \theta' \sum ds_1 \cos \theta_1\right).$$

Но $\Sigma ds_1 \cos \varepsilon_1$ есть проекция многоугольного контура на направление ds' и, следовательно, равна проекции ds на то же направление, т. е. равна $ds \cos \varepsilon$; точно так же $\Sigma ds_1 \cos \theta_1$ равна проекции ds на AA', или $ds \cos \theta$; действие, оказываемое на ds' многоугольным контуром, заканчивающимся в тех же точках, что и ds, выразится поэтому через

$$\frac{ii'ds'}{r^n}(ds \cos \varepsilon + h ds \cos \theta \cos \theta'),$$

т. е. оно равно действию ds на ds'.

Поскольку это следствие не зависит от числа сторон $ds_1, ds_2, \ldots, ds_m$, оно будет действительным и для бесконечно малой дуги любой кривой.

Подобным же образом доказывается, что действие ds' на ds может быть заменено действием любой бесконечно малой кривой с теми же концами, как и у ds', оказываемым ею на каждый из элементов маленькой кривой, которой мы уже заменили ds, а стало быть, и на всю эту маленькую кривую. Таким образом, найденная нами формула выражает то, что любой криволинейный элемент оказывает то же действие, как и бесконечно малая часть прямолинейного тока, заканчивающаяся в тех же точках, каковы бы ни были постоянные n и h. Следовательно опыт, путем которого обнаруживается этот результат, не может ничем служить к определению постоянных.

Тогда мы прибегнем к двум другим случаям равновесия, о которых уже упоминали. Но предварительно преобразуем предыдущее выражение для действия двух элементов вольтаических токов, введя в него частные производные расстояния этих двух элементов [22].

Пусть x, y, z — координаты первой точки; x', y', z' — второй; имеем

$$\cos\theta = \frac{x-x'}{r}\cdot\frac{dx}{ds} + \frac{y-y'}{r}\cdot\frac{dy}{ds} + \frac{z-z'}{r}\cdot\frac{dz}{ds},$$

$$\cos\theta' = \frac{x-x'}{r}\cdot\frac{dx'}{ds'} + \frac{y-y'}{r}\cdot\frac{dy'}{ds'} + \frac{z-z'}{r}\cdot\frac{dz'}{ds'}.$$

Но

$$r^2 = (x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2,$$

откуда, взяв последовательно частные производные по s и s',

$$r\frac{dr}{ds} = (x-x')\frac{dx}{ds} + (y-y')\frac{dy}{ds} + (z-z')\frac{dz}{ds},$$

$$r\frac{dr}{ds'} = (x-x')\frac{dx'}{ds'} + (y-y')\frac{dy'}{ds'} + (z-z')\frac{dz'}{ds'}.$$

Следовательно, получаем

$$\cos\theta = \frac{dr}{ds}; \quad \cos\theta' = -\frac{dr}{ds}.$$

Чтобы найти значение $\cos\varepsilon$, заметим, что

$$\frac{dx}{ds},\ \frac{dy}{ds},\ \frac{dz}{ds}\ \text{и}\ \frac{dx'}{ds'},\ \frac{dy'}{ds'},\ \frac{dz'}{ds'}$$

представляют собою косинусы углов, образуемых ds и ds' с тремя осями, и получим отсюда

$$\cos\varepsilon = \frac{dx}{ds}\cdot\frac{dx'}{ds'} + \frac{dy}{ds}\cdot\frac{dy'}{ds'} + \frac{dz}{ds}\cdot\frac{dz'}{ds'}.$$

Но если мы продифференцируем по s' предыдущее уравнение, определяющее $r\frac{dr}{ds}$, то найдем

$$r\frac{d^2r}{ds\,ds'}+\frac{dr}{ds}\cdot\frac{dr}{ds'}=-\frac{dx}{ds}\cdot\frac{dx'}{ds'}-\frac{dy}{ds}\cdot\frac{dy'}{ds'}-\frac{dz}{ds}\cdot\frac{dz'}{ds'}=-\cos\varepsilon.$$

Если в формуле, выражающей взаимодействие двух элементов ds, ds', подставим вместо $\cos\theta$, $\cos\theta'$, $\cos\varepsilon$ только что найденные значения, то эта формула, после замены $1+h$ равным ему k, обратится в

$$-\frac{ii'ds\,ds'}{r^n}\left(r\frac{d^2r}{ds\,ds'}+k\frac{dr}{ds}\cdot\frac{dr}{ds'}\right),$$

что можно представить в виде

$$-\frac{ii'ds\,ds'}{r^n}\cdot\frac{1}{r^{k-1}}\frac{d\left(r^k\frac{dr}{ds}\right)}{ds'},$$

или, наконец,

$$ii'r^{1-n-k}\frac{d\left(r^k\frac{dr}{ds}\right)}{ds'}\,ds\,ds'.$$

Можно было бы дать этому выражению и вид

$$-\frac{ii'}{1+k}r^{1-n-k}\frac{d^2\left(r^{1+k}\right)}{ds\,ds'}\,ds\,ds'\ [23],$$

Рассмотрим теперь, что вытекает из третьего случая равновесия, о котором мы упоминали и согласно которому составляющая действия любого замкнутого контура на некоторый элемент, взятая в направлении этого элемента, всегда равна нулю, независимо от формы контура. Обозначая через ds' элемент, о котором идет речь, получим, что действие элемента ds, замкнутого элементом ds', будет, согласно предыдущему,

$$-ii'ds'r^{1-n-k}\frac{d\left(r^k\frac{dr}{ds'}\right)}{ds}\,ds,$$

или, заменяя $\frac{dr}{ds'}$ через $-\cos\theta'$,

$$ii'ds'r^{1-n-k}\,\frac{d\,(r^k\cos\theta')}{ds}\,ds.$$

Составляющая этого действия по ds' получится, если умножим это выражение на $\cos\theta'$, т. е. будет

$$ii'ds'r^{1-n-k}\cos\theta'\,\frac{d\,(r^k\cos\theta')}{ds}\,ds.$$

Если мы проинтегрируем это выражение по всей длине контура s, то получим полную тангенциальную составляющую, и она должна быть равна нулю, независимо от формы этого контура. Интегрируя по частям, после того как мы переписали его в виде

$$ii'ds'r^{1-n-2k}r^k\cos\theta'\,\frac{d\,(r^k\cos\theta')}{ds}\,ds,$$

получим

$$\frac{1}{2}\,ii'ds\left[r^{1-n}\cos^2\theta'-(1-n-2k)\int r^{-n}\cos^2\theta'\,dr\right].$$

Первый член $r^{1-n}\cos\theta'$ обращается в нуль на пределах. Что же касается интеграла $\int r^{-n}\cos^2\theta'\,dr$, то очень легко представить себе замкнутый контур, для которого он не обращался бы в нуль. Действительно, если пересечь такой контур весьма близкими сферическими поверхностями с центром в середине элемента ds', то в двух точках пересечения каждой из сфер с контуром r будет иметь одно и то же значение, а dr — значения, равные по величине и обратные по знаку. Но значения $\cos^2\theta'$ могут быть различными, и бесчисленным множеством способов можно будет сделать так, чтобы квадраты всех косинусов, относящихся к точкам, которые расположены по одну сторону между крайними точками контура, были меньше, чем те же квадраты, относящиеся к соответственным точкам по другую сторону. В этом случае интеграл не обратится в нуль. Поскольку же приведенное выше выражение должно быть равно нулю при любой форме контура, необходимо, чтобы коэффициент $1-n-2k$ при этом интеграле был равен нулю, откуда имеем первое соотношение между n и k, а именно $1-n-2k=0$ [24].

Прежде чем отыскивать второе уравнение для определения этих двух постоянных, мы начнем с доказательства, что k отрицательно и что, следовательно, $n=1-2k$ больше единицы. Для этого мы воспользуемся фактом, который очень легко установить на опыте [25], а именно, что прямолинейный проводник неограниченной длины притягивает замкнутый контур, когда ток в этом контуре идет в том же направлении, как и ток в ближайшей к нему части проводника, и отталкивает его — в обратном случае.

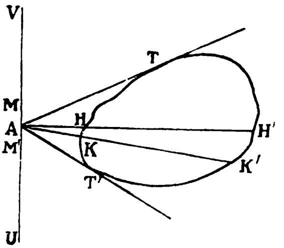


Рис. 7.

Пусть UV (рис. 7) — некоторый прямолинейный проводник; предположим для простоты, что замкнутый контур THKT'K'H' находится в одной плоскости с проводником UV, и определим действие, оказываемое каким-либо его элементом MM'. Для этого проведем из середины A элемента радиусы-векторы ко всем точкам контура и будем искать действие, оказываемое элементом на контур в направлении, перпендикулярном UV.

Перпендикулярная к UV составляющая действия, оказываемого $MM'=ds'$ на некоторый элемент $KH=ds$, получится, если умножим выражение для этого действия на $\sin\theta'$; оно будет, следовательно, принимая во внимание, что $1-n-2k=0$,

$$ii'ds'\sin\theta' r^k \frac{d(r^k\cos\theta')}{ds}ds$$

или

$$\frac{1}{2}ii'ds'\operatorname{tg}\theta'\frac{d(r^{2k}\cos^2\theta')}{ds}ds.$$

Это выражение должно быть проинтегрировано по всей длине контура. Интегрирование по частям дает

$$\frac{1}{2}\, ii'ds'\left(r^{2k}\sin\theta'\cos\theta' - \int r^{2k}d\theta'\right).$$

Поскольку первый член обращается в нуль на пределах, остается лишь

$$-\frac{1}{2}\, ii'ds'\int r^{2k}d\theta'.$$

Если мы теперь рассмотрим два элемента KH, K'H', заключенные между двумя последовательными радиусами, то $d\theta'$ будет одинаково и по одну и по другую сторону, но должно быть взято с противоположными знаками, так что, если положим $AH = r$, $AH' = r'$, то получим для совокупного действия обоих элементов

$$-\frac{1}{2}\, ii'ds'\left[\int (r'^{2k} - r^{2k})\, d\theta'\right],$$

где мы предполагаем, что r' больше r. Член этого интеграла, зависящий от действия части THT', обращенной выпуклостью по направлению к UV, будет иметь перевес над членом, зависящим от действия вогнутой части TH'T', если k отрицательно. Обратное будет, если k положительно, и никакого действия не будет, если k равно нулю. Поскольку те же следствия действительны для всех элементов UV, отсюда следует, что часть, обращенная выпуклостью к UV, будет иметь больше влияния на движение контура, чем вогнутая, если $k < 0$, одинаковое влияние, если $k = 0$, и меньшее, если $k > 0$. Опыт доказывает, что влияние как раз больше. Имеем, следовательно, $k < 0$, а стало быть $n > 1$, ибо $n = 1 - 2k$.

Из этого выводится замечательное следствие, что части одного и того же прямолинейного тока взаимно отталкиваются, ибо если положить $\theta = 0$, $\theta' = 0$, то формула, выражающая притяжение двух элементов, обращается в $\frac{kii'dsds'}{r^n}$, и так как это выражение отрицательно, поскольку отрицательно k, то будет происходить отталкивание. Я проверил это опытом, который и опишу [26]. Берут стеклянный сосуд PQ (рис. 8), разделенный перегородкой MN на две одинаковые камеры, наполненные ртутью. В сосуд помещается медная проволока ABCDE, обмотанная шелком, причем две ее ветви AB, ED, параллельные перегородке MN, плавают на поверхности ртути, которой касаются обнаженные концы A и E этих ветвей. Помещая реофоры в чашечки S и T, ртуть которых сообщается с ртутью сосуда PQ помощью дужек проводника hH, kK, получают два тока, причем каждому из них служит проводником отчасти ртуть, отчасти проволока. Каково бы ни было направление тока, можно видеть, что оба провода AB, ED перемещаются всегда параллельно перегородке MN, удаляясь от точек H и K, что означает для каждой проволоки отталкивание между током, установившимся в ртути, и его продолжением в самой проволоке. В зависимости от направления тока, движение медной проволоки будет происходить с большей или меньшей легкостью, ибо в одном случае действие, оказываемое землей на часть BCD этой проволоки, будет складываться с полученным эффектом, в другом — оно уменьшает его и должно быть из него вычтено [27].

Рассмотрим теперь действие, которое оказывает электрический ток, образующий замкнутый контур, или система токов, также образующих замкнутые контуры, на элемент электрического тока.

Выберем за начало координат середину A′ (рис. 9) данного элемента M′N′ и обозначим через λ, μ, ν углы, которые он составляет с тремя осями. Пусть MN — некоторый элемент тока, образующего замкнутый контур, или одного из токов, также образующих замкнутые контуры, из которых состоит рассматриваемая система токов; если обозначим через ds' и ds элементы M′N′ и MN, через r — расстояние AA′ между их серединами и через θ' — угол, составляемый током M′N′ с AA′, то формула, выведенная нами ранее как выражение взаимодействия между двумя элементами, обратится, после замены $\frac{dr}{ds}$ через $-\cos\theta'$, в

$$ii'ds'r^k \frac{d(r^k \cos\theta')\,ds}{ds}.$$

Косинусы углов, образуемых AA' с тремя осями, будут $\frac{x}{r}$, $\frac{y}{r}$, $\frac{z}{r}$, поэтому имеем

$$\cos\theta' = \frac{x}{r}\cos\lambda + \frac{y}{r}\cos\mu + \frac{z}{r}\cos\nu.$$

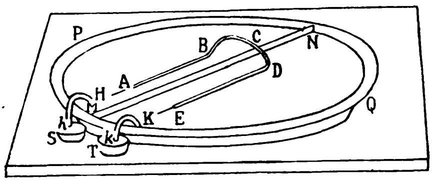


Рис. 8.

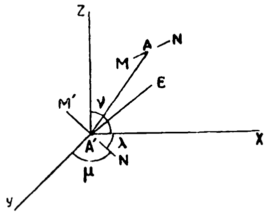


Рис. 9.

Подставляя это значение вместо $\cos\theta'$ и производя умножение на $\frac{x}{r}$, найдем для выражения составляющей по оси x

$$i'ds'r^{k-1}xd(r^{k-1}x\cos\lambda + r^{k-1}y\cos\mu + r^{k-1}z\cos\nu);$$

поскольку знак d всюду, кроме множителя ds', относится только к дифференциалам, взятым в предположении, что изменяется одно лишь s, это выражение можно написать так:

$$ii'ds'\left[\cos\lambda r^{k-1}xd(r^{k-1}x) + \frac{x\cos\mu}{y} r^{k-1}yd(r^{k-1}y) + \right.$$

$$\left. + \frac{x\cos\nu}{z} r^{k-1}zd(r^{k-1}z)\right] = \frac{1}{2} ii'ds'\left[\cos\lambda\; d(r^{k-2}x^2) + \right.$$

$$\left. + \frac{x}{y}\cos\mu\; d(r^{k-2}y^2) + \frac{x}{z}\cos\nu\; d(r^{k-2}z^2)\right] =$$

$$=\frac{1}{2}ii'ds'\left(d\frac{x^2\cos\lambda+xy\cos\mu+xz\cos\nu}{r^{n+1}}-\right.$$

$$\left.-\frac{y^2\cos\mu}{r^{n+1}}d\frac{x}{y}-\frac{z^2\cos\nu}{r^{n+1}}d\frac{x}{z}\right)=$$

$$=\frac{1}{2}ii'ds'\left(d\frac{x\cos\theta'}{r^n}+\frac{xdy-ydx}{r^{n+1}}\cos\mu-\frac{zdx-xdz}{r^{n+1}}\cos\nu\right).$$

Обозначив через r_1, x_1, θ_1 и r_2, x_2, θ_2 значения r, x, θ' на двух концах дуги s, а через X — равнодействующую по оси x всех сил, с какими элементы этой дуги действуют на ds', найдем

$$\mathrm{X}=\frac{1}{2}ii'ds\left[\frac{x_2\cos\theta_2'}{r_2^n}-\frac{x_1\cos\theta_1'}{r_1^n}+\right.$$

$$\left.+\cos\mu\int\frac{xdy-ydx}{r^{n+1}}-\cos\nu\int\frac{zdx-xdz}{r^{n+1}}\right].$$

Если эта дуга образует замкнутый контур, то r_2, x_2, θ_2' будут равны r_1, x_1, θ_1', и значение X выразится проще

$$\mathrm{X}=\frac{1}{2}ii'ds'\left[\cos\mu\int\frac{xdy-ydx}{r^{n+1}}-\cos\nu\int\frac{zdx-xdz}{r^{n+1}}\right].$$

Обозначая через Y и Z равнодействующие по оси y и z сил, зависящих от действия тех же элементов на ds', найдем помощью аналогичных вычислений

$$\mathrm{Y}=\frac{1}{2}ii'ds'\left[\cos\nu\int\frac{ydz-zdy}{r^{n+1}}-\cos\lambda\int\frac{xdy-ydx}{r^{n+1}}\right],$$

$$\mathrm{Z}=\frac{1}{2}ii'ds'\left[\cos\lambda\int\frac{zdx-xdz}{r^{n+1}}-\cos\mu\int\frac{ydz-zdy}{r^{n+1}}\right];$$

полагая

$$\int\frac{ydz-zdy}{r^{n+1}}=\mathrm{A},\quad \int\frac{zdx-xdz}{r^{n+1}}=\mathrm{B},\quad \int\frac{xdy-ydx}{r^{n+1}}=\mathrm{C},$$

получим

$$\mathrm{X}=\frac{1}{2}ii'ds'(\mathrm{C}\cos\mu-\mathrm{B}\cos\nu),$$

$$Y=\frac{1}{2}ii'ds'(A\cos\nu - C\cos\lambda),$$

$$Z=\frac{1}{2}ii'ds'(B\cos\lambda - A\cos\mu).$$

Умножая первое из этих уравнений на A, второе на B и третье на C, найдем $AX+BY+CZ=0$; и если представим себе прямую A′E, проходящую через начало и составляющую с осями углы, косинусы которых равны соответственно

$$\frac{A}{D}=\cos\xi_1,\quad \frac{B}{D}=\cos\eta_1,\quad \frac{C}{D}=\cos\zeta_1,$$

где мы положим для краткости

$$\sqrt{A^2+B^2+C^2}=D,$$

то она будет перпендикулярна равнодействующей R трех сил X, Y, Z, составляющей с осями углы, косинусы которых равны

$$\frac{X}{R},\ \frac{Y}{R},\ \frac{Z}{R},$$

поскольку, в силу предыдущего уравнения, имеем

$$\frac{A}{D}\cdot\frac{X}{R}+\frac{B}{D}\cdot\frac{Y}{R}+\frac{C}{D}\cdot\frac{Z}{R}=C.$$

Необходимо заметить, что прямая, которую мы только что определили, совершенно не зависит от направления элемента M′N′, ибо она получается непосредственно из интегралов A, B и C. Последние зависят только от замкнутого контура и от положения координатных плоскостей и являются суммами проекций на эти последние площадей треугольников, вершины которых лежат по середине элемента ds', а основаниями служат различные элементы замкнутых контуров s, причем все эти площади следует разделить на $(n+1)$-ю степень радиуса-вектора r.

Поскольку равнодействующая перпендикулярна к прямой A′E, которую я назову директрисой, она, независимо от направления элемента, будет лежать в плоскости, проведенной в точке A′ перпендикулярно к A′E. Я назову эту плоскость направляющей плоскостью. Если мы сложим квадраты величин X, Y, Z, то получим значение равнодействующей для одного единственного тока или же для совокупности рассматриваемых токов в виде

$$R=\frac{1}{2}\,Dii'ds'\sqrt{(\cos\zeta_1\cos\mu-\cos\eta_1\cos\nu)^2+(\cos\xi_1\cos\nu-\cos\zeta_1\cos\lambda)^2+(\cos\eta_1\cos\lambda-\cos\xi_1\cos\mu)^2},$$

или, обозначая через ε угол между элементом ds' и директрисой,

$$R=\frac{1}{2}\,Dii'ds'\sin\varepsilon$$ [28].

Нетрудно найти составляющую этой силы в любой заданной плоскости, проходящей через элемент ds' и составляющей угол φ с плоскостью, проведенной через ds' и директрису. Действительно, поскольку R перпендикулярна к этой последней плоскости, ее составляющая на заданную плоскость будет $R\sin\varphi$, или $\frac{1}{2}Dii'ds'\sin\varepsilon\sin\varphi$.

Но $\sin\varepsilon\sin\varphi$ равно синусу угла Ψ, который директриса составляет с заданной плоскостью. Это можно получить непосредственно из трехгранного угла, образованного ds', директрисой и ее проекцией на заданную плоскость. Составляющая в этой плоскости выразится поэтому как

$$\frac{1}{2}\,Dii'ds'\sin\Psi.$$

Это выражение можно представить в другом виде, заметив, что Ψ является дополнением угла, образуемого директрисой с нормалью к плоскости, в которой рассматривается действие. Отсюда, обозначая через ξ, η, ζ углы, образованные этой последней прямой с тремя осями, имеем

$$\sin\Psi=\frac{A}{D}\cos\xi+\frac{B}{D}\cos\eta+\frac{C}{D}\cos\zeta,$$

и выражение действия будет

$$\frac{1}{2}\, ii'ds' (\mathrm{A} \cos \xi + \mathrm{B} \cos \eta + \mathrm{C} \cos \zeta),$$

или

$$\frac{1}{2}\, \mathrm{U} ii'ds',$$

если введем обозначение

$$\mathrm{U} = \mathrm{A} \cos \xi + \mathrm{B} \cos \eta + \mathrm{C} \cos \zeta.$$

Мы видим, что действие не зависит от направления элемента в рассматриваемой плоскости. Мы назовем его действием, производимым в этой плоскости, и из того, что оно остается без изменения, когда элементу придают последовательно различные положения в плоскости, мы выводим следующее заключение. Пусть действие, оказываемое землей на подвижной проводник в неподвижной плоскости, вызывается электрическими токами, образующими замкнутые контуры. Если расстояния от них до проводника достаточно велики, чтоб можно было считать их постоянными, пока он перемещается в данной плоскости, то это действие будет иметь все время одно и то же значение в различных положениях, которые последовательно принимает проводник. В самом деле, поскольку действия, оказываемые на каждый из составляющих его элементов, остаются все время одними и теми же и перпендикулярными к элементам, их равнодействующая не сможет меняться ни по величине, ни по направлению относительно проводника. Однако это направление будет изменяться в неподвижной плоскости, следуя движению проводника, что и наблюдается на самом деле в отношении проводника, который может перемещаться в горизонтальной плоскости и которому придают различные азимуты [29].

Полученный результат можно проверить следующим опытом. В деревянном диске ABCD (рис. 10) вырезается круговая выемка KLMN, в которую помещаются два медных сосуда KL и MN одинаковой формы, причем каждый занимает почти полуокружность выемки, но так, что между ними остаются два промежутка KN, LM, заполняемые изолирующей замазкой. К каждому из этих сосудов припаяны две медные пластинки PQRS, вделанные в диск, на которых находятся чашки X, Y. Назначение чашек состоит в том, чтобы посредством наливаемой в них ртути приводить сосуды KL, MN в сообщение с реофорами очень сильной батареи. В диск вделана еще пластинка TO, несущая чашку Z, куда также наливается немного ртути. Этапластин ка припаяна в центре O

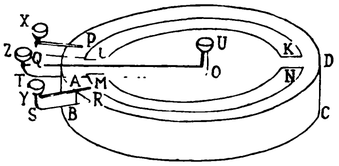


Рис. 10.

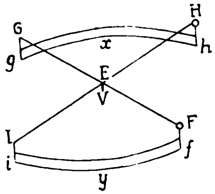


Рис. 11.

к вертикальному стержню, к которому, в свою очередь, припаяна четвертая чашка U. На дне ее находится кусочек стекла или агата, чтоб придать больше подвижности крестовине, о которой мы скажем ниже. Края этой чашки достаточно приподняты, чтоб находиться в соединении со ртутью, наливаемой в чашку. В ртуть погружается острие V (рис. 11), служащее осью крестовине FGHI; ветви последней EG и EI одинаковы и припаяны в G и I к пластинкам *gxh*, *iyf*, которые погружены в подкисленную воду сосудов KL и MN, когда острие V покоится на дне чашки U. Двумя другими концами *h*, *f* они связаны с ветвями EH и EF, но не имеют сообщения с ними. Эти две пластинки одинаковы по величине и по форме и согнуты в виде дуг круга примерно в 90°. Когда реофоры погружены один в чашку Z, другой — в одну из чашек X или Y, ток проходит только через одну ветвь крестовины, и можно видеть, как она вращается на острие V под действием земли с востока на запад через юг, если ток идет от окружности к центру, и в обратном направлении, если он идет от центра к окружности. Это соответствует объяснению, которое я дал описанному явлению и которое можно найти в моем „Recueil d'expériences électro-dynamiques“ на стр. 284 [30]. Но если погрузить реофоры в чашки X и Y так, что ток будет проходить ветви EG, EI в противоположных направлениях, то крест будет оставаться неподвижным, в какое бы положение мы его ни поместили, например, если одна из ветвей параллельна, а другая перпендикулярна магнитному меридиану; он остается неподвижным даже тогда, когда, слегка постукивая по диску ABCD, мы увеличиваем этими мелкими толчками подвижность прибора. Сгибая немного ветви креста вокруг точки E, мы можем помещать их под различными углами друг к другу, но результат опыта остается неизменным. Отсюда очевидно следует, что сила, с которой земля действует на часть проводника, перпендикулярна к его направлению и потому перемещает его в горизонтальной плоскости, т. е. в плоскости, положение которой по отношению к системе земных токов является заданным, — будет одна и та же, каково бы ни было направление части проводника в этой плоскости; а это как раз тот результат вычислений, который следовало проверить.

Нужно заметить, что действие токов, проходящих через подкисленную воду, на их продолжения в пластинках gh, if ни в какой мере не нарушает равновесия прибора; ибо легко видеть, что действие, о котором идет речь, стремится повернуть пластинку gh вокруг острия V в направлении hxg, а пластинку if — в направлении fyi, и вследствие одинаковости этих пластинок получаются равные моменты вращения с противоположными знаками, которые взаимно уничтожаются.

Известно, что мы обязаны г. Савари опытом, обнаруживающим это действие [31]. Этот опыт может быть произведен более удобно, если в приборе, которым он пользовался вначале, заменить спираль из медной проволоки согнутой пластинкой из того же металла. Эта пластинка ABC (рис. 12) образует дугу круга, почти равную полной окружности, но ее концы A и C отделены друг от друга прокладкой D из изолирующего вещества. Один из этих концов, например A, соединяется с одним из реофоров посредством острия O, которое помещается в чашку S (рис. 13), наполненную ртутью. Последняя соединяется посредством металлической проволоки STR с чашкой R, в которую погружен один из реофо-

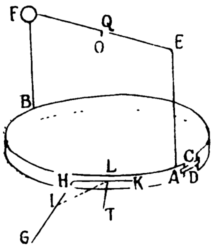


Рис. 12.

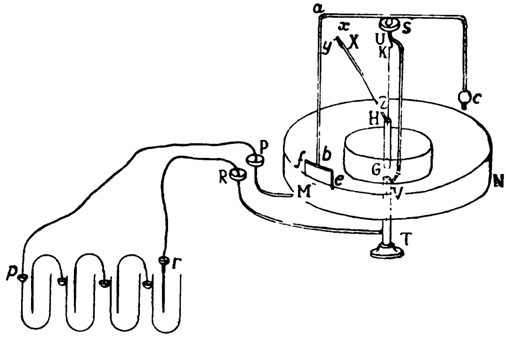


Рис. 13.

ров. Это острие O (рис. 12) соединяется с концом A медной проволокой AEQ, продолжение которой QF поддерживает в F пластинку ABC при помощи кольца из изолирующего вещества, окружающего в этом месте медную проволоку. Когда острие O покоится на дне чашки S (рис. 13), пластинка ABC (рис. 12) погружается в подкисленную воду медного сосуда MN (рис. 13), сообщающегося с чашкой P, где находится другой реофор. При этом мы видим, что пластинка начинает вращаться в направлении CBA (рис. 12), и если батарея достаточно сильна, движение сохраняет то же направление, даже если изменить сообщения с батареей на обратные, поменяв местами оба реофора в чашках P и R (рис. 13). Отсюда следует, что это движение не зависит от действия земли, а может зависеть только от того действия, которое токи, проходящие в подкисленной воде, оказывают на ток в согнутой пластинке ABC (рис. 12). Это действие всегда отталкивающее, ибо если GH (рис. 13) представляет один из токов в подкисленной воде, текущий по HK в пластинке ABC (рис. 12), то каково бы ни было направление этого тока, он, очевидно, будет обегать одну из сторон угла GHK, приближаясь к вершине H, а другую — удаляясь от вершины. Но, чтобы движение, наблюдаемое в этом случае, могло осуществиться, отталкивание между двумя элементами, одним в I, а другим в L, должно происходить по прямой IL, наклонной к дуге ABC, а не по перпендикуляру LT к элементу, находящемуся в L; ибо поскольку направление этого перпендикуляра пересекает вертикаль, проведенную через точку O, вокруг которой вращается подвижная часть прибора, сила, направленная по этому перпендикуляру, не могла бы сообщить прибору вращательного движения.

Как я сказал выше, необходимо пользоваться достаточно сильной батареей, если мы хотим убедиться в том, что вращение прибора происходит не от действия земли. Доказательством этому служит продолжение вращения в прежнем направлении, когда переключают соединения с батареей, поменяв местами реофоры в чашечках. Действительно, при таком расположении невозможно воспрепятствовать действию земли на вертикальную проволоку AE, перемещая ее к западу, если ток в ней идет вверх, и к востоку, если он идет вниз. Точно так же невозможно воспрепятствовать действию земли на горизонтальную проволоку EQ, заставляя ее вращаться вокруг вертикали в прямом направлении восток—юг—запад, когда ток идет из E в Q, приближаясь к центру вращения, и в попятном направлении запад—юг—восток, когда он идет из Q в E, удаляясь от того же центра.[1] Первое из этих действий мало заметно, во всяком случае, если вертикальная

[1] См. по поводу этих двух действий, оказываемых земным шаром, то, что сказано мною в моем „Recueil d'observations électro-dynamiques", стр. 280, 284.

проволока AE берется лишь такой длины, чтобы обеспечить устойчивость подвижного проводника на острие O. Второе же действие определяется размерами прибора. Поскольку оно меняет направление, когда направление сообщения с батареей меняется на обратное, то при одном способе сообщения оно складывается с действием, оказываемым током в подкисленной воде, а при другом — из него вычитается. Вот почему наблюдаемое движение всегда более быстро в одном случае, чем в другом. Эта разница тем более ясно выражена, чем слабее ток, производимый батареей. Действительно, по мере уменьшения силы этого тока получается следующее. Электродинамическое действие при прочих равных условиях пропорционально произведению сил обоих действующих друг на друга участков токов, а потому это действие между токами в подкисленной воде и токами в пластинке ABC убывает пропорционально квадрату их силы. Между тем сила земных токов не изменяется, и потому их действие на токи в пластинке убывает лишь пропорционально силе тока в пластинке. Таким образом, по мере того как энергия батареи убывает, действие земли становится все более способным уничтожить действие токов в подкисленной воде при том расположении сообщений с батареей, при котором эти действия взаимно противоположны. Можно даже видеть, что когда эта энергия становится весьма слабой, прибор останавливается, а затем начинает вращаться в обратную сторону. Этот опыт, казалось бы, может привести к следствию, обратному тому, которое имелось в виду установить, ибо в силу того, что действие земли получило перевес, можно было бы не заметить существования действий, зависящих от токов в подкисленной воде. Необходимо указать, что первое из этих двух действий на круговую пластинку ABC всегда равно нулю, ибо поскольку земля действует как система замкнутых токов, сила, с которой она влияет на каждый элемент, перпендикулярная к направлению этого элемента, проходит через вертикаль, проведенную в точке O, и не может вследствие этого стремиться вращать вокруг нее подвижной проводник [32].

В качестве примера применим предыдущие формулы к случаю, когда система сводится к одному замкнутому круговому току.

Когда система состоит лишь из одного тока, проходящего по окружности круга заданного радиуса m, можно упростить вычисления, взяв за плоскость xy плоскость, проходящую через начало координат, т. е. через середину A элемента ab (рис. 14), параллельно плоскости круга, а за плоскость xz — плоскость, проведенную перпендикулярно плоскости круга через то же начало и через центр O.

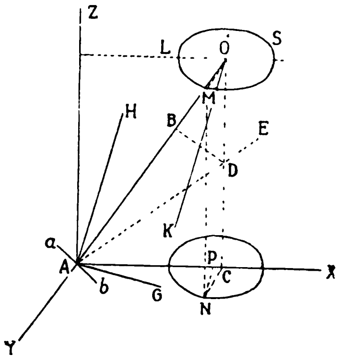


Рис. 14.

Пусть p и q — координаты этого центра O; предположим, что точка C представляет проекцию O на плоскость xy, N — проекцию любой точки M круга, и назовем через ω угол ACN. Если опустить перпендикуляр NP на AX, три координаты x, y, z точки M будут MN, NP и AP; отсюда легко найдем их значения

$$z = q, \quad y = m \sin \omega, \quad x = p - m \cos \omega.$$

Поскольку величины, которые мы обозначим через A, B, C, соответственно равны

$$\int \frac{y dz - z dy}{r^{n+1}}, \quad \int \frac{z dx - x dz}{r^{n+1}}, \quad \int \frac{x dy - y dx}{r^{n+1}},$$

получим

$$A = -mq \int \frac{\cos \omega \, d\omega}{r^{n+1}},$$

$$B = mq \int \frac{\sin\omega\, d\omega}{r^{n+1}},$$

$$C = mp \int \frac{\cos\omega\, d\omega}{r^{n+1}} - m^2 \int \frac{d\omega}{r^{n+1}}.$$

Если мы проинтегрируем по частям члены, содержащие $\sin\omega$ и $\cos\omega$, и примем в расчет, что

$$r^2 = x^2 + y^2 + z^2 = q^2 + p^2 + m^2 - 2mp\cos\omega,$$

то получим

$$dr = \frac{mp\sin\omega\, d\omega}{r};$$

если, далее, отбросим члены, обращающиеся в нуль, ибо интегралы должны быть взяты от $\omega = 0$ до $\omega = 2\pi$, и подставим найденные таким образом значения A, B, C в формулу для

$$U = A\cos\xi + B\cos\eta + C\cos\zeta,$$

то мы получим

$$U = m^2 \left[(n+1)(p^2\cos\zeta - pq\cos\xi) \int \frac{\sin^2\omega\, d\omega}{r^{n+3}} - \cos\zeta \int \frac{d\omega}{r^{n+1}} \right].$$

Однако угол ξ может быть выражен через ζ, ибо обозначая через h перпендикуляр OK, опущенный из центра O на плоскость bAG, для которой вычисляется значение U, будем иметь $h = q\cos\zeta + p\cos\xi$, и это значение обратится в

$$U = m^2 \left\{ (n+1)[(p^2+q^2)\cos\zeta - hq] \int \frac{\sin^2\omega\, d\omega}{r^{n+3}} - \right.$$

$$\left. - \cos\zeta \int \frac{d\omega}{r^{n+1}} \right\} [33].$$

Вычислить эту величину очень просто в случае, когда радиус m весьма мал по сравнению с расстоянием l от начала A до центра O. В самом деле, разложив эту формулу в ряд по степеням m, мы увидим, что если пренебречь степенями m высшими чем 3, то члены, содержащие m^3, обращаются в нуль между пределами O и 2π, а члены с m^2 могут быть получены заменою r через $l = \sqrt{p^2+q^2}$. Таким образом, остается только вычислить значения

$$\int \sin^2\omega\, d\omega \text{ и } \int d\omega \text{ от } \omega = 0 \text{ до } \omega = 2\pi,$$

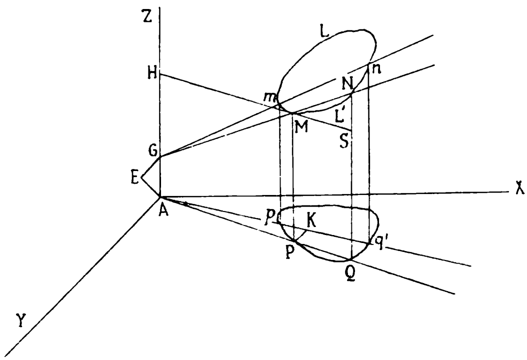


Рис. 15.

что дает π для первого и 2π для второго; величина U сводится, следовательно, к

$$U = \pi m^2 \left[\frac{(n-1)\cos\zeta}{l^{n+1}} - \frac{(n+1)hq}{l^{n+3}}\right] [^{34}].$$

Для большей общности предположим теперь, что замкнутый ток имеет форму не круговую, а любую иную, но продолжает оставаться плоским и очень малым.

Пусть MNL (рис. 15) — очень малый и плоский замкнутый контур, площадь которого равна λ и который действует на элемент, помещенный в начале A. Разобьем его поверхность на бесконечно малые элементы плоскостями, проходящими через ось Z, и пусть APQ будет линия пересечения этой плоскости с плоскостью xy, а M, N — точки ее пересечения с контуром λ, которые проектируются на плоскость xy

в точках P и Q. Продолжим хорду MN до пересечения с осью Z в G. Опустим из A перпендикуляр $AE = q$ на плоскость контура и проведем EG. Пусть Apq' — линия пересечения с осью xy плоскости, бесконечно близкой к первой и составляющей с ней угол $d\varphi$. Положим $AP = u$ и $PQ = \delta u$. Действие контура на элемент в A зависит, как мы видели, от трех интегралов, обозначенных A, B и C, которые мы теперь вычислим. Рассмотрим сначала C, величина которого есть

$$C = \int \frac{xdy - ydx}{r^{n+1}} = \int \frac{u^2 d\varphi}{r^{n+1}}.$$

Этот интеграл относится ко всем точкам контура, и если рассматривать одновременно два элемента, заключенных между двумя соседними плоскостями AGNQ и $AGnq'$ и которые относятся к равным и противоположным по знаку значениям $d\varphi$, мы увидим, что действия этих двух элементов надо вычесть одно из другого и что действие элемента, ближайшего к A, будет наиболее сильно. Замечая, что для получения действия наиболее далекого элемента надо заменить u и r через $u + \delta u$ и $r + \delta r$, найдем

$$C = \int \frac{u^2 d\varphi}{r^{n+1}} - \int \frac{(u + \delta u)^2 d\varphi}{(r + \delta r)^{n+1}},$$

причем эти оба интеграла должны быть взяты между двумя значениями φ, относящимися к крайним точкам L, L' контура.

Разность между этими двумя интегралами можно рассматривать как вариацию первого, взятую с обратным знаком, если пренебречь всеми степенями размеров контура, показатели которых превосходят единицу. Отсюда имеем

$$C = -\delta \int \frac{u^2 d\varphi}{r^{n+1}} = \int \left[\frac{(n+1)\, u^2 \delta r}{r^{n+2}} - \frac{2u\delta u}{r^{n+1}} \right] d\varphi.$$

Но

$$r^2 = u^2 + z^2,$$

откуда

$$\delta r = \frac{u\delta u + z\delta z}{r}.$$

Далее, угол ZAE равен ζ, и, следовательно, имеем

$$\mathrm{AG} = \frac{q}{\cos\zeta}, \quad \mathrm{GH} = z - \frac{q}{\cos\zeta}$$

и, вследствие подобия треугольников MHG, MSN,

$$\mathrm{MH} : \mathrm{MS} = \mathrm{GH} : \mathrm{NS},$$

т. е.

$$u : \delta u = z - \frac{q}{\cos\zeta} : \delta z.$$

Определяя из этой пропорции значение δz и внося его в выражение для δr, получаем

$$\delta z = \frac{z\cos\zeta - q}{u\cos\zeta}\,\delta u, \quad \delta r = \frac{(u^2+z^2)\cos\zeta - qz}{ur\cos\zeta}\,\delta u = \frac{r^2\cos\zeta - qz}{ur\cos\zeta}\,\delta u$$

и, подставляя эти значения в выражение для C, имеем

$$\mathrm{C} = \int\left[\frac{(n+1)(r^2\cos\zeta - qz)}{r^{n+3}\cos\zeta} - \frac{2}{r^{n+1}}\right] u\,\delta u\,d\varphi =$$

$$= \int\left[\frac{n-1}{r^{n+1}} - \frac{(n+1)\,qz}{r^{n+3}\cos\zeta}\right] u\,\delta u\,d\varphi.$$

Поскольку контур очень мал, можно рассматривать значения r и z как постоянные и приравнять их, например, значениям, относящимся к центру тяжести площади контура, дабы члены третьего порядка обратились в нуль. Обозначая эти величины через l и z_1, получим предыдущий интеграл в виде

$$\mathrm{C} = \left[\frac{(n-1)}{l^{n+1}} - \frac{(n+1)\,qz_1}{l^{n+3}\cos\zeta}\right]\int u\,d\varphi\,\delta u.$$

Но $u\,d\varphi$ — это дуга PK, описанная из A как центра радиусом u, а $\mathrm{PQ} = \delta u$; поэтому $u\,d\varphi\,\delta u$ есть бесконечно малая площадь $\mathrm{PQ}pq'$, а интеграл $\int u\,d\varphi\,\delta u$ выражает всю площадь проекции контура, т. е. $\lambda\cos\zeta$, ибо ζ есть угол между плоскостью контура и плоскостью xy; таким образом, имеем окончательно

$$C = \left[\frac{(n-1)\cos\zeta}{l^{n+1}} - \frac{(n+1)\,qz_1}{l^{n+3}}\right]\lambda.$$

Для B и A получим аналогичные выражения, а именно:

$$B = \left[\frac{(n-1)\cos\eta}{l^{n+1}} - \frac{(n+1)\,qy_1}{l^{n+3}}\right]\lambda,$$

$$A = \left[\frac{(n-1)\cos\xi}{l^{n+1}} - \frac{(n+1)\,qx_1}{l^{n+3}}\right]\lambda.$$

Отсюда можно определить и углы, образуемые директрисой с осями, ибо их косинусы будут $\frac{A}{D}$, $\frac{B}{D}$, $\frac{C}{D}$, если положить

$$D = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}.$$

Что касается силы, получаемой в результате действия контура на элемент, находящийся в начале, то, как мы видели выше, она равна $\frac{1}{2}\,ii'ds'\,D\sin\varepsilon$. Здесь ε — угол, образуемый этим элементом с директрисой. Эта сила перпендикулярна как к директрисе, так и к направлению элемента.

В случае, когда рассматриваемый малый контур лежит в плоскости элемента ds', на который он действует, получим, взяв эту плоскость за плоскость xy,

$$q = 0,\ \cos\zeta = 1,\ \cos\eta = 0,\ \cos\xi = 0,$$

и, следовательно,

$$A = 0,\quad B = 0,\quad C = \frac{n-1}{l^{n+1}}\lambda;$$

D сводится тогда к одному только C; ε равно $\frac{\pi}{2}$, и действие тока на элемент ds обращается в

$$\frac{n-1}{2}\cdot\frac{ii'ds'\lambda}{l^{n+1}}.$$

Теперь я изложу новый способ рассмотрения действия плоских контуров заданной формы и величины.

Пусть мы имеем некоторый плоский контур M N m (рис. 16); разделим его поверхность на бесконечно малые элементы рядом параллельных прямых, которые пересекаются другой системой параллельных линий под прямыми углами, и представим себе вокруг каждой из таких бесконечно малых площадок точки, направленные так же, как и ток M N m. Все участки этих токов, которые окажутся на этих прямых, взаимно уничтожаются, ибо по одной и той же прямой пойдут два тока в противоположных направлениях; останутся лишь криволинейные части токов, как MM′, mm', которые образуют полный контур M N m.

Отсюда следует, что три интеграла A, B, C для плоского контура конечной величины получатся путем замены λ в только что найденных выражениях каким-либо элементом площади контура, который мы можем представить через $d^2\lambda$, и путем интегрирования по всей этой площади.

Если, например, элемент расположен в той же плоскости, что и контур, и мы примем эту плоскость за плоскость xy, то имеем

$$A=0,\ B=0,\ C=(n-1)\iint\frac{d^2\lambda}{l^{n+1}};$$

а значение силы обратится в

$$\frac{n-1}{2}ii'ds'\iint\frac{d^2\lambda}{l^{n+1}},$$

откуда следует, что если мы восставим перпендикуляры, равные l^{n+1}, в каждой точке площади контура, то объем призмы, основанием которой является площадь контура и которая заканчивается на поверхности, образованной концами этих перпендикуляров, окажется равным $\iint\frac{d^2\lambda}{l^{n+1}}$. Если этот объем умножим на $\frac{n-1}{2}ii'ds'$, то получим выражение для искомого действия.

Следует заметить, что поскольку вопрос сводится к кубатуре тела, можно будет принять такую систему координат и такой способ деления площади контура на элементы, при которых вычисления окажутся наиболее простыми [35].

Перейдем к взаимодействию двух весьма малых контуров O и O′ (рис. 17), расположенных в одной плоскости. Пусть MN — какой-либо элемент ds' одного из них. Действие контура O на ds' будет, согласно предыдущему,

$$\frac{n-1}{2}\cdot\frac{ii'ds'\lambda}{r^{n+1}}.$$

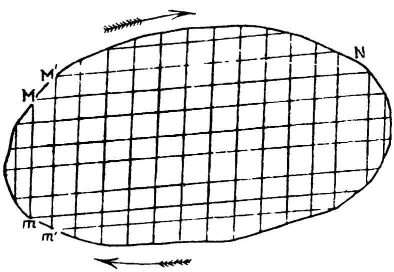


Рис. 16.

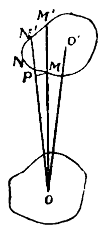


Рис. 17.

Обозначая через $d\varphi$ угол MON и описав дугу MP между сторонами этого угла, можно заменить малый ток MN двумя токами MP и NP, протяжения которых будут соответственно $rd\varphi$ и dr. Действие контура O на элемент MP, нормальное к его направлению, будет

$$\frac{n-1}{2}\cdot\frac{ii'\lambda d\varphi}{r^{n}};$$

действие на NP, перпендикулярное к его направлению, будет точно так же

$$\frac{n-1}{2}\cdot\frac{ii'\lambda dr}{r^{n+1}}.$$

Это последнее, если его проинтегрировать по всему замкнутому контуру O′, будет равно нулю. Достаточно рассмотреть первое, которое направлено к точке O, из чего следует, что действие двух малых токов направлено по прямой, их соединяющей.

Продолжим радиусы OM и ON до пересечения с кривой в M′ и N′; действие M′N′ должно быть вычтено из действия MN, и результирующее действие получится, как прежде, если взять вариацию действия MN с обратным знаком, что дает

$$\frac{n(n-1)}{2}\cdot\frac{ii'\lambda d\varphi\delta r}{r^{n+1}} \text{ или } \frac{n(n-1)}{2}\cdot\frac{ii'\lambda r d\varphi\delta r}{r^{n+2}}.$$

Но $rd\varphi\delta r$ есть площадь бесконечно малого сегмента MNN′M′. Составляя сумму всех аналогичных выражений, относящихся к различным элементам контура O′, и полагая r постоянным и равным расстоянию между центрами тяжести площадей λ и λ' двух контуров, получим для выражения действия, которое они оказывают друг на друга,

$$\frac{n(n-1)}{2}\cdot\frac{ii'\lambda\lambda'}{r^{n+2}},$$

и это действие будет направлено вдоль прямой OO′. Отсюда следует, что мы получим величину взаимодействия между двумя конечными контурами, расположенными в одной плоскости, рассматривая их площади, как разделенные в различных направлениях на бесконечно малые элементы, и предполагая, что действие этих элементов друг на друга, будучи направлено вдоль прямой, которая их соединяет, прямо пропорционально их площадям и обратно пропорционально $(n+2)$-й степени расстояния между ними.

Поскольку взаимодействие между замкнутыми токами будет тогда функцией только расстояния, мы можем вывести отсюда важное следствие, что в результате этого действия никогда не может возникнуть непрерывное вращательное движение [36].

Формула, только что найденная нами, и при помощи которой взаимодействие двух замкнутых плоских контуров сводится к взаимодействиям между элементами их площадей, приводит к определению значения n. Действительно, если рассмотреть две подобные системы, состоящие из двух замкнутых и плоских контуров, то подобные элементы их площадей будут пропорциональны квадратам соответственных линий, а расстояния этих элементов будут пропорциональны первым степеням тех же линий. Обозначая через m отношение соответственных линий двух систем, получим действия двух элементов первой системы и отвечающих им элементов второй в виде

$$\frac{n(n-1)}{2}\cdot\frac{ii'\lambda\lambda'}{r^{n+2}} \quad \text{и} \quad \frac{n(n-1)}{2}\cdot\frac{ii'\lambda\lambda' m^4}{r^{n+2}m^{n+2}}\,.$$

Их отношение, а тем самым и отношение полных действий, будет равно m^{2-n}. Выше мы описывали опыт, которым можно доказать непосредственно, что эти два действия равны; поэтому нужно, чтобы $n=2$ и, в силу уравнения $1-n-2k=0$, чтобы $k=-\frac{1}{2}$. [37] При помощи этих значений n и k можно привести выражение взаимодействия между ds и ds'

$$-\frac{ii'}{1+k}r^{1-n-k}\frac{d^2(r^{1+k})}{ds\,ds'}$$

в очень простой вид; именно, оно сводится к

$$-\frac{2ii'}{\sqrt{r}}\cdot\frac{d^2\sqrt{r}}{ds\,ds'}\,ds\,ds'.$$

Из того, что $n=2$, следует также, что в случае, когда направления двух элементов остаются без изменения, это действие обратно пропорционально квадрату их расстояния. Известно, что г. Лаплас установил этот же закон, исходя из опыта г. Био, в применении к взаимодействию элемента гальванического проводника и магнитной молекулы. Но этот результат не мог быть распространен на случай действия двух элементов проводников иначе как в предположении, что действие магнитов зависит от электрических токов; тогда как опытное доказательство, которое даю я, не зависит от каких бы то ни было гипотез относительно природы магнитов [38].

Пусть MON (рис. 18) — контур, имеющий форму сектора, стороны которого заключают бесконечно малый угол. Определим действие, которое он оказывает на прямолинейный проводник OS′, проходящий через центр O сектора. Вычислим сначала действие элемента MNPQ площади этого сектора на элемент M′N′ проводника OS′. Положим $OM = u$, $MP = du$, $OM' = s'$, $MM' = r$, $S'OM = \varepsilon$, $NOM = d\varepsilon$. Момент MNPQ, вращающий M′ вокруг O, будет, приняв во внимание, что площадь MNPQ выражается как $udud\varepsilon$,

$$\frac{1}{2}\, ii's'ds'\, \frac{udud\varepsilon}{r^3},$$

а момент сектора относительно проводника s' получится, если проинтегрировать это выражение по u и по s'. Имеем

$$r^2 = s'^2 + u^2 - 2us'\cos\varepsilon,$$

откуда

$$r\frac{dr}{du} = u - s'\cos\varepsilon,\quad r\frac{dr}{du} = s' - u\cos\varepsilon,$$

и, дифференцируя второй раз,

$$r\frac{d^2r}{duds'} + \frac{dr}{ds'}\cdot\frac{dr}{du} = -\cos\varepsilon,$$

или, подставляя вместо $\dfrac{dr}{ds'}$ и $\dfrac{dr}{du}$ их значения,

$$r\frac{d^2r}{duds'} + \frac{(u - s'\cos\varepsilon)(s' - u\cos\varepsilon)}{r^2} = -\cos\varepsilon,$$

что, после выполнения вычислений и после приведения, обращается в выражение

$$r\frac{d^2r}{duds'} + \frac{us'\sin^2\varepsilon}{r^2} = 0,$$

откуда следует

$$\frac{us'}{r^3} = -\frac{1}{\sin^2 \varepsilon} \cdot \frac{d^2 r}{du ds'}.$$

Подставляя это значение в элементарный момент, получим для полного момента выражение

$$\frac{1}{2} ii' d\varepsilon \int\int \frac{us' du ds'}{r^3} = -\frac{1}{2} ii' \frac{d\varepsilon}{\sin^2 \varepsilon} \int\int \frac{d^2 r}{du ds'} du ds'.$$

Рассматривая часть $L'L''$ тока s' и часть L_1L_2 сектора и полагая $L'L_1 = r'_1$, $L''L_1 = r''_1$, $L'L_2 = r'_2$, $L''L_2 = r''_2$, мы, очевидно, получим величину этого интеграла в виде

$$\frac{1}{2} ii' \frac{d\varepsilon}{\sin^2 \varepsilon} (r'_2 + r''_1 - r''_2 - r'_1).$$

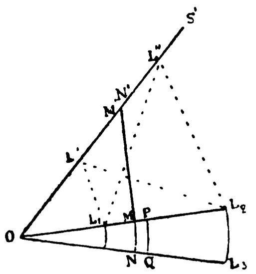


Рис. 18.

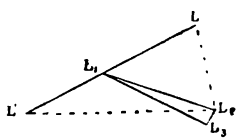


Рис. 19.

Когда сектор и проводник s' оба берут начало в центре O, расстояние $r'_1 = 0$. Если положить $OL_2 = a$, $OL'' = b$, $L''L_2 = r$, то найдем, что их взаимное действие выражается через

$$\frac{1}{2} ii' = \frac{d\varepsilon}{\sin^2 \varepsilon} (a + b - r).$$

Когда середина проводника $L'L''$ (рис. 19) расположена в центре L_1 сектора, а его длина равна удвоенному радиусу a этого сектора, то $a = b$. Если положить $L'L_1L_2 = 2\theta = \pi - \varepsilon$,

$r_1' = r_2'' = a$, $r_2' = 2a\sin\theta$, $r_2'' = 2a\cos\theta$, $d\varepsilon = -2d\theta$, то оказывается, что значение момента вращения равно

$$aii' \frac{d\varepsilon}{\sin^2\varepsilon} (\sin\theta - \cos\theta) = \frac{1}{2} \frac{aii'd\theta(\cos\theta - \sin\theta)}{\sin^2\theta\cos^2\theta}.$$

Из этого результата можно вывести способ проверки моей формулы посредством прибора, к описанию которого я перехожу [39].

В двух точках a, a' (рис. 20) столика mn закреплены два столбика ab, $a'b'$, верхние части которых cb, $c'b'$ сделаны из изолирующего материала. Они поддерживают медную пластинку HH′, согнутую пополам по прямой HH′ и увенчанную двумя чашками H и H′ со ртутью. В точках A, C, A′, C′ столик имеет четыре углубления, также наполненные ртутью. Из A выходит медный проводник AEFGSRQ, который опирается на HH′ и заканчивается чашкой Q; из A′ выходит второй проводник, симметричный первому; они оба обмотаны шелком для изоляции как друг от друга, так и от проводника HH′. В чашку Q погружается острие подвижного проводника QPONMLKIH, который между K и I возвращается обратно, причем две его ветви PO, KI в этой части также обмотаны шелком. Проводник заканчивается вторым острием, погруженным в чашку H. NML образует полуокружность с диаметром LN и центром в K. Стержень PKp вертикален и заканчивается в p острием, поддерживаемым тремя горизонтальными кругами B, D, T, которые могут вращаться вокруг своих центров и предназначены для уменьшения трения.

XY — неподвижный столик, в выемку которого входит проводник VU$ifkhgo$ZC, возвращающийся обратно от g к O и обмотанный в этой части шелком: $ifghk$ — сектор круга, имеющий центром точку k; части Ui и go прямолинейны; в X они проходят через стойку ab, в которой для этого сделано отверстие, и разделяются затем в O, после чего погружаются соответственно в углубления A и C. Справа от FG находится

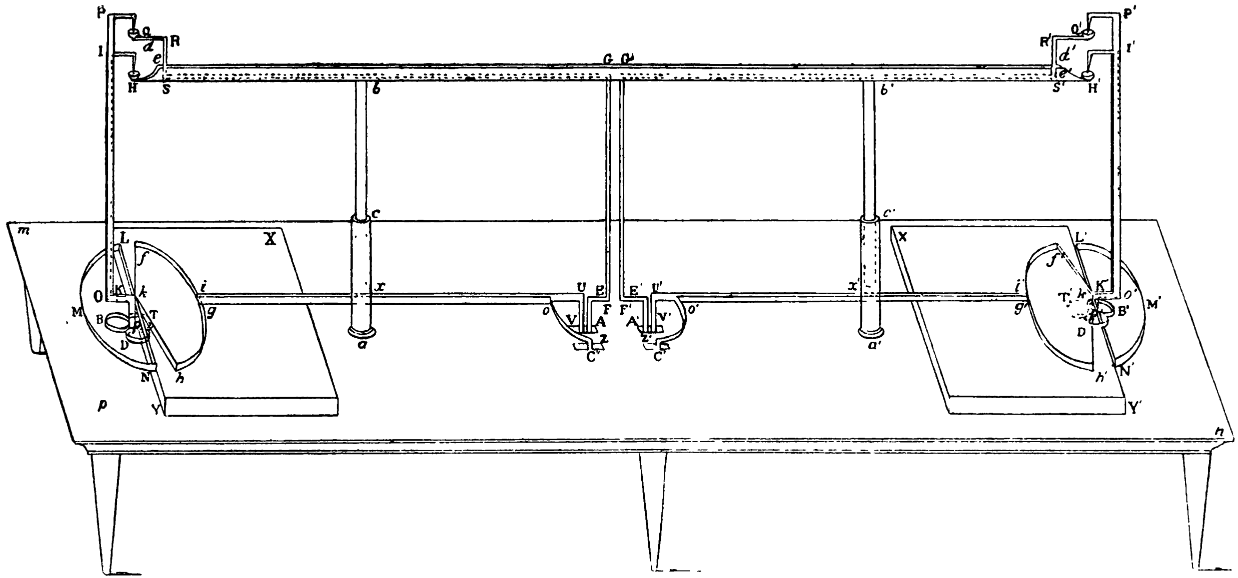


Рис. 20.

система проводников как подвижных, так и неподвижных, в точности подобная только что описанной. Если положительный реофор батареи погружается в C, а отрицательный в C′, то электрический ток пробегает через проводники

$$CZoghkfiUV \text{ и } AEFGSRQ.$$

Отсюда он проходит в подвижной проводник QPONMLKIH и по HH′ попадает в H′. Затем он обегает симметричный подвижной проводник H′I′K′L′M′N′O′P′Q′, приходит в Q′, оттуда проводник Q′R′S′G′F′E′A′ приводит его в углубление A′, из него он направляется в C′ через проводник $V'U'i'f'k'h'g'o'Z'C'$ и, наконец, оттуда в отрицательный реофор.

Поскольку ток в диаметре LN идет в направлении LN, а в радиусах hk, kf — из h в k и затем из k в f, между этими радиусами и диаметрами будет существовать отталкивание; далее, замкнутый контур $ghkfi$ не производит никакого действия на полукруг LMN, центр которого находится на неподвижной оси pH, а потому подвижной проводник может быть приведен в движение лишь действием сектора $ghkfi$ на диаметр LN, ибо во всех других частях прибора проходят два противоположных тока, действия которых взаимно уничтожаются. Равновесие установится тогда, когда диаметр LN будет составлять равные углы с радиусами kf, kh. И если вывести его из этого положения, он будет колебаться только в силу действия на него сектора $ghkfi$.

Пусть 2η — центральный угол сектора. Тогда в положении равновесия будем иметь

$$2\theta = \frac{\pi}{2} + \eta \text{ или } \theta = \frac{\pi}{4} + \frac{\eta}{2},$$

откуда следует

$$\cos\theta - \sin\theta = \cos\theta - \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) =$$

$$= 2\sin\frac{\pi}{4}\sin\left(\frac{\pi}{4} - \theta\right) = -\sqrt{2}\sin\frac{1}{2}\eta,$$

и

$$\sin\theta\cos\theta = \frac{1}{2}\sin 2\theta = \frac{1}{2}\cos\eta;$$

но нетрудно видеть, что если вывести из положения равновесия на угол $2d\theta$ проводник LL′, то момент сил, стремящихся вернуть его в это положение, слагается из моментов, производимых двумя маленькими секторами с центральным углом, равным этому перемещению, причем действия их одинаковы. Значение же этого момента, согласно только что сказанному, есть

$$\frac{1}{2}\,\frac{aii'(\cos\theta - \sin\theta)}{\sin^2\theta\cos^2\theta}\,d\theta = -\frac{2aii'\sqrt{2}\sin\frac{1}{2}\eta}{\cos^2\eta}\,d\theta.$$

Отсюда следует, что продолжительность колебаний будет для одного и того же диаметра, пропорциональна величине

$$\frac{\sqrt{\sin\frac{1}{2}\eta}}{\cos\eta}.$$

Поэтому, если мы заставим колебаться одновременно подвижные проводники в двух симметричных частях прибора, предполагая центральные углы секторов различными, то мы получим токи одной и той же силы и убедимся, что число колебаний за один и тот же промежуток времени пропорционально выражениям

$$\frac{\sqrt{\sin\frac{1}{2}\eta}}{\cos\eta} \quad\text{и}\quad \frac{\sqrt{\sin\frac{1}{2}\eta'}}{\cos\eta'},$$

если обозначить через 2η и $2\eta'$ центральные углы обоих секторов [40].

Рассмотрим теперь взаимодействие двух прямолинейных проводников. Вспомним сначала, что, обозначив через β угол между направлением элемента ds' и прямой r, мы уже имеем выражение для действия, оказываемого двумя элементами электрического тока друг на друга, в форме

$$ii'ds'r^k d(r^k \cos\beta);$$

умножая и деля на $\cos\beta$ и принимая во внимание, что из $k=-\frac{1}{2}$ вытекает $r^{2k}=\frac{1}{r}$, мы увидим, что это выражение может быть написано в виде

$$\frac{ii'ds'}{\cos\beta} r^k \cos\beta d(r^k \cos\beta)=\frac{1}{2}\cdot\frac{ii'ds'}{\cos\beta} - d\left(\frac{\cos^2\beta}{r}\right).$$

Отсюда легко вывести, что составляющая этого действия по касательной к элементу ds' равна

$$\frac{1}{2} ii'ds'd\left(\frac{\cos^2\beta}{r}\right)$$

и что составляющая по нормали к тому же элементу равна

$$\frac{1}{2} ii'ds' \operatorname{tg}\beta d\left(\frac{\cos^2\beta}{r}\right).$$

Этому последнему выражению можно придать вид

$$\frac{1}{2} ii'ds'\left[d\left(\frac{\sin\beta\cos\beta}{r}\right)-\frac{d\beta}{dr}\right].$$

Эти значения для двух составляющих помещены на стр. 331 моего „Recueil d'observations électro-dynamiques“, напечатанного в 1822 г.

Применим последнее значение к случаю двух прямолинейных токов, расположенных на расстоянии d друг от друга. Имеем в этом случае

$$r=\frac{a}{\sin\beta},$$

и нормальная составляющая обращается в

$$\frac{1}{2} ii'ds'\left[\frac{d(\sin^2\beta\cos\beta)}{a}-\frac{\sin\beta\, d\beta}{a}\right].$$

Пусть M′ (рис. 21) — любая точка тока, проходящего по прямой L_1L_2, а β', β'' — углы $L'M'L_2$, $L''M'L_2$, которые крайние радиусы-векторы $M'L'$ и $M'L''$ составляют с L_1L_2. Мы получим действие ds' на $L'L''$, интегрируя предыдущее выражение в пределах β', β'', что дает

$$\frac{1}{2a} ii'ds' (\sin^2\beta''\cos\beta'' + \cos\beta'' - \sin^2\beta'\cos\beta' - \cos\beta'),$$

но для каждого из пределов мы имеем, обозначая соответствующие величины s через b' и b'',

$$s' = b'' - a\operatorname{ctg}\beta'' = b' - a\operatorname{ctg}\beta' ds' = -\frac{ad\beta''}{\sin^2\beta''} = \frac{ad\beta'}{\sin^2\beta'}.$$

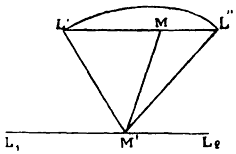


Рис. 21.

Подставляя эти значения и интегрируя вновь между пределами β_1', β_2' и β_1'', β_2'', получим выражение искомой силы

$$\frac{1}{2} ii' \left(\sin\beta_2' - \sin\beta_1'' - \sin\beta_2' + \sin\beta_1' - \right.$$

$$\left. - \frac{1}{\sin\beta_2'} + \frac{1}{\sin\beta_1''} + \frac{1}{\sin\beta_2'} - \frac{1}{\sin\beta_1'}\right),$$

или

$$\frac{1}{2} ii' \left(\frac{a}{r_2''} - \frac{a}{r_1''} - \frac{a}{r_2'} + \frac{a}{r_1'} + \frac{r_1'' + r_2' - r_2'' - r_1'}{a}\right).$$

Если оба проводника имеют одинаковую длину и перпендикулярны к прямым, соединяющим их концы с одной стороны, то имеем

$$r_1' = r_2'' = a \text{ и } r_2' = r_1'' = c,$$

обозначая через c диагональ прямоугольника, образованного этими двумя прямыми и двумя направлениями токов; тогда предыдущее выражение обращается в

$$ii'\left(\frac{c}{a} - \frac{a}{c}\right) = \frac{ii'l^2}{ac},$$

где l — длина проводников; если же прямоугольник обращается в квадрат, то имеем для величины силы $\frac{ii'}{\sqrt{2}}$. Наконец, если предположим, что один из проводников продолжается неопределенно в обе стороны, а l — длина другого, то члены с r'_1, r'_2, r''_1, r''_2 в знаменателе пропадут. Получим

$$r'_2 + r''_1 - r''_2 - r'_1 = 2l,$$

и выражение для силы будет

$$\frac{ii'l}{a},$$

или просто ii', если длина l равна расстоянию a.

Что касается действия двух токов параллельно направлению s', то его можно получить, какова бы ни была форма тока s.

Действительно, составляющая по ds' есть

$$\frac{1}{2}\, ii'ds'd\left(\frac{\cos^2\beta}{r}\right),$$

а потому величина полного действия, которое ds' оказывает в этом направлении на ток L′L″ (рис. 21), будет

$$\frac{1}{2}\, ii'ds'\left(\frac{\cos^2\beta''}{r''} - \frac{\cos^2\beta'}{r'}\right),$$

и замечательно то, что она зависит только от положения концов L′, L″ проводника s. Поэтому она остается неизменной при любой форме этого проводника, который может быть согнут по какой угодно линии.

Если обозначить через a' и a'' перпендикуляры, опущенные из двух оконечностей той части проводника L′L″, которая рассматривается как подвижная, на прямолинейный проводник, действие которого в параллельном ему направлении мы хотим определить, то будем иметь

$$r'' = \frac{a''}{\sin\beta''}, \qquad r' = \frac{a'}{\sin\beta'},$$

$$ds' = -\frac{dr''}{\cos\beta''} = \frac{a''\,d\beta''}{\sin^2\beta''} = -\frac{dr'}{\cos\beta'} = \frac{a'\,d\beta'}{\sin^2\beta'},$$

и, следовательно,

$$\frac{ds'}{r''} = \frac{d\beta''}{\sin\beta''}, \quad \frac{ds'}{r'} = \frac{d\beta'}{\sin\beta'},$$

откуда легко получается, что искомый интеграл есть

$$-\frac{1}{2}ii'\int\left(\frac{\cos^2\beta''\,d\beta''}{\sin\beta''} - \frac{\cos^2\beta'\,d\beta'}{\sin\beta'}\right) =$$

$$= -\frac{1}{2}ii'\left(l\,\frac{\operatorname{tg}\frac{1}{2}\beta''}{\operatorname{tg}\frac{1}{2}\beta'} + \cos\beta'' - \cos\beta' + C\right).$$

Нужно будет взять этот интеграл в пределах, определяемых двумя концами прямолинейного проводника; обозначая через β_1', β_2' и β_1'', β_2'' значения β' и β'' на этих пределах, мы сразу же получим величину действия, оказываемого прямолинейным проводником, и эта величина зависит только от углов β_1', β_1'', β_2', β_2''.

Если мы хотим определить величину этой силы для случая, когда прямолинейный проводник неопределенно продолжается в обе стороны, нужно положить $\beta_1' = \beta_1'' = 0$, а $\beta_2' = \beta_2'' = \pi$. На первый взгляд может показаться, что она обращается в нуль, что было бы в противоречии с опытом. Однако нетрудно убедиться, что в этом случае исчезает лишь та часть интеграла, в которую входят косинусы четырех углов, а остальная часть интеграла

$$\frac{1}{2}ii'\left(l\,\frac{\operatorname{tg}\frac{1}{2}\beta_1''}{\operatorname{tg}\frac{1}{2}\beta_1'} - l\,\frac{\operatorname{tg}\frac{1}{2}\beta_2''}{\operatorname{tg}\frac{1}{2}\beta_2'}\right) = \frac{1}{2}ii'l\,\frac{\operatorname{tg}\frac{1}{2}\beta_1''\operatorname{ctg}\frac{1}{2}\beta_2''}{\operatorname{tg}\frac{1}{2}\beta_1'\operatorname{ctg}\frac{1}{2}\beta_2'}$$

обращается, вследствие $\beta_2'' = \pi - \beta_1''$ и $\beta_2' = \pi - \beta_1'$, в

$$\frac{1}{2}ii'l\,\frac{\operatorname{tg}^2\frac{1}{2}\beta_1''}{\operatorname{tg}^2\frac{1}{2}\beta_1'} = ii'l\,\frac{\operatorname{tg}\frac{1}{2}\beta_1''}{\operatorname{tg}\frac{1}{2}\beta_1'} = ii'l\,\frac{a''}{a'}.$$

Из этого выражения видно, что искомая сила зависит только от отношения двух перпендикуляров a' и a'', опущенных на прямолинейный проводник неопределенной длины из двух концов части проводника, на который он действует. Далее видно, что она не зависит от формы этой части и что она обращается в нуль, как это и должно происходить лишь тогда, когда оба эти перпендикуляра равны между собой.

Чтобы получить расстояние от этой силы до прямолинейного проводника, направление которого параллельно ее направлению, нужно умножить каждую из составляющих ее элементарных сил на расстояние, отделяющее ее от проводника, и проинтегрировать результат в тех же пределах. Мы найдем, таким образом, момент, который нужно будет разделить на силу, чтобы определить искомое расстояние.

Согласно найденным выше значениям, нетрудно видеть, что значение элементарного момента будет

$$\frac{1}{2} ii'ds'r \sin\beta d\left(\frac{\cos^2\beta}{r}\right).$$

Проинтегрировать это выражение можно лишь в том случае, если подставить вместо одной из переменных r или β ее значение в функции другой, взятое из уравнений, определяющих форму подвижной части проводника. Это значение выражается весьма просто, если эта часть находится на перпендикуляре, восставленном из любой точки прямолинейного проводника, который мы рассматриваем, как неподвижный, ибо если мы возьмем эту точку за начало счета s', то получим

$$r = -\frac{s'}{\cos\beta},$$

а s' является постоянной по отношению к дифференциалу.

Значение элементарного момента обращается таким образом в

$$\frac{1}{2} ii' ds' \frac{\sin\beta}{\cos\beta} d(\cos^3\beta) = -\frac{3}{2} ii' ds' \sin^2\beta \cos\beta \, d\beta,$$

интеграл которого в пределах β'' и β' будет

$$-\frac{1}{2}\, ii'\, ds' (\sin^3\beta'' - \sin^3\beta').$$

Заменяя ds' значениями этого дифференциала, найденными выше, и интегрируя вновь, получаем, в определенных пределах прямолинейного проводника,

$$\frac{1}{2}\, ii' [a'' (\cos\beta_2'' - \cos\beta_1'') - a' (\cos\beta_2' - \cos\beta_1')].$$

Если предположим, что проводник продолжается неопределенно в обе стороны, нужно будет дать β_1', β_1'', β_2', β_2'' значения, которые мы им уже придавали в этом случае, и тогда получим

$$-ii' (a'' - a')$$

для величины искомого момента, которая будет, таким образом, пропорциональна длине $a'' - a'$ подвижного проводника и останется неизменной, пока не изменится эта длина, притом каковы бы ни были расстояния концов этого проводника до проводника, который мы рассматриваем, как неподвижный. Вычислим теперь действие, которое должна оказывать дуга какой-либо кривой NM, чтобы заставить дугу круга L_1L_2 вращаться вокруг своего центра.

Пусть M′ (рис. 22)[41] — середина какого-либо элемента ds' дуги L_1L_2, примем радиус круга равным a. Момент элемента ds дуги NM, заставляющий вращаться ds' вокруг центра O, получается, если умножить касательную составляющую в M′ на ее расстояние a от неподвижной точки; это дает

$$\frac{1}{2}\, aii'\, ds\, d\left(\frac{\cos^2\beta}{r}\right).$$

Обозначая через β', β'' и r', r'' значения β и r, относящиеся к пределам M и N, имеем для момента вращения ds'

$$\frac{1}{2}\, aii'\, ds' \left(\frac{\cos^2\beta''}{r''} - \frac{\cos^2\beta'}{r'}\right),$$

т. е. результат, зависящий только от положения конечных точек M и N.

Мы закончим вычисление, предполагая, что линия MN есть диаметр $L'L''$ того же круга.

Назовем через 2θ угол $M'OL'$; $M'T'$ представляет касательную в M', а потому углы $L'M'T'$ и $L''M'T'$ будут соответственно β' и β'', и, очевидно, будем иметь $\cos\beta' = -\cos\theta$, $\cos\beta'' = \sin\theta$, $r' = 2a\sin\theta$, $r'' = 2a\cos\theta$.

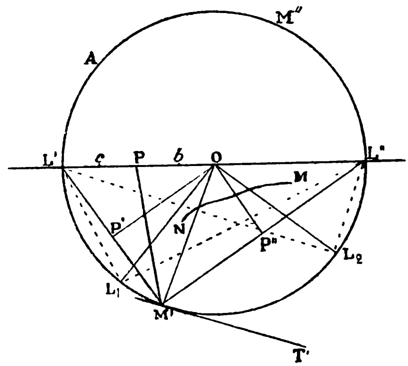


Рис. 22.

Действие диаметра $L'L''$, заставляющее вращаться элемент, расположенный в M, будет, таким образом,

$$\frac{1}{4} ii'\, ds' \left(\frac{\sin^2\theta}{\cos\theta} - \frac{\cos^2\theta}{\sin\theta}\right).$$

Если взять какую-либо точку A окружности за начало дуг и положить $AL' = C$, получим

$$s' = C + 2a\theta \quad \text{и} \quad ds' = 2a\,d\theta,$$

вследствие чего предыдущее выражение обращается в

$$\frac{1}{2} aii' \left(\frac{\sin^2\theta\, d\theta}{\cos\theta} - \frac{\cos^2\theta\, d\theta}{\sin\theta}\right),$$

которое нужно проинтегрировать по всей длине дуги L_1L_2, чтобы получить момент вращения этой дуги вокруг его центра.

Но имеем

$$\int \frac{\sin^2\theta\, d\theta}{\cos\theta} = l\,\mathrm{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\theta\right) - \sin\theta + C_1,$$

$$\int \frac{\cos^2\theta\, d\theta}{\sin\theta} = l\,\mathrm{tg}\,\frac{1}{2}\theta + \cos\theta + C';$$

поэтому если обозначить через $2\theta_1$ и $2\theta_2$ углы $L'OL_1$ и $L'OL_2$, то полный момент дуги L_1L_2 будет

$$\frac{a}{2}ii'\left\{l\frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4}+\frac{1}{2}\theta_2\right)\operatorname{tg}\frac{1}{2}\theta_1}{\operatorname{tg}\frac{1}{2}\theta_2\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4}+\frac{1}{2}\theta_1\right)}-\sin\theta_2-\cos\theta_2+\sin\theta_1+\cos\theta_1\right\}.$$

То же выражение, взятое с обратным знаком, даст величину момента вращения диаметра $L'L''$ под влиянием L_1L_2.

В приборе, описанном мною выше, проводник, имеющий форму кругового сектора, действует на другой проводник, состоящий из диаметра и полуокружности и могущий вращаться вокруг оси, проходящей через центр этой полуокружности и перпендикулярной к ее плоскости. Действие, испытываемое полуокружностью со стороны сектора, уничтожается сопротивлением оси, ибо контур, образованный сектором, замкнут; поэтому остается лишь действие на диаметр. Мы уже вычислили действие дуги, необходимо лишь определить действия радиусов сектора на тот же диаметр.

Чтобы их найти, найдем момент вращения, который получается от взаимного действия двух прямолинейных токов, лежащих в одной плоскости, и стремится вращать их навстречу друг другу вокруг точки пересечения их направлений.

Нормальная составляющая к элементу ds', расположенному в M' (рис. 23), будет, как мы видели выше,

$$\frac{1}{2}ii'ds'\left(d\frac{\sin\beta\cos\beta}{r}-\frac{d\beta}{r}\right).$$

Момент ds, обусловливающий вращение ds' вокруг O, получится умножением этой силы на s'; поэтому, обозначая через M полный момент, получим

$$\frac{d^2M}{ds\,ds'}ds\,ds'=\frac{1}{2}ii's\,ds'\left(\frac{\sin\beta\cos\beta}{r}-\frac{d\beta}{r}\right),$$

или, интегрируя по s,

$$\frac{dM}{ds'} \cdot ds' = \frac{1}{2} ii's' ds' \left(\frac{\sin\beta\cos\beta}{r} - \int \frac{d\beta}{r} \right).$$

Но, согласно тому, как были взяты углы при вычислении формулы, представляющей взаимодействие двух элементов гальванических проводников, угол $MM'L_2 = \beta$ является внешним по отношению к треугольнику OMM'. Обозначая через ε угол MOM', составленный направлениями двух токов, найдем, что третий угол OMM' равен $\beta - \varepsilon$, откуда получается

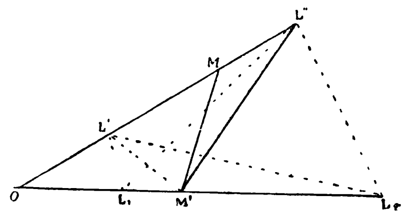


Рис. 23.

$$r = \frac{s' \sin\varepsilon}{\sin(\beta - \varepsilon)};$$

имеем поэтому

$$\frac{dM}{ds'} ds' = \frac{1}{2} ii' \frac{ds'}{\sin\varepsilon} \, [\cos\beta \times \sin\beta \sin(\beta - \varepsilon) + \cos(\beta - \varepsilon) + C].$$

Заменяя в этом выражении $\cos(\beta - \varepsilon)$ через $\cos^2\beta \cos(\beta - \varepsilon) + \sin^2\beta \cos(\beta - \varepsilon)$, можно легко заметить, что оно переходит в

$$\frac{dM}{ds'} ds' = \frac{1}{2} ii' \frac{ds'}{\sin\varepsilon} [\cos\varepsilon \cos\beta + \sin^2\beta \cos(\beta - \varepsilon) + C],$$

которое нужно взять в пределах β' и β''. Мы получаем, таким образом, разность двух функций одного и того же вида, одной от β'', другой от β', которые нужно проинтегрировать снова для получения искомого момента вращения. Достаточно произвести это второе интегрирование лишь для одной из этих двух величин. Если обозначим через a'' расстояние OL'', соответствующее β'', имеем в треугольнике $OM'L''$

$$s' = \frac{a'' \sin(\beta'' - \varepsilon)}{\sin\beta''} = a'' \cos\varepsilon - a'' \sin\varepsilon \operatorname{ctg}\beta'', \quad ds' = \frac{a' \sin\varepsilon \, d\beta''}{\sin^2\beta},$$

и величина, которую мы предполагаем прежде всего интегрировать, обращается в

$$\frac{1}{2}\,a''ii\left[\frac{\cos\varepsilon\cos\beta''\,d\beta''}{\sin^2\beta''}+\cos(\beta''-\varepsilon)\,d\beta''\right];$$

интеграл этого выражения, взятый в пределах β''_1 и β''_2, есть

$$\frac{1}{2}\,a''ii'\left[\sin(\beta''_2-\varepsilon)-\sin(\beta''_1-\varepsilon)-\frac{\cos\varepsilon}{\sin\beta''_2}+\frac{\cos\varepsilon}{\sin\beta''_1}\right].$$

Обозначая через p''_2 и p'_2 перпендикуляры, опущенные из точки O на отрезки $L''L_2=r''_2$ и $L''L_1=r''_1$, получаем, очевидно,

$$a''\sin(\beta''_2-\varepsilon)=p''_2,\quad a''\sin(\beta''_1-\varepsilon)=p''_1,$$

$$\frac{a''}{\sin\beta''_2}=\frac{r''_2}{\sin\varepsilon};\quad \frac{a''}{\sin\beta''_1}=\frac{r''_1}{\sin\varepsilon},$$

и предыдущий интеграл обращается в

$$\frac{1}{2}\,ii'\,[p''_2-p''_1-(r''_2-r''_1)\operatorname{ctg}\varepsilon].$$

Если учесть, что, обозначив расстояние OL' через a', мы получим также и в треугольнике $OM'L'$

$$s'=\frac{a'\sin(\beta'-\varepsilon)}{\sin\beta'}=a'\cos\varepsilon-a'\sin\varepsilon\operatorname{ctg}\beta',\quad ds'=\frac{a'\sin\varepsilon\,d\beta'}{\sin^2\beta'},$$

то легко заметить, что интеграл второго выражения получится из того, которое мы только что нашли, если заменить в нем p''_2, p''_1, r''_2, r''_1 через p'_2, p'_1, r'_2, r'_1. Отсюда получается величина момента вращения, как разность двух интегралов:

$$\frac{1}{2}\,ii'\,[p''_2-p''_1-p'_2+p'_1-(r''_2-r''_1-r'_2+r'_1)\operatorname{ctg}\varepsilon].$$

Это значение переходит в полученное нами выше в том случае, когда угол ε прямой, ибо тогда $\operatorname{ctg}\varepsilon=0$.

Если предположить, что оба тока берут начало в точке O и что длины проводников OL″, OL_2 (рис. 24) обозначены соответственно через a и b, перпендикуляр OP — через p, а расстояние $L''L_2$ — через r_1, то имеем $p''_2 = p$, $p''_1 = p'_2 = p'_1 = 0$, $r''_2 = r_1 r''_1 = a_1 r'_2 = b$, $r'_1 = 0$ и $\frac{1}{2} ii' [p + (a + b - r) \operatorname{ctg} \varepsilon]$ для того значения, которое принимает тогда момент вращения.

Величина $a + b - r$, т. е. разность между суммой двух сторон треугольника и третьей стороной, всегда положительна. Отсюда следует, что момент вращения больше значения $\frac{1}{2} ii'p$, соответствующего прямому углу ε между проводниками, когда $\operatorname{ctg} \varepsilon$ положителен, т. е. когда этот угол — острый, и меньше $\frac{1}{2} ii'p$, когда он тупой, ибо в этом случае $\operatorname{ctg} \varepsilon$ становится отрицательным. Очевидно, его величина будет тем больше, чем меньше угол ε, и возрастает до бесконечно большого значения вместе с $\operatorname{ctg} \varepsilon$ при приближении ε к нулю. Однако следует показать, что она всегда остается положительной, как бы близко этот угол ни приближался в двум прямым.

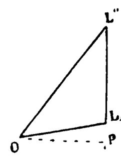


Рис. 24.

Для этого достаточно обратить внимание на то, что если мы обозначим через α угол треугольника $OL''L_2$, заключенный между сторонами a и r, а через β — угол, заключенный между сторонами b и r, то получим

$$\operatorname{ctg} \varepsilon = -\operatorname{ctg}(\alpha + \beta), \quad p = a \sin \alpha = b \sin \beta, \quad r = a \cos \alpha + b \cos \beta,$$

следовательно,

$$a + b - r = a(1 - \cos \alpha) + b(1 - \cos \beta) = p \operatorname{tg} \frac{1}{2} \alpha + p \operatorname{tg} \frac{1}{2} \beta,$$

и

$$\frac{1}{2} ii' [p + (a + b - r) \operatorname{ctg} \varepsilon] = \frac{1}{2} ii'p \left(1 - \frac{\operatorname{tg} \frac{1}{2} \alpha + \operatorname{tg} \frac{1}{2} \beta}{\operatorname{tg}(\alpha + \beta)}\right).$$

Это выражение всегда остается положительным, как бы ни были малы углы α и β, ибо $\operatorname{tg}(\alpha+\beta)$ для углов, меньших $\frac{\pi}{4}$, всегда больше, чем $\operatorname{tg}\alpha+\operatorname{tg}\beta$, и тем более чем $\operatorname{tg}\frac{1}{2}\alpha+\operatorname{tg}\frac{1}{2}\beta$. Эта величина, очевидно, стремится к пределу $\frac{1}{4}ii'p$ по мере приближения углов α и β к нулю; она вместе с p обращается в нуль, когда эти углы становятся равными нулю.

Вернемся теперь к общему выражению момента вращения, вводя в него только расстояния $OL''=a''$ (рис. 24), $OL'=a'$ и различные углы. Это значение есть

$$\frac{1}{2}ii'\Big[a''\sin(\beta_2''-\varepsilon)-a''\sin(\beta_1''-\varepsilon)-$$
$$-a'\sin(\beta_2'-\varepsilon)+a'\sin(\beta_1'-\varepsilon)-$$
$$-\frac{a''\cos\varepsilon}{\sin\beta_2''}+\frac{a''\cos\varepsilon}{\sin\beta_1''}+\frac{a'\cos\varepsilon}{\sin\beta_2'}-\frac{a'\cos\varepsilon}{\sin\beta_1'}$$

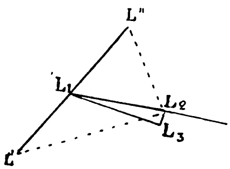


Рис. 25.

Применим его к случаю, когда один из проводников $L'L''$ (рис. 25) прямолинейный и подвижной вокруг своей середины L_1, а другой берет начало в этой середине. Полагая $L'L''=2a$, имеем

$$a''=a,\quad a'=-a,\quad \beta_1'=\pi+\varepsilon,\quad \beta_1''=\varepsilon,\quad \sin\beta_1'=-\sin\beta_1'',$$

и если оставим прежние обозначения для перпендикуляров, опущенных из L_1 на $L'L_2$, $L''L_2$, то выражение момента принимает вид

$$\frac{1}{2}ii'\left(p_2''+p_2'-\frac{a\cos\varepsilon}{\sin\beta_2''}-\frac{a\cos\varepsilon}{\sin\beta_2'}\right).$$

Но

$$\sin\beta_2'':a=\sin\varepsilon:r_2''\quad\text{и}\quad -\sin\beta_2':a=\sin\varepsilon:r_2';$$

если определим значения r_2'' и r_2' из этих пропорций и подставим в предыдущее выражение, оно обратится в

$$\frac{1}{2}ii'\left[p_2''+p_2'+\operatorname{ctg}\varepsilon\,(r_2'-r_2'')\right].$$

Если предположить L_1L_2 бесконечно большим, найдем $p_2'' = p_2' = a\sin\varepsilon$, $r_2' - r_2'' = 2a\cos\varepsilon$ и значение момента будет

$$\frac{1}{2}aii'\left(2\sin\varepsilon + \frac{2\cos^2\varepsilon}{\sin\varepsilon}\right) = \frac{aii'}{\sin\varepsilon};$$

оно, таким образом, обратно пропорционально синусу угла между двумя токами и прямо пропорционально длине конечного проводника.

Если $L_1L_2 = \frac{1}{2}L'L'' = a$ и если обозначить угол $L''L_1L_2$ через 2θ, получим

$$p_2'' = a\sin\theta,\ p_2' = a\cos\theta,\ r_2' = 2a\sin\theta,$$
$$r_2'' = 2a\cos\theta,\quad \operatorname{ctg}\varepsilon = \operatorname{ctg}2\theta,$$

и момент выражается в виде

$$\frac{1}{2}aii'[\cos\theta + \sin\theta + 2\operatorname{ctg}2\theta(\cos\theta - \sin\theta)];$$

заменим $2\operatorname{ctg}2\theta$ его значением

$$\frac{1-\operatorname{tg}^2\theta}{\operatorname{tg}\theta} = \frac{\cos^2\theta - \sin^2\theta}{\sin\theta\cos\theta} = \frac{(\cos\theta + \sin\theta)(\cos\theta - \sin\theta)}{\sin\theta\cos\theta},$$

получаем, что значение момента будет

$$\frac{1}{2}aii'(\cos\theta + \sin\theta)\left[1 + \frac{(\cos\theta - \sin\theta)^2}{\sin\theta\cos\theta}\right] =$$
$$= \frac{1}{2}aii'(\cos\theta + \sin\theta)\left(\frac{1}{\sin\theta\cos\theta}\right).$$

Чтобы найти сумму действия двух радиусов, между которыми заключен бесконечно малый сектор, ограниченный дугой $d\varepsilon$, нужно заметить, что, поскольку ток пробегает эти два радиуса в противоположных направлениях, эта сумма будет равна дифференциалу предыдущего выражения. Мы найдем таким образом, что она выразится через

$$\frac{1}{2}aii'\left[(\cos\theta-\sin\theta)\left(\frac{1}{\sin\theta\cos\theta}-1\right)-\frac{(\cos\theta+\sin\theta)(\cos^2\theta-\sin^2\theta)}{\sin^2\theta\cos^2\theta}\right]d\theta=$$
$$=\frac{1}{2}aii'(\cos\theta-\sin\theta)\left(\frac{1}{\sin\theta\cos\theta}-1-\frac{(\cos\theta+\sin\theta)^2}{\sin^2\theta\cos^2\theta}\right)d\theta=$$
$$=-\frac{1}{2}aii'(\cos\theta-\sin\theta)\left(\frac{1}{\sin^2\theta\cos^2\theta}+\frac{1}{\sin\theta\cos\theta}+1\right)d\theta.$$

Но действие дуги L_2L_3 на диаметр $L'L''$ равно и противоположно действию, которое оказывает этот диаметр на дугу, чтоб привести ее во вращение вокруг его центра. Момент этой силы, согласно сказанному выше, будет равен

$$\frac{1}{2}aii'\left(\frac{\cos^2\theta}{\sin\theta}-\frac{\sin^2\theta}{\cos\theta}\right)d\theta=\frac{1}{2}aii'(\cos\theta-\sin\theta)\left(\frac{1}{\sin\theta\cos\theta}+1\right)d\theta;$$

складывая это равенство с предыдущим, получаем для момента силы, с которой бесконечно малый сектор действует на диаметр $L'L''$, выражение

$$-\frac{1}{2}aii'(\cos\theta-\sin\theta)\frac{d\theta}{\sin\theta\cos\theta}.$$

Данное значение отличается только знаком от найденного нами ранее выражения того же момента. Разница в знаке зависит, очевидно, от того, что мы вывели последнее значение из формулы, относящейся к действию очень малого замкнутого контура на элемент, в котором мы изменили знак C, чтобы сделать выражение положительным.

Рассмотрим теперь действие, которое должны взаимно оказывать друг на друга два прямолинейных тока, не лежащих в одной плоскости, чтобы они стали или перемещаться параллельно их общему перпендикуляру, или вращаться вокруг него.

Пусть два тока будут AU, A'U' (рис. 26); $AA'=a$ их общий перпендикуляр; AV — линия, параллельная A'U'. Действие двух элементов, расположенных в M и в M′, полагая $n=2$ и $h=k-1=-\frac{3}{2}$ в общей формуле

$$\frac{ii'ds\,ds'}{r^n}(\cos\varepsilon+h\cos\theta\cos\theta'),$$

обратится в

$$\frac{1}{2}\,\frac{ii'dsds'\left(2\cos\varepsilon+3\frac{dr}{ds}\cdot\frac{dr}{ds'}\right)}{r^2},$$

ибо

$$\cos\theta=\frac{dr}{ds},\quad \cos\theta'=\frac{dr}{ds'}.$$

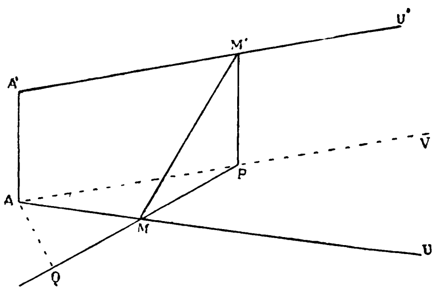


Рис. 26.

Но если положим $AM=s$, $A'M'=s'$, $VAU=\varepsilon$, то имеем

$$r^2=a^2+s^2+s'^2-2ss'\cos\varepsilon,$$

откуда

$$r\frac{dr}{ds}=s-s'\cos\varepsilon,\quad r\frac{dr}{ds'}=s'-s\cos\varepsilon,\quad r\frac{d^2r}{dsds'}+\frac{drdr}{dsds'}=-\cos\varepsilon,$$

а так как

$$\frac{d\frac{1}{r}}{ds}=-\frac{\frac{dr}{ds}}{r^2},\quad \frac{d^2\frac{1}{r}}{dsds'}=-\frac{r\frac{d^2r}{dsds'}-2\frac{dr}{ds}\cdot\frac{dr}{ds'}}{r^3}=\frac{\cos\varepsilon+3\frac{dr}{ds}\cdot\frac{dr}{ds'}}{r^3}.$$

то значение взаимодействия двух элементов обращается в

$$\frac{1}{2}\, ii' ds\, ds' \left(\frac{\cos \varepsilon}{r^2} + r \frac{d^2 \frac{1}{r}}{ds\, ds'} \right).$$

Чтобы получить составляющую, параллельную AA′, нужно помножить это значение на cos угла MM′P, который MM′ составляет с M′P, параллельной AA′, т. е. на $\frac{\mathrm{M'P}}{\mathrm{M'M}}$, или $\frac{a}{r}$, откуда получается

$$\frac{1}{r}\, aii' ds\, ds' \left(\frac{\cos \varepsilon}{r^3} + \frac{d^2 \frac{1}{r}}{ds\, ds'} \right).$$

И, интегрируя на всем протяжении обоих токов, находим для полного действия

$$\frac{1}{2}\, aii' \left(\frac{1}{r} + \cos \varepsilon \int\int \frac{ds\, ds'}{r^3} \right).$$

Если оба тока составляют прямой угол, имеем $\cos \varepsilon = 0$, и действие, параллельное AA′, сводится, если взять интеграл в соответствующих пределах и применять те же обозначения, что и выше, к выражению

$$\frac{1}{2}\, aii' \left(\frac{a}{r''_2} - \frac{a}{r''_1} - \frac{a}{r'_2} + \frac{a}{r'_1} \right).$$

Эта величина пропорциональна кратчайшему расстоянию между токами и поэтому обращается в нуль, когда они лежат в одной плоскости, как это, очевидно, и должно иметь место.

Если токи параллельны, то $\varepsilon = 0$, и

$$r^2 = a^2 + (s - s')^2,$$

откуда

$$\int\int \frac{ds\, ds'}{r^3} = \int ds' \int \frac{ds}{[a^2 - (s - s')^2]^{\frac{3}{2}}} =$$

$$= \int ds' \frac{s - s'}{a^2 \sqrt{a^2 + (s - s')^2}} = -\frac{\sqrt{a^2 - (s - s')^2}}{a^2} = -\frac{r}{a^2},$$

или в пределах интегрирования

$$\frac{r_2' + r_1'' - r_1' - r_2''}{a^2},$$

и, поскольку $\cos\varepsilon = 1$, полное действие равно

$$\frac{1}{2}aii'\left(\frac{a}{r_2''} - \frac{a}{r_2'} - \frac{a}{r_1''} - \frac{a}{r_1'} + \frac{r_1'' + r_2' - r_2'' - r_1'}{a}\right).$$

Мы увидим позднее, как производится интегрирование в случае любого угла ε.

Найдем теперь момент вращения вокруг общего перпендикуляра. Для этого сначала надо знать составляющую по MP и умножить ее на длину перпендикуляра AQ, опущенного из A на MP, или, что то же, умножить составляющую по MM′ на $\frac{\mathrm{MP}}{\mathrm{MM'}}\cdot\mathrm{AQ}$, равное $\frac{ss'\sin\varepsilon}{r}$. Таким образом получим

$$\frac{1}{2}ii'\sin\varepsilon\left(ss'\frac{d^2\frac{1}{r}}{dsds'}dsds' + ss'\frac{\cos\varepsilon\, dsds'}{r^3}\right).$$

Полагая $\frac{ss'}{r} = q$, будем иметь

$$\frac{dq}{ds} = \frac{s'}{r} + \frac{ss'd\frac{1}{r}}{ds}.$$

и

$$\frac{d^2q}{dsds'} = \frac{1}{r} - \frac{s'}{r^2}\frac{dr}{ds'} - \frac{s}{r^2}\frac{dr}{ds} + ss'\frac{d^2\frac{1}{r}}{dsds'} =$$

$$= \frac{1}{r} - \frac{s'(s' - s\cos\varepsilon) + s(s - s'\cos\varepsilon)}{r^3} + ss'\frac{d^2\frac{1}{r}}{dsds'};$$

или, выполняя приведения,

$$\frac{d^2q}{dsds'} = \frac{a^2}{r^3} + \frac{ss'd^2\frac{1}{r}}{ds\,ds'},$$

откуда получается

$$ss'\frac{d^2\frac{1}{r}}{ds\,ds'}=\frac{d^2q}{ds\,ds'}-\frac{a^2}{r^3}.$$

Но выше мы нашли

$$r\frac{d^2r}{ds\,ds'}+\frac{dr}{ds}\cdot\frac{dr}{ds'}=-\cos\varepsilon,$$

или

$$r\frac{d^2r}{ds\,ds'}+\frac{(s-s'\cos\varepsilon)(s'-s\cos\varepsilon)}{r^2}=-\cos\varepsilon;$$

произведя умножение и заменяя $s^2+s'^2$ его значением, взятым из $r^2=a^2+s^2+s'^2-2ss'\cos\varepsilon$, найдем после приведения

$$\frac{d^2r}{ds\,ds'}+\frac{ss'\sin^2\varepsilon+a^2\cos\varepsilon}{r^3}=0,$$

откуда

$$\frac{ss'}{r^3}=-\frac{1}{\sin^2\varepsilon}\left(\frac{d^2r}{ds\,ds'}+\frac{a^2\cos\varepsilon}{r^3}\right).$$

Подставляя эту величину, как и значение $ss'\frac{d^2\frac{1}{r}}{ds\,ds'}$, в выражение момента вращения, получим его в виде

$$\frac{1}{2}ii'\sin\varepsilon\,ds\,ds'\left[\frac{d^2q}{ds\,ds'}-\frac{a^2}{r^3}-\frac{\cos\varepsilon}{\sin^2\varepsilon}\left(\frac{d^2r}{ds\,ds'}+\frac{a^2\cos\varepsilon}{r^3}\right)\right]=$$

$$=\frac{1}{2}ii'ds\,ds'\left(\sin\varepsilon\frac{d^2q}{ds\,ds'}-\frac{a^2\sin\varepsilon}{r^3}-\operatorname{ctg}\varepsilon\frac{d^2r}{ds\,ds'}-\frac{\cos^2\varepsilon}{\sin\varepsilon}\cdot\frac{a^2}{r^3}\right)=$$

$$=\frac{1}{2}ii'ds\,ds'\left(\sin\varepsilon\frac{d^2q}{ds\,ds'}-\operatorname{ctg}\varepsilon\frac{d^2r}{ds\,ds'}-\frac{1}{\sin\varepsilon}\cdot\frac{a^2}{r^3}\right).$$

Интегрируя по s и s', получим для полного момента

$$\frac{1}{2}ii'\left(q\sin\varepsilon-r\operatorname{ctg}\varepsilon-\frac{a^2}{\sin\varepsilon}\iint\frac{ds\,ds'}{r^3}\right).$$

Вычисление сводится, таким образом, как и выше, к нахождению значения двойного интеграла $\iint\frac{ds\,ds'}{r^3}$.

Если токи лежат в одной плоскости, имеем $a=0$, и момент сводится к

$$\frac{1}{2} ii' (q \sin \varepsilon - r \operatorname{ctg} \varepsilon),$$

т. е. результат, совпадающий с тем, который мы нашли, рассматривая непосредственно два тока, расположенных в одной плоскости. Действительно, поскольку q представляет не что иное, как $\frac{ss'}{r}$, а r обращается в MP, имеем

$$q \sin \varepsilon = \frac{ss' \sin \varepsilon}{r} = \frac{\mathrm{MP} \cdot \mathrm{AQ}}{\mathrm{MP}} = \mathrm{AQ}.$$

Но мы нашли иным путем

$$\frac{1}{2} ii' (p - \operatorname{ctg} \varepsilon),$$

где p обозначает перпендикуляр AQ. Оба результата, стало быть, тожественны. Интегрирование между пределами дает

$$\frac{1}{2} ii' \left[p_2'' - p_2'' - p_2' + p_1' + \operatorname{ctg} \varepsilon \left(r_1'' + r_2' - r_2'' - r_1'\right)\right].$$

Если угол ε — прямой, величина момента сводится к

$$\frac{1}{2} ii' (p_2'' - p_1' - p_2' + p_1').$$

Если $\varepsilon = \frac{\pi}{2}$, но a не равно нулю, этот момент обращается в

$$\frac{1}{2} ii' \left(q - a^2 \iint \frac{ds\, ds'}{r^3}\right).$$

Интеграл, который требуется вычислить в этом случае, будет

$$\int ds' \int \frac{ds}{r^3} = \int ds' \int \frac{ds}{\left(a^2 + s^2 + s'^2\right)^{\frac{3}{2}}} = \int \frac{s}{\left(a^2 + s'^2\right) \sqrt{a^2 + s^2 + s'^2}}\, ds',$$

и это надо еще раз проинтегрировать по s'; получается

$$\int \frac{sds'}{(a^2+s'^2)\sqrt{a^2+s^2+s'^2}} = \int \frac{(a^2+s^2)\,sds'}{(a^4+a^2s'^2+a^2s^2+s^2s'^2)\sqrt{a^2+s^2+s'^2}} =$$

$$= \int \frac{s\,(a^2+s^2)\dfrac{ds'}{\sqrt{a^2+s^2+s'^2}}}{a^2(a^2+s^2+s'^2)+s^2s'^2} = \int \frac{\dfrac{s\,(a^2+s^2)\,ds'}{(a^2+s^2+s'^2)^{\frac{3}{2}}}}{a^2+\dfrac{s^2s'^2}{a^2+s^2+s'^2}} =$$

$$= \int \frac{\dfrac{dq}{ds'}ds'}{a^2+q^2} = \frac{1}{a}\operatorname{arc\,tg}\frac{q}{a} + C.$$

Пусть M — момент вращения для случая, когда два проводника с электрическим током, длины которых — s и s', берут начало в точках, где их направления пересекаются с прямой, определяющей кратчайшее расстояние между ними. Тогда будем иметь

$$M = \frac{1}{2}\,ii'\left(q - a\operatorname{arc\,tg}\frac{q}{a}\right),$$

т. е. выражение, которое при $a=0$ обращается в $M = \frac{1}{2}ii'q$. Это согласуется с уже найденной нами для данного случая величиной $M = \frac{1}{2}ii'p$, ибо тогда q обращается в перпендикуляр, обозначенный нами через p. Если предположить a бесконечно большим, M обращается в нуль, как и должно быть, ибо отсюда следует

$$a\operatorname{arc\,tg}\frac{q}{a} = q.$$

Если обозначим через z угол, тангенс которого

$$\frac{ss'}{a\sqrt{a^2+s^2+s'^2}},$$

то получим

$$M = \frac{1}{2}\,ii'q\left(1 - \frac{z}{\operatorname{tg} z}\right).$$

Это — момент вращения, который был бы обусловлен силой, равной

$$\frac{1}{2} ii' \left(1 - \frac{z}{\operatorname{tg} z} \right)$$

и действующей по прямой, соединяющей два конца проводников. Эти концы противоположны тем, в которых проводники пересекаются с прямой, определяющей их кратчайшее расстояние.

Достаточно умножить эти значения на 4, чтобы получить момент вращения, обусловленный взаимодействием двух проводников, из которых один может вращаться вокруг прямой, измеряющей их кратчайшее расстояние в том случае, когда эта прямая пересекает оба проводника в их середине, а длины их соответственно равны $2s$ и $2s'$.

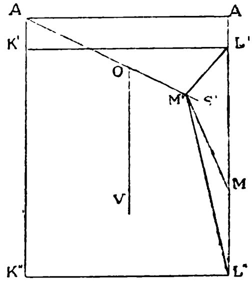


Рис. 27.

В общем, как легко убедиться, если бы мы не предполагали, что оба тока берут начало в точке пересечения с этой прямой, и сделали расчет для произвольных пределов, мы нашли бы для выражения M четыре члена того же вида, какой получили для данного частного случая, причем два из них были бы положительными, а два других — отрицательными.

Рассмотрим теперь два прямолинейных тока $A'S'$, $L'L''$ (рис. 27), расположенных не в одной плоскости и направления которых составляют прямой угол.

Пусть AA' — их общий перпендикуляр. Будем искать действие $L'L''$, которое заставило бы $A'S'$ вращаться вокруг OV, параллельной $L'L''$ и проведенной в расстоянии $A'O = b$ от A.

Пусть M, M' — два каких-либо элемента этих токов. Общее выражение для составляющей их взаимодействия, параллельной общему перпендикуляру AA', будет, если положить $\varepsilon = \frac{\pi}{2}$.

$$\frac{1}{2} aii' \frac{d^2 \frac{1}{r}}{ds ds'} ds ds'.$$

Его момент относительно точки O будет, следовательно, если принять A′ за начало отсчета длин s', равен

$$-\frac{1}{2} aii' (s'-b) \frac{d^2 \frac{1}{r}}{ds ds'} ds ds'.$$

Интегрируя по s, находим

$$\frac{1}{2} aii' (s'-b) \frac{d\left(\frac{1}{r}\right)}{ds'} ds'.$$

Обозначая через r' и r'' расстояния M′L′, M′L″ от M′ до точек L′, L″ и интегрируя в этих пределах, получим выражение для действия LL′, необходимого, чтобы заставить вращаться элемент M′,

$$\frac{1}{2} aii' (s'-b) ds' \left(\frac{d\left(\frac{1}{r''}\right)}{ds'} - \frac{d\left(\frac{1}{r'}\right)}{ds'} \right),$$

выражение, которое надо проинтегрировать по s'. Но

$$\frac{1}{2} aii' \int (s'-b) d\left(\frac{1}{r''}\right) = \frac{1}{2} aii' \left(\frac{s'-b}{r''} - \int \frac{ds'}{r''} \right).$$

Кроме того, легко видеть, что, обозначая через c значение AL″ величины s, соответствующее r'', которое при данном интегрировании является величиной постоянной, имеем $A'L'' = \sqrt{a^2+c^2}$, откуда следует, что

$$r'' = \frac{\sqrt{a^2+c^2}}{\sin\beta''}, \quad s' = \sqrt{a^2+c^2} \operatorname{ctg} \beta'', \quad ds' = \frac{\sqrt{a^2+c^2}}{\sin^2\beta''} d\beta'',$$

поэтому

$$\int \frac{ds''}{r''} = \int \frac{d\beta''}{\sin\beta''} = l \frac{\operatorname{tg}\frac{1}{2}\beta_2''}{\operatorname{tg}\frac{1}{2}\beta_1''};$$

второй член интегрируется таким же образом, и мы получим окончательно для искомого момента вращения

$$\frac{1}{2}aii'\left(\frac{s_2'-b}{r_2''}-\frac{s_1'-b}{r_1''}-\frac{s_2'-b}{r_2'}+\frac{s_1'-b}{r_1'}\right)-l\,\frac{\operatorname{tg}\frac{1}{2}\beta_2''\operatorname{tg}\frac{1}{2}\beta_1'}{\operatorname{tg}\frac{1}{2}\beta_1''\operatorname{tg}\frac{1}{2}\beta_2'}.$$

В случае, когда ось вращения, параллельная прямой $L'L''$ или s, проходит через точку A' пересечения прямых a и s', имеем $b=0$. Если, кроме того, предположить, что ток, проходящий через s', берет начало в этой точке пересечения, то будем иметь, кроме того,

$$s_1'=0,\quad \beta_1'=\frac{\pi}{2},\quad \beta_1''=\frac{\pi}{2},$$

вследствие чего значение момента вращения обратится в

$$\frac{1}{2}aii'\left(\frac{s_2'}{r_2''}-\frac{s_2'}{r_2'}-l\,\frac{\operatorname{tg}\frac{1}{2}\beta_2''}{\operatorname{tg}\frac{1}{2}\beta_2'}\right).$$

Теперь я поставлю себе задачей найти действие проводника, согнутого в виде прямоугольника $K'K''L''L'$, которое заставило бы прямолинейный проводник $A'S'=s_2'$, перпендикулярный к плоскости этого прямоугольника, вращаться вокруг одной из его сторон $K'K''$, пересекаемой им в точке A'. Момент, обусловленный действием этой стороны $K'K''$, будет тогда, очевидно, равен нулю. Поэтому к моменту, созданному действием $L'L''$ и только что вычисленному нами, надо прибавить момент, обусловленный $K'L'$ в том же направлении, как и для $L'L''$, и вычесть из него момент, обусловленный $K''L''$, под влиянием которого $A'S'$ вращается в обратном направлении. Но согласно найденному выше, если обозначим через g и h кратчайшие расстояния $A'K'$, $A'K''$ от AS' до прямых $K'L'$ и $K''L''$, которые оба равны a, то получим для абсолютных значений этих моментов

$$\frac{1}{2}\,ii'\left(q'-g\operatorname{arc\,tg}\frac{q'}{g}\right),\quad \frac{1}{2}\,ii'\left(q''-h\operatorname{arc\,tg}\frac{q''}{h}\right),$$

полагая

$$q'=\frac{as_2'}{\sqrt{g^2+a^2+s'^2}}=\frac{as_2'}{r_2'},\quad q''=\frac{as_2'}{\sqrt{h^2+a^2+s'^2}}=\frac{as_2'}{r_2''};$$

поэтому абсолютное значение полного момента будет

$$\frac{1}{2}\,ii'\left(h\operatorname{arc\,tg}\frac{q''}{h}-g\operatorname{arc\,tg}\frac{q'}{g}-al\,\frac{\operatorname{tg}\frac{1}{2}\beta_2''}{\operatorname{tg}\frac{1}{2}\beta_2'}\right).$$

Такова величина момента вращения, обусловленного действием проводника, имеющего форму прямоугольника, на проводник, вращающийся вокруг одной из сторон последнего, для случая, когда направление проводника перпендикулярно к плоскости прямоугольника. Расстояние его от других сторон прямоугольника и размеры последнего могут быть при этом какими угодно. Определяя из опыта момент, когда подвижной проводник находится в равновесии под влиянием противоположных действий двух прямоугольников, лежащих в одной плоскости, но отличающихся по размерам и находящихся в различных расстояниях от подвижного проводника, имеем простой и в то же время очень точный способ получить подтверждение моей формулы. Это можно сделать при посредстве прибора, конструкцию которого очень легко понять, так что объяснять ее здесь нет необходимости.

Проинтегрируем теперь выражение $\int\int\frac{ds\,ds'}{r^3}$ по длине двух прямолинейных токов, расположенных не в одной плоскости и составляющих между собой некоторый угол ε, для случая, когда эти токи берут начало на общем перпендикуляре; другие случаи можно будет вывести непосредственно из этого последнего.

Пусть A (рис. 28) — точка пересечения общего перпендикуляра с направлением AM тока s, AM′ — прямая, параллельная току s', проведенная через эту точку, а mm' — проекция прямой, которая соединяет два элемента ds, ds', на плоскость MAM'.

Проведем через A прямую An, равную и параллельную mm', и образуем в n маленький параллелограмм nn', стороны которого параллельны прямым MAN, AM' и равны ds, ds'.

Если мы сделаем аналогичное построение для всех элементов, то образованные таким образом параллелограммы составят целый параллелограмм NAM'D, и поскольку их площадь измеряется величиной $ds\,ds'\sin\varepsilon$, мы получим искомый интеграл, умноженный на $\sin\varepsilon$, если найдем объем, имеющий основанием NAM'D и заканчивающийся на поверхности, для которой ординаты, восставленные из различных точек этого основания, равны $\frac{1}{r^3}$. Здесь r — расстояние между двумя элементами токов, которые соответствуют, согласно нашему построению, всем точкам поверхности NAMD.

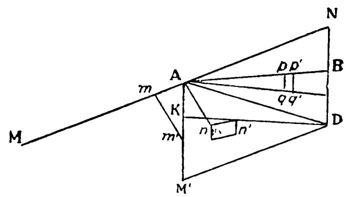


Рис. 28.

Далее, чтобы вычислить этот объем, мы можем разбить основание на треугольники с общей вершиной в точке A.

Пусть Ap — прямая, проведенная к какой-либо из точек площади треугольника AND, а $pqq'p'$ — площадь, заключенная между двумя бесконечно близкими прямыми Ap', Aq' и двумя дугами окружностей, описанных из A радиусами A$p = u$ и A$p' = u + du$. Мы получим, принимая во внимание, что угол NAM' $= \pi - \varepsilon$, и обозначая угол NAp через φ,

$$\sin\varepsilon \iint \frac{ds\,ds'}{r^3} = \iint \frac{u\,du\,d\varphi}{r^3}.$$

Если теперь обозначим через a общий перпендикуляр к направлениям обоих проводников, а через s и s' — расстояния, отсчитанные на них от A, то будем иметь

$$r=\sqrt{a^2+u^2}, \quad u=\sqrt{s^2+s'^2-2ss'\cos\varepsilon}.$$

Поэтому, интегрируя сначала от $u=0$ до $u=\mathrm{AB}=u_1$, получаем

$$\sin\varepsilon\int\int\frac{ds\,ds'}{r^3}=\int\int\frac{u\,du\,d\varphi}{(a^2+u^2)^{\frac{3}{2}}}=\int d\varphi\left(\frac{1}{a}-\frac{1}{\sqrt{a^2+u_1^2}}\right).$$

Остается проинтегрировать данное выражение по φ. Для этого найдем u_1 в функции φ из пропорции

$$\mathrm{AN}:\mathrm{AB}=\sin(\varphi+\varepsilon):\sin\varepsilon \quad \text{или} \quad s:u_1=\sin(\varphi+\varepsilon):\sin\varepsilon.$$

Подставляя вместо $a^2+u_1^2$ его значение, полученное из этой пропорции, мы должны будем определить

$$\int d\varphi\left[\frac{1}{a}-\frac{1}{\sqrt{a^2+\dfrac{s^2\sin^2\varepsilon}{\sin^2(\varphi+\varepsilon)}}}\right]=\frac{\varphi}{a}-\int\frac{d\varphi\sin(\varphi+\varepsilon)}{\sqrt{s^2\sin^2\varepsilon+a^2\sin^2(\varphi+\varepsilon)}}=$$

$$=\frac{\varphi}{a}+\frac{1}{a}\int\frac{d\cos(\varphi+\varepsilon)}{\sqrt{\dfrac{a^2+s^2\sin^2\varepsilon}{a^2}-\cos^2(\varphi+\varepsilon)}}\Bigg]=$$

$$=\frac{1}{a}\left[\varphi+\arcsin\frac{a\cos(\varphi+\varepsilon)}{\sqrt{a^2+s^2\sin^2\varepsilon}}+C\right].$$

Назовем через μ и μ' углы NAD и M'AD и возьмем предыдущий интеграл между пределами $\varphi=0$ и $\varphi=\mu$. Тогда он обратится в

$$\frac{1}{a}\left[\mu+\arcsin\frac{a\cos(\mu+\varepsilon)}{\sqrt{a^2+s^2\sin^2\varepsilon}}-\arcsin\frac{a\cos\varepsilon}{\sqrt{a^2+s^2\sin^2\varepsilon}}\right],$$

или, поскольку $\mu+\varepsilon=\pi-\mu'$, это выражение принимает вид

$$\frac{1}{a}\left[\mu-\arcsin\frac{a\cos\mu'}{\sqrt{a^2+s^2\sin^2\varepsilon}}-\arcsin\frac{a\cos\varepsilon}{\sqrt{a^2+s^2\sin^2\varepsilon}}\right].$$

Но

$$\cos\mu' = \frac{AK}{AD} = \frac{s' - s\cos\varepsilon}{\sqrt{(s' - s\cos\varepsilon)^2 + s^2\sin\varepsilon}} = \frac{s' - s\cos\varepsilon}{\sqrt{s^2 + s'^2 - 2ss'\cos\varepsilon}},$$

откуда для интеграла получается выражение

$$\frac{1}{a}\left[\mu - \arcsin\frac{a(s' - s\cos\varepsilon)}{\sqrt{a^2 + s^2\sin^2\varepsilon}\sqrt{s^2 + s'^2 - 2ss'\cos\varepsilon}} - \right.$$
$$\left. - \arcsin\frac{a\cos\varepsilon}{\sqrt{a^2 - s^2\sin^2\varepsilon}}\right],$$

или, переходя для обеих дуг от синусов к тангенсам,

$$\frac{1}{a}\left[\mu - \operatorname{arc\,tg}\frac{a(s' - s\cos\varepsilon)}{s\sin\varepsilon\sqrt{a^2 + s^2 + s'^2 - 2ss'\cos\varepsilon}} - \operatorname{arc\,tg}\frac{a\operatorname{ctg}\varepsilon}{\sqrt{a^2 + s^2}}\right],$$

а так как интеграл, относящийся к треугольнику M'AD, получается путем замены в этом выражении μ через μ' и s через s', то имеем для полного интеграла, замечая, что $\mu + \mu' = \pi - \varepsilon$,

$$\frac{1}{a}\left(\pi - \varepsilon - \operatorname{arc\,tg}\frac{a(s' - s\cos\varepsilon)}{s\sin\varepsilon\sqrt{a^2 + s^2 + s'^2 - 2ss'\cos\varepsilon}} - \operatorname{arc\,tg}\frac{a\operatorname{ctg}\varepsilon}{\sqrt{a^2 + s^2}} - \right.$$
$$\left. - \operatorname{arc\,tg}\frac{a(s - s'\cos\varepsilon)}{s'\sin\varepsilon\sqrt{a^2 + s^2 + s'^2 - 2ss'\cos\varepsilon}} - \operatorname{arc\,tg}\frac{a\operatorname{ctg}\varepsilon}{\sqrt{a^2 + s'^2}}\right).$$

Вычисляя тангенс суммы обеих дуг, величины которых содержат s и s', получим это выражение в виде

$$\frac{1}{a}\left(\pi - \varepsilon - \operatorname{arc\,tg}\frac{a\sin\varepsilon\sqrt{a^2 + s^2 + s'^2 - 2ss'\cos\varepsilon}}{ss'\sin^2\varepsilon + a^2\cos\varepsilon} - \right.$$
$$\left. - \operatorname{arc\,tg}\frac{a\operatorname{ctg}\varepsilon}{\sqrt{a^2 + s^2}} - \operatorname{arc\,tg}\frac{a\operatorname{ctg}\varepsilon}{\sqrt{a^2 + s'^2}}\right),$$

а так как

$$\frac{\pi}{2} - \operatorname{arc\,tg}\frac{a\sin\varepsilon\sqrt{a^2 + s^2 + s'^2 - 2ss'\cos\varepsilon}}{ss' - \sin^2\varepsilon + a^2\cos\varepsilon} =$$
$$= \operatorname{arc\,tg}\frac{ss'\sin^2\varepsilon + a^2\cos\varepsilon}{a\sin\varepsilon\sqrt{a^2 + s^2 + s'^2 - 2ss'\cos\varepsilon}},$$

то получаем, разделив на $\sin\varepsilon$,

$$\iint \frac{ds\,ds'}{r^3} = \frac{1}{a\sin\varepsilon}\left(\operatorname{arc\,tg}\frac{ss'\sin^2\varepsilon + a^2\cos\varepsilon}{a\sin\varepsilon\sqrt{a^2+s^2+s'^2-2ss'\cos\varepsilon}} - \right.$$

$$\left. - \operatorname{arc\,tg}\frac{a\operatorname{ctg}\varepsilon}{\sqrt{a^2+s^2}} - \operatorname{arc\,tg}\frac{a\operatorname{ctg}\varepsilon}{\sqrt{a^2+s'^2}} + \frac{\pi}{2} - \varepsilon\right),$$

выражение, которое в предположении $\varepsilon = \frac{\pi}{2}$ сводится к

$$\frac{1}{a}\left(\operatorname{arc\,tg}\frac{ss'}{a\sqrt{a^2+s^2+s'^2}}\right),$$

как мы нашли выше.

Можно заметить, что первый член величины, найденной нами в общем случае, есть неопределенный интеграл от

$$\frac{ds\,ds'}{(a^2+s^2+s'^2-2ss'\cos\varepsilon)^{\frac{3}{2}}},$$

как можно проверить дифференцированием, и что три остальных получаются, если положить последовательно в этом неопределенном интеграле

$$1)\ s'=0,\quad 2)\ s=0\quad 3)\ s'=0\ \text{ и }\ s=0.$$

Если бы токи не брали своего начала из общего перпендикуляра, то мы получили бы интеграл, состоящий также из четырех членов, которые все имели бы тот же вид, что и неопределенный интеграл [42].

Мы рассматривали до сих пор взаимодействие электрических токов, расположенных в одной плоскости, и прямолинейных токов, произвольно расположенных в пространстве. Нам остается еще рассмотреть взаимодействие криволинейных токов, лежащих не в одной плоскости. Предположим сначала, что эти токи образуют плоские и замкнутые кривые, все размеры которых бесконечно малы. Мы видели, что действие токов этого рода зависит от трех интегралов A, B и C, значения которых выражаются следующим образом:

$$A=\lambda\left(\frac{\cos\xi}{l^3}-\frac{3qx}{l^5}\right),$$

$$B=\lambda\left(\frac{\cos\eta}{l^3}-\frac{3qy}{l^5}\right),$$

$$C=\lambda\left(\frac{\cos\zeta}{l^3}-\frac{3qz}{l^5}\right).$$

Представим себе в пространстве некоторую линию MmO (рис. 29), которую окружают электрические токи, образующие вокруг нее весьма малые замкнутые контуры, в плоскостях, к ней перпендикулярных и бесконечно близких друг к другу. При этом площади, ограниченные контурами, все равны между собою и равны λ, их центры тяжести лежат на MmO, и каждые две смежные плоскости находятся на одинаковом расстоянии друг от друга, измеренном по кривой MmO. Если обозначим через g это расстояние, которое мы будем считать бесконечно малым, то число токов, соответствующих элементу ds линии MmO, будет $\frac{ds}{g}$. На это число нужно будет помножить значения A, B, C, найденные нами для одного замкнутого контура, чтобы получить значения, относящиеся к токам элемента ds. Если затем произвести интегрирование от одного конца L$'$ дуги s до другого ее конца L'', то мы получим значения A, B, C для совокупности всех окружающих ее замкнутых токов, — совокупности, которой я дал название *электродинамического соленоида*, от греческого слова σωληνοειδής. Это слово обозначает нечто, имеющее форму канала, т. е. поверхность такой формы, на которой лежат все замкнутые токи.

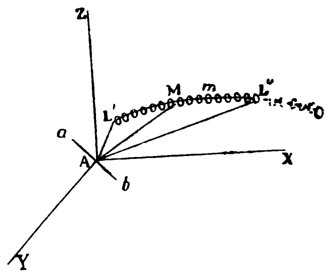


Рис. 29.

Имеем, таким образом, для всего соленоида

$$A = \frac{\lambda}{g} \int \left(\frac{\cos \xi \, ds}{l^3} - \frac{3qxds}{l^5} \right),$$

$$B = \frac{\lambda}{g} \int \left(\frac{\cos \eta \, ds}{l^3} - \frac{3qyds}{l^5} \right),$$

$$C = \frac{\lambda}{g} \int \left(\frac{\cos \zeta \, ds}{l^3} - \frac{3qzds}{l^5} \right).$$

Но поскольку направление линии g, перпендикулярное к плоскости λ, параллельно касательной к кривой s, имеем

$$\cos \xi = \frac{dx}{ds}, \quad \cos \eta = \frac{dy}{ds}, \quad \cos \zeta = \frac{dz}{ds}.$$

Далее, q очевидно равно сумме проекций трех координат x, y, z на ее направление; отсюда

$$q = \frac{xdx + ydy + zdz}{ds} = \frac{ldl}{ds},$$

ибо $l^2 = x^2 + y^2 + z^2$. Подставляя эти величины в найденное значение C, получаем последнее в виде

$$C = \frac{\lambda}{g} \int \left(\frac{dz}{l^3} - \frac{3zdl}{l^4} \right) = \frac{\lambda}{g} \left(\frac{z}{l^3} + C \right).$$

Обозначая через x', y', z', l' и x'', y'', z'', l'' значения x, y, z, l, относящиеся к двум концам L′, L″ соленоида, имеем

$$C = \frac{\lambda}{g} \left(\frac{z''}{l''^3} - \frac{z'}{l'^3} \right).$$

Поступая таким же образом с двумя другими интегралами A, B, найдем для них подобные же выражения, и величины, которые нам нужно было вычислить для всего соленоида, будут

$$A = \frac{\lambda}{g} \left(\frac{x''}{l''^3} - \frac{x'}{l'^3} \right),$$

$$B = \frac{\lambda}{g}\left(\frac{y''}{l''^3} - \frac{y'}{l'^3}\right),$$

$$C = \frac{\lambda}{g}\left(\frac{z''}{l''^3} - \frac{z'}{l'^3}\right).$$

Если бы директрисой соленоида была замкнутая кривая, то мы имели бы $x' = x''$, $y' = y''$, $z' = z''$, $l' = l''$, и, следовательно, $A = 0$, $B = 0$, $C = 0$. Если бы соленоид простирался бесконечно далеко в обе стороны, то все члены выражений A, B, C были бы равны нулю каждый в отдельности, и, очевидно, действие, оказываемое соленоидом, также было бы равно нулю. Если предположить, что соленоид простирается бесконечно далеко только в одну сторону, — я буду в этом случае называть его соленоидом, не ограниченным в одном направлении, — придется рассматривать лишь тот конец, для которого координаты x', y', z' имеют конечные значения, ибо, поскольку другой конец находится на бесконечно далеком расстоянии, первые члены выражений, найденных нами для A, B, C, по необходимости равны нулю. Таким образом,

$$A = -\frac{\lambda x'}{dl'^3}, \quad B = -\frac{\lambda y'}{gl'^3}, \quad C = -\frac{\lambda z'}{gl'^3},$$

или $A : B : C = x' : y' : z'$, откуда следует, что нормаль к направляющей плоскости, проходящей через начало и образующей с осями углы, косинусы которых суть

$$\frac{A}{D}, \frac{B}{D}, \frac{C}{D},$$

где всегда $D = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}$, проходит также через конец соленоида, координаты которого суть x' y', z'.

Мы видели в общем случае, что полная равнодействующая перпендикулярна к этой нормали. Таким образом, действие неограниченного соленоида на некоторый элемент направлено перпендикулярно прямой, соединяющей середину этого элемента с концом соленоида. Так как прямая перпендикулярна и к этому элементу, то отсюда следует, что она перпендикулярна к плоскости, проходящей через этот элемент и через конец соленоида.

Когда направление прямой определено, остается только найти ее величину. Но согласно вычислению, произведенному для общего случая, эта величина будет

$$-\frac{Dii'ds'\sin\varepsilon'}{2},$$

где ε' — угол, составляемый элементом ds' с нормалью к направляющей плоскости. Так как $D=\sqrt{A^2+B^2+C^2}$, то легко находим

$$D=-\frac{\lambda}{dl'^2},$$

а отсюда получается величина равнодействующей

$$\frac{\lambda ii'ds'\sin\varepsilon}{2gl'^2}.$$

Мы видим, таким образом, что действие, оказываемое неограниченным соленоидом, конец которого находится в L (рис. 29), на элемент ab, нормально в точке A к плоскости bAL′, пропорционально синусу угла bAL′ и обратно пропорционально квадрату расстояния AL′. Это действие остается неизменным, какова бы ни была форма и направление неограниченной кривой L′L″, на которой, как мы предполагаем, лежат все центры тяжести замкнутых токов, образующих неограниченный соленоид.

Если мы хотим перейти отсюда к случаю ограниченного соленоида, оба конца которого расположены в двух заданных точках L′ и L″, достаточно представить себе второй неограниченный соленоид, начинающийся в точке L″ первого и совпадающий с ним на протяжении от этой точки до бесконечности, причем токи в нем имеют одинаковую величину, но противоположное направление. Тогда действие этого последнего будет противоположно по знаку действию первого неограниченного соленоида, начинающегося в точке L′, и уничтожит это действие во всей той части, которая идет от точки L″ в бесконечность по направлению L″O и по которой они накладываются друг на друга. Таким образом, действие соленоида L′L″ будет такое же, какое оказывала бы совокупность этих двух неограниченных соленоидов, и будет состоять из силы, которую мы только что вычислили, и из другой силы, действующей в обратном направлении, проходящей также через точку A, перпендикулярной к плоскости bAL' и имеющей величину

$$\frac{\lambda ii'ds' \sin \varepsilon''}{2gl''^2},$$

где ε'' — угол bAL', а l'' — расстояние AL″. Полное действие соленоида L′L″ есть равнодействующая этих двух сил и проходит, как и они, через точку A.

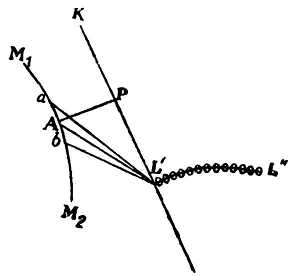


Рис. 30.

Поскольку действие ограниченного соленоида выводится непосредственно из действия неограниченного соленоида, мы будем в том, что нам еще осталось изложить по этому вопросу, исходить из рассмотрения неограниченного соленоида. С ним проще производить вычисления, и из тех результатов, которые для него получаются, уже легко вывести заключения о том, что имеет место для ограниченного соленоида [43].

Пусть L′ (рис. 30) — один конец неограниченного соленоида; A — середина некоторого элемента ba электрического тока M_1AM_2, а L′K — какая-либо неподвижная прямая, проходящая через точку L′. Обозначим через θ переменный угол KL′A, через μ — угол между плоскостями bAL', AL′K и через l' — расстояние L′A. Действие элемента ba на соленоид равно и противоположно действию этого последнего на элемент, и потому, чтобы его определить, нужно рассмотреть некоторую точку, лежащую в A, неизменно связанную с соленоидом и подверженную действию силы, выражение которой, не обращая внимания на знак, есть

$$\frac{\lambda\, ii'ds' \sin b\, \mathrm{AL}'}{2gl'^2} \quad \text{или} \quad \frac{\lambda ii'd\nu}{gl'^3},$$

где $d\nu$ — площадь $a\mathrm{L}'b$, равная

$$l'\frac{ds' \sin b\mathrm{AL}'}{2}.$$

Поскольку эта сила нормальна в A к плоскости AL$'b$, для определения ее момента относительно оси L$'$K нужно найти ее составляющую, перпендикулярную к AL$'$K, и помножить ее на величину перпендикуляра AP, опущенного из точки A на прямую L$'$K. Но так как μ — угол между плоскостями AL$'b$ и AL$'$K, то эта составляющая получится умножением предыдущего выражения на $\cos\mu$. A $d\nu\cos\mu$ есть проекция площади $d\nu$ на плоскость AL$'$K, откуда следует, что если мы обозначим эту проекцию через du, то величина искомой составляющей будет

$$\frac{\lambda ii'du}{gl'^3}.$$

Далее, проекция угла aL$'b$ на AL$'$K может быть рассматриваема как бесконечно малая разность углов KL$'a$ и KL$'b$, т. е. это будет Lθ, и получим

$$du = \frac{l'^2 d\theta}{2}.$$

Поэтому предыдущее выражение обращается в

$$\frac{\lambda ii'd\theta}{2gl'}.$$

Так как $\mathrm{AP} = l' \sin\theta$, то для искомого момента находим

$$\frac{\lambda ii'}{2g}\sin\theta d\theta.$$

Если проинтегрировать это выражение по всему протяжению кривой $\mathrm{M_1AM_2}$, то получим момент этого тока, под влиянием которого соленоид должен вращаться вокруг L'K. Однако если ток замкнут, интеграл, равный вообще

$$C - \frac{\lambda i i' \cos\theta}{2g},$$

обращается в нуль между пределами, и момент относительно любой прямой L'K, проходящей через точку L', будет равен нулю.

Отсюда следует, что при действии замкнутого контура или какой-либо системы замкнутых контуров на неограниченный соленоид все силы, приложенные к различным элементам системы, имеют те же моменты относительно какой-либо оси, как если бы они были приложены к самой оконечности соленоида. Их равнодействующая проходит через эту оконечность, и они ни в коем случае не могут сообщить соленоиду вращения вокруг прямой, проведенной через его конец. Это согласуется и с результатами опытов. Если бы ток, изображенный кривой M_1AM_2, не был замкнут, то его момент, обусловливающий вращение соленоида вокруг L'K, был бы

$$\frac{\lambda i i'}{2g}(\cos\theta_1' - \cos\theta_2'),$$

где через θ_1' и θ_2' обозначены крайние значения θ, относящиеся к точке L' и к концам M_1 M_2 кривой M_1AM_2.

Рассмотрим теперь ограниченный соленоид L'L'' (рис. 31), который может только вращаться вокруг оси, проходящей через два его конца. Мы сможем заменить его, как было указано выше, двумя неограниченными соленоидами. Сумма действий тока M_1AM_2 на каждый из них будет представлять его действие на L'L''. Мы только что нашли момент первого и, обозначая через θ_1'' и θ_2'' углы, соответствующие углам θ_1' и θ_2', но относящиеся к концу L'', получим для момента второго соленоида

$$-\frac{\lambda i i'}{2g}(\cos\theta_1'' - \cos\theta_2'').$$

Полный момент, обусловленный действием M_1AM_2 и вызывающий вращение соленоида вокруг его оси $L'L''$, будет поэтому

$$\frac{\lambda ii'}{2g}(\cos\theta_1' - \cos\theta_1'' - \cos\theta_2' + \cos\theta_2'').$$

Этот момент не зависит от формы проводника M_1AM_2, от его величины и от его расстояния до соленоида $L'L''$, и остается одним и тем же, когда они изменяются так, что

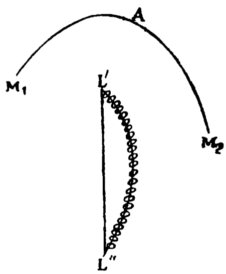


Рис. 31.

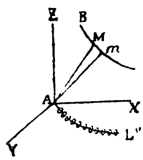


Рис. 32.

четыре угла θ_1', θ_1'', θ_2', θ_2'' сохраняют свои значения. Момент обращается в нуль не только тогда, когда ток M_1M_2 образует замкнутый контур, но и тогда, когда предполагается, что он простирается на бесконечное расстояние в обе стороны. Действительно, в этом случае его оба конца находятся на бесконечно большом расстоянии от концов соленоида, и угол θ_1' становится равным θ_1'', а угол θ_2' — углу θ_2''.

Поскольку все моменты вращения вокруг прямых, проведенных через конец неограниченного соленоида, равны нулю, этот конец является точкой приложения равнодействующей всех сил, с которыми замкнутый электрический контур, или система токов, образующих замкнутый контур, действуют на соленоид. Можно, таким образом, предположить, что все силы перенесены в эту точку, и взять ее за начало A (рис. 32) координат. Если обозначим через BM некоторую часть одного из токов, действующих на соленоид, то сила, зависящая от какого-либо элемента Mm этой части BM, будет, согласно предыдущему, нормальна к плоскости AMm и будет выражаться через

$$\frac{\lambda ii'd\nu}{gr^3},$$

где $d\nu$ — площадь AMm, а r — переменное расстояние AM.

Чтобы получить составляющую этой силы по оси AX, нужно умножить это выражение на косинус угла, составляемого направлением силы с осью AX, а этот угол — тот же, что и угол между плоскостями AMm, ZAY. Но $d\nu$, умноженное на косинус этого угла, представляет проекцию AMm на ZAY, которая равна

$$\frac{ydz - zdy}{2}.$$

Поэтому, если мы хотим определить составляющую по AX действия какого-либо числа токов, образующих замкнутые контуры, то нам нужно взять на всем протяжении этих токов интеграл

$$\frac{\lambda ii'}{2g}\int\frac{ydz - zdy}{r^3}, \text{ равный } \frac{\lambda ii'\mathrm{A}}{2g}.$$

Здесь A означает ту же величину, что и прежде, но n заменено в ней его численным значением 3. Точно так же найдем, что составляющая по AY выражается через

$$\frac{\lambda ii'\mathrm{B}}{2g},$$

а по AZ — через

$$\frac{\lambda ii'\mathrm{C}}{2g}.$$

Равнодействующая этих сил, которая представляет общее действие, оказываемое каким-либо числом замкнутых контуров на неограниченный соленоид, будет поэтому равна

$$\frac{\lambda ii'\mathrm{D}}{2g},$$

где D, как всегда, обозначает $\sqrt{A^2+B^2+C^2}$, а косинусы углов, образуемых ею с осями x, y, z, будут

$$\frac{A}{B}, \frac{B}{D}, \frac{C}{D},$$

т. е. они в точности будут равны косинусам углов, составляемых с теми же осями нормалью к направляющей плоскости, которую мы получили бы, рассматривая действие тех же контуров на элемент, расположенный в A. Но этот элемент может быть перенесен под действием системы в направлении, лежащем в направляющей плоскости. Отсюда вытекает замечательное следствие. Если какая-либо система замкнутых контуров действует попеременно на соленоид неограниченной длины и на некоторый элемент, находящийся на конце этого соленоида, то направления, в которых переносятся соответственно элемент и конец соленоида, взаимно перпендикулярны. Если предположить, что элемент расположен в самой направляющей плоскости, то действие, оказываемое на него системой, достигает своего максимума, величина которого будет

$$\frac{ii'\mathrm{D}ds'}{2}.$$

Действие той же системы на соленоид было выше найдено равным

$$\frac{\lambda ii'\mathrm{D}}{2g}.$$

Следовательно, эти две силы для одного и того же элемента и одного и того же соленоида всегда находятся между собою в постоянном отношении

$$ds' : \frac{\lambda}{g},$$

иными словами — в отношении, в каком находятся длина элемента и частное от деления площади замкнутой кривой, пробегаемой одним из токов соленоида, на расстояние между двумя смежными токами. Это отношение не зависит от формы и величины токов системы, действующей на элемент и на соленоид [44].

Когда система замкнутых токов, которую мы только что рассмотрели, представляет собою неограниченный соленоид, нормаль к направляющей плоскости, проходящая через точку A, совпадает, как мы видели, с прямой, соединяющей эту точку A с оконечностью соленоида. Отсюда следует, что взаимодействие двух неограниченных соленоидов происходит вдоль прямой, соединяющей конец одного с концом другого. Чтобы найти величину этого действия, обозначим через λ' площадь контуров, образуемых токами этого нового соленоида, через y' — расстояние между плоскостями двух непосредственно следующих друг за другом контуров, через l — расстояния концов двух неограниченных соленоидов. Тогда получим $D = -\frac{\lambda'}{g'l^2}$, откуда их взаимодействие будет

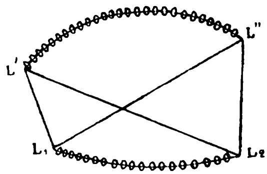


Рис. 33.

$$\frac{\lambda ii'D}{2g} = -\frac{\lambda\lambda' ii'}{2gg'l^2},$$

т. е. оно обратно пропорционально квадрату расстояния l. Когда один из соленоидов имеет ограниченную длину, его можно заменить двумя неограниченными соленоидами, и сила будет представлять сумму двух сил: одной притягивающей, другой — отталкивающей, направленных вдоль прямых, соединяющих оба конца первого с концом второго. Наконец, в случае, когда два ограниченных соленоида $L'L''$, L_1L_2 (рис. 33) действуют друг на друга, имеются четыре силы, направленные соответственно вдоль прямых $L'L_1$, $L'L_2$, $L''L_1$, $L''L_2$, соединяющих концы соленоидов попарно. И если, например, имеем отталкивание вдоль $L'L_1$, то будем иметь притяжение вдоль $L'L_2$ и $L''L_1$ и отталкивание вдоль $L''L_2$.

Чтобы оправдать мой способ объяснения явлений, которые мы обнаруживаем в магнитах, именно — представление последних в виде совокупностей электрических токов, образующих вокруг их частиц весьма малые контуры, нужно было доказать, исходя из формулы, которой я выразил взаимодействие двух элементов электрического тока, что при некоторых совокупностях этих малых токов возникают силы, зависящие лишь от положения двух определенных точек этой системы. Эти силы по отношению к данным двум точкам обладают всеми свойствами сил, приписываемых так называемым молекулам южной и северной жидкостей при объяснении явлений, связанных как с взаимодействием магнитов между собою, так и с их действием на проводник. Мы знаем, однако, что многие физики предпочитают объяснения, в которых предполагается существование таких молекул, объяснениям, которые я вывожу из свойств электрических токов. Они принимают, что каждой молекуле южной жидкости отвечает в частице намагниченного тела молекула северной жидкости той же силы. Они принимают также, что если назвать магнитным элементом совокупность этих двух молекул, которые можно рассматривать как два полюса элемента, то для объяснения явлений, связанных с двумя видами действий, о которых здесь идет речь, необходимо: 1) чтобы взаимодействие двух магнитных элементов состояло из четырех сил — двух притягивающих и двух отталкивающих, направленных по прямым, соединяющим две молекулы одного из этих элементов с двумя молекулами другого, и обратно пропорциональных квадратам длин этих прямых; 2) чтобы, когда один из этих элементов действует на бесконечно малую часть проводника, получались две силы, которые были бы перпендикулярны к плоскостям, проходящим через две молекулы элемента и через направление малой части проводника. По величине они должны быть пропорциональны синусам углов, образуемых этим направлением с прямыми, которые измеряют расстояния, отделяющие их от двух молекул, и обратно пропорциональны квадратам этих расстояний. Если не принимать моего способа представления действия магнитов и приписывать эти два рода сил молекулам двух жидкостей — одной северной, другой южной, то их нельзя свести к одному общему началу. Как только принимается моя точка зрения на строение магнитов, легко убедиться из предыдущих подсчетов, что оба эти рода действий и величины сил, ими обусловленных, вытекают непосредственно из моей формулы. Чтобы найти эти значения, достаточно заменить совокупность двух молекул, одну южной, другую северной жидкости, соленоидом, концы которого, — две определенные точки, связанные с рассматриваемыми силами, — расположены в точности в тех точках, в которых помещались бы молекулы обеих жидкостей [45].

Таким образом, две системы весьма малых соленоидов будут, согласно моей формуле, взаимодействовать как два магнита, состоящие из стольких магнитных элементов, сколько предположено соленоидов в этих двух системах. Одна из таких систем будет действовать и на элемент электрического тока подобно магниту. Поэтому все вычисления, все объяснения, основанные как на представлении о притягивающих и отталкивающих силах этих молекул, обратно пропорциональных квадрату расстояния, равно как и на представлении о силах вращения между дной из этих молекул и элементом электрического тока (я формулирую закон так, как его принимают физики, не допускающие моей теории), — будут совершенно одинаковы, объяснять ли в обоих случаях явления, обнаруживаемые магнитами, посредством электрических токов, как это делаю я, или отдавать предпочтение гипотезе двух жидкостей. Итак, не в расчетах или объяснениях нужно искать возражений против моей системы или доказательств в ее пользу. Доказательством, на котором я основываюсь, является прежде всего то, что эта теория сводит к единому началу три рода действий, зависящих, согласно целому ряду наблюдений, от одной общей причины и не могущих быть сведенными к ней никаким иным образом. В Швеции, в Германии и Англии пробовали объяснить их одним только фактом взаимодействия двух магнитов, как его определил Кулон. Однако опыты над непрерывным вращательным движением явным образом противоречат этому представлению. Во Франции те, кто не принял моей точки зрения, вынуждены рассматривать три рода действий, которые я свел к общему закону, как три рода явлений, совершенно не зависимых друг от друга. Нужно, однако, заметить, что из закона, предложенного г. Био для выражения взаимодействия между элементом проводника с током и тем, что он называет магнитной молекулой, можно было бы вывести закон, установленный Кулоном в отношении действия двух магнитов, в предположении, что один из них состоит из малых электрических токов, какие предполагаю я. Но почему же в таком случае не допустить, что и второй построен так же, и не принять, следовательно, полностью мою точку зрения?

Далее, поскольку г. Био назвал элементарной силой[1] силу, которую он определил по величине и направлению для случая, когда элемент проводника действует на каждую из частиц магнита, ясно, что он не может рассматривать как действительно элементарную ни силу, проявляющуюся в действии двух элементов различной природы, ни силу, которая действует на две точки не вдоль прямой, их соединяющей. Однако в сочинении, которое этот талантливый физик представил Академии 30 октября и 18 декабря 1820 г.,[2] он рассматривает как элементарную

---

[1] „Précis élémentaire de physique". Изд. 2-е, т. II, стр. 122.

[2] Указанное сочинение не было опубликовано отдельно, поэтому я не знаю, какая там приводится формула для выражения этой силы, и сужу лишь по второму изданию „Précis élémentaire de physique", т. II, стр. 122 и 123: „Если мысленно разделить всю длину соединительного провода Z′C′ (рис. 34) на бесконечное число ломтей весьма малой толщины, можно убедиться, что каждый такой ломоть должен действовать на стрелку с различной силой, в зависимости от расстояния от него [до стрелки] и направления. Но эти элементарные силы являются как раз тем простым результатом, который нужно определить. Полная сила оказываемая всем проводником, есть лишь сумма их отдельных действий. Чтобы перейти от этой равнодействующей к простой силе, достаточно

силу ту силу, с которой действует элемент проводника на молекулу южной или северной жидкости, т. е. на полюс маг-

---

произвести некоторые вычисления. Это и сделал г. Лаплас. Он вывел из наших опытов, что индивидуальный закон элементарных сил, с которыми действует каждый слой соединительного проводника, — это обратная пропорциональность квадрату расстояния, т. е. тот же закон, какому подчинены обычные магнитные силы. Этот анализ показал, что для дополнения представления о силе остается еще определить, будет ли действие каждого слоя проводника, при одном и том же расстоянии, одно и то же для всех направлений, или оно будет в одних направлениях сильнее, чем в других. Чтобы разрешить этот вопрос, я натянул в вертикальной плоскости длинную медную проволоку ZMC (рис. 34), согнув ее в M так, чтобы две ветви ZM и MC образовали равные углы с горизонтальной прямой MH. Перед этой проволокой я натянул другую Z'M'C' из того же материала и того же диаметра, взятую из той же серии. Но ее я расположил вертикально, причем она отделялась в MM' от первой проволоки лишь очень тонкой бумажной полосой. Загем я подвесил перед этой системой нашу намагниченную стрелку AB на уровне точек M, M' и наблюдал ее колебания для разных расстояний, пропуская последовательно гальванический ток через изогнутую и через прямую проволоки.

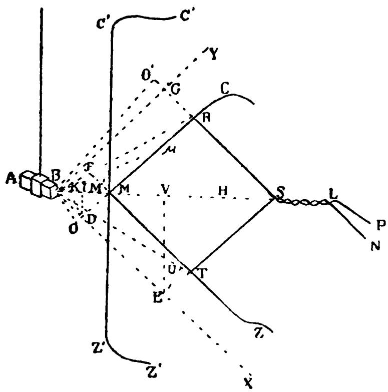


Рис. 34.

Я нашел таким образом, что как для одной, так и для другой действие было обратно пропорционально расстояниям от точек M, M'. Абсолютная интенсивность действия была, однако, слабее для наклонной части изогнутой проволоки, чем для прямой проволоки, пропорционально отношению угла ZMH к единице. Мне кажется, что этот результат, если подвергнуть его анализу помощью вычисления, указывает на то, что действие каждого элемента μ наклонного проводника на каждую молекулу m южного или северного магнетизма обратно пропорционально квадрату его расстояния μm от этой молекулы и пропорционально синусу угла $m\mu M$, образованному прямой μm с направлением проволоки“.

Весьма примечательно, что этот закон, являющийся необходимым следствием той формулы, помощью которой я выразил взаимодействие нитного элемента, и как сложное явление — взаимное действие двух элементов гальванических проводников [46]. Однако легко себе представить, что если действительно существуют магнитные молекулы, их взаимодействие можно рассматривать как элементарную силу. Такова была точка зрения шведских и немецких физиков, которая не могла выдержать проверки опытом, ибо, поскольку эта сила пропорциональна функции расстояния, она никогда не может вызвать движения с постоянным ускорением в одном направлении. Действительно, эти физики предполагали, что магнитные молекулы следует рассматривать как закрепленные в определенных точках проводников, которые они считали как бы совокупностью маленьких магнитов, и тогда два другие рода действия представлялись сложными явлениями, поскольку таковым был магнитный элемент. Можно также предполагать, что именно взаимодействие двух элементов проводников представляется элементарной силой. Тогда взаимодействие двух магнитных элементов, а также действие одного из этих элементов на бесконечно малую часть вольтаического проводника будут

между двумя элементами проводника, если заменить, согласно моей теории, каждый магнитный элемент весьма малым электромагнитным соленоидом, был найден первоначально вследствие ошибки в вычислении. Действительно, чтобы он был верен, необходимо, чтобы *абсолютная интенсивность* действия была пропорциональна не углу ZMH, а тангенсу половины этого угла, как указал г. Савари в мемуаре, представленном Академии 3 февраля 1823 г., опубликованном около того же времени и напечатанном в „Journal de physique", т. XCVI, стр. 1—25 и сл. Однако, повидимому, г. Био признал эту ошибку, ибо в 3-м издании той же работы, которое только что вышло, он действительно приводит новые опыты, где интенсивность полной силы, согласно выводу г. Савари, пропорциональна тангенсу половины угла ZMH. При этом, однако, он не ссылается на статью, в которой его ошибка была исправлена. Он выводит отсюда, с бóльшим основанием, чем из первых своих опытов, что сила, которую он называет элементарной, для равных расстояний пропорциональна синусу угла между направлением элемента проводника и направлением прямой, соединяющей его середину с магнитной молекулой („Précis élémentaire de physique expérimentale". Изд. 3-е, т. II, стр. 740—745).

действиями сложными, ибо магнитный элемент приходится рассматривать как сложный. Но как представить себе, при любой точке зрения на происхождение рассматриваемых явлений, что элементарная сила — это сила, которая действует между магнитным элементом и бесконечно малой частью проводника, т. е. между телами хотя и весьма малого объема, но из которых одно необходимо является сложным?

То обстоятельство, что сила действия элемента проводника на полюс магнитного элемента направлена перпендикулярно прямой, соединяющей две точки, между которыми она возникает, тогда как взаимодействие между двумя элементами проводника направлено вдоль соединяющей их прямой, является также не менее веским доказательством того, что первая из этих сил представляет собою явление сложное. Всякий раз, когда две материальные точки действуют друг на друга, будь то вследствие заранее присущей им силы или же вследствие силы, возникшей под действием какой-либо причины, например химических явлений, или благодаря разложению или восстановлению нейтральной жидкости, возникающей от соединения двух электричеств, — эту силу нельзя мыслить иначе, как в виде стремления двух точек приблизиться друг к другу или удалиться друг от друга по прямой, их соединяющей, со скоростями, обратно пропорциональными их массам. Это происходит несмотря на то, что данная сила передается от одной материальной частицы к другой лишь через посредствующую жидкость, подобно тому, как масса ядра движется вперед с известной скоростью под действием пороховых газов лишь постольку, поскольку масса орудия отдается назад по той же прямой, проходящей через центры инерции ядра и орудия, со скоростью, которая относится к скорости ядра, как масса последнего относится к массе орудия.

Таково необходимое следствие инерции материи, которое Ньютон отметил как один из основных принципов физической теории вселенной в последней из трех аксиом, установленных им в начале „Philosophiae naturalis principia mathematica“ — что действие всегда равно и противоположно противодействию. В самом деле, две силы, сообщающие двум массам скорости, обратно пропорциональные этим массам, являются силами, которые заставили бы их произвести равные давления на препятствия, непреодолимо противодействующие тому, чтобы они пришли в движение, т. е. равными силами. Для того чтобы этот принцип можно было применить к случаю взаимодействия двух материальных частиц, через которые проходит электрический ток, предполагая, что действие передается через посредство чрезвычайно упругой жидкости, которая наполняет пространство и колебания которой представляют собою свет,[1] необходимо допустить, что жидкость не обладает заметной инерцией, как воздух по отношению к ядру и к орудию. В этом, впрочем, и не приходится сомневаться, ибо эфир не оказывает никакого сопротивления движению планет. Явление вращения электрической мельнички привело некоторых физиков к допущению заметной инерции в двух электрических жидкостях, а следовательно, и в той жидкости, которая происходит от их соединения. Однако это допущение находится в противоречии со всем, что мы вообще знаем о данных жидкостях, и с тем фактом, что планетные движения не испытывают никакого сопротивления со стороны эфира. Да нет и никакой нужды в этом допущении с тех пор, как я показал, что вращение электрической мельнички обусловливается электродинамическим отталкиванием между острием мельнички и частичками движущегося воздуха, вызванным электрическим током, который исходит из этого острия.[2]

---

[1] Эта жидкость не может быть иной, чем та, которая возникает в результате соединения двух электричеств. Чтобы не повторять постоянно одну и ту же фразу для ее обозначения, я думаю, что нужно употребить здесь, как это делает Эйлер [[17]], название эфира, понимая всегда под этим словом жидкость, определяемую таким образом.

[2] См. *заметку*, которую я доложил Академии 24 июня 1822 г. и которая помещена в „Annales de chimie“, т. XX, стр. 419—421, и в моем „Recueil d'observations électro-dynamiques“, стр. 316—318.

Когда г. Эрстед открыл действие, оказываемое проводником на магнит, это в самом деле наводило на мысль о возможности взаимодействия между двумя проводниками. Такое предположение отнюдь не является, впрочем, необходимым следствием из открытия знаменитого физика, ибо брусок из мягкого железа также действует на магнитную стрелку, и, однако, между двумя брусками из мягкого железа нет никакого взаимодействия. Пока был известен только факт, что, намагниченная стрелка отклоняется проводником с током, разве нельзя было предположить, что электрический ток. сообщал проводнику только свойство быть подверженным такому же влиянию стрелки, как и мягкое железо, и этого было бы достаточно, чтобы и он на нее действовал? Но это еще не значило, что между двумя проводниками с током должно обнаруживаться взаимодействие, если они находятся вне всякого влияния какого-либо намагниченного тела. Только опыт мог разрешить этот вопрос. Я произвел его в сентябре 1820 г., и взаимодействие вольтаических проводников было доказано.

Что касается действия земного шара на проводник с током, то аналогии между землею и магнитом было бы достаточно, чтобы считать это действие весьма вероятным, и мне не ясно, почему многие из наиболее известных европейских физиков полагали, что его не существует. Так полагал г. Эрман не только до произведенного мною опыта, который доказывал наличие этого влияния,[1] но и после того, как этот опыт был сообщен Академии наук на заседании 30 октября 1820 г. и был повторен много раз в течение ноября того же года в присутствии многих членов Академии и большого числа других физиков. Они разрешили мне в то время сослаться на них как на свидетелей, которые наблюдали движения,

[1] В весьма замечательной работе, напечатанной в 1820 г., этот знаменитый физик усматривает преимущество проводника с током перед магнитной стрелкой, которой пользуются при весьма тонких опытах, в том, что проводник не будет испытывать воздействия земли.

вызванные воздействием земли в подвижных частях приборов, описанных и изображенных в „Annales de chimie et de physique“, т. XV, стр. 191—196 (табл. II, рис. 5; табл. III, рис. 71), и в моем „Recueil d'observations électro-dynamiques“, стр. 43—48. И почти год спустя английские физики всё еще продолжали высказывать сомнения в результатах столь исчерпывающих опытов, произведенных перед столь многочисленными свидетелями.[1] Нельзя ни отрицать значения этих опытов, ни отказаться признать, что открытие воздействия земли на проводник с током принадлежит мне так же исключительно, как и открытие взаимодействия двух проводников. Но недостаточно было открыть эти два рода действий и подтвердить их опытом. Необходимо было кроме того:

1) найти формулу, которая выражала бы взаимодействие двух элементов электрических токов;

2) показать, что согласно закону, выраженному этой формулой, относительно притяжения двух токов, идущих в одном направлении, и отталкивания токов, противоположных по направлению, независимо от того, параллельны ли они или образуют любой угол,[2] воздействие земли на проводники с током при всех обстоятельствах будет то же, что и воздействие на те же проводники пучка электрических токов, направленных

---

[1] См. мемуар г. Фарадея, напечатанный 11 сентября 1821 г. Перевод этого мемуара имеется в „Annales de chimie et de physique“, т. XVIII, стр. 337—370, и в моем „Recueil d'observations électro-dynamiques“, стр. 125—158. Вследствие опечатки на нем стоит дата 4 сентября 1821 г. вместо 11 сентября 1821 г. [[48]].

[2] Опыты, доказывающие взаимодействие двух прямолинейных проводников в обоих этих случаях, были сообщены Академии в заседании 9 октября 1820 г. Приборы, которыми я пользовался, были описаны и изображены в томе XV „Annales de chimie et de physique“, именно: 1) относящийся к взаимодействию двух параллельных токов, стр. 72 (табл. I, рис. 1), а подробнее в моем „Recueil d'observations électro-dynamiques“, стр. 16—18; 2) относящийся к взаимодействию двух токов, образующих любой угол, — стр. 171 этого же тома XV „Annales de chimie et de physique“ (табл. II, рис. 2) и в моем „Recueil“, стр. 23. Чертежи имеют в моем „Recueil“ ту же нумерацию, что и в Annales [[49]].

с востока на запад и расположенных на юге Европы, где были произведены наблюдения, которыми установлено наличие этого воздействия;

3) вычислить, исходя из моей формулы и из моего объяснения магнитных явлений посредством электрических токов, образующих очень маленькие замкнутые контуры вокруг частичек намагниченных тел, то действие, которое должны оказывать друг на друга две частицы магнита, рассматриваемые как два маленьких соленоида, эквивалентных каждый двум магнитным молекулам, одной — южной, другой — северной жидкости, а также то действие, которое одна из этих частиц должна оказывать на элемент проводника с током. Затем надо удостовериться, что из этих вычислений вытекают, для взаимодействий двух токов, в первом случае в точности закон, установленный Кулоном для взаимодействия двух магнитов, во втором — закон, предложенный г. Био относительно сил возникающих между магнитом и проводником с током[50]. Таким образом, я привожу к единому принципу как эти два рода действий, так и то, которое я открыл между двумя проводниками. Было бы, без сомнения, легко предположить на основании всей совокупности фактов, что все три рода действий зависят от единой причины. Но лишь вычисление может оправдать такое предположение, и я это сделал, не предрешая ничего относительно природы силы, с которой два элемента проводников воздействуют друг на друга. Я искал на основании данных опыта аналитическое выражение силы. Взяв его за исходную точку, я доказал, что из него можно вывести путем чисто математических вычислений значения двух других сил такими, какими они даются в опыте, одной — между элементом проводника и тем, что называется магнитной молекулой, другой — между двумя такими молекулами. Для этого и в том и в другом случае нужно заменить каждую магнитную молекулу одним из двух концов электромагнитного соленоида, как это и необходимо делать, согласно моим взглядам, на строение магнитов. Тем самым все, что

можно вывести из значений этих последних сил, очевидно заключается в моей точке зрения на действия, которые они производят, и становится необходимым следствием моей формулы. Этого одного было бы достаточно, чтобы доказать, что взаимодействие двух элементов проводника действительно является наиболее простым случаем и что из него следует исходить для объяснения всех остальных. Мне кажется уместным привести следующие соображения, которые могут более точно подтвердить общий результат моей работы. Они легко выводятся из самых простых понятий о сложении сил и относятся к взаимодействию двух систем, состоящих из точек, бесконечно близких друг другу. Здесь могут представиться различные случаи, в зависимости от того, состоят ли обе системы из точек одного и того же рода, т. е. таких, которые все притягивают или отталкивают соответственные точки второй системы. Или в одной из систем, или же в обеих имеются точки противоположных свойств, так что одни отталкивают те точки, которые другие притягивают, и, наоборот, притягивают те, которые другие отталкивают.

Предположим сначала, что каждая из этих систем состоит из точек одного и того же рода, т. е. что все точки одной системы оказывают притягивающее или отталкивающее действие на точки другой с силой, пропорциональной их массам. Пусть M, M′, M″ и т. д. (рис. 35) — молекулы, составляющие первую систему, а m — какая-либо молекула второй системы. Далее, складывая последовательно все действия ma, mb, md и т. п., оказываемые M, M′, M″, получим равнодействующие mc, me и т. д., из которых последняя будет действием системы MM′M″ на точку m и будет проходить приблизительно в центре инерции этой системы. Рассуждая таким же образом относительно других молекул второй системы, найдем, что соответственные равнодействующие будут также проходить весьма близко от центра инерции первой системы и будут иметь общую равнодействующую, проходящую также почти в центре инерции второй. Назовем *центрами действия* две точки, чрезвычайно близкие к соответствующим центрам инерции двух систем, через которые проходит эта общая равнодействующая. Очевидно, что вследствие малых расстояний, в которых центры действия находятся от центров инерции, эта равнодействующая будет стремиться сообщить каждой из систем лишь поступательное движение.

Представим себе, во-вторых, что молекулы второй системы попрежнему одного и того же рода, а молекулы первой системы являются одни притягивающими, а другие отталкивающими по отношению к молекулам второй. Первые дадут тогда равнодействующую *of* (рис. 36), проходящую через их центр

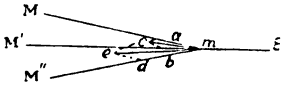


Рис. 35.

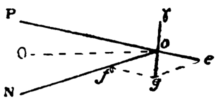


Рис. 36.

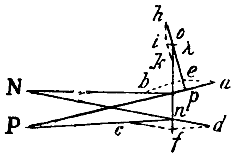


Рис. 37.

действия N и через центр действия *o* второй системы. Точно так же отталкивающие частицы дадут равнодействующую *oe*, проходящую через их центр действия P и через ту же точку *o*. Общей равнодействующей будет поэтому диагональ *og*, и поскольку эта равнодействующая проходит почти через центр инерции второй системы, она опять-таки будет стремиться сообщить системе лишь поступательное движение. Эта равнодействующая лежит притом в плоскости, проходящей через три центра действия *o*, N, P. Кроме того, если число притягивающих молекул равно числу отталкивающих и они действуют с одинаковой силой, то направление этой равнодействующей будет перпендикулярно прямой O*o*, делящей угол P*o*N пополам.

Рассмотрим, наконец, случай, когда обе системы состоят из молекул различного рода. Пусть N и P (рис. 37) — соответственные центры действия притягивающих и отталкивающих молекул первой системы, *o* и *p* — соответственные центры второй, так что между N и *p*, как и между *n* и P, имеет место притяжение, а между N и *n*, как и между P и *p*, — отталкивание. Оба действия N и P на *p*, соединенные в одно, дадут равнодействующую, направленную по диагонали *pe*. Точно так же действие N и P на *n* дадут равнодействующую *nf*. Чтобы получить общую равнодействующую, нужно продолжить эти две прямые до пересечения в *o*, и если отложим $oh = pe$ и $ok = nf$, то диагональ *oi* будет искомой равнодействующей, которая определит действие, оказываемое системой PN на систему *pn*. Но поскольку *o* не является частью системы *pn*, нужно будет представить себе, что она неизменно связана с этой системой, не будучи связана с первой системой PN. Сила же *of* вследствие такой связи будет стремиться сообщить системе *pn* как поступательное движение, так и вращательное вокруг ее центра инерции.

Рассмотрим теперь противодействие, оказываемое второй системой на первую. Согласно основной аксиоме механики — действие и противодействие двух частиц друг на друга равны и прямо противоположны, — для определения противодействия нужно будет последовательно составить силы, равные и прямо противоположные силам, с которыми частицы первой системы действуют на частицы второй, и очевидно, что общее противодействие, найденное таким образом, будет всегда равно и противоположно действию.

В первом случае противодействие будет изображаться, следовательно, прямой *mε* (рис. 35), равной и противоположной по направлению равнодействующей *me*, и можно будет представить себе, что она приложена к центру действия первой системы, лежащему на ее продолжении. Отсюда следует, что, пренебрегая снова маленькой разницей в положениях центра действия и центра инерции, мы получим и здесь лишь поступательное движение.

Во втором случае противодействие также изобразится прямой *oγ* (рис. 36), равной *og* и противоположной ей по направлению. Но поскольку точка *o* не принадлежит к первой системе, и направление $o\gamma$, вообще говоря, через нее не проходит, нужно представить себе, что эта точка o неизменно связана с первой системой, не будучи связана со второй. Вследствие этого сила $o\gamma$ будет стремиться сообщить системе PN двойное движение — поступательное и вращательное. Эта сила $o\gamma$, кроме того, лежит в плоскости PoN. Если же число притягивающих молекул равно числу отталкивающих и они действуют с одинаковой интенсивностью, то направление этой силы, как и для og, перпендикулярно к oO.

Наконец, в третьем случае противодействие изобразится прямой $o\lambda$ (рис. 37), равной и противоположной равнодействующей oi и приложенной, как и она, к точке o. Чтобы получить действие oi на pn, мы только что предполагали, что эта точка o связана со второй системой pn, не будучи связана с первой PN. Чтобы теперь получить противодействие относительно этой последней, положим, что сила $o\lambda$, приложенная в точке o, связана с первой системой, не будучи связана со второй. И эта сила, вообще говоря, будет стремиться сообщить PN двойное движение — поступательное и вращательное.

Если мы сравним эти результаты с данными опыта относительно направлений сил, проявляющихся в действиях трех родов, которые мы различали выше, то можно легко убедиться, что три случая, только что нами рассмотренные, находятся с ними в полном соответствии. Когда два элемента вольтаических проводников действуют друг на друга, действие и противодействие, как в первом случае, направлены по прямой, соединяющей эти элементы. Когда дело идет о силе, действующей между элементом проводника и частицей магнита с двумя разнородными полюсами, которые действуют в противоположных направлениях с одинаковой интенсивностью, то действие и противодействие, как во втором случае, направлены перпендикулярно прямой, соединяющей частицу с элементом. Две же частицы намагниченного бруска, которые сами являются не чем иным, как двумя весьма малыми магнитами, оказывают друг на друга более сложное действие, сходное с тем, какое представляет третий случай, и которое нельзя себе иначе представить, как полагая его результатом действия четырех сил: двух притягивающих и двух отталкивающих. Отсюда легко заключить, что лишь относительно элемента проводника можно предположить, что все его точки оказывают действие одинакового рода, и заключить, какой из трех родов сил, о которых здесь идет речь, нужно рассматривать как наиболее простой.

Но возникает иной вопрос. Пусть сила, действующая между двумя элементами проводника, есть наиболее простая, а силы, которые возникают с одной стороны между одним из этих элементов и частичкой магнита, заключающей всегда два полюса одинаковой интенсивности, а с другой стороны — между двумя из этих частичек, являются лишь более или менее сложными результатами этой простой силы. Можем ли мы заключить отсюда, что эту последнюю следует рассматривать как действительно элементарную? Фактически я всегда был так далек от этой мысли, что в „Notes sur l'exposé sommaire des nouvelles expériences électro-magnétiques“, опубликованных мною в 1822 г.,[1] я стремился объяснить ее реакцией жидкости, разлитой в пространстве, колебания которой вызывают световые явления. Я сказал лишь, что эту реакцию следует считать элементарной в том смысле, в каком химики относят к простым телам все те, которые они еще не смогли разложить, независимо от всяких, основанных на аналогии, предположений, могущих их заставить думать, что на самом деле это — тела сложные. Я считаю эту силу элементарной еще и в том смысле, что после того как величина этой силы выведена из опытов и вычислений, изложенных в настоящем труде, надлежит вычислить, именно исходя из этой единственной величины, значения всех сил, проявляющихся в наиболее сложных случаях.

[1] „Recueil d'observations électro-dynamiques“, стр. 215 [[51]].

Но если бы даже эта сила была обусловлена или реакцией жидкости, разреженность которой не позволяет предположить, чтобы она могла действовать посредством своей массы, или сочетанием сил, свойственных двум электрическим жидкостям, — все равно действие было бы всегда направлено противоположно противодействию и по одной и той же прямой. В самом деле, как следует из изложенных выше соображений, это обстоятельство необходимо присутствует во всяком сложном действии, когда оно происходит от действительно элементарных сил, из которых состоит это сложное действие. Применяя тот же самый принцип к силе, действующей между так называемой магнитной молекулой и элементом проводника, мы найдем, что если эта сила, действуя на элемент, проходит через его середину, то обратное действие элемента на молекулу должно также быть направлено так, чтобы оно проходило через ту же середину, а не через молекулу. Это следствие из принципа, который до сих пор допускали все физики, не так легко, однако, доказать на опыте для случая той силы, о которой мы говорим. Действительно, во всех опытах, в которых на магнит действует часть проводника, образующая замкнутый контур, значение полного действия оказывается одним и тем же независимо от того, предположим ли мы, что данная сила проходит через элемент проводника или через магнитную молекулу, как было показано в настоящем труде. Это заставило многих физиков предполагать, что только действие, оказываемое элементом проводника, проходит через этот элемент, противодействие же, будучи ему противоположно и параллельно, не направлено по той же прямой и образует с действием то, что они назвали первичной парой.

Вычисления, которые я проведу ниже, доставят мне повод подробно рассмотреть эту своеобразную гипотезу. Мы увидим, что она не только противоречит одному из основных принципов механики, но к тому же абсолютно не нужна для объяснения наблюдаемых фактов. Мы увидим, что лишь ложное истолкование этих фактов могло побудить к принятию данной гипотезы тех физиков, которые не допускают, что свойства магнитов реально обусловлены действием электрических токов, окружающих их частицы.

Явления, вызываемые двумя электрическими жидкостями, которые движутся в вольтаических проводниках с током, кажутся совершенно отличными от тех, в которых проявляется присутствие этих жидкостей, когда они находятся в покое в телах, наэлектризованных обычным способом. Это давало повод утверждать, будто первые явления зависят от совершенно иных жидкостей, чем вторые. Точно так же можно было бы заключить, поскольку подъем ртути в барометре представляет явление совершенно отличное от звука, что нельзя приписать их одной и той же атмосферной жидкости, в первом случае находящейся в покое, во втором — в движении, а для двух столь различных фактов нужно принять две различные жидкости, одна из которых лишь давит на свободную поверхность ртути, а другая передает колебательные движения, обусловливающие звук.

Ничто, к тому же, не доказывает, что сила, выраженная моей формулой, не может быть результатом притяжений и отталкиваний между молекулами двух электрических жидкостей, обратно пропорциональных квадратам расстояний этих молекул. Факт вращательного движения, непрерывно ускоряющегося до тех пор, пока, в силу сопровождающего его трения и сопротивления жидкости, в которую погружен магнит или проводник, его скорость не станет постоянной, кажется прежде всего абсолютно противоречащим этому способу объяснения электродинамических явлений. Действительно, из принципа сохранения живой силы, который является необходимым следствием самих законов движения, необходимо вытекает, что если элементарные силы (в данном случае — притяжения и отталкивания, обратно пропорциональные квадрату расстояний) выражены простыми функциями взаимных расстояний между точками, где они действуют, и если некоторые из этих точек неизменно связаны друг с другом и движутся лишь под влиянием этих сил, причем прочие остаются неподвижными, — то первые не могут возвратиться в исходное положение относительно вторых со скоростями бóльшими, чем те, с которыми они вышли из этого положения. Между тем, при непрерывном вращательном движении, сообщенном подвижному проводнику действием неподвижного проводника, все точки первого возвращаются в то же положение со скоростями, все возрастающими при каждом обороте, пока трение и сопротивление подкисленной воды, в которую погружен верхний конец проводника, не положат предела увеличению этой скорости вращения. Тогда она становится постоянной, несмотря на трение и на сопротивление.

Итак, можно считать вполне доказанным, что явления, зависящие от действия двух вольтаических проводников, не могут быть объяснены предположением, что электрические молекулы, действующие обратно пропорционально квадрату расстояний, при своем распределении на проводниках как бы закреплены на них и могут рассматриваться как неизменно связанные друг с другом. Отсюда необходимо следует, что причина указанных явлений заключается в том, что эти две электрические жидкости непрерывно обегают[1] проводники с чрезвычайной быстротой, то соединяясь, то разъединяясь

[1] Со времени первых работ физиков в области электродинамических явлений многие ученые предполагали, что эти явления можно объяснить распределением либо электрических, либо магнитных молекул, находящихся в покое в вольтаических проводниках. Как только было опубликовано открытие первого непрерывного вращательного движения, сделанное Фарадеем, я сразу же увидел, что оно целиком опровергает эту гипотезу, и вот в каких выражениях я изложил мою мысль — все, что я говорю здесь, является лишь ее развитием — в „Exposé sommaire des nouvelles expériences électro-magnétiques faites par différents physiciens depuis le mois de mars 1821“, которую я представил общему собранию королевской Академии наук 8 апреля 1922 г.

„Таковы новейшие успехи этой отрасли физики, о существовании которой мы даже не подозревали еще два года тому назад. Они открыли нам факты, может быть более изумительные, чем все то, что до сих пор открыла в промежутках между частицами проводников. Поскольку явления, о которых идет здесь речь, могут быть вызваны лишь электричеством, находящимся в движении, я счел нужным обозначить их наименованием *электродинамических явлений*. Наименование *электромагнитных явлений*, которое им давали до сих пор, было уместно, пока дело шло только об открытии г. Эрстедом взаимодействий между *магнитом* и *электрическим током*, но это наименование может ввести в заблуждение после того, как мною доказано, что явления такого же рода возникают без всякого магнита, лишь при взаимодействии двух *электрических токов*.

Лишь в том случае, если предположить, что электрические молекулы находятся в покое в телах, где их присутствие обнаруживается только возбуждаемыми ими притяжениями или отталкиваниями между этими телами, можно доказать, что непрерывно ускоряющееся движение не может здесь происходить вследствие зависимости сил, с которыми действуют электрические молекулы в состоянии покоя, лишь от их взаимных расстояний. Если предположить, наоборот, что, будучи приведены в движение в проводниках действием батареи, молекулы непрерывно меняют место, соединяются каждое мгновение в нейтральную жидкость, разъединяются вновь и присоединяются тут же к другим молекулам противополож-

нам наука из диковинных явлений. Движение, продолжающееся постоянно в одном направлении, несмотря на трение, несмотря на сопротивление среды, и притом движение, вызываемое взаимодействием двух тел, остающихся все время в одном состоянии, — беспримерный факт среди всего, что мы знаем о свойствах неорганической материи. Он доказывает, что действие, исходящее из гальванических проводников, не может быть вызвано особым распределением некоторых жидкостей, находящихся в этих проводниках в состоянии покоя, которому обязаны своим происхождением обыкновенные электрические притяжения и отталкивания. Это действие можно приписать только жидкостям, которые движутся в проводнике, быстро переносясь от одного конца к другому." См. „Journal de physique", где этот абзац был помещен одновременно (т. XCIV, стр. 65), и мой „Recueil d'observations électro-dynamiques", стр. 225 [52].

ной жидкости, то противоречие исчезает. Тогда становится возможным допустить, что в результате действий каждой молекулы, обратно пропорциональных квадрату расстояний, между двумя элементами проводников может возникнуть сила, зависящая не только от их расстояния друг от друга, но и от направлений двух элементов, вдоль которых движутся электрические молекулы, соединяясь в молекулы противоположного рода и тотчас же отделяясь от них, чтобы присоединиться к другим. Между тем сила, которая при этом возникает, как раз и зависит единственно от расстояния и от направлений. Опыты и вычисления, изложенные в настоящей работе, позволили мне оценить ее величину. Чтобы составить себе ясное представление о том, что происходит в проводнике, нужно учесть, что между молекулами металла, из которых он состоит, разлита некоторая жидкость, образованная положительной и отрицательной жидкостями, но не в тех соотношениях, которые дают нейтральную жидкость, а с некоторым избытком той из двух жидкостей, которая по природе противоположна электричеству, свойственному молекулам металла, и как бы затушевывает их электричество. В письме, написанном мною г. Фан-Беку в начале 1822 г.[1] я объяснил, что именно в этой электрической жидкости происходят все движения, все разъединения и воссоединения, образующие электрический ток.

Жидкость, находящаяся между пластинками элемента, является несравненно худшим проводником, чем проволока, соединяющая его полюсы, а потому проходит некоторое, правда весьма малое, но все же измеримое время, в течение которого межмолекулярное электричество, находившееся, по нашему предположению, первоначально в равновесии, разлагается в каждом промежутке, заключенном между двумя молекулами этой проволоки. Разложение постепенно возрастает до тех пор, пока положительное электричество одного

[1] Journal de physique, т. XCIII, стр. 450—453; „Recueil d'observations électro-dynamiques", стр. 174—177 [53].

промежутка не соединится с отрицательным электричеством промежутка, непосредственно следующего за ним (считая по направлению тока), и пока его отрицательное электричество не воссоединится с положительным электричеством предыдущего промежутка. Такое воссоединение может быть только мгновенным, подобно разряду лейденской банки. Поэтому и действие между проводниками, развивающееся за указанное время и направленное противоположно тому, которое возникает во время разложения, не может уменьшить эффекта последнего. В самом деле, действие силы зависит как от ее интенсивности, так и от времени, в продолжение которого она действует. В данном же случае интенсивность должна быть одной и той же, невзирая на то, разделяются или воссоединяются электрические жидкости. Но промежуток, в течение которого происходит их разделение, несравненно длительнее того периода, какой требуется для их соединения.

Поскольку действие изменяется с изменением расстояний между молекулами за тот срок, в течение которого происходит это разделение, нужно было бы величину силы, вычисленную для каждого момента, проинтегрировать по времени для всего этого интервала и разделить полученный таким образом интеграл на этот интервал. Но и не производя этого вычисления, для которого у нас еще недостает данных относительно изменения, в зависимости от времени, расстояний между электрическими молекулами в каждом межмолекулярном промежутке проводника, легко видеть, что полученные таким образом силы должны зависеть от направлений электрического тока в каждом из элементов.

Если бы, исходя из этого соображения, было возможно установить, что взаимодействие двух элементов действительно пропорционально выражению, которым я его представил, то такое объяснение основного факта электродинамических явлений следовало бы, очевидно, предпочесть всякому другому. Потребовалось бы, однако, заняться исследованиями, для которых у меня сейчас нет времени. Не могу я заниматься и еще более трудными исследованиями, которые нужно было бы произвести, чтобы выяснить, не приведет ли к той же самой формуле и обратное предположение, именно то, согласно которому электродинамические явления объясняются движениями, сообщаемыми эфиру электрическими токами. Каковы бы ни были гипотезы и всякие предположения, которые можно сделать для объяснения этих явлений, последние всегда представятся формулой, выведенной мною из результатов опыта посредством математического вычисления. Всегда останется математически доказанным, что если рассматривать магниты как совокупности электрических токов, протекающих, согласно моему представлению, вокруг их частиц, то все значения сил, которые в каждом случае даются из опыта, могут быть выведены из одной единственной силы, действующей между двумя элементами электрических токов вдоль прямой, соединяющей их середины. Из этой же силы могут быть выведены и все условия тех трех родов действий, которые происходят: одно — между двумя магнитами, другое — между проводником с током и магнитом, третье — между двумя проводниками.

Что касается самого выражения этой силы, то оно является наиболее простым из выражений для сил, которые зависят не только от расстояния, но еще и от направления обоих элементов, ибо эти направления входят в выражение силы лишь постольку, поскольку оно содержит вторую производную квадратного корня из расстояния между двумя элементами. Эта производная получается в результате последовательного изменения двух дуг с электрическими токами, функцией которых является это расстояние. Она сама зависит от направлений этих двух элементов и входит в значение, определяемое моей формулой, в очень простом виде. Действительно, это значение состоит из определенной таким образом второй производной, умноженной на постоянный коэффициент и деленной на квадратный корень из расстояния, причем сила будет отталкивающей, если вторая производная положительна, и притягивающей, если она отрицательна. Это выражается знаком минус, который ставится перед общим выражением $-\frac{2ii'}{\sqrt{r}} \cdot \frac{d^2\sqrt{r}}{ds\,ds'}\,ds\,ds'$ для этой силы, в соответствии с обычными обозначениями, согласно которым принято считать притяжение силами положительными, а отталкивание — отрицательными.

Эпохи, когда факты, ранее приписывавшиеся совершенно различным причинам, сводились к единому началу, обычно были ознаменованы и открытием большого числа новых фактов. Это и понятно: новая точка зрения на причины вызывает желание поставить множество опытов, проверить множество объяснений. Так, доказательство тожества гальванизма и электричества [54], данное Вольта, сопровождалось изобретением элемента, а затем последовали все открытия, которым положил начало этот изумительный прибор. Если судить по столь значительным результатам работ г. Беккереля — о влиянии электричества на химические явления [55], и гг. Прево и Дюма — о причинах мышечных сокращений [56], то можно надеяться, что как столь многие новые факты, открытые за последние четыре года, так и сведение их к единому принципу — закону притягивающих и отталкивающих сил между проводниками электрических токов — будут также иметь следствием множество дальнейших результатов, коим суждено будет установить между физикой, с одной стороны, химией и даже физиологией — с другой, ту связь, необходимость которой все время ощущалась, но мы не могли похвалиться тем, что ее осуществили [57].

Нам остается теперь заняться действиями, которые оказывает замкнутый контур с током, независимо от его величины, формы и положения, либо на соленоид, либо на другой контур любой величины, формы и положения. Главный результат этих исследований заключается в установлении аналогии между силами, возбужденными этим контуром при действии его на другой замкнутый контур или на соленоид, и силами, которые возбуждались бы точками, действие которых было бы в точности то самое, какое приписывается молекулам так называемых северной и южной жидкостей. Эти точки должны распределяться по поверхностям, ограниченным контурами, так, как я укажу ниже, а концы соленоида должны быть заменены двумя разноименными магнитными молекулами. Эта аналогия представляется сначала столь полной, что кажется возможным свести все электродинамические явления к теории, предполагающей существование этих двух жидкостей. Но вскоре приходится убедиться, что она справедлива лишь по отношению к гальваническим проводникам, образующим твердые и замкнутые контуры, что таким способом можно истолковать лишь те из электродинамических явлений, которые вызываются проводниками, образующими такие контуры, и что, наконец, со всей совокупностью фактов могут быть совместимы только силы, выраженные иной формулой. Именно из этой самой аналогии я выведу доказательство второй теоремы, которую можно формулировать так: взаимодействие двух твердых и замкнутых контуров или твердого и замкнутого контура и магнита никогда не может вызвать непрерывного движения со скоростью, которая неограниченно возрастает до тех пор, пока силы сопротивления и трения приборов не сделают эту скорость постоянной.

Чтобы провести это доказательство со всей полнотой, я начну с того, что придам двум формулам, относящимся к взаимодействию двух проводников с током, более общую и более симметричную форму. Пусть s и s' — две какие-либо кривые, по которым проходят токи; силы токов мы, как прежде, обозначим через i и i'. Пусть $ds = \mathrm{M}m$ (рис. 38) — некоторый элемент первой кривой, $ds' = \mathrm{M}m'$ — элемент второй; x, y, z и x', y', z' — координаты их середин o, o', а r — соединяющая их прямая oo', длину которой следует рассматривать как функцию двух независимых переменных s и s', представляющих дуги двух кривых, считая от некоторых взятых на них постоянных точек. Взаимодействие двух элементов ds, ds'

есть, как мы видели выше, сила, направленная по прямой r и имеющая величину

$$-ii'dsds's^k \frac{d\left(r^k \frac{dr}{ds}\right)}{ds'}.$$

Это выражение можно написать более просто следующим образом:

$$-ii'r^k d'(r^k dr),$$

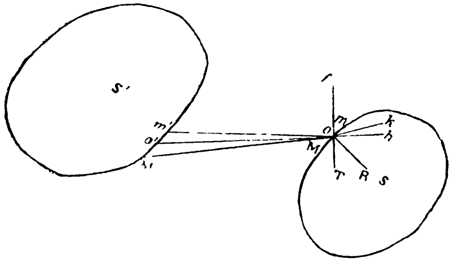


Рис. 38.

где знаками d и d' отличаются дифференциалы, относящиеся к изменению только координат x, y, z элемента ds, от дифференциалов, которые получатся, если изменять только координаты x', y', z' элемента ds'. Этими отличительными знаками мы будем пользоваться всякий раз, когда нам надо будет рассматривать дифференциалы, взятые первым, и дифференциалы, взятые вторым из этих двух способов.

Поскольку эта сила — притягивающая, то, чтобы получить ее составляющую, параллельную оси x, нужно умножить ее выражение на $\frac{x-x'}{r}$ или на $-\frac{x-x'}{r}$, в зависимости от того, рассматривать ли ее как действующую на элемент ds' или на элемент ds. Таким образом, в этом последнем случае составляющая равна

$$ii'r^{k-1}(x-x')\,d'(r^k dr).$$

Этому выражению можно придать другую форму, пользуясь значением, которое получается для udv, где u и v — произвольные величины, если сложить почленно два тождественных уравнения

$$udv + vdu = d(uv),$$

$$udv - vdu = u^2 d\left(\frac{v}{u}\right).$$

Находим выражение

$$udv = \frac{1}{2} d(uv) + \frac{1}{2} u^2 d\left(\frac{v}{u}\right).$$

Полагая

$$u - r^{k-1}(x - x'), \quad v = r^k dr,$$

получаем

$$r^{k-1}(x - x') d'(r^k dr) = \frac{1}{2} d'[r^{2k-1}(x - x') dr] +$$

$$+ \frac{1}{2} r^{2k-2}(x - x')^2 d' \frac{rdr}{x - x'} = \frac{1}{2} d' \frac{(x - x') dr}{r^n} +$$

$$+ \frac{1}{2} \frac{(x - x')^2}{r^{n+1}} d' \frac{rdr}{x - x'},$$

так как $2k + n = 1$, что дает

$$2k - 1 = -n, \quad 2k - 2 = -n - 1.$$

Но

$$r^2 = (x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2$$

и, следовательно,

$$\frac{rdr}{x - x'} = dx + \frac{y - y'}{x - x'} dy + \frac{z - z'}{x - x'} dz,$$

откуда

$$d' \frac{rdr}{x - x'} = \frac{(z - z') dx' - (x - x') dz'}{(x - x')^2} dz -$$

$$- \frac{(x - x') dy' - (y - y') dx'}{(x - x')^2} dy.$$

Таким образом, для составляющей, параллельной оси x, имеем выражение

$$\frac{1}{2}\,ii'd'\,\frac{(x-x')\,dr}{r^n}+\frac{1}{2}\,ii'\left[\frac{(z-z')\,dx'-(x-x')\,dz'}{r^{n+1}}\,dz-\right.$$
$$\left.-\frac{(x-x')\,dy'-(y-y')\,dx'}{r^{n+1}}\,dy\right].$$

Два члена этого выражения могут быть рассматриваемы в отдельности как две силы, совокупность которых эквивалентна искомой силе. Но, как легко видеть, в том случае, когда кривая s' образует замкнутый контур, все силы, подобные той, которая выражается членами $\frac{1}{2}\,ii'd'\,\frac{(x-x')\,dz}{r^n}$, и происходящие от действия всех элементов ds' контура s' на один и тот же элемент ds, взаимно уничтожаются. Действительно, все эти силы приложены к той же точке О, середине элемента ds, вдоль одной и той же прямой, параллельной оси x. Поэтому, чтобы получить силу, вызванную вдоль прямой действием какого-нибудь участка проводника, нужно проинтегрировать $\frac{1}{2}\,ii'd'\,\frac{(x-x')\,dr}{r^n}$ от одного конца этого участка до другого. Мы найдем таким образом

$$\frac{1}{2}\,ii'\left[\frac{(x-x_2')\,dr_2}{r_2^n}-\frac{(x-x_1')\,dr_1}{r_1^n}\right],$$

обозначая через x_1', r_1, dr_1 величины, относящиеся к одному концу, и через x_2', r_2, dr_2 величины, относящиеся к другому концу. Это выражение обратится, очевидно, в нуль, когда контур замкнут, и оба его конца находятся в одной точке.

Следовательно, если проводник s' образует замкнутый контур, то, чтобы проще получить действие, оказываемое им на элемент ds параллельно оси x, нужно опустить в выражении для составляющей, параллельной этой оси, член $\frac{1}{2}\,ii'\,\frac{d'(x-x')\,dx}{r^n}$ и принять во внимание только другую часть

$$\frac{1}{2}\, ii' \left[\frac{(z-z')\, dx' - (x-x')\, dz'}{r^{n+1}}\, dz - \frac{(x-x')\, dy' - (y-y')\, dx'}{r^{n+1}}\, dy \right],$$

которую мы обозначим через X.

Рассуждая подобным же образом относительно двух других составляющих той же силы, параллельных осям y и z, подставим вместо них силы Y и Z, выражения которых будут

$$\mathrm{Y} = \frac{1}{2}\, ii' \left[\frac{(x-x')\, dy' - (y-y')\, dx'}{r^{n+1}}\, dx - \right.$$

$$\left. - \frac{(y-y')\, dz' - (z-z')\, dy'}{r^{n+1}}\, dz \right],$$

$$\mathrm{Z} = \frac{1}{2}\, ii' \left[\frac{(y-y')\, dz' - (z-z')\, dy'}{r^{n+1}}\, dy - \right.$$

$$\left. - \frac{(z-z')\, dx' - (x-x')\, dz'}{r^{n+1}}\, dx \right].$$

Таким образом, когда речь идет о замкнутом контуре, равнодействующая R трех сил X, Y, Z, к которым сводятся составляющие силы — $ii' r^k d' (r^k dr)$, заменяет эту силу. Совокупность всех сил R эквивалентна совокупности всех сил, с какими действует каждый из элементов ds' замкнутого контура s', и представляет собою полное действие этого контура на элемент ds. Посмотрим теперь, каковы величина и направление этой силы R.

Пусть u, v, w — проекции линии r на плоскости yz, xz и xy, образующие соответственно углы φ, χ, ψ с осями y, z и x. Рассмотрим сектор $M'om'$ (рис. 38), имеющий основанием элемент ds' и вершиной точку o, расположенную в середине элемента ds, координаты которой суть x, y, z. Обозначим через λ, μ, ν углы, которые образует с осями нормаль к плоскости этого сектора, и через θ' — угол между направлениями ds' и r. Удвоенная площадь этого сектора равна $rds' \sin\theta'$, и ее проекции на плоскости координат будут:

$$u^2 d'\varphi = rds' \sin\theta' \cos\lambda = (y'-y)\, dz' - (z'-z)\, dy',$$

$$v^2 d'\chi = rds' \sin\theta' \cos\mu = (z'-z)\, dx' - (x'-x)\, dz',$$

$$w^2 d'\psi = rds' \sin\theta' \cos\nu = (x'-x)\, dy' - (y'-y)\, dx'.$$

Следовательно, выражениям для сил X, Y, Z можно придать новый вид:

$$X = \frac{1}{2} ii' \left(\frac{v^2 d'\chi}{r^{n+1}} dz - \frac{w^2 d'\psi}{r^{n+1}} dy \right) =$$

$$= \frac{1}{2} \frac{ii' ds ds' \sin\theta'}{r^n} \left(\frac{dz}{ds} \cos\mu - \frac{dy}{ds} \cos\nu \right),$$

$$Y = \frac{1}{2} ii' \left(\frac{w^2 d'\psi}{r^{n+1}} dx - \frac{u^2 d'\varphi}{r^{n+1}} dz \right) =$$

$$= \frac{1}{2} \frac{ii' ds ds' \sin\theta'}{r^n} \left(\frac{dx}{ds} \cos\nu - \frac{dy}{ds} \cos\nu \right),$$

$$Z = \frac{1}{2} ii' \left(\frac{u^2 d'\varphi}{r^{n+1}} dy - \frac{v^2 d'\chi}{r^{n+1}} dx \right) =$$

$$= \frac{1}{2} \frac{ii' ds ds' \sin\theta'}{r^n} \left(\frac{dy}{ds} \cos\lambda - \frac{dx}{ds} \cos\mu \right).$$

Но эти выражения дают

$$X \frac{dx}{ds} + Y \frac{dy}{ds} + Z \frac{dz}{ds} = 0,$$

$$X \cos\lambda + Y \cos\mu + Z \cos\nu = 0,$$

т. е. направление силы R образует с направлением элемента $mM = ds$ и с нормалью op к плоскости сектора $M'om'$ (рис. 38) углы, косинусы которых равны нулю, так что эта сила одновременно находится в плоскости сектора и перпендикулярна к элементу ds. Что касается ее интенсивности, то мы имеем на основании известных формул

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \frac{1}{2} \frac{ii' ds ds' \sin\theta' \sin pom}{r^n} =$$

$$= \frac{1}{2} \frac{ii' ds ds' \sin\theta' \cos mok}{r^n},$$

где ok — проекция om на плоскость сектора $M'om'$. Эту силу можно разложить в плоскости сектора на две силы: S, направленную вдоль прямой $oo' = r$, и T, перпендикулярную к этой прямой. Последняя составляющая

$$\mathrm{T} = \mathrm{R}\cos\mathrm{T}o\mathrm{R} = \mathrm{R}\cos hok = \frac{1}{2}\,\frac{ii'dsds'\sin\theta'\cos mok\cos hok}{r^n}\,.$$

А так как трехгранный угол, образованный направлениями om, ok и oh, дает

$$\cos mok\cos hok = \cos moh = \cos\theta,$$

то получается

$$\mathrm{T} = \frac{1}{2}\,\frac{ii'dsds'\sin\theta'\cos\theta}{r^n}\,.$$

Сила вдоль oh равна

$$\mathrm{S} = \mathrm{R}\sin hok = \mathrm{T}\,\mathrm{tg}\,hok.$$

Но, обозначая через ω двугранный угол между плоскостью moh и плоскостью hok, в которой лежит сектор $\mathrm{M}'om'$, имеем

$$\mathrm{tg}\,hok = \mathrm{tg}\,\theta\cos\omega.$$

Таким образом

$$\mathrm{S} = \frac{1}{2}\cdot\frac{ii'dsds'\sin\theta\sin\theta'\cos\omega}{r^n}\,.$$

Проинтегрировав выражение X, Y, Z по всему протяжению замкнутого контура s', получим три составляющих действия, оказываемого всем этим контуром на элемент ds. После замены n его значением 2 выражения этих трех составляющих обратятся в

$$\frac{1}{2}\,ii'\left(dz\int\frac{v^2d'\chi}{r^3} - dy\int\frac{w^2d'\psi}{r^3}\right),$$

$$\frac{1}{2}\,ii'\left(dx\int\frac{w^2d'\psi}{r^3} - dz\int\frac{u^2d'\varphi}{r^3}\right),$$

$$\frac{1}{2}\,ii'\left(dy\int\frac{u^2d'\varphi}{r^3} - dx\int\frac{v^2d\chi}{r^3}\right).$$

Подобные же силы, приложенные ко всем элементам ds кривой s, дадут полное действие контура s' на контур s. Мы их получим, интегрируя вновь предыдущие выражения по всему протяжению этого последнего контура.

Теперь представим себе две произвольные поверхности σ, σ', ограниченные двумя контурами s, s', все точки которых неизменно связаны между собой и со всеми точками соответствующей данному контуру поверхности. На обеих поверхностях вообразим бесконечно тонкие слои одной и той же магнитной жидкости, которая удерживается на этих поверхностях действием коэрцитивной силы, достаточной, чтобы препятствовать ей перемещаться. Рассмотрим на этих поверхностях два бесконечно малых участка второго порядка, которые мы обозначим через $d^2\sigma$ и $d^2\sigma'$, причем положение первого определяется координатами x, y, z, положение второго — координатами x', y', z', а расстояние между ними равно r. Их взаимодействие будет отталкивающей силой, направленной вдоль линии r и равной $-\frac{\mu\varepsilon\varepsilon' d^2\sigma d^2\sigma'}{r^2}$, которую мы будем считать действующей на элемент $d^2\sigma$ [58]. Здесь ε, ε' обозначают так называемую толщину магнитного слоя соответственно для каждой из поверхностей, μ есть постоянный коэффициент, при котором $\mu\varepsilon\varepsilon'$ выражает отталкивающее действие, которое происходило бы если бы в двух точках, расположенных на расстоянии, равном единице, сосредоточить с одной стороны всю жидкость, распределенную на площади, равной единице поверхности, при постоянной толщине ε, а с другой стороны — всю жидкость, распределенную на другой единице поверхности при толщине, также постоянной и равной ε'.

Разложив рассматриваемую силу параллельно трем осям координат, получим три составляющие

$$\frac{\mu\varepsilon\varepsilon' d^2\sigma d^2\sigma' (x-x')}{r^3}, \quad \frac{\mu\varepsilon\varepsilon' d^2\sigma d^2\sigma' (y-y')}{r^3}, \quad \frac{\mu\varepsilon\varepsilon' d^2\sigma d^2\sigma' (z-z')}{r^3}.$$

Представим себе теперь новую поверхность, ограниченную тем же контуром s, что и поверхность σ, причем все отрезки нормалей к поверхности σ, заключенные между нею и новой поверхностью, предполагаются весьма малыми. Предположим далее, что на этой последней поверхности распределена магнитная жидкость противоположного рода относительно жидкости поверхности σ таким образом, что на участке новой поверхности, который образован нормалями, проведенными через все точки контура элемента поверхности $d^2\sigma$, количество жидкости равно количеству, распределенному по $d^2\sigma$ [59]. Обозначим через h длину малого отрезка нормали к поверхности σ, проведенной через точку с координатами x, y, z. Этот отрезок заключен между двумя поверхностями и измеряет на всем протяжении бесконечно малой площадки $d^2\sigma$ расстояние от ее точек до соответствующих точек другой поверхности. Обозначим через ξ, η, ζ углы, образованые этой нормалью с осями. Три составляющие взаимного действия между элементом $d^2\sigma'$ и малым участком новой поверхности, очертанным, как указано выше, и равным $d^2\sigma$, получатся заменой в найденном нами выше выражении x, y, z, через

$$x + h\cos\xi, \quad y + h\cos\eta, \quad z + \cos\zeta.$$

Мы предположили, действительно, что h очень мало и при вычислениях можно пренебречь, как это мы и делаем, степенями h выше первой. Ввиду того, что жидкости, распределенные на двух площадках, равных $d^2\sigma$, имеют противоположный характер, новые значения составляющих надо вычесть из ранее найденных значений. Это сведется, поскольку мы пренебрегаем степенями h выше первой, к дифференцированию соответствующих выражений, к замене в полученном выражении дифференциалов x, y, z их выражениями $h\cos\xi$, $h\cos\eta$ и $h\cos\zeta$ и к перемене знака. Так как эти дифференциалы берутся при переходе от первой поверхности σ ко второй, мы их обозначим через δ, как это принято в вариационном исчислении. Таким образом, мы будем иметь для составляющей, параллельной оси x, выражение

$-\mu\varepsilon\varepsilon' d^2\sigma d^2\sigma' \delta \frac{x-x'}{r^3}$, если заменим в нем δx через $h\cos\xi$, а именно

$$\mu\varepsilon\varepsilon' d^2\sigma d^2\sigma' h \cos\xi \left[\frac{3(x-x')\frac{\delta r}{\delta x}}{r^4} - \frac{1}{r^3} \right].$$

Определим теперь форму и положение элемента $d^2\sigma$.

Обозначим, как и выше, через u, v, w проекцию линии r на плоскости yz, zx и xy, и через φ, χ, ψ углы, соответственно образованные этими проекциями с осями y, z и x.

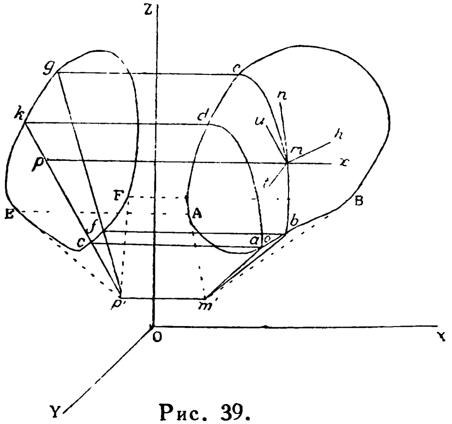


Рис. 39.

Разобьем первую поверхность σ на бесконечное число бесконечно узких зон, таких, как $abcd$ (рис. 39) [60], при помощи ряда плоскостей, перпендикулярных к плоскости YZ и проведенных через координату $m'p' = x$ точки m'. Каждая зона ограничена с обоих концов периметром s поверхности σ, и потому ее проекцией на плоскость YZ будет площадь, которая в свою очередь может быть разложена на бесконечно малые четырехугольные элементы. Им будет отвечать на рассматриваемой зоне такое же количество элементов поверхности σ. Эти элементы и должны считаться значениями $d^2\sigma$. Тот элемент, положение которого относительно элемента $d^2\sigma'$ определяется полярными координатами r, u, φ, равен его проекции $udu\,d\varphi$ на плоскость YZ, деленной на косинус угла ξ между этой плоскостью и касательной плоскостью к поверхности σ, с которой совпадает элемент $d^2\sigma$. Следовательно, в предыдущей формуле нужно заменить $d^2\sigma$ через $\frac{udud\varphi}{\cos\xi}$, и мы получим

$$\mu h\varepsilon\varepsilon' d^2\sigma' udud\varphi \left[\frac{3(x-x')\frac{\delta r}{\delta x}}{r^4} - \frac{1}{r^3}\right].$$

Вычислим теперь значение $(x-x')\frac{\delta r}{\delta x}$. Пусть mx — продолжение координаты $mp = x$ точки m, в которой расположен элемент $d^2\sigma$; mu — параллель к плоскости YZ, проведенная в плоскости $pmm'p'$, и mt — перпендикуляр к этой последней плоскости в точке m. Легко видеть, что прямая mn, по которой $pmm'p'$ пересекает плоскость, касательную в m к поверхности σ, образует с тремя взаимно перпендикулярными линиями mx, mu, mt углы, косинусы которых соответственно равны $\frac{dx}{\sqrt{dx^2+du^2}}$, $\frac{du}{\sqrt{dx^2+du^2}}$ и 0, и что нормаль mh образует с теми же направлениями углы, косинусы которых суть

$$\frac{\delta x}{\sqrt{\delta x^2+\delta u^2+\delta t^2}},\quad \frac{\delta u}{\sqrt{\delta x^2+\delta u^2+\delta t^2}},\quad \frac{\delta t}{\sqrt{\delta x^2+\delta u^2+\delta t^2}},$$

где δt является проекцией mh на mt. Следовательно, мы имеем для косинуса угла между прямой mn и нормалью mh

$$\frac{dx\delta x + du\delta u}{\sqrt{dx^2+du^2}\,\sqrt{\delta x^2+\delta u^2+\delta t^2}},$$

а так как этот угол прямой, $dx\delta x + du\delta u = 0$, откуда $\frac{dx}{du} = -\frac{\delta u}{\delta x}$. Но уравнение $r^2 = (x-x')^2 + u^2$ дает

$$rdr = (x-x')\,\delta x + u\delta u$$

и

$$rdr = udu + (x-x')\,dx,$$

откуда получаем

$$\frac{\delta r}{\delta x} = \frac{x - x'}{r} + \frac{u}{r} \cdot \frac{\delta u}{\delta x}$$

и

$$\frac{dr}{du} = \frac{u}{r} + \frac{x - x'}{r} \cdot \frac{dx}{du} = \frac{r}{u} - \frac{x - x'}{r} \cdot \frac{\delta u}{\delta x}.$$

Исключив $\frac{\delta u}{\delta x}$ из этих двух уравнений, имеем

$$(x - x')\frac{\delta r}{\delta x} + u\frac{dr}{du} = \frac{(x - x')^2}{r} + \frac{u^2}{r} = r.$$

Если теперь определить из этого уравнения значение $(x - x')\frac{\delta r}{\delta x}$ и подставить его в выражении для силы, параллельной оси x, мы получим

$$\mu h \varepsilon \varepsilon' u du d\varphi \left[\frac{3r - 3u\frac{dr}{du}}{r^4} - \frac{1}{r^3}\right] = \mu h \varepsilon \varepsilon' d\varphi \left(\frac{2udu}{r^3} - \frac{3u^2 dr}{r^4}\right) =$$

$$= \mu h \varepsilon \varepsilon' d\varphi d\,\frac{u^2}{r^3}.$$

Высота h бесконечно тонкого слоя жидкости, распространенной по поверхности σ, и толщина ε могут изменяться от одной точки этой поверхности к другой. Для достижения цели, которую мы перед собой поставили, а именно — для представления с помощью магнитных жидкостей действий, оказываемых вольтаическими проводниками, нужно предположить, что обе эти величины ε и h изменяются обратно пропорционально одна другой, так что их произведение сохраняет одно и то же значение на всем протяжении поверхности σ [61]. Если обозначим через g постоянную величину этого произведения, предыдущее выражение принимает вид

$$\mu g \varepsilon' d^2\sigma' d\varphi d\,\frac{u^2}{r^3}$$

и непосредственно интегрируется. Его интеграл

$$\mu g \varepsilon' d^2\sigma d\varphi \left(\frac{u^2}{r^3} - C\right)$$

выражает сумму сил, параллельных оси x, которые действуют на элементы $d^2\sigma$ зоны поверхности σ, заключенной между двумя плоскостями, проведенными через $m'p'$ под углом $d\varphi$ одна к другой. Так как поверхность σ ограничена замкнутым контуром s, этот интеграл нужно взять между пределами, которые определяются двумя элементами ab, cd этого контура, заключенными внутри угла $d\varphi$ между двумя упомянутыми выше плоскостями. Таким образом, обозначая через u_1, r_1 и u_2, r_2 значения u и r, относящиеся к этим двум элементам, мы получим для суммы всех сил, с которыми элемент $d^2\sigma'$ действует на зону параллельно оси x, выражение

$$\mu g \varepsilon' d^2\sigma' d\varphi \left(\frac{u_2^2}{r_2^3} - \frac{u_1^2}{r_1^3}\right).$$

Если бы поверхность σ не была ограничена одним контуром, а окружала со всех сторон некоторое пространство какой угодно формы, то зона этой поверхности, заключенная внутри двугранного угла φ, была бы замкнутой и мы имели бы $u_2 = u_1$, $r_2 = r_1$, так что действие, оказываемое на эту зону параллельно оси x, было бы равно нулю, а следовательно, было бы равно нулю и действие, оказываемое элементом $d^2\sigma'$ на всю поверхность σ, состоящую из подобных зон. Так как то же самое имело бы место и в отношении сил, параллельных осям y и z, то мы видим, что совокупность двух поверхностей, весьма близко расположенных друг к другу и окружающих со всех сторон объем пространства какой угодно формы, причем они покрыты, как указано выше, одна южной, а другая северной жидкостью, не оказывает действия на магнитную молекулу, где бы последняя ни находилась, а следовательно, и на какое бы то ни было тело, намагниченное каким угодно способом.

Вернемся к предыдущему выражению

$$\mu g\varepsilon' d^2\sigma'\left(\frac{u_2^2\,d\varphi}{r_2^3}-\frac{u_1^2\,d\varphi}{r_1^3}\right).$$

Как легко видеть, чтобы получить общую сумму сил, параллельных оси x, с которыми элемент $d^2\sigma'$ действует на всю поверхность σ, нужно проинтегрировать по φ обе части, из которых состоит это выражение, соответственно на обоих участках $AabB$, $BcdA$ контура s, определяемых двумя касательными плоскостями $p'm'A$, $p'm'B$, проведенными через линию $m'p'$. Но это все равно, что интегрировать

$$\mu g\varepsilon' d^2\sigma'\,\frac{u^2 d\varphi}{r^3}$$

по всему протяжению контура s, ибо, подставляя вместо u и φ значения их в функции от r, полученные из уравнений кривой s, мы видим, что при переходе от части $AabB$ к части $BcdA$ $d\varphi$ меняет знак, и, следовательно, элементы одной из этих частей противоположны по знаку элементам другой части. Поэтому если мы обозначим через X сумму сил, параллельных оси x, с которыми элемент $d^2\sigma'$ действует на совокупность двух поверхностей, ограниченных одним и тем же контуром s, то будем иметь

$$X=\mu g\varepsilon' d^2\sigma'\int\frac{u^2 d\varphi}{r^3},$$

или, что то же самое,

$$X=\mu g\varepsilon' d^2\sigma\int\frac{(y-y')\,dz-(z-z')\,dy}{r^3},$$

где x, y, z относятся лишь к контуру s.

Точно так же, обозначая через Y и Z суммы сил, параллельных осям y и z, действующих на ту же совокупность поверхностей, мы будет иметь

$$Y=\mu g\varepsilon' d^2\sigma'\int\frac{v^2 d\chi}{r^3}=g\mu\varepsilon' d^2\sigma'\int\frac{(z-z')\,dx-(x-x')\,dz}{r^3},$$

$$Z = \mu g\varepsilon' d^2\sigma' \int \frac{w^2 d\psi}{r^3} = g\mu\varepsilon' d^2\sigma' \int \frac{(x-x')\,dy - (y-y')\,dx}{r^3}.$$ [1]

Так как все элементарные силы, с которыми элемент $d^2\sigma'$ действует на эти поверхности, проходят через точку m, где данный элемент расположен, то, как мы видим, все эти силы имеют только одну равнодействующую, направление которой проходит через ту же точку m'. Составляющие равнодействующей силы, параллельные осям координат, суть X, Y, Z. Моменты этой равнодействующей относительно тех же осей, таким образом, равны

$$Yz' - Zy',\ Zx' - Xz',\ Xy' - Yx'.$$

Предположим теперь, что вместо этих сил мы приложим к середине каждого из элементов ds контура s силу, равную $\mu g\varepsilon' d^2\sigma' \frac{ds \sin\theta}{r^2}$ и перпендикулярную к плоскости сектора, имеющего основанием ds, вершину в точке m', и площадь которого равна $\frac{1}{2} r ds \sin\theta$. Так как три составляющие этой силы, соответственно равные

$$\mu g\varepsilon' d^2\sigma' \frac{u^2 d\varphi}{r^3},\quad \mu g\varepsilon' d^2\sigma' \frac{v^2 d\chi}{r^3},\quad \mu g\varepsilon' d^2\sigma' \frac{w^2 d\psi}{r^3},$$

параллельны силам, проходящим через элемент $d^2\sigma$, и одинаково с ними направлены, то мы получим те же значения для трех сил X, Y, Z, стремящихся привести в движение контур s. Но суммы моментов вращения будут выражаться не значениями

$$\mu g\varepsilon' d^2\sigma' \left(z' \int \frac{v^2 d\chi}{r^3} - y' \int \frac{w^2 d\psi}{r^3}\right),\quad \mu g\varepsilon' d^2\sigma' \left(x' \int \frac{w^2 d\psi}{r^3} - z' \int \frac{u^2 d\varphi}{r^3}\right),$$

$$\mu g\varepsilon' d^2\sigma' \left(y' \int \frac{u^2 d\varphi}{r^3} - x' \int \frac{v^2 d\chi}{r^3}\right),$$

[1] Само собой понятно, что здесь X, Y, Z выражают силы, совершенно отличные от сил, которые мы уже обозначили теми же буквами, когда речь шла о взаимодействии двух элементов вольтаических контуров.

а значениями

$$\mu g\varepsilon' d^2\sigma'\left(\int\frac{zv^2d\chi}{r^3}-\int\frac{yw^2d\psi}{r^3}\right).\quad \mu g\varepsilon' d^2\sigma'\left(\int\frac{xw^2d\psi}{r^3}-\int\frac{zud^2\varphi}{r^3}\right).$$

$$\mu g\varepsilon' d^2\sigma'\left(\int\frac{yu^2d\varphi}{r^3}-\int\frac{xvd^2\chi}{r^3}\right).$$

На первый взгляд может показаться, что такое изменение должно повлечь за собой изменение в действии, оказываемом на контур s. Однако это не так, если только данный контур является замкнутым, ибо если вычесть первую сумму моментов, например относящуюся к оси x, из четвертой суммы, относящейся к той оси, то, принимая во внимание, что x', y', z' при этих интегрированиях должны быть рассматриваемы как постоянные, получим

$$\mu g\varepsilon' d^2\sigma'\int\frac{(z-z')\,v^2d\chi-(y-y')\,w^2d\psi}{r^3}=$$

$$=\mu g\varepsilon' d^2\sigma'\int\frac{(z-z')^2dx-(z-z')(x-x')\,dz-(y-y')^2(x-x')dy-(y-y')^2dx}{r^3}=$$

$$=\mu g\varepsilon' d^2\sigma'\int\frac{[(z-z')^2+(y-y')^2]dx-(x-x')\,[(z-z')\,dz+(y-y')\,dy]}{r^3}=$$

$$=\mu g\varepsilon' d^2\sigma'\int\frac{[r^2-(x-x')^2]\,dx-(x-x')\,[rdr-(x-x')\,dx]}{r^3}=$$

$$=\mu g\varepsilon' d^2\sigma'\int\frac{rdx-(x-x')\,gr}{r^2}=\mu g\varepsilon' d^2\sigma\left(\frac{x_2-x'}{r_2}-\frac{x_1-x'}{r_1}\right).$$

Здесь x_1, x_2 и r_1, r_2 — значения x и r на двух концах дуги s, для которой вычисляется значение разности обоих моментов. Когда эта дуга образует замкнутый контур, очевидно $x_2=x_1$, $r_2=r_1$, и полученный интеграл обращается в нуль; следовательно, в этом случае мы имеем

$$\mu g\varepsilon' d^2\sigma'\int\frac{zv^2d\chi-yw^2d\psi}{r^3}=\mu g\varepsilon' d^2\sigma'\left(z'\int\frac{v^2d\chi}{r^3}-y'\int\frac{w^2d\psi}{r^3}\right).$$

Посредством подобного же вычисления мы находим, что для замкнутого контура моменты относительно двух других осей будут одними и теми же независимо от того, предполагается ли, что направления сил

$$\mu g\xi' d^2\sigma' \frac{u^2 d\varphi}{r^3}, \quad \mu g\xi' d^2\sigma' \frac{v^2 d\chi}{r^3}, \quad \mu g\xi' d^2\sigma' \frac{w d\psi}{r^3}$$

проходят через элемент $d^2\sigma'$ или через середину ds. Отсюда следует, что оказываемое на контур s действие будет в обоих этих случаях в точности одинаковым, поскольку этот контур неизменно связан с двумя бесконечно близкими поверхностями, которые он ограничивает. Таким образом, действие, оказываемое на эти две поверхности элементом $d^2\sigma'$, приводится, если только периметр s есть замкнутая кривая, к силам, приложенным, как мы сказали выше, к каждому из элементов этого контура. При этом значение силы, действующей на элемент ds, равно

$$\mu g\xi' d^2\sigma' \frac{ds \sin\theta}{r^2}.$$

Сила, приложенная к середине o элемента $ab = ds$, пропорциональная частному от деления $ds \sin\theta$ на квадрат расстояния r от этого элемента до точки m' и направление которой перпендикулярно к плоскости, проходящей через элемент ab и через точку m', в точности соответствует силе, с которой, как мы видели, действует на элемент ds конец неограниченного электродинамического соленоида, помещенный в точке m'. Это та же сила, которую вызывает, согласно последним опытам г. Био, взаимодействие между элементом ab и магнитной молекулой, находящейся в m'.

Но, придавая этой силе то же значение и то же направление, перпендикулярное к плоскости $m'ab$, которые следует ей придать, когда ее, как это делаю я, определяют путем замены магнитной молекулы концом неограниченного соленоида, г. Био предполагает, что точка приложения этой силы находится в m'. Вернее, здесь дело идет о силе, ей равной и противоположной, с которой элемент ds действует на точку m', ибо к этой последней силе относятся произведенные им опыты. Между тем, направление силы, с которой этот элемент действует на расположенный в m' конец неограниченного соленоида, должно проходить через точку m, как и направление силы, с которой соленоид действует на элемент, если определить эту силу из моей формулы. Таким образом, сохраняя применяемые нами обозначения и заменяя для сокращения постоянный коэффициент $\mu g \varepsilon' d^2 \sigma'$ через ρ, мы получили бы для сумм моментов относительно трех осей, полагая точки приложения сил там, где их берет г. Био, и меняя знаки, потому что речь идет о силах, действующих на точку m', следующие выражения:

$$-\rho \int \frac{z'v^2 d\chi - y'w^2 d\varphi}{r^3},$$

$$-\rho \int \frac{x'w^2 d\psi - x'v^2 d\chi}{r^3}.$$

$$-\rho \int \frac{y'u^2 d\varphi - x'v^2 d\chi}{r^3}.$$

Если же взять точки приложения там, где их устанавливаю я, то мы имеем для этих сумм моментов следующие выражения:

$$-\rho \int \frac{zv^2 d\chi - yw^2 d\psi}{r^3}.$$

$$-\rho \int \frac{xw^2 d\psi - zu^2 d\varphi}{r^3}.$$

$$-\rho \int \frac{yu^2 d\varphi - xv^2 d\chi}{r^3}.$$

Но выше мы видели, что эти последние значения соответственно равны трем предыдущим, когда участок проводника образует замкнутый контур. Отсюда следует, что в этом случае опыт не может разрешить вопроса, находится ли точка приложения силы действительно в точке m' или в середине m элемента ds. В опытах, произведенных знаменитым физиком, о которых здесь идет речь, на маленький маг нит в самом деле действовал вполне замкнутый контур, состоявший из двух прямолинейных частей проводника, углу между которыми он последовательно придавал различные значения. Этот контур состоял, далее, из остальной части проводника и из батареи; заставляя ее действовать на маленький магнит, этот физик определял отношение сил, соответствующих различным значениям этого угла, из числа колебаний маленького магнита за данный промежуток времени, также соответствовавших различным значениям угла. Ясно, что результаты опытов, произведенных таким образом, должны были быть совершенно тожественными, независимо от того, считать ли точку приложения силы в o или в m'. Эти опыты не позволяют разрешить вопроса о том, какому из предположений следует отдать предпочтение. Вопрос о положении точки приложения может быть разрешен лишь при помощи иных соображений. Поэтому, прежде чем итти дальше, я считаю необходимым рассмотреть его более подробно.

В работе, доложенной в заседании 4 декабря 1820 г., я сообщил Академии основную формулу[1] всей теории, изложенной в настоящем труде, которая дает величину взаимодействия между двумя проводниками с током в виде

$$\frac{ii'dsds'\,(\sin\theta\sin\theta'\cos\omega + k\cos\theta\cos\theta')}{r^2},$$

где k — постоянное число, значение которого я нашел впоследствии, доказав на опыте, что оно равно $-\frac{1}{2}$ [62].

Несколько времени спустя в заседании 18-го числа того же месяца, г. Био сообщил о своей работе, в которой описывались опыты, которые он производил с колебаниями маленького магнита, подверженного действию согнутого под углом проводника, и где он заключил из этих опытов, в результате упомянутой выше ошибки в вычислениях, что действие каждого элемента

[1] Journal de physique, т. XCI, стр. 226—230.

проводника на так называемую магнитную молекулу выражается силой, перпендикулярной плоскости, проходящей через молекулу и через элемент. Сила эта обратно пропорциональна квадрату их расстояния и прямо пропорциональна синусу угла, который прямая, измеряющая данное расстояние, образует с направлением элемента. Из предыдущих вычислений следует, что упомянутая сила в точности совпадает с тем, что дает и моя формула относительно взаимодействия между элементом проводника с током и концом электродинамического соленоида. Такая же сила вытекает из закона Кулона, в предположении двух магнитных жидкостей, если мы ищем действие между магнитной молекулой и элементами контура, ограничивающего две бесконечно близкие поверхности, покрытые одна южной, другая северной жидкостью, причем предполагается, что молекулы этих жидкостей распределены на обеих поверхностях, как было мною показано выше.

Как при той, так и при другой точке зрения на вещи мы находим одни и те же значения для трех составляющих, параллельных трем произвольно выбранным осям, которые дают равнодействующую всех сил, вызываемых элементами контура. Для каждой из этих сил действие направлено противоположно противодействию, по прямым, соединяющим попарно точки, между которыми они действуют; то же относится к самой равнодействующей и к противодействующей ей силе. Но в первом случае точка O (рис. 36) представляет конец соленоида, к которому принадлежат точки P, N; o — точка, в которой находится элемент, и потому две равные и взаимно противоположные силы og, $o\gamma$ проходят через этот элемент. Во втором случае, наоборот, нужно предполагать, что элемент контура поверхностей, покрытых магнитными молекулами P, N, помещается в O, а в o — молекула, на которую действуют эти поверхности, так что две равные и противоположные силы проходят через молекулу. Мы считаем, что действие одной материальной точки на другую возможно лишь при условии, что эта последняя действует на первую с такой же силой, направленной противоположно по той же прямой. Отсюда вытекает то же условие в отношении действия и противодействия двух систем точек, неизменно связанных между собой. Таким образом, нам остается только выбирать между двумя указанными выше гипотезами. А так как опыт г. Фарадея о вращении части проводника с током вокруг магнита стоит, как я сейчас докажу, в явном противоречии с первой из этих гипотез, то уже не будет трудно принять, вместе со мною, что единственно допустимой является та гипотеза, согласно которой силы действия и противодействия направлены по прямой, проходящей через середину элемента. Однако многие физики умудрились предположить, что при взаимодействии элемента AB (рис. 40)[63] проводника и магнитной молекулы M действие и противодействие хотя и равны и направлены в противоположные стороны, но не по одной прямой, а по двум параллельным прямым. В этом случае молекула M, действуя на элемент AB, должна стремиться перемещать его по прямой oR, проходящей через середину o элемента AB перпендикулярно к плоскости MAB, а встречное действие, которое оказывал бы элемент AB на молекулу M, должно было бы перенести ее с той же силой в направлении MS, параллельном oR.

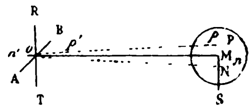


Рис. 40.

Из этой своеобразной гипотезы, если бы она оказалась правильной, следовало бы, что математически невозможно свести когда-либо явления, вызываемые взаимодействием проводника и магнита, к силам, которые, как и все известные нам силы, существующие в природе, подчинены одному закону — действие и противодействие равны по величине и направлены противоположно друг другу по прямым, соединяющим попарно точки, между которыми они осуществляются. Действительно, если это условие выполнено для каких-либо элементарных сил, то очевидно, что на основании самого принципа сложения сил оно будет выполнено и для их равнодействующих. Поэтому физики, которые приняли эту гипотезу, вынуждены допустить действительно элементарную силу, составленную из двух равных сил, направленных по двум параллельным прямым в противоположных направлениях и образующих таким образом первичную пару. Такая сила не может быть сведена к силам, для которых действие и противодействие направлены противоположно друг другу по одной прямой. Я всегда считал, что эта гипотеза первичных пар полностью противоречит основным законам механики, к которым надо причислить, согласно Ньютону, равенство действия и противодействия, причем они направлены в противоположные стороны по одной прямой. И я свел те явления, которые наблюдаются при действии проводника и магнита друг на друга, как и прочие электродинамические явления, к взаимодействию между двумя элементами электрических токов, в результате которого получаются две силы, равные по величине и противоположно направленные по прямой, соединяющей эти элементы. Таким образом, оправдывается первое свойство, характеризующее все наблюдаемые в природе силы. Другое отличительное свойство состоит в том, что силы, рассматриваемые как действительно элементарные, должны быть, кроме того, только функциями расстояний между точками, между которыми они действуют. В этом отношении, как уже было указано мною ранее, ничто не препятствует свести впоследствии силу, величину которой я определил точными опытами, к элементарным силам, удовлетворяющим и этому условию, если только при вычислениях будет принято в расчет непрерывное движение в проводниках с током электрических молекул, являющихся носителями этой силы. Но чтобы учесть эти движения, необходимо ввести в выражение обусловленного ими действия между двумя элементами, помимо расстояния, еще и углы, определяющие направления, по которым движутся эти электрические молекулы, и зависящие от самих направлений элементов. В мою формулу входят наряду с расстояниями только эти углы или, что то же, дифференциалы расстояния между двумя элементами, рассматриваемого как функция дуг, образуемых проводниками. Не следует забывать, что, согласно моей точке зрения на вещи, которую я считаю единственно возможной, две равные и противоположно направленные силы oR и oT являются равнодействующими бесконечного числа сил, попарно равных и противоположно направленных; oR — равнодействующая сил on', op' и т. д., которые все проходят через точку o, так что и oR через нее проходит, а oT — равнодействующая сил Nn, Pp и т. д., с которыми элемент AB действует на точки Np и т. д., неизменно связанные с концом M электродинамического соленоида, заменяющего в моем предположении так называемую магнитную молекулу. Эти точки весьма близки к точке M, если соленоид весьма мал, но никогда с нею не совпадает, а потому их равнодействующая oT проходит не через точку M, а через точку o, к которой направлены все Nn, Pp и т. д.

Из всего сказанного ясно, что если мы сохраним одну и ту же величину и одно и то же, перпендикулярное к плоскости MAB, направление для двух равных сил, возбуждаемых при взаимодействии тока и магнита, причем одна действует на проводник, частью которого является элемент AB, другая — на магнит, которому принадлежит точка M, то относительно точки притяжения этих сил можно сделать три предположения. Первое из них — что обе силы проходят через точку M. Второе именно то, которое вытекает из моей формулы, что обе силы проходят через середину o элемента. Третье — что рассматриваемые силы будут oR и MS и та, которая действует на элемент, приложена в точке o, вторая — в точке M. Все эти три гипотезы находятся в полном согласии: 1) в отношении величины этих сил, которые при любом из трех предположений обратно пропорциональны квадрату расстояния Mo и прямо пропорциональны синусу угла MoB между прямой, измеряющей это расстояние, и элементом AB; 2) в отношении направления этих сил, которые всегда перпендикулярны к плоскости MAB, проходящей через молекулу и через направление элемента. Что же касается точек приложения этих сил, то в двух первых гипотезах они расположены различно для каждой из двух сил. Первая и третья гипотезы совпадают только в отношении сил, действующих на магнит, а вторая и третья — только в отношении сил, действующих на проводник.

Вследствие совпадения величин и направлений сил во всех трех гипотезах, составляющие их равнодействующих, параллельные трем любым осям, будут одни и те же. Моменты вращения, которые, кроме того, зависят от точек приложения этих сил, будут для сил, стремящихся перемещать магнит, вообще говоря, одинаковы только для первой и третьей гипотезы, а для сил, действующих на проводник, только для второй и третьей.

Выше было показано, что в случае, когда дело идет о действии некоторой части проводника, образующей замкнутый контур, значения моментов будут одинаковы независимо от того, взята ли для каждого элемента точка приложения сил в *o* или в M. Таким образом, в этом случае для всех трех гипотез будут одинаковы и значения моментов [64].

Движение тела, все части которого неизменно связаны между собой, может зависеть только от составляющих, параллельных трем произвольно взятым осям, и от трех моментов вращения относительно этих осей. Отсюда следует, что все эти гипотезы полностью совпадают в отношении движения, возбужденного в магните или в проводнике, если последний образует твердый и замкнутый контур. Вот почему невозможность неограниченно ускоряющегося движения представляет собою необходимое следствие первой гипотезы, поскольку элементарные силы являются там только функциями расстояний точек, между которыми она действует. Она будет, однако, следствием двух других гипотез только в том случае, если проводник образует твердый и замкнутый контур.

Легко, впрочем, видеть, что полученное таким образом доказательство невозможности неограниченно ускоряющегося движения под влиянием взаимодействия твердого и замкнутого электрического контура и магнита является не только необходимым следствием моей теории. Если принять теорию первичных пар, то же следствие вытекает из одного только значения, данного г. Био для силы, перпендикулярной плоскости MAB, как я это доказал непосредственно со всеми желаемыми подробностями в письме, написанном мною на эту тему г. доктору Герарди [65]. Поэтому если бы удалось получить ускоренное движение в результате действия на магнит проводника, образующего твердый и замкнутый контур, то оказалась бы неправильной не только моя формула, но и формула, данная г. Био, хотя она подтверждена всеми наблюдениями, произведенными с тех пор, и не возбуждала сомнений ни в ком из физиков, допускающих гипотезу первичных пар [66].

Если часть вольтаического контура предполагается подвижной, то можно представить себе три случая: случай, когда эта часть образует почти замкнутый контур;[1] случай, когда она может только вращаться вокруг некоторой оси, и тогда оба ее конца лежат на этой оси; случай, когда подвижная часть не образует замкнутого контура и когда, по крайней мере, один ее конец проходит при движении известное пространство. Этот последний случай относится и к подвижному участку, образованному жидким проводником.

Мы видели, что в первом из этих трех случаев движение, в которое приходит подвижная часть под действием магнита, тожественно для всех трех гипотез и не может неопределенно ускоряться, а лишь стремится привести подвижную

[1] Контур, образованный подвижной частью проводника, никогда не является замкнутым в строгом смысле, ибо необходимо, чтобы каждый из его концов в отдельности соединялся с батареей. Но нетрудно сделать разделяющий их промежуток столь малым, что контур можно рассматривать как строго замкнутый.

часть в определенное положение, где она останавливается в равновесии, совершив некоторые колебания около этого положения в силу приобретенной ею скорости.

То же имеет место и для второго случая, который лишь по видимости отличается от первого. Действительно, если бы мы прибавили еще ток по оси, который проходил бы через два конца подвижной части, мы получили бы замкнутый контур. При этом момент вращения вокруг этой оси нисколько не изменился бы, поскольку моменты сил, действующих на этот добавленный ток, очевидно, были бы равны нулю. Отсюда следует, что движение подвижной части было бы тожественно с тем, какое имеет место для полученного таким образом замкнутого контура.

Но когда подвижная часть не образует замкнутого контура и когда ее концы не лежат на оси, вокруг которой она принуждена вращаться, тогда моменты, вызываемые действием или магнитной молекулы, или же конца неограниченного соленоида, уже не будут те же, что и во второй и третьей гипотезах, и будут иметь различные значения при первой гипотезе. Если возьмем за ось x прямую, с которой, по нашему предположению, подвижная часть связана так, что может вращаться только вокруг этой прямой, и если сохраним обозначения, принятые нами в предыдущих вычислениях, мы заключим отсюда, что значение момента вращения, создаваемого силами, которые действуют на подвижную часть, должно быть

$$\rho \int \frac{z'v^2 d\chi - y'w^2 d\psi}{r^3}$$

по первой гипотезе и

$$\rho \int \frac{z'v^2 d\chi - y'w^2 d\psi}{r^3} + \rho \left(\frac{x_2 - x'}{r_2} - \frac{x_1 - x'}{r_1} \right),$$

по двум остальным.

Именно благодаря этой разнице в значениях момента вращения представляется возможным доказать на опыте, что первая гипотеза противоречит фактам. Ибо если рассматривать магнит, как если бы он сводился к двум магнитным молекулам бесконечно большой силы, помещенным в его полюсах, и, придав вертикальное положение соединяющей их прямой, заставить часть проводника вращаться вокруг этой прямой, взятой за ось x, то два момента вращения относительно двух полюсов получились бы из предыдущей формулы путем замены x', y', z' через x'_1, y'_1, z'_1 для одного полюса и через x'_2, y'_2, z'_2 — для другого; при этом необходимо изменить знак у одного из моментов, например у первого, ибо оба полюса необходимо будут разноименные: один — южный, другой — северный.

Когда оба полюса, как мы предположили здесь, расположены на оси x, имеем $y'_1 = 0$, $y'_2 = 0$, $z'_1 = 0$, $z'_2 = 0$, и два момента вращения относительно оси x в первой гипотезе обратятся в нуль; это было легко предвидеть, ибо по этой гипотезе направления всех сил, приложенных к подвижному проводнику, проходят через один из полюсов и пересекаются в нем с неподвижной осью, вследствие чего момент этих сил необходимо обращается в нуль.

Наоборот, при двух других гипотезах, согласно которым направления сил проходят через середины элементов, обращаются в нуль только те части моментов, которые равны моментам в первой гипотезе; и если, опустив их, мы соберем члены, которые останутся от каждого из моментов, то получим

$$\rho\left(\frac{x_2 - x'_2}{r_{2,2}} - \frac{x_1 - x'_2}{r_{1,2}} - \frac{x_2 - x'_1}{r_{2,1}} + \frac{x_1 - x'_1}{r_{1,1}}\right),$$

где $r_{2,2}$, $r_{1,2}$, $r_{2,1}$, $r_{1,1}$ означают расстояния между точками, абсциссы которых соответственно равны x_2, x'_2; x_1, x'_2; x_2, x'_1; x_1, x'_1. Легко видеть, что четыре члена, заключенные здесь в скобки, представляют собою как раз косинусы углов, которые образует с осью x прямая, измеряющая расстояния

$r_{2,2}$, $r_{1,2}$, $r_{2,1}$, $r_{1,1}$. Благодаря этому значение найденного нами момента, обусловленного действием двух полюсов на подвижной проводник, оказывается тожественным с тем значением, который мы получили для момента, обусловленного действием на тот же проводник со стороны соленоида, концы которого совпадали бы с этими полюсами, причем проходящие в нем токи должны были бы иметь интенсивность i, а соответственные расстояния должны были бы быть таковы, чтобы соблюдалось равенство

$$\frac{\lambda i i'}{2g} = \rho,$$

где i' — сила тока в проводнике.

Поскольку для первой гипотезы момент вращения всегда равен нулю, подвижная часть вольтаического контура никогда не могла бы вращаться под влиянием магнита, расположенного так, как нами указано, вокруг этого магнита. Согласно двум другим гипотезам она, наоборот, должна совершать это вращение под действием момента вращения, которое мы только что вычислили и которое одинаково для обеих этих гипотез. Г. Фарадей, который первый осуществил это движение — необходимое следствие установленных мною законов о взаимодействии вольтаических проводников и моей точки зрения на магниты как на совокупность электрических токов, — доказал тем самым, что направление действия, оказываемого полюсом магнита на элемент проводника, в самом деле проходит через середину элемента, а не через полюс магнита. Это как раз находится в согласии с тем объяснением, которое я дал данному действию. Таким образом, при объяснении всей совокупности электродинамических явлений нельзя заменять действие, оказываемое токами в проводниках и выражаемое моей формулой, действием северных и южных магнитных молекул, распределенных, как было мною сказано выше, по двум весьма близким поверхностям, ограниченным этими проводниками. Такая замена допустима только тогда, когда дело идет о действии жестких и замкнутых контуров, и главная ее польза — в том, что ею доказывается невозможность неограниченно ускоряющегося движения ни под взаимным действием двух твердых замкнутых проводников, ни под действием такого же проводника и магнита.

Если магнит является подвижным, нужно также различать три случая: случай, когда все части вольтаического контура, действующие на этот магнит, неподвижны; случай, когда некоторые части этого контура подвижны, но без связи с магнитом, причем эти части могут быть образованы металлической проволокой или проводящей жидкостью; наконец, случай, когда часть тока проходит через магнит или через часть проводника, связанную с магнитом.

В первом случае полный контур, состоящий из проводников и батареи, по необходимости является замкнутым. Поскольку все его части неподвижны, три суммы моментов, как и суммы равнодействующих сил, действующих на точки магнита, будут тожественны во всех трех гипотезах, будем ли мы рассматривать эти точки как молекулы южной и северной жидкостей или как концы электродинамических соленоидов. Поэтому и сообщенные магниту движения, и все обстоятельства, связанные с этими движениями, будут в точности одни и те же, какую бы гипотезу мы ни приняли. Это, например, имеет место для продолжительности колебаний, совершаемых магнитом под влиянием замкнутого и неподвижного контура. Последние опыты г. Био, из которых следует, что сила, производящая указанные колебания, пропорциональна тангенсу четвертой части угла между двумя ветвями взятого им проводника, именно поэтому согласуются одинаково хорошо как с моей теорией, из которой следует, что направления сил, действующих на магнит, проходят через середины элементов проводника, так и с принятой им гипотезой, что эти направления проходят через точки магнита, в которых он помещает магнитные молекулы.

Тожественность следствий, вытекающих в этом случае из трех гипотез, показывает в то же время, что неограниченное ускорение движения магнита невозможно и что действие вольтаического контура лишь стремится привести его к определенному положению равновесия.

На первый взгляд кажется, что такая же невозможность должна существовать и для второго случая, но это противоречит опыту, по крайней мере, тогда, когда часть контура образована жидкостью. Действительно, очевидно, что подвижность некоторой части проводника не препятствует ей действовать в каждый данный момент так, как если бы она была неподвижна в том положении, какое она в этот момент занимает. И трудно усмотреть сразу, каким образом такая подвижность может изменить условия движения магнита в такой мере, чтобы он стал способным приобретать неограниченное ускорение, невозможность которого при неподвижности всех частей вольтаического контура уже доказана. Но рассмотрим внимательно, что должно произойти согласно законам взаимодействия проводника и магнита в том случае, когда этот проводник представляет собою жидкость, когда намагниченный вертикальный цилиндр плавает в этой жидкости и когда поверхность цилиндра покрыта изолирующим лаком, чтобы ток не мог через нее проходить. Тогда имеем условия третьего случая, и становится возможным отдать себе отчет, каким образом вследствие подвижности жидкой части вольтаического контура плавающий магнит приобретает бесконечно ускоряющееся движение. Для этого нужно только применить к данному случаю объяснение такого же движения, которое я дал в „Annales de chimie et de physique“, т. XX, стр. 68—70, в предположении, что магнит не покрыт лаком и токи жидкости, в которой он плавает, свободно через него проходят.

В самом деле, это объяснение основано на том, что части токов, проходящие внутри магнита, не могут производить на него никакого действия, а части проходящие в жидкости вне магнита, действуют все заодно, ускоряя его движение всегда в одном направлении. Отсюда, очевидно, следует, что все, что происходит в этом случае, должно иметь место и тогда, когда покрывающее магнит изолирующее вещество уничтожает как раз те части токов, которые не оказывали никакого действия. Части же, находящися вне магнита и стремящиеся ускорить его движение в одном и том же направлении, продолжают существовать и действовать, как и прежде. Чтобы можно было явственно убедиться в том, что действительно в указанном мною объяснении ничего не нужно изменять, я напомню здесь это объяснение в применении к случаю, когда магнит покрыт изолирующим веществом. Для простоты я предположу в объяснении, что мы заменяем магнит электродинамическим соленоидом, концы которого находятся в полюсах магнита, хотя согласно моей теории мы должны были бы его рассматривать как пучок соленоидов. Упомянутое предположение не имеет никакого влияния на результаты, ибо токи, проходящие в ртути, действуют на все соленоиды пучка одинаковым образом и в одинаковом направлении и потому сообщают ему то же движение, какое сообщили бы одному из этих соленоидов. Ничто не препятствует предположить, что электрические токи в этом последнем достаточно сильны, чтобы его движение было практически то же, что и движение пучка.

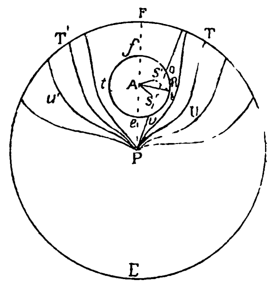


Рис. 41.

Итак, пусть ETFT′ (рис. 41 [67]) — горизонтальное сечение стеклянного сосуда, наполненного ртутью, которая соприкасается с медным кругом на его внутренней стенке, причем этот круг соединен с одним из реофоров, например отрицательным, в то время как положительный реофор погружен в P. Тогда в ртути возбуждаются токи, идущие от центра P круга ETFT′ к его окружности.

Представим горизонтальный разрез соленоида маленьким кругом $etft'$, центр которого находится в A, а окружность $etft'$ изображает один из электрических токов, из которых состоит соленоид. Если предположим, что этот ток идет в направлении $etft'$, то он будет притягиваться теми токами ртути, которые, как PUT, находятся на чертеже вправо от $etft'$, поскольку полуокружность etf, где ток идет в том же направлении, ближе к нему, чем $ft'e$, где ток идет в обратном направлении. Пусть AS — притяжение, равное разности сил, с которыми токи PUT действуют на каждую из полуокружностей. Оно необходимо проходит через центр A, ибо обусловлено действием, оказываемым этими токами на все элементы окружности $etft'$, которые к нему перпендикулярны и потому направлены по радиусам этой окружности. Наоборот, тот же ток $etft'$ соленоида отталкивается теми токами, которые, как PU′T′, изображены на чертеже влево от $etft'$, ибо в ближайшей к PU′T′ полуокружности они идут в обратном направлении. Пусть AS′ — отталкивание, обусловленное разностью действий, которые токи PU′T′ оказывают на ту и другую полуокружность. Оно по величине будет равно AS и будет составлять с радиусом PAF угол FAS′ = PAS, ибо по обе стороны этого радиуса все части соответственно равны друг другу. Поэтому равнодействующая AR этих двух сил будет к нему перпендикулярна, и так как она, как и две ее составляющие AS, AS′, будет проходить через центр A, соленоид не получит никакого стремления вращаться вокруг своей оси. Это и наблюдается в действительности для плавающего магнита, который мы представили этим соленоидом. Но он будет в каждый момент стремиться двигаться по перпендикуляру AR к радиусу PAF, а так как опыт производится с плавающим магнитом, то сопротивление ртути уничтожает в каждый момент приобретенную им скорость, и мы видим, как магнит описывает кривую, нормальную ко всем прямым, проходящим, подобно PAF, через точку P, т. е. окружность, центром которой является эта точка.

Описанный замечательный опыт, которым мы обязаны Фарадею, был иначе истолкован физиками, не принимающими моей теории. Они приписывали движение магнита реофору, погруженному в ртуть в точке P, которому обычно придается направление, перпендикулярное к поверхности ртути. Нужно признать, что в данном случае ток, проходящий по этому реофору, стремится перемещать магнит в том направлении, в котором он движется в действительности. При помощи сравнительных опытов легко, однако, убедиться, что сила этого тока слишком мала для того, чтобы он мог преодолеть сопротивление ртути и вызвать, вопреки этому сопротивлению, наблюдаемые движения. Я сразу же был удивлен тем, что эти физики не отдают себе отчета в действии, которое, согласно их же теории, должны оказывать токи в ртути, но мое удивление еще возросло, когда я нашел причину этого в явно неправильном утверждении, выраженном в уже упомянутой работе[1] следующими словами: „Поэтому действие в поперечном направлении этой фиктивной проволоки (электрического тока, проходящего в ртути) на южный магнетизм в A (рис. 42[68]) будет все время стремиться переместить A справа налево для наблюдателя, голова которого находится в C′, а ноги в Z. Обратное действие будет оказываться на полюс B, притом с той же силой, если горизонтальная прямая C′FF′Z будет находиться точно на высоте центра бруска. Таким образом, в результате не получится никакого поступательного движения. Итак, вращение бруска AB будет определяться только силой, зависящей от C′F′. Как мог автор не заметить, что действия, оказываемые на два полюса бруска AB *фиктивной проволокой*, расположенной так, как он описывает, стремятся перемещать его в одном и том же направлении и что они складываются, а не уничтожают друг друга, ибо полюсы разноименны, а потому находятся по разные стороны проволоки.

[1] „Rrécis élémentaire de physique expérimentale“. Изд. 3-е, т. II, стр. 753.

По поводу этого важно отметить, что если бы участки токов, составляющие часть токов в ртути, могли находиться внутри маленького круга $etft'$ (рис. 41) и на него действовать, они стремились бы вращать его вокруг точки P в обратном направлении; при этом сила была бы уже не разностью действий на обе полуокружности etf, $ft'e$, а их суммой. Действительно, если uo представляет одну из таких частей, то очевидно, что она будет притягивать дугу uto и отталкивать дугу $ot'u$, откуда получатся две силы, которые совместно

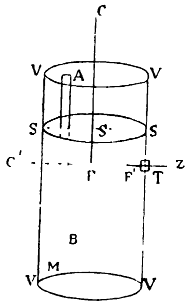


Рис. 42.

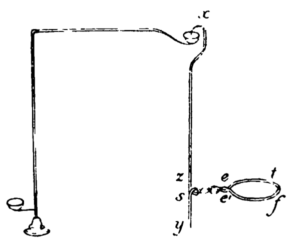


Рис. 43.

будут стремиться переместить $etft'$ в направлении AZ, обратном AR. Это обстоятельство, само собою разумеется, не может иметь места для плавающего магнита, который занимает всю площадь внутри маленького круга $etft'$, ибо, будучи покрыт изолирующим веществом, он уничтожает существующие там токи, если же он не изолирован, то действие тех частей этих последних, которые находятся внутри круга, уничтожаются равным и противоположным противодействием, поскольку эти части токов проходят в частицах магнита, неизменно связанных с теми, на которые они действуют. Таким образом, в обоих случаях остаются лишь силы, зависящие от токов в ртути, которые все стремятся переместить магнит по AR. Единственно поэтому он и вращается в данном направлении вокруг точки P, как можно убедиться, заменив магнит подвижным проводником $xzetfe'sy$ (рис. 43 [69]), состоящим из достаточно тонкой, обмотанной шелком медной проволоки. Ее средняя часть $etfe'$ согнута в виде круга, а две крайние части, скрученные вместе на участке от e до z, проходят следующим образом: одна ezx входит в x в чашечку со ртутью, соединенную с одним из реофоров, а другая $e'sy$ погружается в P (рис. 41) в ртуть, соединенную, как мы упоминали, с одним из реофоров. Такой подвижной проводник подвешивается затем так, чтобы круг $etfe'$ (рис. 43) находился весьма близко к поверхности ртути, и мы видим, что он остается в покое вследствие равновесия которое устанавливается между силами, возбуждаемыми частями токов, находящимися в круге $etfe'$, и силами, возбуждаемыми теми токами и частями токов, которые лежат вне этого круга. Но как только мы уничтожим части токов, лежащие в пространстве $etft'$ (рис. 41), погрузив в ртуть под кругом $etft'$ (рис. 43) цилиндр из изолирующего вещества с тем же основанием, чтобы создать аналогию с плавающим магнитом, мы увидим, что проводник, как и этот магнит, будет перемещаться в направлении AR. Если поместить цилиндр из изолирующего вещества в том месте, где ранее находился круг $etft'$, то он не будет вращаться безостановочно, как магнит, а после некоторых колебаний остановится в положении равновесия. Эта разница зависит от того, что за плавающим магнитом смыкается ртуть, заполняя пространство, занятое им прежде, и таким образом он постепенно вытесняет ртуть из различных мест, в которые передвигается. Изменение же положения части ртути вызывает изменения в положении электрических токов, и потому, хотя полный вольтаический контур и замкнут, непрерывное движение магнита, невозможное при действии твердого замкнутого контура, оказывается возможным в данном случае, когда формы замкнутого контура изменяются вследствие самого движения магнита. Можно воспроизвести такое же движение, пользуясь вместо магнита описанным нами подвижным проводником; мы установили, что он движется только в том случае, когда действием цилиндра из изолирующего вещества уничтожается часть токов внутри маленького круга $etft'$, и если оставить его на том же месте, он устанавливается в положении равновесия после некоторых колебаний около этого положения. Поэтому, чтобы получить движение проводника, нужно создать условия, аналогичные тем, которые существуют для плавающего магнита, заставляя скользить цилиндр из изолирующего вещества по дну сосуда так, чтобы он все время находился под кругом $etft'$ (рис. 43) и чтобы его центр всегда находился на одной вертикали с центром круга. Тогда, действительно, подвижной проводник, как ранее магнит, будет непрерывно вращаться вокруг точки P (рис. 41).

Вообще, если мы хотим составить себе правильное представление о причинах различных движений магнитов, имея в виду анализировать их на опыте, без помощи вычислений, то это лучше всего достигается заменой магнитов подвижными проводниками, согнутыми в виде круга. Действительно, такая замена дает возможность различным образом видоизменять условия опыта, что для магнитов обычно неосуществимо, а между тем иначе почти невозможно разъяснить все темные места, которые встречаются при объяснении столь сложных явлений. Так, в только что рассмотренном нами случае было бы невозможно проверить при помощи магнита результат теории, что магнит не должен вращаться вокруг точки P, если через него могут проходить части токов ртути и несмотря на это действовать на него, сохраняя ту же величину и направление, как и в ртути, если удалить из нее магнит. Между тем этот результат легко проверить, заменив магнит, как сказано выше, изображенным здесь подвижным проводником (рис. 43).

Тожественность действия, которая всегда наблюдается при движениях подвижного проводника и магнита, если только они находятся в одинаковых условиях, не позволяет, после осуществления предыдущего опыта, сомневаться в том, что и магнит остался бы неподвижным, если бы через него могли проходить части токов, заключенные в круге *etfe'*, причем нужно, чтобы они могли на него действовать. Напротив, мы видим, что когда он не покрыт изолирующим веществом и токи проходят через него свободно, он движется совершенно так же, как если бы был изолирован и никакие части токов не могли проникнуть внутрь магнита. Это дает нам непосредственное доказательство принципа, на котором основана часть приведенных мною объяснений, а именно: что части токов, проходящие через магнит, никаким образом на него не действуют, ибо те силы, которые возникли бы от действия этих токов на токи, свойственные магниту, или на так называемые магнитные молекулы, были бы силами, действующими между частицами одного и того же твердого тела, и по необходимости уничтожались бы равной и противоположной реакцией.

Я сознаю, что это экспериментальное доказательство принципа, который является лишь необходимым следствием основных законов механики, представляется мне совершенно бесполезным, каким оно должно бы представляться и всем физикам, которые считают этот принцип одной из основ науки. Я и не упоминал бы о нем, если бы не было высказано предположение, что взаимодействие между элементом проводника и магнитной молекулой выражается первичной парой, состоящей из двух сил, равных по величине и направленных параллельно друг другу, но не прямо противоположных, и что вследствие этого часть тока, проходящего в магните, может привести его в движение. Это предположение противоречит принципу, о котором мы только что упомянули, и опровергается предыдущим опытом. Согласно последнему, части токов, проходящих через магнит, когда он не окружен изолирующей оболочкой, не могут на него действовать, ибо движение, происходящее в данном случае, не изменяется, если воспрепятствовать токам проходить через магнит, заключив его в изолирующую оболочку.

Именно из этого принципа и надлежит исходить, дабы исследовать, какие явления возникнут для подвижного магнита под влиянием вольтаического тока в третьем случае, который нам еще осталось рассмотреть, а также в случае, когда часть тока проходит через магнит или через часть проводника, неизменно с ним связанную. Мы видели, что если дело идет о вращательном движении магнита вокруг проводника, то движение должно оставаться и остается одним и тем же, проходит ли ток через магнит или не проходит. Но дело обстоит иначе, когда мы рассматриваем непрерывное вращательное движение магнита вокруг прямой, соединяющей два его полюса.

Я показал как теоретически, так и посредством экспериментов, которые я видоизменял различным образом и которые всегда подтверждали теорию, что возможность или невозможность этого движения зависит единственно от того, будет ли часть полного вольтаического контура отделена от магнита во всех своих точках, или она будет проходить либо в этот магнит, либо в часть проводника, неизменно с ним связанную. Действительно, в первом случае совокупность батареи и проводников образует всегда замкнутый контур, все части которого действуют на магнит одинаково, будут ли они неподвижными или подвижными. В последнем случае они в каждый момент вызывают те же силы, как если бы они были закреплены в том же положении, в каком находятся в данный момент. Но мы доказали, сначала синтетически, при помощи соображений, основанных на рис. 30 и 31, а затем при помощи непосредственно вычисленных моментов вращения, что замкнутый контур не может сообщить магниту непрерывного движения вокруг прямой, соединяющей два его полюса. Это невозможно независимо от того, рассматривать ли полюсы согласно моей теории, как два конца эквивалентного магниту соленоида, или согласно гипотезе двух жидкостей, как две магнитные молекулы, интенсивность которых достаточно велика, чтобы оказываемые ими действия остались без изменения при замене ими всех тех молекул, из которых по этой гипотезе состоит магнит. Таким образом, полностью доказана невозможность вращения магнита вокруг его оси, когда полный замкнутый контур всюду от него отделен. Притом это доказано не только путем применения моей формулы к токам соленоида, заменяющего магнит, но и на основании рассмотрения силы, которая действовала бы между элементом проводника и магнитной молекулой перпендикулярно плоскости, проходящей через эту молекулу и через направление элемента. Величина этой силы обратно пропорциональна квадрату расстояния и прямо пропорциональна синусу угла между прямой, измеряющей это расстояние, и направлением элемента. Но если в этом последнем случае предположить, что сила проходит через середину элемента, будет ли то действие на элемент или противодействие на магнитную молекулу, как это, по моей теории, должно быть для соленоида, то такое движение становится возможным, если часть тока проходит через магнит или через неизменно связанную с ним часть проводника. В самом деле, все действия, оказываемые этим участком на частицы, будут уничтожаться равными и встречными противодействиями, оказываемыми на него теми же частицами. Поэтому сохраняются только действия, вызванные остатком полного контура, который уже не является замкнутым и может поэтому вызвать движение магнита.

Чтобы лучше понять все, что относится к этому роду движения, представим себе (рис. 13), стержень TVUS поддерживающий чашечку S, в которую погружено острие *o* подвижного проводника *oab*. Стержень изогнут в точках V и U, как показано на чертеже, причем часть VU прямой TS, принятой за ось вращения, остается свободной. К находящемуся на стержне в точке U крючку K подвешивается на очень тонкой нити ZK цилиндрический магнит GH. Подвижной проводник *oab*, поддерживаемый противовесом *c* так, как это показано на чертеже, заканчивается в *b* медной пластинкой *bef*, погруженной в подкисленную воду, налитую в сосуд MN. Таким образом проводник сообщается с реофором *p*P, погруженным в ртуть чашечки P, тогда как другой реофор *r*R сообщается со стержнем TVUS через посредство ртути, налитой в чашечку R, а батарея *pr* замыкает весь контур.

В момент, когда в приборе устанавливается ток, мы видим, что подвижной проводник начинает вращаться вокруг прямой TS. Но магнит лишь приходит к некоторому определенному положению, вокруг которого он колеблется известное время, а затем остается в этом положении неподвижно. Вследствие принципа равенства действия и противодействия, осуществляющегося как в отношении моментов вращения вокруг одной и той же оси, так и в отношении сил, получается следующее. Если мы обозначим через M момент вращения, сообщаемого действием магнита подвижному проводнику *oab*, то реакция этого последнего будет стремиться вращать магнит вокруг его оси с моментом минус M, равным моменту M, но действующим в обратном направлении.

Причиной неподвижности магнита является, очевидно, то обстоятельство, что когда на магнит действует подвижной проводник *oab*, остальная часть полного контура *b*MP*pr*RTS также должна на него действовать. Момент действия этой последней на магнит, сложенный с моментом, зависящим от *oab*, составляет момент замкнутого контура *oab*MP*pr*RTS, равный нулю. Отсюда следует, что момент части *b*MP*pr*RTS есть M, равный и противоположный моменту минус M.

Но если связать магнит GH с подвижным проводником *oab*, то получается система неизменной формы, в которой действие и противодействие, оказываемые ими друг на друга, взаимно уничтожаются. Эта система, очевидно, оставалась бы неподвижной, если бы часть *b*MP*pr*RTS не действовала, как и раньше, на магнит, заставляя его вращаться под влиянием момента M. Вследствие возникновения этого момента, магнит и подвижной проводник, связанные в одну систему неизменной формы, вращаются вокруг прямой TS. Этот момент, как мы видели, имеет ту же величину и тот же знак, что и момент, сообщаемый магнитом проводнику oab, когда этот проводник был от него отделен и вращался самостоятельно. Поэтому оба эти движения будут обязательно происходить в одну и ту же сторону, но со скоростями, обратно пропорциональными моменту инерции проводника и сумме этого момента инерции и момента инерции магнита.

В предыдущих рассуждениях я не учитывал действия, оказываемого частью $b\mathrm{MP}pr\mathrm{RTS}$ полного контура на подвижной проводник oab ни в том случае, когда этот проводник разобщен с магнитом, ни в другом случае, когда он с ним соединен. Я поступал так не только потому, что это действие весьма мало в сравнении с действием, производимым магнитом, но и потому, что оно стремится лишь перенести подвижной проводник в положение, определяемое взаимным отталкиванием двух частей общего контура, и, следовательно, в обоих случаях влияет на вращательное движение проводника oab лишь в том отношении, что несколько изменяет его скорость. Без этого она была бы постоянной.

Чтобы иметь возможность легко то соединять, то разъединять магнит с подвижным проводником, не прерывая опыта, рекомендуется прикрепить к крючку Z, на котором подвешен магнит на нити ZK, кусочек медной проволоки ZX, оканчивающийся в X вилкой, две ветви которой Xx, Xy охватывают подвижной проводник oab так, что он оказывается сжатым между ними, когда стержень ZX сгибается соответствующим образом. Если перегнуть его в обратную сторону, он приходит в положение, изображенное на рисунке, и проводник освобождается.

Я подробно остановился на этом опыте, потому что если не анализировать его, как это сделал я, то может показаться, что он, более чем всякий другой, подтверждает гипотезу первичных пар. Действительно, в этой гипотезе допускается, как предполагаю и *я*, что силы, с которыми магнит GH действует на элементы подвижного проводника *oab*, проходят через этот элемент, и если принять их все лежащими в вертикальной плоскости TS*ab*, проходящей через прямую TS, то и силы будут нормальны к этой плоскости и будут поэтому стремиться вращать *oab* все время в одном и том же направлении вокруг TS. Эти силы, согласно закону, предложенному г. Био, будут по величине, по направлению и по своим точкам приложения совершенно теми же, как и силы, определяемые моей формулой. Поэтому они дают тот же момент вращения M, в силу которого возникает движение проводника *oab*, если он свободен. Но, по мнению физиков, придерживающихся гипотезы, о которой идет речь, силы, обусловленные противодействием элементов проводника на магнит, будут теми же самыми лишь постольку, поскольку будет одинакова их величина, и направление будет также перпендикулярно к плоскости TS*ab*. Эти физики считают, что данные силы приложены к магнитным молекулам или, что то же, к двум полюсам магнита GH, лежащим на прямой TS. Тем самым моменты вращения указанных сил относительно этой прямой равны нулю. Физики приписывают этой причине неподвижность магнита в том случае, когда он не связан ни с какой частью вольтаического контура. Но для того чтобы объяснить вращение магнита в случае, когда он присоединен к подвижному проводнику *oab* посредством стержня ZX, приходится допустить, что соединение этих двух тел в систему неизменной формы не препятствует магниту все время сообщать подвижному проводнику момент вращения M. При этом предполагается, что проводник не оказывает на магнит противодействия, которое препятствовало бы движению системы, так что она должна вращаться в ту же сторону, в какую вращался подвижной проводник прежде, чем он был неизменно связан с магнитом, но только с меньшей скоростью. Эта скорость обратно пропорциональна отношению моментов инерции отдельного проводника и проводника, соединенного с магнитом.

Таким образом, мы приходим в этой гипотезе к тем же результатам, как и в том случае, если предположим, что действие направлено противоположно противодействию по той же прямой, и примем в расчет действие, оказываемое на магнит оставшейся частью $bMPprRTS$ вольтаического контура. Из всего сказанного в этой работе следует, что найденная нами в рассмотренном случае тожественность действий сил и их величин, как для моей точки зрения на явления, так и для гипотезы первичной пары, является необходимым следствием того обстоятельства, что действующий на магнит вольтаический контур всегда замкнут. А когда дело идет о замкнутом контуре, то не только три параллельные трем осям силы, вызываемые действием такого контура на магнит, но и три момента вращения вокруг этих трех осей будут одни и те же как при том, так и при другом способе объяснения явлений. Поэтому не будет иным и движение магнита, которое может зависеть только от этих шести величин.

Следовательно, та же тожественность будет наблюдаться и при всех опытах этого рода, и потому поставленный вопрос не может быть разрешен ни путем опытов, ни путем измерения сил, возникающих между проводниками и магнитами. Его разрешения следует искать на основании:

1) необходимости существования того принципа, что взаимодействие различных частей системы неизменной формы ни в каком случае не может сообщить этой системе какого бы то ни было движения, — принципа, который является следствием самого нашего представления о силах и об инерции материи;

2) того обстоятельства, что гипотеза первичной пары была придумана предложившими ее физиками только затем, чтобы объяснить явления, из коих они исходили и которые они не сочли возможным объяснить иным образом, потому

что не учитывали действия, оказываемого на магнит всем вольтаическим контуром в целом и не обратили внимания на то, что этот контур всегда замкнут. Притом они не вывели, как это сделал я, того неизбежного следствия из закона, предложенного г. Био, что для замкнутого контура силы и моменты тожественно одинаковы, будем ли мы предполагать, что направления сил, действующих на магнит, проходят через магнитные молекулы или через середины элементов проводников;

3) того обстоятельства, что, по нашему предположению, явления, которые мы исследуем, возникают в конечном счете под влиянием сил, вызываемых молекулами двух электрических жидкостей и выражающихся в функции расстояний. Мы предполагаем, что те же силы могут быть приписаны воздействию двух магнитных жидкостей, если рассматривать их как причину наблюдаемых в магнитах явлений, имеющих, по-моему, чисто электрическое происхождение. Легко себе представить, что при движении этих молекул в проводниках между элементами последних возбуждаются силы, зависящие не только от расстояний между этими элементами, но и от направлений, в которых происходит в них движение электрических молекул. Эти силы будут совершенно такими же, как дает и моя формула, если только они удовлетворяют условию, что действие и противодействие направлены по одной и той же прямой. Наоборот, получилось бы противоречие, если бы мы предположили, что силы, направленные по прямым, соединяющим молекулы, между которыми эти силы действуют, и выражающиеся как угодно в функции расстояния, могут в каких бы то ни было своих сочетаниях (хотя бы и при движении молекул) вызвать действие и противодействие, направленные не по одной прямой, а по параллельным прямым, как это утверждает гипотеза первичной пары.

Действительно, мы знаем, что если даже магнитные или электрические молекулы находятся в движении, они в каждый момент действуют так, как если бы оставались в покое в том положении, в каком находятся в этот момент. Рассмотрим две системы молекул, где каждая молекула одной системы оказывает на каждую молекулу другой системы действие, равное и противоположное по направлению действию, оказываемому второй молекулой на первую, причем эти действия направлены по одной прямой. Представим себе, что мы остановили все эти молекулы в том положении, в каком они находятся в данный момент, предполагая, что все они неизменно связаны между собой в этом положении. Тогда система неизменной формы, состоящая из двух других, необходимо окажется в равновесии, которое явится результатом данного предположения, ибо предполагается равновесие между элементарными силами, взятыми попарно. Таким образом, равнодействующая всех сил, с какими действует первая система на вторую, будет равна результирующей всех сил, с какими вторая действует на первую, и они будут направлены противоположно друг другу по одной прямой. Эти две равнодействующие никогда не смогут дать пару, способную сообщить вращение всей системе, если все ее части неизменно связаны между собой. Между тем, сторонники гипотезы о существовании пары при взаимодействии между магнитной молекулой и элементом проводника как раз делают предположение о возможности такого вращения. Однако, по их утверждению, этот результат зависит от того, что элемент действует на молекулу лишь постольку, поскольку он сам является совокупностью магнитных молекул, действия которых на рассматриваемую молекулу следуют закону Кулона, т. е. направлены по прямым, соединяющим ее с молекулами элемента, и численно обратно пропорциональны квадратам расстояний.

Достаточно прочесть с некоторым вниманием то, что пишет г. Био о рассматриваемых нами явлениях в девятой книге третьего издания своего „Précis élémentaire de physique expérimentale", чтобы убедиться, что вначале он все время рассматривает действия, оказываемые элементами проводников на магниты, как приложенные к магнитным молекулам перпендикулярно к плоскостям, проходящим через каждый элемент и каждую молекулу. Однако далее, говоря о движении проводников вокруг магнитов, он предполагает, что силы, с которыми магнитные молекулы действуют на элементы проводников, проходят в этих элементах по направлениям, параллельным силам, действующим на магнит. Таким образом, получается, что они образуют с первыми силами пары, а не направлены им противоположно по одной прямой. В частности, на стр. 754 тома II этого труда он объясняет вращательное движение магнита вокруг своей оси, когда через него проходит некоторая часть тока, тем, что сама эта часть тока оказывает действие на оставшуюся часть магнита, хотя они составляют между собою систему неизменной формы, все части которой жестко связаны между собой.[1] Отсюда, очевидно, следует, что эта часть

[1] Не знаю, следует ли напомнить по этому поводу то, что я уже указывал выше, а именно, что электрические жидкости, согласно всей совокупности фактов и в особенности в силу того ничтожного влияния, которое оказывает электричество, перемещающееся в пустоте, на весьма легкие тела, не могут считаться способными действовать посредством своей массы, поскольку ее можно рассматривать как бесконечно малую в сравнении с массой весомых тел. Поэтому всякое притяжение или отталкивание, действующее между этими телами и электрическими жидкостями, может лишь привести в движение жидкости, но не повлияет на весомые тела. Для приведения в движение весомых тел нужно, если дело идет об обыкновенных электрических притяжениях и отталкиваниях, чтобы электричество удерживалось на их поверхностях. Тогда сила, преодолевающая инерцию одного из тел, опирается, если можно так выразиться, на инерцию второго. Точно так же, для того чтобы взаимодействие двух проводников могло привести эти проводники в движение, нужно, чтобы разложения и воссоединения нейтральной жидкости, происходящие непрерывно во всех элементах вдоль этих проводников, развили между их весомыми частицами силы, способные преодолеть их инерцию, сообщая обоим проводникам скорости, обратно пропорциональные их массам. Когда мы гово-

тока и оставшаяся часть магнита образуют пару. Каким же образом можно объяснить в таком случае, что физик, делающий это предположение, пишет на стр. 769 того же труда следующие слова: „Если вычислить действие, которое оказывает на расстоянии намагниченная стрелка бесконечно малой длины, почти молекулярная, то легко представить себе, что можно образовать совокупность таких стрелок, которые будут вызывать поперечные силы. Единственная, правда, весьма большая трудность заключается в том, чтобы соответствующим образом скомбинировать из таких систем, для измеримых кусков проводника, точные законы поперечных действий, которые следуют из опыта и которые мы рассмотрели выше". Без сомнения, две системы малых магнитов, южные и северные молекулы которых притягиваются или отталкиваются обратно пропорционально квадратам расстояний в направлении прямых, соединяющих их попарно, могут вызывать *поперечные действия*, но не могут вызывать таких *действий, которые не будут равны и противоположны реакциям, направленным по тем же прямым*, как это предполагает г. Био.

Одним словом, величина действия двух элементов проводника, которую я вывел единственно из опыта, зависит от углов, определяющих взаимное направление этих двух элементов. Согласно закону, предложенному г. Био, сила,

---

рим о взаимодействиях двух электрических токов, мы никогда не слышим, да и не можем слышать, не о чем ином, как о проводниках, через которые они проходят: физики, которые считают, что магнитные молекулы действуют на элементы проводника согласно закону, предложенному г. Био, считают, очевидно, также, что это действие заставляет проводник двигаться лишь потому, что магнитная молекула удерживается весомыми частицами магнита, образующими магнитный элемент, частью которого она является. Отсюда ясно, что приписывая движение магнита действию проходящей через него части электрического тока, мы необходимо делаем предположение, что его движение зависит от взаимодействия между каждой из тех частиц, через которые проходит ток, и между всеми остальными частицами того же тела.

развивающаяся между элементом проводника и магнитной молекулой, зависит также и от угла, определяющего направление элемента. Если я назвал силу, величину которой я определил, *элементарной*, то это потому, что она действует между двумя элементами проводника, и потому, что ее еще не удалось свести к более простым силам. Он также назвал *элементарной* силу, которая, по его представлению, действует между магнитной молекулой и элементом проводника. До сих пор все, что касается этих двух родов сил, сходно между собою. Однако для силы, которую принимаю я, действие и противодействие направлены навстречу друг другу по одной прямой. Для того чтобы объяснить влияние направления элементов проводников на величину силы, ничто не препятствует принять, что она обусловлена притяжениями и отталкиваниями, свойственными молекулам двух электрических жидкостей. Нужно только предположить, что молекулы в проводниках находятся в движении. Между тем, для г. Био, допускающего силу, для которой действие и противодействие направлены противоположно, но не по одной прямой, а по параллельным прямым, так что они образуют пару, абсолютно невозможно свести эту силу к притяжениям или отталкиваниям, направленным вдоль прямых, соединяющих магнитные молекулы попарно, какие допускают все физики для объяснения взаимодействия двух магнитов. Не очевидно ли, что именно об этой гипотезе г. Био относительно вращательных сил, для которых действие и противодействие направлены противоположно, но не по одной прямой, следовало бы сказать то, что он говорит (стр. 771) по поводу взаимодействия двух элементов проводников, определенного мною из опытов и основанных на них вычислений? А именно, следовало сказать, что подобное предположение *прежде всего само по себе совершенно противоречит аналогиям, которые мы видим во всех других законах притяжения*. Можно ли представить себе гипотезу, более противоречащую всем этим аналогиям, чем существование таких сил, при которых взаимодействие различных частей системы неизменной формы может привести эту систему в движение?

Открыв большое число фактов, которых никто не наблюдал до меня, не отступая ни от одного из тех законов, которые Ньютон считал основами физической теории вселенной, и следуя пути, начертанному этим великим человеком, я определил, единственно посредством опыта, сначала законы электродинамического действия, а затем аналитическое выражение силы, возникающей между двумя элементами проводников. Наконец, я вывел из этого выражения все следствия, изложенные в настоящем труде. Г. Био, приводя имена некоторых физиков, которые наблюдали новые факты или изобрели новые приборы, полезные для науки, не упомянул о том способе, применением которого мне удалось сообщить подвижность частям проводников (опирая их на стальные острия, погруженные в чашечки со ртутью), способе, без которого мы ничего не знали бы о действиях, оказываемых на эти проводники другими проводниками, земным шаром и магнитами. Он не упомянул и о сконструированных мною приборах для выявления всех особенностей этих действий и для точного определения случаев равновесия, которые позволили мне вывести законы, управляющие этими действиями. Не упомянул он ни о самих этих законах, вытекающих из моих опытов, ни о формуле, которую я из них получил, ни о моих приложениях этой формулы. Что же касается фактов, которые я наблюдал впервые, то из них он приводит только один, именно факт взаимного притяжения двух проводников с токами. И приводит он его лишь для того, чтобы дать ему объяснение, предложенное ранее некоторыми зарубежными физиками, притом в то время, когда еще не были произведены опыты, давно доказавшие несостоятельность этого объяснения. Как известно, оно заключается в предположении, что два проводника с током действуют друг на друга так, как они действовали бы вследствие взаимодействия бесконечно малых магнитных стрелок, расположенных по касательным к круговым сечениям, на которые можно разбить всю длину проводников, считая их цилиндрическими. Совокупность маленьких стрелок для одного и того же сечения дает, таким образом, магнитное кольцо, подобное тому, которым пользовались в 1820 г. гг. Гей-Люссак и Вельтер, чтобы произвести решающий опыт относительно возможности упомянутого объяснения. Как известно, этот опыт доказал, что подобное кольцо не оказывает абсолютно никакого действия, поскольку оно образует полную окружность. Между тем оно намагничено до такой степени, что если сделать его из стали, которая способна сохранять при разломе весь свой магнетизм, то, разломав его на части, можно обнаружить, что все они сильно намагничены.

Сэр Г. Дэви и г. Эрман получили тот же результат для стального кольца любой формы. Результат этот, впрочем, представляет столь же необходимое следствие из теории двух магнитных жидкостей, как и моя теория. Можно легко в этом убедиться, произведя вычисление, совершенно подобное произведенному мною в данном труде, посредством которого я доказал, что действие соленоида, образующего замкнутую кривую, равно нулю. Это соответствует тому, что впервые нашел г. Савари при помощи вычисления, не отличающегося существенно от моего. С ним можно ознакомиться или в приложении, заканчивающем „Mémoire sur l'application du calcul aux phénomènes électro-dynamiques", который опубликован им в 1823 г., или в „Journal de physique", т. XCVI, стр. 295 и сл. Повторяя упомянутое объяснение, г. Био обнаруживает незнакомство как с опытом Гей-Люссака и Вельтера, так и с вычислениями г. Савари.

Более того, г. Био рассматривает маленькие стрелки, касательные к окружностям сечений проводников, как самые частицы поверхности проводника, намагниченные электрическим током, который разделяет в этих частицах южную магнитную жидкость от северной, перенося их в противоположных направлениях, причем молекулы упомянутых жидкостей не могут покинуть частицы проводника, в которых они вначале образовали нейтральную жидкость. Далее, если электрический ток в течение некоторого времени установился в жидкости и продолжает существовать неопределенное время, то распределение магнитных молекул в проводниках уже не может измениться. Дело обстоит так, как будто бы в этих проводниках имеется множество определенных точек, которые не изменяют положения, пока ток не изменяет своей интенсивности, и из которых исходят притягивающие и отталкивающие силы, обусловленные магнитными молекулами и, стало быть, обратно пропорциональные квадратам расстояний.

Таким образом, проводники действовали бы друг на друга лишь под влиянием сил, которые выражаются функцией расстояний между неподвижными точками в одном из проводников и такими же неподвижными точками в другом проводнике. Но в таком случае, если один из этих проводников предполагается неподвижным, он мог бы только привести другой в положение равновесия, в котором интеграл живых сил, выражаемый всегда в функции координат точек подвижного проводника, если силы являются функциями расстояний, достигает своего максимального значения. Никогда такие силы не могли бы вызвать вращательного движения с все возрастающей скоростью в одном направлении, покуда эта скорость не стала бы постоянной вследствие силы трения или сопротивления жидкости, в которую приходится погружать подвижные проводники, чтобы поддерживать ток.

Однако я получил это вращательное движение, действуя спиральным проводником почти круговой формы на прямолинейный проводник, вращавшийся вокруг одного из своих концов, расположенного в центре круга, тогда как другой конец находился достаточно близко к спиральному проводнику.

Этот опыт, в котором скорость движения очень велика и движение, при достаточно сильной батарее, может продолжаться несколько часов, находится в явном противоречии с точкой зрения г. Био. Если он не противоречит взгляду, что действие двух проводников зависит от притягивающих и отталкивающих сил, свойственных молекулам двух электрических жидкостей, то лишь по следующей причине: электрические молекулы не заключены в очень небольших пространствах, где их распределение обусловлено постоянной причиной, как это имеет место для молекул, из которых состоят по предположению обе магнитные жидкости. Напротив, электрические молекулы перемещаются по всей длине каждого из проводников вследствие ряда разложений и воссоединений, следующих друг за другом через очень короткие промежутки времени. Отсюда, как уже было мною указано, могут возникать непрерывные движения все в одну и ту же сторону, не совместимые с предположением, что точки, из которых исходят притягивающие и отталкивающие силы, не изменяют своего положения в проводниках.

Наконец, г. Био повторяет в третьем издании своего „Traité élémentaire de physique“ (т. II, стр. 773) то, что уже было им сказано в заметке в „Annales de chimie et de physique“ относительно первых опытов, которые были произведены им вместе с г. Саваром по интересующему нас вопросу, а именно: когда элемент весьма тонкого неограниченного соединительного провода действует на магнитную молекулу, „природа этого действия та же, что и в случае действия магнитной стрелки, помещенной на контуре проводника в определенном направлении, которое остается неизменным по отношению к направлению вольтаического тока“. Однако действие этой стрелки на магнитную молекулу направлено по той же прямой, что и противодействие, оказываемое молекулой на стрелку, и нетрудно убедиться в том, что возникающая отсюда сила обратно пропорциональна кубу, а не квадрату расстояния, как это имеет место, согласно вычислениям самого г. Био, для силы, с которой действует элемент проводника [70].

Мне остается еще распространить на взаимодействие замкнутых контуров соображения, высказанные относительно поверхностей, ограниченных этими контурами и все точки которых действуют подобно так называемым молекулам южной и северной жидкостей. Ранее я применил эти соображения к взаимодействию какого-либо замкнутого контура с элементом проводника. Я нашел, что действие элемента $d^2\sigma'$ на две поверхности, ограниченные контуром s, выражается тремя силами

$$\mu g\varepsilon' d^2\sigma' \frac{u^2 d\varphi}{r^3}, \quad \mu g\varepsilon' d^2\sigma' \frac{v^2 d\chi}{r^3}, \quad \mu g\varepsilon' d^2\sigma' \frac{w^2 d\psi}{r^3},$$

приложенными к каждому элементу ds этого контура. Теперь я сделаю в отношении контура s' то, что сделал тогда в отношении контура s. Представим себе для этого новую поверхность, ограниченную со всех сторон, как и поверхность σ', замкнутой кривой s', причем отрезки нормалей поверхности σ', заключенные между последней и этой новой поверхностью, всюду весьма малы. Представим себе на новой поверхности магнитную жидкость, противоположную по знаку жидкости на поверхности σ', причем в соответствующих участках двух поверхностей имеется одинаковое количество обеих жидкостей. Обозначим через ξ', η', ζ' углы, которые нормаль в точке m' с координатами x', y', z' образует с тремя осями, а через h' — маленький отрезок этой нормали, заключенный между двумя поверхностями. Тогда, как это было нами сделано для элемента $d^2\sigma'$, мы сможем свести действие элемента новой поверхности, обозначенного через $d^2\sigma'$, на совокупность двух поверхностей, ограниченных контуром s, к силам, которые приложены (стр. 147) к различным элементам контура. Сила, относящаяся к элементу ds и параллельная оси x, получится, если в найденном для нее выражении

$$\mu g\varepsilon' d^2\sigma' \frac{u^2 d\varphi}{r^3}$$

или

$$-\mu g\varepsilon' d^2\sigma' \frac{(y'-y)\,dz-(z'-z)\,dy}{r^3}$$

подставить вместо x', y', z' новые координаты $x'+h'\cos\xi'$, $y'+h'\cos\eta'$, $z'+h'\cos\zeta'$. Так как полученные таким образом силы действуют в направлении, противоположном первым, то их нужно из них вычесть. Если мы отбросим при вычислении степени h' выше первой, нам останется дифференцировать выражение

$$-\mu g\varepsilon' d^2\sigma' \frac{(y'-y)\,dz-(z'-z)\,dy}{r^3},$$

причем мы примем за переменные x', y', z', заменим $\delta x'$, $\delta y'$, $\delta z'$ через $h'\cos\xi'$, $h'\cos\eta'$, $h'\cos\zeta'$ и изменим знак у результата, рассматривая x, y, z и dx, dy, dz как постоянные, ибо они относятся к элементу ds.

Формула, в которой надо произвести замену $\delta x'$, $\delta y'$, δz через $h'\cos\xi'$, $h'\cos\eta'$, $h'\cos\zeta'$, будет, следовательно,

$$\mu g\varepsilon'\left(dz d^2\sigma'\delta'\frac{y'-y}{r^3}-dy d^2\sigma'\delta'\frac{z'-z}{r^3}\right),$$

и ее надо после подстановки проинтегрировать по всей площади поверхности σ'. Тогда получим полное действие этой поверхности и поверхности, с нею связанной, на совокупность двух поверхностей, ограниченных контуром s. Можно произвести это двойное интегрирование отдельно для каждого из двух членов, образующих выражение. Выполним сначала интегрирование для первого члена

$$\mu g\varepsilon' dz d^2\sigma'\delta'\frac{y'-y}{r^3}.$$

Для этого поверхность σ' разобьем на бесконечное число бесконечно узких зон рядом плоскостей, перпендикулярных к плоскости xz и проходящих через координату y середины o элемента ds. Выберем на одной из этих зон за $d^2\sigma'$ элемент поверхности σ', выражением которого служит

$$\frac{v d'v d'\chi}{\cos\eta'}.$$

Тогда нам придется проинтегрировать величину

$$\mu g \varepsilon' dz \frac{vd'vd'\chi}{\cos\eta'} \delta' \frac{y'-y}{r^3},$$

которая путем преобразования, в точности подобного тому, какое мы применили выше по отношению к

$$d^2\sigma' = \frac{udud\varphi}{\cos\xi},$$

обратится в

$$-\mu g dz h' \varepsilon' d'\chi d' \frac{v^2}{r^3}.$$

Предположим, как мы это сделали для поверхности σ', что величины h', ε' изменяются одновременно так, что их произведение сохраняет постоянную величину, и проинтегрируем это последнее выражение при постоянном угле χ по всей длине зоны, заключенной на поверхности σ' между двумя плоскостями, составляющими угол $d'\chi$ от одного края контура до другого. Это первое интегрирование выполняется непосредственно и дает

$$-\mu g g' dz d'\chi \left(\frac{v_2^2}{r_2^3} - \frac{v_1^2}{r_1^3}\right),$$

где r_1, v_1 и r_2, v_2 представляют значения r и v для двух краев контура s'. Теперь нужно проинтегрировать обе части этого выражения по χ соответственно в двух участках контура s', определяемых двумя плоскостями, касательными к этому контуру и проходящими через ординату y элемента ds. Согласно замечанию, сделанному нами на стр. 146 относительно величины силы, параллельной оси x при вычислении, которое относится к двум поверхностям, ограниченным контуром s, легко видеть, что мы имеем здесь

$$-\mu g g' dz \int \frac{v^2 d'\chi}{r^3},$$

причем интеграл берется по всему протяжению замкнутого контура s'. Переменные r, v и χ относятся уже только к этому контуру.

Таким же образом производится двойное интегрирование второго члена, равного

$$-\mu g\varepsilon' dy d^2\sigma'\delta' \frac{z'-z}{r^3},$$

по всему пространству поверхности σ'. Для этого нужно будет разбить эту поверхность на бесконечно большое число зон плоскостями, проходящими через координату z по середине элемента ds и взять на одной из этих зон за $d^2\sigma'$ бесконечно малую площадь, выраженную через $\frac{wd'wd'\psi}{\cos\zeta'}$. Эту формулу нужно преобразовать, как и предыдущую, и затем проинтегрировать сначала по всей длине зоны. Интеграл будет содержать тогда только величины, относящиеся к контуру s'. Далее, второе интегрирование, произведенное по ψ на протяжении замкнутого контура s', даст

$$\mu gg' dy \int \frac{w^2 d'\psi}{r^3}.$$

Объединяя результаты, полученные путем этих двух интегрирований, найдем

$$\mu gg' \left(dy \int \frac{w^2 d'\psi}{r^3} - dz \int \frac{v^2 d'x}{r^3}\right)$$

для силы, параллельной оси x; эта сила проходит через середину элемента ds и обусловлена действием двух поверхностей, ограниченных контуром s', на две поверхности, ограниченные контуром s.

Таким же образом будем иметь для сил, параллельных двум другим осям, выражения

$$\mu gg' \left(dz \int \frac{u^2 d'\varphi}{r^3} - dx \int \frac{w^2 d'\psi}{r^3}\right),$$

$$\mu gg' \left(dx \int \frac{v^2 d'\chi}{r^3} - dy \int \frac{u^2 d'\varphi}{r^3}\right).$$

В итоге мы, предполагая, что к каждому элементу ds контура s приложены силы, выражения которых мы только что определили, получим действие, зависящее от притяжений и отталкиваний двух магнитных жидкостей, расположенных и закрепленных на двух совокупностях поверхностей, ограниченных двумя контурами s, s'. [71].

Но эти силы, приложенные к элементам ds, отличаются только знаком от сил, полученных нами на стр. 139 для действия двух контуров s, s' в предположении, что по ним проходят электрические токи и при условии, что $\mu gg' = \frac{1}{2} ii'$. Эта разница в знаке зависит от того, что в вычислении, посредством которого мы получили эти значения, мы предполагали у дифференциалов $d'\varphi$, $d'\chi$, $d'\psi$ те же знаки, что и у дифференциалов $d\varphi$, $d\chi$, $d\psi$, тогда как их надо брать с разными знаками, когда два тока имеют одинаковые направления. Таким образом, силы, вызываемые взаимодействием этих токов, будут в точности те же, что и силы, полученные от действия двух поверхностей σ' на две поверхности σ. Тем самым полностью доказано, что взаимодействие двух твердых замкнутых контуров, через которые проходят электрические токи, может быть заменено взаимодействием двух совокупностей поверхностей, ограниченных этими контурами, на которых расположены неподвижно молекулы южной и северной магнитных жидкостей, притягивающие и отталкивающие друг друга по направлению соединяющих их прямых с силами, обратно пропорциональными квадрату их расстояний друг от друга. Объединим этот результат с необходимым следствием из общего принципа сохранения живых сил, о котором я не раз упоминал в этом труде, а именно, что никакое действие, которое может быть сведено к силам, являющимся функциями расстояний и действующим между материальными точками, образующими две твердые системы, одну неподвижную, другую подвижную, никогда не может вызвать движения, которое существовало бы неопределенное время, несмотря на сопротивления и трения, действующих на подвижную систему. Отсюда мы заключаем, как было показано для магнита и для твердого замкнутого вольтаического контура, что движение этого рода никогда не может быть вызвано *взаимодействием двух жестких и замкнутых контуров.*

Вместо того чтобы заменять каждый контур двумя весьма близкими поверхностями, покрытыми одна южным, другая северным магнетизмом, причем они распределены так, как было описано выше, можно было бы заменить каждый из них одной поверхностью, по которой магнитные элементы были бы равномерно распределены так, как их определил г. Пуассон в труде, доложенном Академии наук 2 февраля 1824 г.

Автор этого труда, вычисляя формулы, посредством которых он включил в область математического анализа все вопросы, относящиеся к магнитным свойствам тел, от каких бы причин они ни зависели, дал[1] значения сил, с которыми магнитный элемент действует на молекулу южной или северной жидкости. Эти значения тожественны с теми, которые я вывел из моей формулы для трех величин A, B, C в случае весьма малого замкнутого плоского контура, если предположить, что постоянные коэффициенты одинаковы. Отсюда уже легко вывести теорему, на основании которой можно видеть непосредственно:

1) что действие электродинамического соленоида, вычисленное по моей формуле, во всех случаях равнозначно действию ряда магнитных элементов одной и той же интенсивности, распределенных равномерно вдоль прямой или кривой линии, которую окружают все маленькие токи соленоида, причем оси элементов в каждой точке кривой совпадают с ее направлением;

2) что действие жесткого и замкнутого контура, также вычисленное по моей формуле, подобно действию, которое оказывали бы магнитные элементы одной и той же интенсив-

[1] „Mémoire sur la théorie du magnétisme“ г. Пуассона, стр. 22.

ности, равномерно распределенные на какой-либо поверхности, опирающейся на этот контур, если оси магнитных элементов везде нормальны к данной поверхности.

Та же теорема приводит еще к одному следствию. Представим себе поверхность, охватывающую весьма малый объем. Предположим, с одной стороны, что молекулы южной и северной жидкостей распределены в равных количествах по этой маленькой поверхности, как это и должно быть, чтобы они составили магнитный элемент, который рассматривал г. Пуассон. Представим себе, с другой стороны, что та же поверхность покрыта электрическими токами, образующими на ней маленькие замкнутые контуры, лежащие на параллельных и равно отстоящих друг от друга поверхностях. Если вычислим по моей формуле действие этих токов, то силы, действующие в обоих случаях на элемент проводника или на магнитную молекулу, будут в точности одинаковыми, независимо от формы маленькой поверхности, и пропорциональными ограниченному ею объему, причем оси магнитных элементов будут совпадать с прямой, перпендикулярной к плоскости, в которой лежат замкнутые токи.

Доказав тожественность этих сил, можно было бы рассматривать как простые ее следствия все выводы, которые я изложил в настоящем труде, относительно возможности замены магнитов совокупностями электрических токов, образующих замкнутые контуры вокруг их частиц; причем от этой замены результаты не изменяются. Я полагаю, что читателю будет нетрудно вывести из предыдущих вычислений это следствие и теорему, на которой оно основано. Впрочем, я развил его в другом труде, где одновременно рассмотрел с этой новой точки зрения все то, что относится к взаимодействию магнита и вольтаического проводника[72].

В то время как я печатал эту работу, г. Араго открыл новый род действия на магниты. Это открытие, столь же важное, сколь и неожиданное, заключается во взаимодействии, возникающем между магнитом и диском или кольцом из какого-либо материала, когда их относительное положение непрерывно изменяется [73]. Г. Араго полагал, что в этом опыте можно было бы заменить намагниченный брусок проводником, скрученным в виде спирали, и предложил мне проверить это предположение посредством опыта, успех которого не мог подлежать сомнению. Я пытался установить существование такого действия в опытах, произведенных мною вместе с г. Араго, но недостатки прибора не дали нам возможности получить решающие результаты. Затем г. Колладон любезно согласился взять на себя устройство прибора более целесообразной конструкции, которым мы пользовались, и сегодня, 30 августа 1826 г., я самым исчерпывающим образом проверил вместе с ним идею г. Араго, пользуясь весьма короткой двойной спиралью с витками около 2 дюймов в диаметре.

Этот опыт дополняет выводы о тожественности действий, оказываемых или магнитами, или совокупностями твердых и замкнутых вольтаических контуров.[1] Он дает окончательное

[1] Сначала кажется, что это тожество должно быть действительным только для замкнутых вольтаических контуров весьма малого диаметра. Легко, однако, видеть, что оно сохраняет силу и для контуров любой величины, ибо мы убедились, что их можно заменить магнитными элементами, равномерно распределенными на поверхностях, опирающихся на эти контуры, и что можно произвольно увеличивать число поверхностей, проходящих через один и тот же контур. Совокупность этих поверхностей может быть рассматриваема как пучок магнитов, эквивалентных контуру. То же соображение показывает, что, не изменяя ничего в возникающих при этом силах, всегда можно заменить весьма малые электрические токи, окружающие частицы намагниченного бруска, электрическими токами конечной величины, образующими замкнутые контуры вокруг оси бруска, если токи, окружающие частицы, симметрично распределены вокруг его оси. Для этого достаточно вообразить в данном бруске поверхности, заканчивающиеся на поверхности магнита, повсюду пересекающие под прямым углом линии намагниченности и проходящие через магнитные элементы. Эти последние всегда можно предположить расположенными в точках, где линии намагниченности пересекаются с поверхностями. Тогда, если все элементы одной и той же поверхности распределены на равных площадях с одинаковой интенсивностью, их

доказательство того, что ряда разложений и воссоединений нейтральной жидкости, составляющих электрический ток, достаточно, чтобы вызвать в этом случае, как и во всех других, все эффекты, обычно объясняющиеся действием двух

следует заменить одним электрическим током, проходящим по кривой, образованной пересечением этой поверхности с поверхностью магнита. Если бы они были распределены равномерно, причем интенсивность возрастала бы от поверхности к оси магнита, их следовало бы заменить несколькими токами. Сначала нужно было бы взять ток, проходящий по указанной линии пересечения, притом такой, каким он должен быть в соответствии с *минимальной* интенсивностью токов в частицах поверхности, нормальной к линиям намагниченности. Затем для каждой линии, окружающей те участки этой поверхности, где маленькие токи становятся более интенсивными, нужно было бы представить себе новый ток, идущий концентрично с предыдущим, и притом такой, каким он должен быть в соответствии с разностью интенсивностей смежных токов: одних текущих вне этой линии, других — внутри нее. Если бы интенсивность токов в частицах убывала от поверхности к оси бруска, нужно было бы представить себе на линии раздела ток, идущий концентрично с предыдущим, но имеющий противоположное направление. Наконец, если бы за этим уменьшением следовало увеличение, нужно было бы ввести новый концентрический ток, направленный одинаково с первым.

В сущности, я делаю здесь данное указание лишь затем, чтобы отметить должным образом замечательное следствие из результатов, полученных в настоящем труде, а не затем, чтобы вывести из него какие-либо соображения в пользу того взгляда, что электрические токи магнитов образуют замкнутые контуры вокруг их осей. Сначала я колебался между этим предположением и той точкой зрения на указанные токи, согласно которой они окружают частицы магнитов. Однако я уже давно пришел к заключению, что вторая точка зрения ближе согласуется со всей совокупностью фактов, и я не изменил мнения по этому вопросу.

Указанное мною следствие полезно еще в том отношении, что оно сообщает подобию действий, производимых с одной стороны электродинамической спиралью, а с другой — магнитом, такую же полноту с точки зрения теории, какая обнаруживается на опыте. Полезно оно и в том отношении, что служит оправданием тем объяснениям, в которых мы заменяем рассматриваемый магнит одним замкнутым контуром, как я это сделал, например, в приведенном выше объяснении вращательного движения плавающего магнита.

жидкостей, отличных от электричества и обозначаемых названиями *южной* и *северной* магнитных жидкостей [74].

Я долго размышлял над всеми этими явлениями и над остроумным объяснением, которое дал недавно г. Пуассон новому роду действия, открытому г. Араго. По моему мнению, то, что можно допустить с наибольшей вероятностью при современном состоянии науки, сводится к следующим положениям:

1. Хотя мы и не имеем права отбрасывать объяснения, основанные на противодействии эфира, приведенного в движение электрическими токами, однако до сих пор нет никакой необходимости к ним прибегать.

2. Молекулы двух электрических жидкостей, распределенные на поверхности тел, являющихся проводниками, а также на поверхности или внутри тел, являющихся непроводниками, остаются связанными с теми точками тела, в которых они находятся, — в первом случае вследствие равновесия, во втором — под влиянием задерживающей силы со стороны непроводящих тел. Их взаимные притяжения и отталкивания, обратно пропорциональные квадрату расстояния, производят все обычные электрические явления.

3. Если те же молекулы движутся в проводниках, где они в каждое мгновение воссоединяются в нейтральную жидкость и вновь разъединяются, то из их взаимодействия возникают силы, зависящие, в первую очередь, от длительности чрезвычайно коротких промежутков времени между последовательными соединениями или разъединениями, а затем от направлений, в которых происходят эти чередующиеся соединения и разложения нейтральной жидкости. Возбужденные таким образом силы становятся постоянными, как только это динамическое состояние электрических жидкостей в проводниках станет перманентным. Именно эти силы и производят все открытые мною явления притяжения и отталкивания между двумя проводниками.

4. Обнаруженное мною взаимодействие между землею и вольтаическими проводниками не позволяет сомневаться

в том, что внутри земного шара существуют токи, подобные токам в проводниках. Можно предполагать, что эти токи являются причиной тепла, свойственного земному шару. Они по преимуществу текут там, где окружающий его внешний окисленный слой покоится на металлическом ядре, как указал сэр Г. Дэви в своем объяснении вулканов. И именно они намагничивают магнитную руду и тела, которые в соответствующих условиях подвергаются электродинамическому действию земли. Однако, согласно тожественности действий, разъясненной в предыдущем примечании, не существует и не может существовать никакого бесспорного доказательства того, что земные токи установились не только вокруг частиц, образующих земной шар.

5. Одно и то же непрерывно существующее электродинамическое состояние, заключающееся в разложениях и соединениях нейтральной жидкости, которое наблюдается в проводниках с током, существует и вокруг частиц намагниченных тел и производит в них действия, подобные тем, какие вызывают проводники.

6. Вычисляя эти действия по формуле, выражающей действие двух элементов вольтаического тока, мы получаем для вызываемых ими сил в точности те же значения, какие вытекают из последних опытов г. Био в случае действия магнита на проводник с током и из опытов Кулона — для случая взаимодействия двух магнитов.

7. Эта чисто математическая тожественность самым исчерпывающим образом подтверждает воззрение, основанное, впрочем, и на всей совокупности фактов, что свойства магнитов действительно зависят от непрерывного движения двух электрических жидкостей вокруг их частиц.

8. Когда, под действием магнита или проводника, вокруг частиц какого-либо тела устанавливается такое движение, необходимо, чтобы молекулы положительного и отрицательного электричества пришли в перманентное электродинамическое состояние, для того чтобы это движение оказывало действие

на проводник с током или на магнит; однако они могут притти в это состояние лишь по прошествии некоторого промежутка времени, всегда весьма короткого, но все же не равного нулю. Его продолжительность зависит от сопротивления, оказываемого телом перемещению заключенных в нем электрических жидкостей. Во время этих перемещений, когда указанное стационарное состояние еще не достигнуто или когда оно уже прекратилось, они должны возбуждать силы, от которых и зависят, повидимому, своеобразные явления, открытые г. Араго. Это объяснение, впрочем, представляет собою только объяснение г. Пуассона в применении к моей теории. Действительно, мы предполагаем, что электрический ток образует весьма малый замкнутый контур, который действует точно так же, как две молекулы, одна южной, другая северной жидкости, расположенные на его оси по одну и другую сторону плоскости, в которой лежит маленький контур, и на равных расстояниях от этой плоскости, причем эти расстояния тем больше, чем больше интенсивность электрического тока. Поэтому мы неизбежно должны получить одни и те же значения для действующих сил, независимо от того, предположим ли мы, что ток устанавливается или прекращается постепенно, или будем представлять себе дело так, что магнитные молекулы, вначале соединенные в нейтральную жидкость, разделяются, удаляясь на все более и более далекие расстояния, а затем вновь сближаются, чтобы соединиться.

Заканчивая этот труд, я считаю необходимым заметить, что я еще не имел времени заказать приборы, изображенные на рис. 4 и на рис. 20. Таким образом, опыты, для которых они предназначены, еще не произведены. Поскольку, однако, цель этих опытов только в том, чтобы проверить результаты, полученные иными путями, и так как было бы полезно произвести их в качестве контроля опытов, из которых выведены изложенные здесь результаты, я полагаю, что не следует исключать их описания.

ПРИМЕЧАНИЯ, СОДЕРЖАЩИЕ НОВЫЕ СООБРАЖЕНИЯ ПО НЕКОТОРЫМ ВОПРОСАМ, РАЗБИРАЕМЫМ В НАСТОЯЩЕМ ТРУДЕ

I. О способе доказательства при помощи четырех случаев равновесия, изложенных в начале настоящего труда, что выражение взаимодействия двух элементов проводников с токами равно $-\frac{2ii'}{\sqrt{r}} \cdot \frac{d^2\sqrt{r}}{dsds'} dsds'$

Следуя порядку преобразований, которые я шаг за шагом производил над этим выражением, находим сначала, в силу двух первых случаев равновесия, что оно эквивалентно

$$-\frac{ii'(\sin\theta\sin\theta'\cos\omega + k\cos\theta\cos\theta')\,dsds'}{r^n}.$$

Из третьего случая получается соотношение между n и k, именно $n+2k=1$, а из четвертого случая следует, что $n=2$, откуда $k=-\frac{1}{2}$. Этот четвертый случай равновесия применяется в последнюю очередь при определении выражения силы, возникающей между двумя элементами проводников с током. Но можно итти и другим путем, исходя из соображений, которые применял г. де Лаплас. Он заключил из первых опытов г. Био над взаимодействием магнита и бесконечного прямолинейного проводника, что действие, которое оказывает элемент этого проводника на один из полюсов магнита, обратно пропорционально квадрату расстояния между ними, если одно только это расстояние меняет свою величину, а угол между прямой, измеряющей это расстояние, и направлением элемента остается без изменения. Применяя это соображение к взаимодействию двух элементов проводников с током, легко видеть, независимо от каких-либо предварительных исследований относительно численного значения возникающей при этом силы, что она также обратно пропорциональна квадрату расстояния, когда изменяется только это расстояние, а углы, определяющие взаимное положение обоих элементов, не претерпевают никакого изменения. Действительно, согласно соображениям, развитым в начале настоящего труда, сила, о которой идет речь, необходимо направлена вдоль прямой r и имеет величину

$$ii'f(r,\ \theta,\ \theta',\ \omega)\,dsds'.$$

Отсюда следует, что, обозначая через α, β, γ углы, которые эта прямая образует с тремя осями, будем иметь для трех ее составляющих

$$ii'f(r,\ \theta,\ \theta',\ \omega)\cos\alpha\,dsds',$$

$$ii'f(r,\ \theta,\ \theta',\ \omega)\cos\beta\,dsds',$$

$$ii'f(r,\ \theta,\ \theta',\ \omega)\cos\gamma\,dsds$$

и три параллельные трем осям силы, возникающие между двумя контурами, получатся двойным интегрированием этих выражений при постоянных i и i'.

Из четвертого случая равновесия, в котором три круга могут быть заменены какими-нибудь подобными между собой кривыми, чьи сходственные измерения образуют непрерывную геометрическую прогрессию, следует, что эти три силы имеют одинаковые значения в двух подобных системах. Следовательно, выражающие их интегралы, согласно упомянутому выше замечанию г. де Лапласа, должны быть нулевого измерения относительно всех входящих в них линий. То же самое относится и к дифференциалам, из коих состоят эти интегралы, причем ds и ds' также считаются линиями, входящими в эти выражения, ибо число дифференциалов, хотя оно и является бесконечно большим второго порядка, следует считать одинаковым в обеих системах.

Но произведение $dsds'$ — двумерно. Следовательно,

$$f(r,\ \theta,\ \theta',\ \omega)\cos\alpha,\qquad f(r,\ \theta,\ \theta',\ \omega)\cos\beta,\qquad f(r,\ \theta,\ \theta',\ \omega)\cos\gamma$$

должны иметь измерение —2, а так как углы θ, θ', ω, α, β, γ выражаются числами, которые не имеют никакого значения для размерности выражений дифференциалов, и так как $f(r,\ \theta,\ \theta',\ \omega)$ содержит лишь одну линию r, то эта функция непременно должна быть пропорциональна $\frac{1}{r^2}$, так что сила, с которой действуют друг на друга два элемента проводников с током, имеет выражение

$$\frac{ii'\varphi(\theta, \theta', \omega)}{r^2} ds ds'.$$

Два первых случая равновесия определяют затем функцию φ, где только k остается неизвестным, и мы имеем для выражения искомой силы

$$\frac{ii'(\sin\theta \sin\theta' \cos\omega + k \cos\theta \cos\theta')}{r^2} ds ds'.$$

Как известно, в таком виде я ее дал в труде, доложенном Академии 4 декабря 1820 г. Заменяя $\sin\theta \sin\theta' \cos\omega$ и $\cos\theta \cos\theta'$ их значениями

$$-\frac{rd^2r}{ds ds'} ds ds', \qquad -\frac{dr}{ds} \cdot \frac{dr}{ds'},$$

получаем

$$-\frac{ii'}{r^2}\left(\frac{d^2r}{ds ds'} + k\frac{dr}{ds} \cdot \frac{dr}{ds'}\right) ds ds' = -\frac{ii'(rdd'r + kdrd'r)}{r^2} =$$

$$= -\frac{ii'r^k dd'r + kr^{k-1}drd'r}{r^{k+1}} = -\frac{ii'd(r^k d'r)}{r^{k+1}} = -\frac{ii'dd'(r^{k+1})}{(k+1)r^{k+1}}$$

и, полагая для сокращения $k+1=m$, имеем для величины искомой силы следующее весьма простое выражение

$$-\frac{ii'dd'(r^m)}{mr^m}.$$

Остается лишь доказать, что $r^m = \sqrt{r}$, т. е. что постоянное число m равно $^1/_2$.

Опыт, описанный на стр. 27—30, которым я пользовался в этом труде для определения величины k и, тем самым, величины $k+1$, не может быть особо точным вследствие трения дуги AA′ (рис. 3) о ртуть, налитую в два желоба M, M′. Кроме того, отталкивание, которое устанавливается между дугой и ртутью, удаляет их друг от друга, так что сообщение между ними прерывается, и этому трудно воспрепятствовать. Я сначала определил величину k из другого опыта, который не представлял таких неудобств, ибо подвижная часть вольтаического контура лежала обоими своими концами на вертикальной оси, вокруг которой она должна была вращаться, а потому трение ртути происходило лишь у поверхности двух острых концов, которые вращались вокруг самих себя. Таким образом, трение сводилось к нулю, а к тому же острия не могли отделиться от ртути, в которую они были погружены. Преимущество этого опыта еще в том, что для него не требуется специального прибора, а достаточно лишь того, который служит для производства всех электродинамических опытов и который я описал в труде, опубликованном мною в 1825 г. у издателя Башелье, Набережная Дез-Огюстен, № 55, под заглавием „Description d'un appareil électro-dynamique", издание второе. На стр. 19 и 20 этого описания можно видеть, каким образом производится опыт, о котором идет здесь речь. Его цель — установить, что подвижная часть проводника, с концами на вертикальной оси, вокруг которой он свободно вращается, не может непрерывно двигаться вокруг этой оси под действием кругового горизонтального проводника, если центр его находится на той же оси. Впоследствии я отказался от этого способа определять величину k, ибо вычисление, которым я пользовался для ее вывода, предполагало установленным в отношении каждого из элементов кругового проводника то, что устанавливал эксперимент только в отношении всего проводника в целом. Но я выяснил с тех пор, что, исходя из отсутствия действия кругового проводника на прямоугольный проводник, две стороны которого вертикальны, — это является формой, наиболее удобной для эксперимента, — можно при помощи некоторого преобразования непосредственно определить величину m, а следовательно, и величину $k = m - 1$. Это преобразование будет приведено в следующем примечании. В таком случае нет необходимости прибегать к прибору, изображенному на рис. 3, и к недостаточно точному опыту, для которого он был предназначен.

II. О преобразовании, с помощью которого можно упростить вычисление взаимодействия двух прямолинейных проводников

Когда два проводника прямолинейны, угол между направлениями двух элементов остается постоянным и равным углу между направлениями самих проводников. Следовательно, он предполагается известным, и, обозначая его через ε, мы имеем (см. стр. 40)

$$r\frac{d^2r}{dsds'}+\frac{dr}{ds}\cdot\frac{dr}{ds'}=-\frac{dx}{ds}\cdot\frac{dx'}{ds'}-\frac{dy}{ds}\cdot\frac{dy'}{ds'}-\frac{dz}{ds}\cdot\frac{dz'}{ds'}=-\cos\varepsilon,$$

откуда следует, что

$$\frac{dd'(r^m)}{mr^m}=\frac{(m-1)\,drdr'+rdd'r}{r^2}=\frac{(m-2)\,drdr'-\cos\varepsilon\, dsds'}{r^2}.$$

Обозначая через p любой иной показатель степени, имеем точно так же

$$\frac{dd'(r^p)}{pr^p}=\frac{(p-2)\,drdr'-\cos\varepsilon\, dsds'}{r^2},$$

и, исключая $\frac{drdr'}{r^2}$ из этих двух уравнений, мы получаем

$$(p-2)\frac{dd'(r^m)}{mr^m}-(m-2)\frac{dd'(r^p)}{pr^p}=\frac{(m-p)\cos\varepsilon\, dsds'}{r^2},$$

откуда

$$\frac{dd'(r^m)}{mr^m}=\frac{m-2}{p-2}\cdot\frac{dd'(r^p)}{pr^p}+\frac{m-p}{p-2}\cdot\frac{\cos\varepsilon\, dsds'}{r^2}.$$

Умножая оба члена этого уравнения на $-ii'$, имеем выражение взаимодействия двух элементов вольтаических проводников, в котором неопределенной постоянной p можно придать любое значение. Это выражение следующее:

$$-ii'\frac{dd'(r^m)}{mr^m}=-ii'\left(\frac{m-2}{p-2}\cdot\frac{dd'(r^p)}{pr^p}+\frac{m-p}{p-2}\cdot\frac{\cos\varepsilon\, dsds'}{r^2}\right).$$

III. Приложение этого преобразования к определению постоянной m в формуле, выражающей силу, с которой два элемента проводника с током действуют друг на друга, и к определению значения этой силы, которое следует принять для вычисления результатов взаимодействия двух прямолинейных проводников

Прежде всего нужно применить только что найденную нами формулу к определению значения m, исходя из опыта, доказывающего, что подвижной прямоугольный проводник с двумя вертикальными сторонами не приходит в движение, будучи подвержен действию горизонтального кругового проводника, и что он принужден вращаться только вокруг дуги круга, окружность которого образует этот проводник.

Для этого, выполнив одно из двух дифференцирований, указанных в только что полученном нами значении силы, которая действует на элемент ds' кругового проводника, мы представим его в виде

$$- ii'\left(\frac{m-2}{p-2}\cdot\frac{d\,(r^{p-1}dr')}{r^p}+\frac{m-p}{p-2}\cdot\frac{\cos\varepsilon\, ds ds'}{r^2}\right).$$

Затем возьмем его составляющую по касательной к круговому проводнику, умножив ее на $\cos\theta'$, и заменим dr' его значением $-ds'\cos\theta'$. Тогда получим для выражения этой составляющей

$$ii'ds'\left(\frac{m-2}{p-2}r^{-p}\cos\theta d\,(r^{p-1}\cos\theta')-\frac{m-p}{p-2}\cdot\frac{\cos\theta'\cos\varepsilon\, ds}{r^2}\right),$$

где p может иметь любое значение.

Умножая выражение составляющей a, обозначающее радиус окружности, по которой согнут неподвижный проводник, получим составляющую момента действия, оказываемого элементом ds, чтобы заставить ds' вращаться вокруг оси, если бы последний элемент был подвижен. Отсюда следует, что, изменив знак произведения, мы получим значение момента, который производится действием ds' и заставляет ds вращаться вокруг той же оси. Так как p можно взять каким угодно, положим $-p=p-1$ или $p=\frac{1}{2}$. При этом выражение станет более простым.

Имеем в этом случае

$$r^{-p}\cos\theta' d(r^{p-1}\cos\theta')=\frac{\cos\theta'}{\sqrt{r}}\,d\,\frac{\cos\theta'}{\sqrt{r}}=\frac{1}{2}\,d\,\frac{\cos^2\theta'}{r},$$

и выражение момента будет

$$aii'ds'\left(\frac{m-2}{3}\,d\,\frac{\cos^2\theta'}{r}-\frac{2m-1}{3}\cdot\frac{\cos\theta'\cos\varepsilon\, ds}{r^2}\right).$$

Интегрируя по дифференциалам, обозначенным буквой d, которые относятся к подвижной части проводника, и называя r_1, r_2, $\cos\theta_1'$, $\cos\theta_2'$, значения r и $\cos\theta$ на двух концах этого участка, получим для момента, вызывающего вращение вокруг оси под действием элемента ds',

$$aii'ds'\left[\frac{m-2}{3}\left(\frac{\cos^2\theta_2'}{r}-\frac{\cos^2\theta_1'}{r_1}\right)-\frac{2m-1}{3}\int\frac{\cos\theta'\cos\varepsilon ds}{r^2}\right].$$

Так как прямые, проведенные из всех точек оси к середине элемента ds' кругового проводника, перпендикулярны к направлению этого элемента, то очевидно, что когда оба конца подвижного проводника лежат на оси, $\cos\theta_1'=0$, $\cos\theta_2'=0$, и потому предыдущее выражение обращается в

$$-\frac{(2m-1)\,aii'ds'}{3}\int\frac{\cos\theta'\cos\varepsilon ds}{r^2}=-\frac{(2m-1)\,aii'ds'}{3}\int\frac{dr}{ds'}\,\frac{\cos\varepsilon ds}{r^2}.$$

Интеграл,[1] который входит в это выражение, должен быть взят по всему контуру прямоугольника, образованного подвижным проводником, т. е. по четырем частям этого проводника, которые являются сторонами прямоугольника.

[1] Такое же сокращение имеет место, когда подвижной проводник образует замкнутый контур, ибо тогда $r_2=r_1$, и $\theta_2'=\theta_1'$, и потому $\frac{\cos^2\theta_2}{r_1}-\frac{\cos^2\theta_1}{r_1}=0$.

Но для двух вертикальных сторон угол ε, заключенный между направлением горизонтального элемента ds' и направлениями, из которых состоят эти части, очевидно, будет прямой, а потому множитель $\cos\varepsilon$ равен нулю. Вследствие этого и сам интеграл обращается в нуль для этих частей, и, таким образом, остается вычислить только части интеграла, относящиеся к двум горизонтальным сторонам.

Предположим, что окружность L'M'L''M'' (рис. 22) представляет горизонтальный проводник, что ось в центре O этого круга перпендикулярна к плоскости чертежа, что две вертикальные стороны подвижного проводника проектируются из b и c на радиус OL' и что P — проекция середин двух равных и расположенных на той же вертикали элементов каждой из этих частей. Мы считаем, что оба они обозначены через ds и расположены на расстоянии $\mathrm{OP}=ds$ от центра O, причем для обеих частей начало счета s лежит в точках пересечения их направлений с направлением оси. Вместо того, чтобы вычислять интеграл

$$\frac{2m-1}{3}\,aii'ds'\int\frac{dr}{ds'}\cdot\frac{\cos\varepsilon ds}{r^2}$$

отдельно для каждой из этих частей и объединить оба результата, лучше взять его всего один раз от $s=\mathrm{O}b=s_1$ до $s=\mathrm{O}c=s_2$, как интеграл суммы двух моментов сил, с которыми действует элемент ds' на два элемента, обозначенные через ds. Обозначая через γ угол L'OM', имеем $s=a\gamma+\mathrm{C}$, $ds'=ad\gamma$; а так как радиус OM перпендикулярен к элементу ds' и две горизонтальные стороны подвижного проводника электрический ток пробегает в противоположных направлениях, то очевидно, что для стороны, где он направлен к оси, нужно положить $\varepsilon=\frac{\pi}{2}-\gamma$, а для второй $\varepsilon=\frac{\pi}{2}+\gamma$.

Если обозначить через r и r' расстояния от элемента ds' до двух элементов этих сторон, обозначенных через ds, то получим для результирующего момента действия ds' на элемент первой стороны, где $\cos\varepsilon=\sin\gamma$,

$$\frac{(2m-1)\,a^2ii'd\gamma}{3}\cdot\frac{dr}{ds'}\cdot\frac{\sin\gamma ds}{r^2},$$

а для момента того же действия на элемент второй стороны, где $\cos\varepsilon=-\sin\gamma$,

$$-\frac{(2m-1)\,a^2ii'd\gamma}{3}\cdot\frac{dr'}{ds'}\cdot\frac{\sin\gamma ds}{r'^2}.$$

Пусть h и h' — расстояния двух горизонтальных частей подвижного проводника от плоскости кругового проводника. Тогда

$$r^2=h^2+a^2+s^2-2as\cos\gamma,\quad r'^2=h'^2+a^2+s^2-2as\cos\gamma,$$

поэтому

$$r\frac{dr}{ds}ds'=r'\frac{dr'}{ds'}ds'=as\sin\gamma d\gamma;$$

и так как $ds'=ad\gamma$, то имеем

$$\frac{dr}{ds'}=\frac{s\sin\gamma}{r},\quad \frac{dr'}{ds'}=\frac{s\sin\gamma}{r'}.$$

Подставляя эти значения в полученные нами выше выражения для двух моментов, найдем, что их сумма равна

$$\frac{(2m-1)\,a^2ii'}{3}\left(\frac{\sin^2\gamma}{r^3}-\frac{\sin^2\gamma}{r'^3}\right)sdsd\gamma.$$

Полный момент, зависящий от действия подвижного проводника на круговой проводник, равен двойному интегралу этого выражения, взятому от $\gamma=0$ до $\gamma=2\pi$ и от $s=s_1$ до $s=s_2$, причем безразлично, в каком порядке производятся эти два интегрирования. Момент выражается следующим образом:

$$\frac{(2m-1)\,aii'}{3}\int_{s_1}^{s_2}sds\int_0^{2\pi}\left(\frac{\sin^2\gamma}{r^3}-\frac{\sin^2\gamma}{r'^3}\right)d\gamma,$$

а так как опыт показывает, что он равен нулю, то и двойной интеграл

$$\int_{s_1}^{s_2} s ds \int_0^{2\pi} \left(\frac{\sin^2\gamma}{r^3} - \frac{\sin^2\gamma}{r'^3}\right) d\gamma = 0,$$

или $2m - 1 = 0$, откуда получается для m значение $\frac{1}{2}$. Мы как раз и поставили себе целью доказать, что постоянная m имеет это значение.

Дело идет теперь лишь о том, чтобы показать, что вышеуказанный двойной интеграл никогда не может быть равен нулю. В этом легко убедиться, ибо прежде всего два члена $\frac{\sin^2\gamma}{r^3}$ и $\frac{\sin^2\gamma}{r'^3}$ не могут менять знака, каково бы ни было значение γ, ибо оба расстояния r и r' всегда должны быть взяты как положительные; далее, эти оба расстояния представляют расстояния от одного и того же элемента ds' кругового проводника до двух элементов, равных ds, находящихся на одной вертикали на каждой из сторон подвижного проводника. Поэтому, если мы предположим для определенности, что r относится к элементу ds той из двух сторон, которая находится на меньшем расстоянии от плоскости подвижного проводника, а r' — к второй стороне, то мы всегда будем иметь $r < r'$, и, следовательно,

$$\left(\frac{\sin^2\gamma}{r^3} - \frac{\sin^2\gamma}{r'^3}\right) d\gamma$$

всегда будет положительным.

Поскольку все элементы первого интеграла положительны, сам интеграл, взятый от $\gamma = 0$ до $\gamma = 2\pi$, также будет положителен, и его произведение на sds будет того же знака, что и ds, если s будет положительно, т. е. если прямоугольник, образованный подвижным проводником, будет весь находиться по одну сторону оси, как мы это здесь и предполагаем. Что касается знака ds, то он определяется направлением тока в обеих горизонтальных частях этого проводника, а так как мы придали $\cos\varepsilon$ различные знаки для этих двух частей, то ds по необходимости будет иметь один и тот же знак и в той, и в другой. Поэтому и все элементы, из которых состоит второй интеграл, от $s = s_1$ до $s = s_2$, будут также одного знака, и таким образом этот интеграл никогда не может быть равен нулю. Отсюда следует, что, согласно изложенному выше, должно быть $m = \frac{1}{2}$, и взаимное действие двух элементов электрического тока имеет вид

$$-\frac{2ii'}{\sqrt{r}} \cdot \frac{d^2\sqrt{r}}{dsds'}\, dsds'.$$

Далее, момент, вызываемый действием кругового проводника на проводник, который может вращаться вокруг оси круга, образуемого первым проводником, должен быть всегда равен нулю, если оба конца подвижного проводника лежат на этой оси или если этот проводник образует замкнутый контур. А это, как мы видим, подтверждается опытом при любой форме контура.

Определив значение m, мы можем теперь подставить это значение, равное $\frac{1}{2}$, вместо m в преобразованную формулу, полученную нами на стр. 201, и вновь предположить в ней p произвольным. Таким образом, имеем для взаимодействия двух элементов ds и ds' выражение

$$-\frac{2ii'dd'\sqrt{r}}{\sqrt{r}} = \frac{\frac{3}{2}ii'}{p-2} \cdot \frac{dd'(r^p)}{pr^p} - \frac{\left(\frac{1}{2} - p\right) ii'}{p-2} \cdot \frac{\cos\varepsilon\, dsds'}{r^2},$$

и в этой формуле можно придать p любое значение. Наиболее удобным значением для вычисления будет $p = -1$. Приняв его, получаем

$$-\frac{2ii'dd'\sqrt{r}}{\sqrt{r}} = \frac{1}{2} ii' r dd' \frac{1}{r} + \frac{1}{2} \frac{ii'' \cos\varepsilon dsds'}{r^2} =$$

$$= \frac{1}{2} ii' dsds' \left(\frac{\cos\varepsilon}{r^2} + r \frac{d^2 \frac{1}{r}}{dsds'} \right).$$

Я получил уже другим способом, на стр. 86, это выражение силы, с которой действуют друг на друга два элемента проводников с током. Им можно пользоваться для упрощения вычислений лишь в том случае, когда эти проводники прямолинейны, потому что только тогда угол ε является постоянным и известным. В этом случае, однако, силы и моменты вращения, возникающие при взаимодействии двух прямолинейных проводников, определяются с помощью этого выражения наиболее простым способом. Если я пользовался в настоящем труде другими способами для вычисления этих величин, то лишь потому, что в то время, когда я его писал, я не знал еще вышеизложенного преобразования моей формулы.

IV. О положении прямой, которую я назвал директрисой электродинамического действия в данной точке, в случае, когда это действие есть действие плоского замкнутого контура, все размеры которого весьма малы

Прямая, которую я назвал *директрисой электродинамического действия в данной точке*, есть прямая, образующая с тремя осями углы, косинусы коих соответственно пропорциональны трем величинам A, B, C; выражения этих трех величин, найденные на стр. 60, принимают вид

$$A=\lambda\left(\frac{\cos\xi}{r^3}-\frac{3qx}{r^5}\right),$$

$$B=\lambda\left(\frac{\cos\eta}{r^3}-\frac{3qy}{r^5}\right),$$

$$C=\lambda\left(\frac{\cos\zeta}{r^3}-\frac{3qz}{r^5}\right),$$

если вместо n подставить число 2, которому n равно. Расположим маленький контур произвольной формы так, как показано на рис. 14, именно, поместив начало координат A в данной точке, возьмем за ось z перпендикуляр AZ, опущенный из точки A на плоскость маленького контура, а за плоскость xz возьмем плоскость, проходящую через этот перпендикуляр и через центр инерции O площади LMS, к которому относятся x, y, z, входящие в выражения для A, B, C. Тогда, очевидно, $y=0$, $q=z$, $\xi=\eta=\frac{\pi}{2}$, $\zeta=0$, и, следовательно, мы будем иметь

$$A=-\frac{3\lambda xz}{r^5},\quad B=0,\quad C=\lambda\left(\frac{1}{r^3}-\frac{3z^2}{r^5}\right)=\frac{\lambda(x^2-2z^2)}{r^5},$$

потому что $r^2=x^2+z^2$. Так как B равно нулю, то директриса AE непременно лежит в плоскости xz, определенной, как сказано выше. Тангенс угла EAX, который директриса образует с осью x, очевидно равен $\frac{C}{A}$, т. е. $\frac{2z^2-x^2}{3xz}$. Поскольку тангенс угла OAX равен $\frac{z}{x}$, мы находим для тангенса угла OAE

$$\operatorname{tg}OAE=\frac{\frac{z}{x}-\frac{2z^2-x^2}{3xz}}{1+\frac{2z^2-x^2}{3x^2}}=\frac{(z^2+x^2)x}{(2x^2+2z^2)z}=\frac{1}{2}\cdot\frac{x}{z}=\frac{1}{2}\operatorname{tg}COA,$$

откуда следует, что если принять $OB=\frac{1}{3}OA$ и восставить к OA в точке B плоскость, перпендикулярную к AO, которая пересекает в точке D нормаль OC к плоскости маленького контура, то прямая ADE, проведенная через точки A, D, будет направляющей действия, производимого в точке A электрическим током, который проходит по этому контуру, ибо мы будем иметь

$$AB=2OB,\ \operatorname{tg}BDA=2\operatorname{tg}BDO,$$

и

$$\operatorname{tg}OAE=\operatorname{ctg}BDA=\frac{1}{2}\operatorname{ctg}BDO=\frac{1}{2}\operatorname{tg}COA.$$

Это построение дает наиболее простым способом положение директрисы AE, вдоль которой, как мы видели на стр. 108, перемещается полюс магнита, помещенный в A, под действием рассматриваемого тока. Следует отметить, что прямая AE расположена относительно плоскости LMS маленького контура, описываемого этим током, так же, как и стрелка наклонения располагается относительно магнитного экватора. В самом деле, если рассматривать точку O как центр земли, плоскости LMS, OAC как плоскости магнитного экватора и меридиана, а прямую AE как направление стрелки наклонения, то очевидно, что угол OAE, заключенный между земным радиусом OA и направлением AE магнитной стрелки, есть дополнение угла наклонения и что угол COA есть дополнение магнитной широты LOA. Предыдущее уравнение, таким образом, становится

$$\operatorname{ctg}\ \text{наклон.} = \frac{1}{2} \operatorname{ctg}\ \text{шир.},$$

или

$$\operatorname{tg}\ \text{наклон.} = 2 \operatorname{tg}\ \text{шир.}$$

V. О выражении силы воздействия неограниченного проводника, изогнутого под углом, на полюс маленького магнита и силы, с которой действует на этот же полюс проводник, имеющий форму параллелограмма, расположенный в той же плоскости

Рассматривать ли полюс B (рис. 34) маленького магнита AB как конец электродинамического соленоида или же как магнитную молекулу, — между обоими этими взглядами нет расхождения относительно выражения силы, с которой действует на этот полюс каждый элемент изогнутого под углом проводника CMZ. Вообще если опустить из точки B на продолжение BO одной из ветвей CμM перпендикуляр $BO = b$, полагая $O\mu = s$, $BM = a$, $B\mu = r$, угол $B\mu M = \theta$, угол $CMH = BMO = \varepsilon$, и обозначить через ρ постоянный коэффициент, то сила, с которой действует на полюс B элемент ds, находящийся в μ, равна

$$\frac{\rho \sin \theta ds}{r^2}.$$

Это выражение надо проинтегрировать от $s = \mathrm{OM} = a \cos \varepsilon$ до $s = \infty$ или, что то же самое, от $\theta = \varepsilon$ до $\theta = 0$. Но из треугольника $\mathrm{BO}\mu$, в котором сторона $\mathrm{OB} = b = a \sin \varepsilon$, имеем

$$r = \frac{a \sin \varepsilon}{\sin \theta}, \quad s = a \sin \varepsilon \operatorname{ctg} \theta, \quad ds = -\frac{a \sin \varepsilon d\theta}{\sin^2 \theta}, \quad \frac{ds}{r^2} = -\frac{d\theta}{a \sin \varepsilon}.$$

Таким образом,

$$\frac{\rho \sin \theta ds}{r^2} = -\frac{\rho \sin \theta d\theta}{a \sin \varepsilon},$$

а интеграл этого выражения равен

$$\frac{\rho}{a \sin \varepsilon} (\cos \theta + C);$$

беря его между указанными выше пределами, получаем значение

$$\frac{\rho (1 - \cos \varepsilon)}{a \sin \varepsilon} = \frac{\rho}{a} \operatorname{tg} \frac{1}{2} \varepsilon.$$

Достаточно его удвоить, чтобы получить силу, с которой действует на полюс B угловой бесконечно длинный проводник CMZ. Эта сила, обратно пропорциональная $\mathrm{BM} = a$, для одного и того же значения a пропорциональна, следовательно, тангенсу половины угла CMH, а не самому углу. Иногда, правда, утверждают, что выражение

$$\frac{\rho \sin \theta ds}{r^2}$$

силы, с которой элемент ds действует на полюс B, было найдено путем *математического анализа* того предположения, что сила, вызванная проводником с током CMZ, пропорциональна углу CMH. Не приходится сомневаться, что

14*

в этом вычислении была какая-то ошибка, и тем любопытнее было бы с ним ознакомиться, что этот анализ имел целью определить выражение дифференциала из выражения определенного интеграла, который получается из него между данными пределами, что, как мне кажется, ни один математик не считал до сих пор возможным.

Так как на практике невозможно ни сделать реально бесконечными ветви MC и MZ согнутого под углом проводника, ни удалить его продолжений, служащих для соединения его ветвей с концами батареи, на достаточно большое расстояние от маленького магнита AB так, чтобы они не оказывали на магнит абсолютно никакого влияния, то, строго говоря, следует рассматривать полученное нами выражение лишь как приближенное. Чтобы иметь возможность проверить на опыте точное выражение, следует вычислить выражение силы, с которой действует на полюс B маленького магнита проводник с током PSRMTSN, участки которого SP и SN, служащие для соединения с двумя концами батареи, покрыты шелком и скручены вместе, как показано в SL, почти до самой батареи. В этом случае оказываемые ими действия взаимно уничтожаются, а остальные участки образуют ромб SRMT, расположенный так, что направление его диагонали SM проходит через точку B. Сохраняя прежние обозначения и полагая, кроме того, угол $BRM = \theta$, угол $BRO' = \theta'$, расстояние $BS = a'$ и перпендикуляр $BO' = b = -a' \sin \varepsilon$, так как угол $BSO' = -\varepsilon$, мы легко убеждаемся в том, что действие участка RS проводника с током на полюс B равно

$$-\frac{\rho(\cos\varepsilon - \cos\theta_1')}{b'}.$$

И так как $b = a \sin \varepsilon$, мы найдем величину действия, оказываемого на тот же полюс B участком MR, взяв предыдущий интеграл от $\theta = \varepsilon$ до $\theta = \theta_1$. Это действие равно

$$\frac{\rho(\cos\theta_1 - \cos\varepsilon)}{b}.$$

Чтобы получить затем действие всего периметра ромба MRST, нужно соединить эти два выражения и удвоить их сумму, что дает

$$2\rho\left(\frac{\cos\theta_1}{b}-\frac{\cos\varepsilon}{b}+\frac{\cos\theta_1'}{b'}-\frac{\cos\varepsilon}{b'}\right).$$

Этому выражению можно придать другую форму, относя положение четырех углов ромба к двум осям BX, BY, проведенным через точку B параллельно его сторонам и пересекающим эти стороны в точках D, E, F, G. Положив $\mathrm{BD}=\mathrm{BF}=g$, $\mathrm{BE}=\mathrm{BG}=h$, имеем

$$b=\mathrm{BO}=g\sin 2\varepsilon,\quad b'=\mathrm{BO}'=h\sin 2\varepsilon,$$

$$\cos\theta_1=\frac{\mathrm{OR}}{\mathrm{BR}}=\frac{h+g\cos 2\varepsilon}{\sqrt{g^2+h^2+2gh\cos 2\varepsilon}},$$

$$\cos\theta_1'=\frac{\mathrm{O'R}}{\mathrm{BR}}=\frac{g+h\cos 2\varepsilon}{\sqrt{g^2+h^2+2gh\cos 2\varepsilon}},$$

при помощи которых находим выражение для силы, действующей на полюс B,

$$2\rho\left(\frac{h+g\cos 2\varepsilon}{g\sin 2\varepsilon\sqrt{g^2+h^2+2gh\cos 2\varepsilon}}+\frac{g+h\cos 2\varepsilon}{h\sin 2\varepsilon\sqrt{g^2+h^2+2gh\cos 2\varepsilon}}-\right.$$

$$\left.-\frac{\cos\varepsilon}{g\sin 2\varepsilon}-\frac{\cos\varepsilon}{h\sin 2\varepsilon}\right)=\rho\left(\frac{2\sqrt{g^2+h^2+2gh\cos 2\varepsilon}}{gh\sin 2\varepsilon}-\frac{1}{g\sin\varepsilon}-\frac{1}{h\sin\varepsilon}\right),$$

после приведения двух первых членов к одному знаменателю и замены в двух последних членах $\sin 2\varepsilon$ равным ему $2\sin\varepsilon\cos\varepsilon$.

Опустим теперь из точки D перпендикуляры DI, DK на прямые BM, BR. Первый, очевидно, будет равен $g\sin\varepsilon$, а второй мы получим, замечая, что умножение его на $\mathrm{BR}=\sqrt{g^2+h^2+2gh\cos\varepsilon}$ дает произведение, равное удвоенной площади треугольника BDR, т. е. $gh\sin 2\varepsilon$. Таким образом, обозначая эти перпендикуляры через $p_{1,1}$ и $p_{1,2}$, имеем

$$\frac{1}{p_{1,1}}=\frac{1}{g\sin\varepsilon},\quad \frac{1}{p_{1,2}}=\frac{\sqrt{g^2+h^2+2gh\cos\varepsilon}}{gh\sin 2\varepsilon}.$$

Если опустить из точки E два перпендикуляра EU, EV на прямые BT и BS и обозначить их через $p_{2,1}$ и $p_{2,2}$, то первый из них будет равен DK по причине равенства треугольников BDR и BET, а второй будет $h = \sin\varepsilon$. Следовательно, выражение силы, с которой периметр ромба MRST действует на полюс B, может быть написано так

$$\rho\left(\frac{1}{p_{1,2}}+\frac{1}{p_{2,1}}-\frac{1}{p_{1,1}}-\frac{1}{p_{2,2}}\right).$$

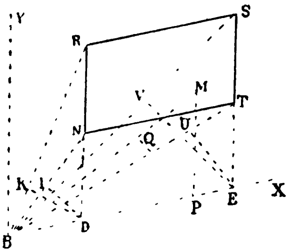


Рис. 44.

В такой форме это выражение применимо не только к ромбу, у которого диагональ направлена так, что она проходит через точку B, но и к любому параллелограмму NRST (рис. 44), по периметру которого проходит электрический ток, действующий на полюс магнита, расположенного в плоскости этого параллелограмма. Действительно, из того, что было сказано на стр. 61, следует, что вычислив величины, обозначенные через A, B, C и $D=\sqrt{A^2+B^2+C^2}$ по отношению к замкнутому плоскому вольтаическому контуру, каким является периметр параллелограмма NRST, и к точке B, расположенной в той же плоскости, имеем

$$A=0,\quad B=0,\quad C=D\iint\frac{d^2\lambda}{r^3},$$

обозначая через $d^2\lambda$ элемент площади этого контура и заменяя постоянный показатель n его значением 2. A и B равны нулю, а потому направляющей электродинамического действия, оказываемого на B рассматриваемым током, будет перпендикуляр, восставленный в этой точке к плоскости параллелограмма, откуда следует:

1. Что сила, с которой этот ток действует на элемент другого электрического тока, середина которого находится

в B, перпендикулярна в этой плоскости к направлению элемента и равна по величине (стр. 48).

$$\frac{1}{2}\,\mathrm{D}ii'ds'\sin\varepsilon = \frac{1}{2}\,ii'ds'\cos\omega\iint\frac{d^2\lambda}{r^3},$$

если обозначить через ω угол, образуемый элементом ds с плоскостью BKST; этот угол есть дополнение угла ε, образованного направлением этого элемента с направлением директрисы.

2. Что на основании сказанного на стр. 107, если поместить в точке B оконечность соленоида, продолжающегося неопределенно, то сила, с которой действует на эту оконечность тот же электрический ток, будет перпендикулярна к плоскости BRST и равна по величине

$$\frac{\lambda' ii'\mathrm{D}}{2g} = \frac{\lambda' ii'}{2g}\iint\frac{d^2\lambda}{r^3},$$

если обозначить через λ' площадь маленьких контуров, из которых состоит соленоид, а через g — расстояние между плоскостями двух смежных контуров.

3. Что полюс магнита, расположенный в B, должен испытывать со стороны контура NRST действие, направленное по тому же перпендикуляру и выражающееся величиной

$$\rho\iint\frac{d^2\lambda}{r^3},$$

где ρ — постоянный коэффициент.

Чтобы найти значение $\iint\frac{d^2\lambda}{r^3}$, относящееся к вольтаическому контуру, который представляется периметром параллелограмма NRST, нужно отнести все точки, например M, его площади к двум осям BX, BY, проведенным через точку B параллельно его сторонам. Обозначая через x, y координаты BP, PM, имеем

$$d^2\lambda = dx\,dy\sin 2\varepsilon, \quad r = \sqrt{x^2 + y^2 + 2xy\cos 2\varepsilon}.$$

Полная сила, приложенная к полюсу B, будет равна

$$\rho \sin 2\varepsilon \int\int \frac{dxdy}{(x + y + 2xy \cos 2\varepsilon)^{\frac{3}{2}}}.$$

Но мы видели на стр. 98, что неопределенный интеграл от

$$\frac{dsds'}{(a^2 + s^2 + s'^2 - 2ss' \cos \varepsilon)^{\frac{3}{2}}}$$

равен

$$\frac{1}{a \sin \varepsilon} \operatorname{arc\,tg} \frac{ss' \sin^2 \varepsilon + a^2 \cos \varepsilon}{a \sin \varepsilon \sqrt{a^2 + s^2 + s'^2 - 2ss' \cos \varepsilon}}$$

или

$$-\frac{1}{a \sin \varepsilon} \operatorname{arc\,tg} \frac{a \sin \varepsilon \sqrt{a^2 + s^2 + s'^2 - 2ss' \cos \varepsilon}}{ss' \sin^2 \varepsilon + a^2 \cos \varepsilon}$$

после сокращения постоянной $\frac{\pi}{2}$. Когда $a = 0$, это выражение принимает вид $\frac{0}{0}$. Поскольку дуга должна быть в этом случае заменена ее тангенсом, равный нулю множитель $a \sin \varepsilon$ исчезает, и мы имеем

$$\int\int \frac{dsds'}{(s^2 + s'^2 + 2ss' \cos \varepsilon)^{\frac{3}{2}}} = -\frac{\sqrt{s^2 + s'^2 - 2ss' \cos \varepsilon}}{ss' \sin 2\varepsilon},$$

что легко проверить дифференцированием. Отсюда непосредственно заключаем, что вычисляемое нами выражение силы, рассматриваемое как неопределенный интеграл, равно

$$-\frac{\rho \sqrt{x^2 + y^2 + 2xy \cos 2\varepsilon}}{xy \sin 2\varepsilon} = -\frac{\rho}{p},$$

где p — перпендикуляр PQ, опущенный из точки P на BM, ибо удвоенная площадь треугольника BPM равна одновременно $p\sqrt{x^2 + y^2 + 2xy \cos 2\varepsilon}$ и $xy \sin 2\varepsilon$, откуда

$$\frac{1}{p} = \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + 2xy \cos 2\varepsilon}}{xy \sin 2\varepsilon}.$$

Теперь остается только вычислить значения, которые принимает этот неопределенный интеграл в четырех вершинах N, R, S, T параллелограмма, и сложить их, взяв с соответствующими знаками. Обозначая попрежнему через $p_{1,2}$, $p_{1,2}$, $p_{2,1}$, $p_{2,2}$ соответственно перпендикуляры DI, DK, EU, EV, мы, очевидно, получим выражение искомой силы

$$\rho\left(\frac{1}{p_{1,2}}+\frac{1}{p_{2,1}}-\frac{1}{p_{1,1}}-\frac{1}{p_{2,2}}\right).$$

Если в этом выражении заменить постоянную ρ через $\frac{1}{2} ii' \cos\omega$, то найдем значение силы, которое получается от действия, оказываемого электрическим током NRST на элемент ds'. Ее направление, лежащее в плоскости BRST, перпендикулярно к направлению элемента. Искомое значение равно

$$\frac{1}{2} ii' ds' \left(\frac{1}{p_{1,2}}+\frac{1}{p_{2,1}}-\frac{1}{p_{1,1}}-\frac{1}{p_{2,2}}\right)\cos\omega.$$

Если элемент, расположенный в B, лежит в плоскости параллелограмма, то имеем $\omega=0$, $\cos\omega=1$, и величина силы, которую мы только что вычислили, принимает вид

$$\frac{1}{2} ii' ds' \left(\frac{1}{p_{1,2}}+\frac{1}{p_{2,1}}-\frac{1}{p_{1,1}}-\frac{1}{p_{2,2}}\right).$$

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Изложение пути, которого надлежит придерживаться при исследовании законов, управляющих явлениями природы, и сил, вызывающих эти явления 9

Описание опытов, при помощи которых устанавливаются четыре случая равновесия, приводящие к такому же числу законов взаимодействия, от которых зависят электродинамические явления 18

Исследование формулы, выражающей взаимодействие двух элементов вольтаических проводников 32

Вытекающее из третьего случая равновесия соотношение между двумя неизвестными постоянными, входящими в эту формулу 42
Общие формулы, выражающие воздействие замкнутого вольтаического контура или системы замкнутых контуров на элемент электрического тока 44
Опыт, при помощи которого проверяется одно следствие из этих формул 49
Приложение предыдущих формул к круговому контуру 55
Упрощения этих формул, когда диаметр кругового контура весьма мал 56
Приложение к плоскому контуру, образующему какую-нибудь замкнутую кривую, сначала для случая, когда все его размеры весьма малы, а затем для любой величины контура 57
Взаимодействие двух замкнутых контуров, расположенных в одной плоскости, сначала в предположении, что все их размеры весьма малы, и затем в случае, когда оба эти контура имеют любые форму и размеры 62
Определение двух неизвестных постоянных, которые входят в основную формулу 63
Воздействие проводника с током, имеющего форму кругового сектора, на прямолинейный проводник, проходящий через центр сектора 65
Описание прибора, предназначенного для проверки результатов теории на проводниках указанной формы 67
Взаимодействие двух прямолинейных проводников 70
Действие, оказываемое на элемент проводника с током совокупностью замкнутых контуров весьма малых размеров, называемой электродинамическим соленоидом 98
Действие, оказываемое на соленоид элементом или ограниченным участком проводника с током, замкнутым контуром или системой замкнутых контуров 103
Взаимодействие двух соленоидов 109
Тожественность соленоидов и магнитов в отношении действия, оказываемого на них проводниками с током или другими соленоидами, или другими магнитами. Обсуждение выводов, которые можно сделать на основании этой тожественности, относительно природы магнитов и взаимодействия, наблюдаемого между земным шаром и магнитом или проводником с током 111
Тожественность действий, оказываемых на полюс магнита или на конец соленоида замкнутым вольтаическим контуром и сово-

купностью двух весьма близких поверхностей, ограниченных этим контуром, на которых две жидкости, подобные двум предполагаемым магнитным жидкостям, северной и южной, неподвижно распределены таким образом, что интенсивность магнетизма повсюду одинакова 132
Разбор трех гипотез о характере взаимодействия элемента проводника с током и так называемой *магнитной молекулы* 151
Невозможность вызвать бесконечно ускоряющееся движение посредством взаимодействия между твердым замкнутым контуром и магнитом или электродинамическим соленоидом. 156
Разбор различных случаев, когда бесконечно ускоряющееся движение может быть вызвано в результате действия, которое вольтаический контур, одна часть которого может перемещаться отдельно от остального контура, оказывает на магнит или на электродинамический соленоид 157
Тожественность между взаимодействием двух замкнутых вольтаических контуров и взаимодействием двух совокупностей, состоящих каждая из двух весьма близких поверхностей, ограниченных соответствующим этой совокупности контуром, причем на этих поверхностях неподвижно распределены две магнитные жидкости — южная и северная — с одинаковой повсюду интенсивностью магнетизма 185
Невозможность вызвать бесконечно ускоряющееся движение посредством взаимодействия между двумя жесткими замкнутыми вольтаическими контурами и, следовательно, посредством взаимодействия между двумя какими-нибудь совокупностями такого рода контуров 189
Опыт, являющийся окончательным подтверждением теории, согласно которой свойства магнита зависят от электрических токов; он показывает, что согнутый в виде спирали или винтовой линии проводник, по которому течет вольтаический ток, испытывает со стороны движущегося металлического диска действие, во всем подобное действию между диском и магнитом, открытому г. Араго 191
Общие выводы из опытов и вычислений, относящихся к электродинамическим явлениям 194

Примечания, касающиеся различных вопросов, излагаемых в настоящем труде

I. О способе доказательства при помощи четырех случаев равновесия, изложенных в начале настоящего труда, что выражение взаимодействия двух элементов проводников с токами равно $-\frac{2ii'}{\sqrt{r}}\frac{d^2\sqrt{r}}{dsds'}dsds'$ 197

II. О преобразовании, с помощью которого можно упростить вычисление взаимодействия двух прямолинейных проводников 201

III. Приложение этого преобразования к определению постоянной m в формуле, выражающей силу, с которой два элемента проводника с током действуют друг на друга, и к определению значения этой силы, которое следует принять для вычисления результатов взаимодействия двух прямолинейных проводников 202

IV. О положении прямой, которую я назвал директрисой электродинамического действия в данной точке, в случае, когда это действие есть действие плоского замкнутого контура, все размеры которого весьма малы 208

V. О выражении силы воздействия неограниченного проводника, изогнутого под углом, на полюс маленького магнита и силы, с которой действует на этот же полюс проводник, имеющий форму параллелограмма, расположенный в той же плоскости 210

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

ТРУД, ПРЕДСТАВЛЕННЫЙ КОРОЛЕВСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК 2 ОКТЯБРЯ 1820 г. И СОДЕРЖАЩИЙ РЕЗЮМЕ ДОКЛАДОВ, ПРОЧИТАННЫХ В АКАДЕМИИ 18 и 25 СЕНТЯБРЯ 1820 г. ОТНОСИТЕЛЬНО ДЕЙСТВИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ[1]

§ 1. О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ДВУХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ

1. Электродвижущее действие проявляется в двоякого рода эффектах, которые я считаю нужным сперва разграничить путем точного определения.

Я назову первый из этих эффектов *электрическим напряжением*, а второй — *электрическим током*.

Напряжение наблюдается, когда два тела, между которыми возникло электродвижущее действие, отделены одно от другого непроводниками[1] по всей своей поверхности, за исключением тех точек, где эта сила возникает. Ток возникает тогда, когда в проводящем контуре создано сообщение между телами, притом в точках, отличных от точек возникновения электродвижущей силы.[2] В первом случае результатом этого действия является приведение двух тел или двух систем тел, между которыми это действие происходит, в особое состояние напряжения. Разность между этими напряжениями есть величина постоянная, если действие постоянно, например, если она вызвана контактом двух разнородных веществ. Напротив, эта разность была бы переменной, если бы она зависела от переменной причины, например от трения или от давления.

---

[1] При простом удалении двух проводящих тел друг от друга разделяющим их непроводником является воздух.

[2] Сюда входит и тот случай, когда оба тела или системы тел, между которыми возникла электродвижущая сила, полностью присоединены к общему резервуару, являющемуся тогда частью цепи.

Этот первый случай является единственным, который мог бы существовать, когда электродвижущее действие развивается между отдельными частями одного и того же непроводящего тела. Примером служит турмалин при изменении его температуры.

Во втором случае, когда тела соединены проводящим контуром, электрическое напряжение отсутствует, легкие тела заметным образом не притягиваются и обычный электрометр не может уже служить указателем того, что происходит в теле. Однако электродвижущее действие продолжается, так как вода, кислота, щелочь или соляной раствор, если они входят в контур, разлагаются, как это уже давно известно, в особенности при постоянном электродвижущем действии.

Кроме того, когда электродвижущее действие вызвано контактом металлов, то происходит, как это недавно открыл г. Эрстед, отклонение магнитной стрелки, помещенной возле какого-либо участка контура, от ее нормального положения. Однако эти действия исчезают, прекращаются разложение воды и отклонение магнитной стрелки, как только прерывается ток. Тогда напряжения восстанавливаются, а легкие тела вновь притягиваются. Это вполне доказывает, что указанные напряжения не служат причиной ни разложения воды, ни открытых г. Эрстедом изменений положения намагниченной стрелки. Данное явление, очевидно, могло бы существовать самостоятельно, если бы электродвижущая сила возникала между отдельными частями одного и того же проводящего тела. Следствия, выведенные в настоящем труде из опытов г. Эрстеда, заставят нас признать существование этих токов в том единственном пока случае, при котором имеются для этого предположения достаточные основания.

2. Посмотрим теперь, от чего зависит разница между этими двумя рядами совершенно различных явлений: с одной стороны, напряжение и давно известные притяжения и отталкивания, а с другой — разложение воды и многих других

веществ, отклонение магнитной стрелки и притяжения и отталкивания особого рода, совершенно отличные от обычных электрических притяжений и отталкиваний, — открытые мною, как я полагаю, впервые. В отличие от обычных, я назвал их *притяжениями и отталкиваниями электрических токов*. Если нет проводящего соединения между телами или системами тел, между которыми возникает электродвижущее действие, и если сами тела являются проводниками, как в вольтовом столбе, то это действие можно мыслить лишь как вносящее постоянно положительное электричество в одно из тел, а отрицательное — в другое. В первый момент, когда ничто не препятствует проявлению этого действия, оба электричества накапливаются, каждое в соответствующей части системы. Но этот процесс останавливается в тот момент, когда разность электрических напряжений[1] придает взаимному притяжению обоих электричеств, стремящемуся их соединить, силу, достаточную для уравновешивания электродвижущего действия. Затем все остается в том же положении, если не считать утечки электричества, которая может мало-помалу происходить через непроводящие тела, например через воздух, разделяющий контур, так как, повидимому, не существует абсолютно изолирующих тел. Поскольку такая утечка происходит, напряжение уменьшается. Но как только напряжение уменьшилось, нарушается равновесие между взаимным притяжением обоих электричеств и электродвижущим действием, и эта последняя сила, если она постоянна, вновь разносит положительное электричество в одну сторону, а отрицательное — в другую, и напряжения восстанавливаются. Такое состояние системы электродвижущих и проводящих тел я называю *электрическим напряжением*. Как известно, это состояние продолжает существовать

[1] Когда столб изолирован, эта разность равна сумме обоих напряжений — положительного и отрицательного. Когда один конец столба соединен с общим резервуаром нулевого напряжения, та же разность равна по абсолютной величине напряжению на другом конце.

в обеих половинах системы после их разделения или при их контакте после прекращения электродвижущего действия, если последнее было вызвано давлением или трением между телами, из коих хотя бы одно не проводник. В обоих этих случаях напряжения постепенно уменьшаются вследствие утечки электричества, о которой мы только что говорили.

Но пусть два тела или две системы тел, между которыми действует электродвижущая сила, соединены друг с другом посредством проводящих тел. Допустим, что между ними нет другой электродвижущей силы, равной и противоположной первой, которая поддерживала бы состояние электрического равновесия, а следовательно, и возникающие при этом напряжения. В таком случае эти последние исчезают или, во всяком случае, становятся весьма малыми, и возникают указанные выше, характерные для этого второго случая, явления. Но так как в остальном ничего не изменилось в расположении тел, между которыми развивалось электродвижущее действие, то последнее несомненно продолжает существовать. Однако взаимное притяжение обоих электричеств, измеряемое разностью напряжений, ставшей равной нулю или весьма малой, не может более уравновесить электродвижущее действие. Поэтому обычно соглашаются с тем, что в этом случае электродвижущее действие продолжает, как и прежде, переносить оба электричества в тех же направлениях. Так возникает двойной ток, один положительного, а другой отрицательного электричества, вытекающих в противоположных направлениях из точек, где существует электродвижущее действие, и воссоединяющихся в противоположной этим точкам части контура. Токи, о которых я говорю, продолжают ускоряться до тех пор, пока инерция электрических жидкостей и сопротивление, испытываемое ими вследствие несовершенства даже наилучших проводников, не уравновесят электродвижущую силу [2]. После этого токи продолжаются неопределенно долго с постоянной скоростью, покуда электродвижущая сила сохраняет свою прежнюю интенсивность, но они всегда прекращаются в тот момент, когда контур разрывается. Такое состояние электричества в цепи проводящих и электродвижущих тел я буду называть кратко *электрическим током* [3].

Так как мне пришлось бы постоянно говорить о двух противоположных направлениях, по которым текут оба электричества, то, во избежание излишних повторений, после слов: *направление электрического тока*, я буду всякий раз подразумевать *положительного электричества* [4]. Так, например, в случае вольтова столба выражение *направление электрического тока внутри столба* будет обозначать направление от конца, на котором при разложении воды выделяется водород, к концу, на котором выделяется кислород, а выражение *направление электрического тока в проводнике, соединяющем концы столба*, будет обозначать направление от конца, где выделяется кислород, к концу, где выделяется водород. Чтобы объединить оба эти случая в одном общем определении, можно сказать, что *направлением электрического тока* называется направление перемещения водорода и оснований солей при разложении током воды или соляных растворов, входящих в контур, независимо от того, составляют ли они в случае вольтова столба часть внешнего проводника или входят в состав пар, из которых состоит этот столб.

Исследования гг. Гэй-Люссака и Тенара над вольтовым столбом [5] — этим богатым источником великих открытий почти во всех областях физических знаний — показали, что разложение воды, солей и тому подобного ни в какой мере не происходит вследствие разности напряжений на концах столба, а лишь вследствие того, что я называю *электрическим током*. Это видно из того, что при погружении концов проводников в чистую воду разложение почти равно нулю, но если, ничего не изменив в остальном расположении, прибавить к воде кислоты или соляного раствора, разложение пойдет очень быстро, так как в первом случае чистая вода является плохим проводником, а во втором она хорошо проводит электричество.

Однако совершенно очевидно, что во втором случае электрическое напряжение концов проволок, погруженных в жидкость, не могло увеличиться, оно могло лишь уменьшиться, по мере того как жидкость становится лучшим проводником. Во втором случае в действительности возрастает лишь ток. Единственно ему мы обязаны разложением воды и солей. Легко также показать, что только ток действует на магнитную стрелку в опытах г. Эрстеда. Для этого достаточно поместить стрелку над горизонтальным вольтовым столбом, расположенным приблизительно в плоскости магнитного меридиана. Покуда концы столба разъединены, стрелка сохраняет свое нормальное направление. Если же к одному из концов столба прикрепить металлическую проволоку и коснуться ею другого конца столба, стрелка сразу меняет свое направление и продолжает оставаться в этом новом положении до тех пор, пока длится контакт и столб сохраняет свою энергию. Лишь по мере того, как столб теряет энергию, стрелка постепенно приближается к своему нормальному направлению. Однако при разрыве тока размыканием контакта возврат стрелки происходит мгновенно. Но ведь тот же контакт вызывает прекращение или значительное уменьшение электрических напряжений. Следовательно, не эти напряжения, а единственно лишь ток влияет на направление магнитной стрелки. Когда частью контура является чистая вода и ее разложение едва заметно, магнитная стрелка, помещенная над или под каким-либо другим участком этого контура, отклоняется также слабо. Прибавление же к воде азотной кислоты, без внесения других каких-либо изменений в аппаратуру, увеличивает отклонение стрелки, одновременно ускоряя разложение воды.

3. Обычный электрометр показывает, есть ли напряжение и какова его интенсивность. Недоставало прибора, который показывал бы наличие тока в вольтовом столбе или в про-

воднике, его энергию и направление. Такой прибор теперь существует: достаточно расположить горизонтально, приблизительно в направлении магнитного меридиана, вольтов столб или какой-нибудь участок проводника и поместить над столбом или сверху, или снизу от проводника прибор, схожий с буссолью и отличающийся от нее лишь своим назначением. Пока в контуре имеется разрыв, магнитная стрелка остается в своем нормальном положении, но как только устанавливается ток, стрелка тем сильнее отклоняется от этого положения, чем больше энергия тока. Направление тока можно узнать из следующего: если мысленно расположить себя в направлении тока, идущего от ног к голове наблюдателя и обратиться лицом к стрелке, то под действием тока всегда будет отклоняться влево от своего нормального направления тот из концов стрелки, который направлен к северу и который я буду называть *южным полюсом магнитной стрелки*, так как он аналогичен южному полюсу земли. Короче можно сказать, что южный полюс стрелки отклоняется влево от действующего на нее тока. Я думаю, что этот прибор в отличие от обычного электрометра следует назвать *гальванометром* [6] и им следует пользоваться при всех опытах с электрическими токами, как принято пользоваться электрометром при электрических машинах [7], чтобы видеть в каждый момент, существует ли ток и какова его энергия.

Первое применение, которое я дал этому прибору, было констатирование, что ток, идущий внутри вольтова столба, от отрицательного конца к положительному, оказывает то же действие на магнитную стрелку, что и ток в проводнике, текущий наоборот, от положительного конца к отрицательному.

Для этой цели хорошо иметь две магнитные стрелки: одну на столбе, а другую — над или под проводником. Южный полюс каждой из стрелок отклоняется влево от тока, возле которого стрелка находится. Таким образом, если вторая стрелка расположена над проводником, она отклоняется в другую сторону, чем стрелка, находящаяся на вольтовом столбе, потому что токи в этих двух участках контура имеют противоположные направления. Напротив, обе стрелки отклоняются в одну сторону, оставаясь приблизительно параллельными друг другу, когда одна стрелка находится над столбом, а другая под проводником.[1] Как только размыкают контур, стрелки в обоих случаях тотчас же возвращаются к своему нормальному положению.

4. Таковы те различия, которые были установлены до меня между действиями электричества в вышеописанных двух его состояниях. Одним из этих состояний является, если не покой, то, по меньшей мере, медленное движение электричества, которое исключительно вследствие трудности вполне изолировать тела, на которых проявляется электрическое напряжение, вызывает двойной ток положительного и отрицательного электричества вдоль непрерывного контура из проводящих тел. Согласно обычной теории, обе жидкости, из которых, как считают, состоит электричество, беспрерывно разделяются в одной части контура и быстро переносятся в противоположных направлениях в другую часть того же контура, где они постоянно воссоединяются. Отвечающий такому определению электрический ток может быть получен и с помощью обычной машины, если она дает электричество обоих знаков и если соединить проводником соответствующие части машины. Однако, не прибегая к машинам очень больших размеров, невозможно получить ток достаточной энергии, какой получается при помощи вольтова столба [8]. Причина лежит в том, что количество электричества, производимое за данный промежуток времени машиной трения

[1] Для того чтобы этот опыт не оставлял никакого сомнения относительно действия тока, идущего внутри столба, необходимо спаять, как я это и сделал, цинковые пластинки с медными по всей поверхности одной из сторон, а не соединять их просто металлическими перемычками, которые справедливо можно рассматривать как часть проводника.

остается постоянным и не зависит от проводящей способности остального контура, а количество электричества, приводимое в движение за известный промежуток времени вольтовым столбом, неограниченно возрастает, чем лучше проводники, соединяющие концы столба друг с другом.

Но различия, о которых я напоминал выше, не являются единственными отличительными признаками двух состояний электричества. Я открыл еще более замечательные отличия, расположив параллельно прямолинейные участки двух проводящих проволок, соединяющих концы двух вольтовых столбов. Одна из проволок была неподвижной, а другая, подвешенная на остриях и снабженная для увеличения подвижности противовесом, могла приближаться и удаляться от первой, оставаясь ей параллельной. Я наблюдал тогда при одновременном пропускании тока через каждую из проволок, что они притягивались друг к другу, когда оба тока были одинаково направлены, и отталкивались друг от друга, когда направление токов было взаимно противоположным.

Но эти притяжения и отталкивания электрических токов существенно отличаются от тех, которые вызываются электричеством в состоянии покоя. Во-первых, они прекращаются, как и процесс химического разложения, в тот момент, когда размыкается проводящий контур. Во-вторых, при обычных электрических притяжениях и отталкиваниях разноименные электричества притягиваются, а одноименные отталкиваются. В случае же электрических токов, как раз наоборот, притяжение наблюдается, когда две проводящие проволоки расположены параллельно таким образом, что одноименные концы находятся с одной стороны и очень близко один возле другого, а отталкивание — когда в параллельных проводниках токи имеют взаимно противоположные направления, так что одноименные концы находятся на возможно большем расстоянии один от другого. В-третьих, когда имеющееся притяжение достаточно сильно, чтобы привести в соприкосновение подвижной проводник с неподвижным проводником, они остаются притянутыми друг к другу, как два магнита, а не разделяются тотчас же, подобно двум соприкоснувшимся вследствие взаимного притяжения разноименно наэлектризованным — одно положительно, другое отрицательно — проводящим телам. Наконец, — и повидимому это последнее обстоятельство зависит от той же причины, что и предыдущие, — два электрических тока притягиваются и отталкиваются в пустоте так же, как и в воздухе, что опять противоречит тому, что наблюдается при взаимодействии двух проводников, наэлектризованных обычным образом. Здесь не идет речь о том, чтобы объяснить эти новые явления. Притяжения и отталкивания двух параллельных токов, смотря по тому, как они направлены, одинаково или противоположно, являются фактами, полученными из эксперимента, который легко может быть повторен. Чтобы избежать во время этого опыта колебаний подвижного проводника, вызываемых легким движением воздуха, прибор необходимо поместить под стекло, пропустив через подставку участки проводника, ведущие к концам вольтова столба. Наиболее удобным является следующее расположение проводников: один из них закрепляется горизонтально на двух опорах, другой подвешивается при помощи двух металлических проволок, составляющих с ним одно целое, к стеклянной оси, расположенной выше первого проводника и опирающейся очень тонкими стальными остриями на две другие металлические опоры. К остриям припаяны упомянутые выше две металлические проволоки, так что электрическое соединение устанавливается через опоры при помощи этих остриев (рис. 1).

Оба проводника расположены таким образом взаимно параллельно, один возле другого и в одной горизонтальной плоскости. Один из них может совершать колебания вокруг горизонтальной линии, проходящей через концы стальных остриев, и в этом своем движении он остается параллельным неподвижному проводнику.

Над срединой стеклянной оси установлен противовес, который увеличивает подвижность колеблющейся части прибора, повысив ее центр тяжести.

Сперва я думал, что электрический ток должен быть установлен в каждом из проводников с помощью отдельного вольтова столба, но это не обязательно. Достаточно, если оба проводника являются частями одного и того же контура,

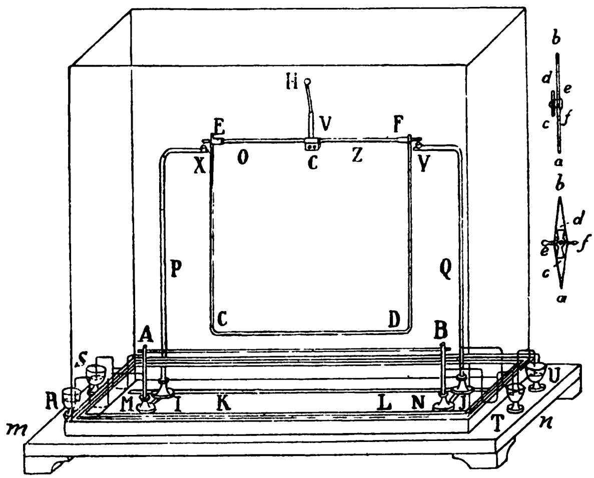


Рис. 1.

так как электрический ток существует в нем повсюду с одинаковой интенсивностью. Из этого наблюдения следует, что в рассматриваемых явлениях не играют никакой роли электрические напряжения концов столба, ибо в остальном контуре напряжение, конечно, отсутствует. Это подтверждается еще и тем, что на большом расстоянии от вольтова столба можно заставить отклоняться магнитную стрелку при помощи очень длинного проводника, середина коего огибает стрелку сверху и снизу в направлении магнитного меридиана. Этот опыт был мне указан знаменитым ученым, которому физико-математические науки особенно обязаны великим прогрессом, достигнутым в наши дни [9]. Опыт удался полностью.

Обозначим через A и B концы неподвижного проводника, через C — конец подвижного проводника, близкий к A, и через D — конец того же проводника, близкий к B. Если один конец столба соединить с A, затем соединить B с C, а D присоединить к другому концу столба, то ясно, что электрический ток в обоих проводниках будет одного направления, и мы увидим, что проводники притягиваются. Если же, наоборот, B соединить с D, а C — с другим концом столба, токи в обоих проводниках будут взаимно противоположного направления, и проводники будут отталкиваться. Так как протяжения и отталкивания электрических токов происходят во всех точках контура, то понятно, что одним неподвижным проводником можно притягивать и отталкивать сколько угодно других проводников и изменять направление скольких угодно магнитных стрелок. Я намерен устроить прибор с одним неподвижным и двумя подвижными проводниками, так чтобы либо оба проводника одновременно притягивались или отталкивались, либо один притягивался, а другой в то же время отталкивался, в зависимости от способа соединения их друг с другом.

Ввиду успеха опыта, указанного мне маркизом де-Лапласом, можно было бы, взяв столько проводников и магнитных стрелок, сколько имеется букв, и помещая каждую букву на отдельной стрелке, устроить своего рода телеграф с помощью одного вольтова столба, расположенного вдали от стрелок. Соединяя поочередно концы столба с концами соответствующих проводников, можно было бы лицу, которое наблюдало бы за буквами на стрелках, передавать сведения со всеми подробностями и через какие угодно препятствия. Если установить со стороны столба клавиатуру с буквами и производить соединения нажатием клавиш, то этот способ сообщения мог бы применяться достаточно просто и не требовал бы больше времени, чем необходимо для нажатия клавиш на одной стороне и чтения каждой буквы на другой.[1]

Вместо того, чтобы давать подвижному проводнику перемещаться параллельно неподвижному, можно дать ему возможность лишь вращаться в плоскости, параллельной неподвижному проводнику вокруг общего перпендикуляра, проходящего через середины обоих проводников. Тогда, как следует из установленного выше закона притяжения и отталкивания электрических токов, будет происходить одновременное притяжение или отталкивание каждой половины обоих проводников, в зависимости от того, будут ли токи направлены в одну сторону или взаимно противоположно. Подвижной проводник будет при этом поворачиваться до тех пор, пока он не станет параллельным неподвижному, так что токи в обоих проводниках будут одинаково направлены. Отсюда вытекает, что при взаимодействии двух электрических токов направляющее действие и притяжение или отталкивание имеют в основе тот же принцип и являются лишь различными проявлениями одного и того же действия; поэтому нет надобности устанавливать различие между этими двумя эффектами. Однако такое различие весьма важно, как мы сейчас увидим, если речь идет о взаимодействии между электрическим током и магнитом, который обычно рассматривают относительно его оси, так как в этом последнем случае оба тела стремятся стать перпендикулярно друг к другу.

Перейдем теперь к изучению взаимодействия электрического тока и магнита, а также двух магнитов друг на друга. Мы увидим, что оба эти случая подчиняются закону взаимодействия двух электрических токов, если считать один из

[1] После редактирования настоящего труда, я узнал от г. Араго, что подобный телеграф был уже предложен г. Земмерингом, с той лишь разницей, что вместо отклонения магнитной стрелки, тогда еще не известного, автор предлагал наблюдать разложение воды в стольких сосудах, сколько имеется букв [10].

этих токов имеющим место в каждой точке линий, проведенных на поверхности магнита, от одного полюса до другого, в плоскостях, перпендикулярных к оси магнита. На основании простого сопоставления фактов мне кажется несомненным, что эти токи вокруг оси магнита реально существуют, или, скорее, что намагничивание является операцией, посредством которой частицам стали сообщается свойство возбуждать для этих токов такое же электродвижущее действие, какое имеется в вольтовом столбе, в окиси цинка минералогов [11], в нагретом турмалине и даже в столбике, составленном из влажного картона и дисков одного и того же металла при двух разных температурах. Но в случае магнита эта электродвижущая сила, возникая между отдельными частицами одного и того же хорошо проводящего тела, никогда не может вызвать, как мы отметили выше, никакого электрического напряжения, а лишь постоянный ток электричества, подобный тому, какой возник бы в вольтовом столбе, если его устроить в виде замкнутой кривой, соединив конец с началом. Совершенно очевидно из сказанного раньше, что подобный столбик не мог бы вызвать ни в одной из своих точек ни напряжений, ни обычных электрических притяжений или отталкиваний, ни химических явлений, так как в контур невозможно было бы включить жидкость. Однако ток, который тотчас же возник бы в таком столбе, оказывал бы направляющее, притягивающее или отталкивающее действие как по отношению к другому электрическому току, так и по отношению к магниту, который является, как мы увидим, не чем иным, как совокупностью электрических токов.

Так, мы приходим к тому неожиданному результату, что магнитные явления вызываются исключительно электричеством и что нет никакой иной разницы между двумя полюсами магнита, как их положение относительно токов, из которых этот магнит состоит. Южный полюс [1] — это тот, который

[1] Т. е. полюс, которым магнитная стрелка обращается к северу; этот полюс лежит справа от токов, из которых состоит магнит, так как

находится справа от этих токов, а северный — находится слева от них.

Продолжение труда о взаимодействии между двумя электрическими токами, между током и магнитом или земным шаром и между двумя магнитами

§ 1

В дальнейших параграфах я перейду к описанию моих опытов относительно взаимодействия между электрическим током и земным шаром или магнитом. Сделанные из опытов выводы позволят свести это взаимодействие, равно как и действие земли на магнит или двух магнитов друг на друга, к взаимодействию двух электрических токов, если магниты рассматривать как совокупность электрических токов, расположенных указанным выше образом. Но прежде всего я считаю своим долгом, в дополнение к сказанному ранее относительно двух электрических токов, изложить новые результаты, полученные мною после напечатания первой части и сообщенные Академии наук в двух трудах, доложенных 9 октября и 6 ноября с. г.

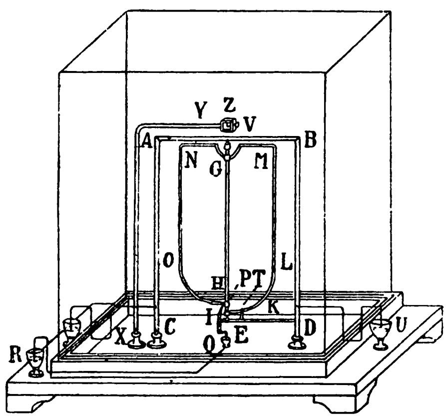


Рис. 2.

Первый опыт, дополнительно произведенный мною, был сделан с прибором, представленным на рис. 2.

он находится слева от внешнего тока, одинаково направленного и обращенного „лицом“ к первым токам.

Электрический ток поступал через опору CA, проходил через проводник AB, вновь спускался через опору BDE, а затем через маленькую стальную чашечку со ртутью E, в которой вращался стальной подпятник стеклянной оси GH, и через медную насадку I ток попадал в проводник KLMNOPQ, конец коего Q был погружен в ртуть, соединенную с другим концом вольтова столба. При том положении проводника KLMNOPQ, которое представлено на рисунке и которое я ему придавал, упирая его в отросток T проводящего проводника, токи на участках MN и AB направлены в противоположные стороны. Если же заставить проводник описать полуокружность, оба тока окажутся одинаково направленными.

При этом я мог наблюдать тот эффект, которого я и ожидал: в момент, когда контур замыкался, подвижная часть прибора поворачивалась вследствие взаимодействия с неподвижным проводником AB, и токи, бывшие вначале взаимно противоположного направления, становились параллельными и одинаково направленными. Благодаря приобретенной скорости, проводник переходил через это последнее положение и окончательно устанавливался, лишь совершив несколько колебаний.

Мое представление о магните, как о совокупности электрических токов, расположенных в плоскостях, перпендикулярных к линии, соединяющей полюсы магнита, побудило меня вначале попытаться имитировать его действие при помощи проводника, согнутого в виде спирали, каждый виток коей играл для меня роль тока, расположенного так же, как токи в магните. Сперва мне казалось, что наклоном витков можно пренебречь, если их шаг будет достаточно мал, но при этом я упустил из виду, что с уменьшением шага в той же пропорции возрастает число витков для данной длины спирали, а следовательно, как я убедился позднее, влияние наклона витков всегда остается одним и тем же.

В труде, доложенном Академии 18 сентября, я сообщил о своем намерении устроить спирали из латунной проволоки для воспроизведения всех действий магнита, как неподвижного — при помощи неподвижной спирали, так и магнитной стрелки — при помощи спирали, намотанной на стеклянной трубке и подвешенной на очень тонком острие, подобно компасной стрелке.[1] При этом я не только рассчитывал на то, что концы этой спирали, подобно полюсам магнитной стрелки, будут притягиваться и отталкиваться от концов

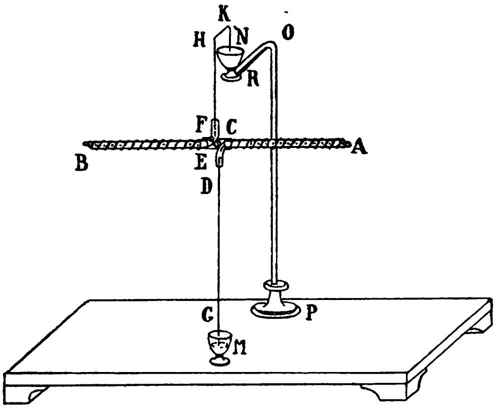


Рис. 3.

магнита, я надеялся также, что спираль будет ориентироваться под действием земного шара. Что касается действия магнита, опыт вполне удался, но для ориентирующей силы земли прибор оказался недостаточно подвижным, и эта сила действовала на слишком коротком плече, чтобы произвести желаемый эффект. Я добился успеха лишь несколько позже при помощи приборов, которые будут описаны в следующем параграфе. В устроенной мною спирали латунная проволока, намотанная на две стеклянные трубки ACD и BEF (рис. 3), продолжена на обоих концах и возвращается через середину

[1] Впоследствии я изменил способ подвешивания, как будет указано ниже.

трубок. Один конец опускается вертикально, а другой FHK изогнут, как показано на рисунке. На обоих концах имеются стальные острия, погруженные в две чашечки со ртутью M и N, соединенные с концами вольтова столба; дна чашечки касается лишь верхнее острие. Понятно само собой, что тот конец этой стрелки, сделанной из электрической спирали, который находится справа от токов, ведет себя по отношению к магниту, как южный полюс компасной стрелки, а противоположный конец — как северный полюс.

Затем я устроил прибор, сходный с прибором рис. 1, в котором неподвижный и подвижной проводники были заменены спиралями из латунной проволоки на стеклянных трубках. Концы проволок не выводились назад сквозь середину трубок, а соединялись с концами вольтова столба так же, как прямолинейные проводники на рис. 1.

На этом приборе я обнаружил новое явление, не согласующееся, как мне сперва показалось, с другими моими наблюдениями над взаимодействием двух электрических токов или тока и магнита. Впоследствии я убедился, что здесь нет никакого противоречия. Но для того, чтобы объяснить все эти явления, нужно принять за общий закон взаимодействия электрических токов некоторый принцип, проверенный мною пока лишь для токов в металлических спиралях, но который я считаю правильным для всех вообще бесконечно малых участков электрических токов, на которые должен быть мысленно разбит всякий ток конечной длины как прямолинейный, так и криволинейный, когда желают вычислить его действие.

Чтобы получить ясное представление об этом законе, возьмем в пространстве линию, изображающую по величине и направлению равнодействующую двух сил, представленных двумя другими линиями, и предположим в направлении этих трех линий три бесконечно малых участка электрических токов, интенсивности коих пропорциональны их длинам. Закон, о котором идет речь, состоит в том, что малый участок электрического тока, направленный по равнодействующей, оказывает на другой ток или на магнит в любом направлении притягивающее или отталкивающее действие, равное действию, которое результировало бы в том же направлении от соединения двух участков тока, направленных по составляющим. Легко убедиться в правильности этого принципа на примере тока, текущего по спирали, если рассматривать его действие, оказываемое параллельно оси спирали и в плоскостях, перпендикулярных этой оси. В этом случае отношение равнодействующей и составляющих — одно и то же для всех бесконечно малых участков кривой, так же как и отношение действий, оказываемых соответствующими бесконечно малыми участками электрических токов; откуда следует, что то же отношение существует также между интегралами этих действий. Между прочим, если закон, о котором мы говорили, справедлив для двух составляющих и их равнодействующей, он должен быть верен и для любого числа сил и их общей равнодействующей, как это легко видеть, применяя его сперва к двум из данных сил, затем к их равнодействующей и к третьей силе и т. д., пока не придем к общей равнодействующей всех данных сил. Из того, что было сказано относительно токов по спиралям, следует, что действие, производимое током каждого из витков, слагается из двух действий: из действия, которое производил бы ток, параллельный оси спирали, интенсивность коего представлена шагом витка, и из действия кругового тока, представленного перпендикулярным к оси сечением цилиндрической поверхности, на которой находится спираль. А так как сумма шагов всех витков спирали, взятых параллельно ее оси, необходимо равняется этой оси, то отсюда следует, что, кроме действия поперечных круговых токов, которое я сравнил с действием магнита, спираль одновременно оказывает такое же действие, как и ток равной интенсивности, текущий вдоль ее оси.

Если вдоль этой оси провести обратно проволоку от спирали, заключив ее для изоляции от витков внутрь стеклянной трубки, то ток на этом прямолинейном участке будет направлен обратно току, отображающему действие спирали, параллельное ее оси. Один из этих токов будет притягивать то, что другой будет отталкивать, и наоборот, так что действия этих токов будут взаимно уничтожаться, и в результате присоединения к спирали такого прямолинейного участка останется в силе только действие поперечных круговых токов, совершенно сходное с действием магнита.

Таково устройство прибора, показанного на рис. 3, хотя я и не предвидел заранее его преимущества, но благодаря этому устройству он воспроизвел в точности действие магнита. Спирали же, в которых не было обратного провода вдоль оси, оказывали, кроме того, еще действие, соответствующее действию прямолинейного проводника, имеющего длину оси спирали. А так как радиусы цилиндрических поверхностей, проходивших через применявшиеся мною спирали, были в достаточной мере малы, то именно продольное действие оказалось наиболее заметным — явление, крайне удивившее меня до того, как я открыл его причину. Я был еще занят отыскиванием этой причины и хотел при помощи новых опытов изучить все обстоятельства, сопровождающие это явление, наблюдавшееся мною сперва на двух спиралях, а затем на спирали и магнитной стрелке, когда г. Араго заметил его также у спирали и стрелки прежде, чем я сказал ему об этом. Такие спирали с обратной прямой проволокой вдоль оси окажутся весьма полезными при исследованиях не только тем, что при малом шаге витков они будут подобны магнитам, но еще и потому, что при большом шаге они представят собой почти адинамический проводник, чтобы подводить и отводить электрический ток, без опасения исказить действие тока на других участках контура, где это действие желательно наблюдать или измерять.

Можно в точности воспроизводить магнитные явления также и с помощью проволоки в форме, показанной на рис. 4, при которой между всеми участками, расположенными в осевом направлении, имеется такая же компенсация, какая существует в вышеуказанных спиралях между действием прямолинейной части проводника и действием, оказываемым витками в противоположном направлении параллельно оси спирали.

На рисунке видно, что заключенная внутри трубки латунная проволока BH′ является продолжением круговых колец E, F, G и т. д.; каждое из колец соединено со следующим при помощи небольших отрезков винтовой линии M, N, O и т. д. с шагом, достаточно большим по сравнению с радиусом цилиндра, на котором эта линия находится. Действие, оказываемое параллельно оси трубки отрезками M, N, O и т. д., равно и противоположно действию отрезка AB; следовательно, остается в силе лишь действие круговых колец в плоскостях, перпендикулярных к оси трубки, и действие отрезков M, N, O и т. д. в тех же плоскостях. Так как последнее действие весьма мало, то при опытах с этим прибором будут оказывать влияние лишь кольца E, F, G и т. д.

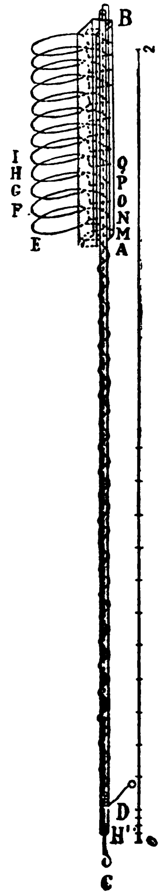


Рис. 4.

Начиная с первых моих исследований по данному вопросу, я стремился найти закон, согласно которому изменяется действие притяжения и отталкивания между двумя электрическими токами в зависимости от их взаимного расстояния и углов между ними. Я вскоре убедился в том, что этот закон не может быть получен из опыта, так как он может иметь простое выражение лишь в том случае, если рассматривать бесконечно малые участки тока, над которыми невозможно экспериментальное исследование. Поддающееся измерению действие токов является интегралом бесконечно малых действий таких элементов — интегралом, который может быть получен лишь двумя последовательными интегрированиями. Первое должно быть произведено по всей длине одного из токов для одной какой-либо точки другого тока, а второе следует произвести над результатом первого интегрирования, взятым между пределами, обозначенными концами первого тока, по всей длине второго тока. Лишь результат этого последнего интегрирования, взятый между пределами, обозначенными концами второго тока, может быть сравниваем с данными опыта. Отсюда следует, — как я указал в труде, доложенном мною в Академии 9 октября, — что прежде всего следует заняться этими интегрированиями, когда сначала хотят определить взаимодействие двух токов конечной длины, прямолинейных или криволинейных, а затем действие электрического тока на магнит или двух магнитов друг на друга. При этом направление элементов криволинейного тока определяется в каждой точке касательной к кривой. Магниты рассматриваются как совокупности электрических токов, расположенных, как сказано выше.

Согласно замечательному опыту г. Био, токи, расположенные в одной плоскости, перпендикулярной к оси магнита, должны быть рассматриваемы как имеющие одну и ту же интенсивность. В этом опыте сравнивалось действие земли на два магнитных стержня, одинаковых по величине и по форме, намагниченных одинаковым способом, но один из коих был полый. При этом оказалось, что движущая сила была пропорциональна массе, а следовательно, причины, вызывавшие эту силу, действовали с равной интенсивностью на все частицы, расположенные в одном слое, перпендикулярном к оси. Для различных слоев интенсивность менялась в зависимости от того, расположен ли слой ближе или дальше от полюса. Когда магнит представляет собой тело вращения вокруг оси, соединяющей оба его полюса, все токи одного слоя должны быть, кроме того, кругами, что дает возможность упростить вычисления.

Для магнитов такой формы можно сперва вычислить действие бесконечно малого участка электрического тока на совокупность концентрических круговых токов, заполняющих всю поверхность данного кругового сечения. При этом вычислении круговым токам приписывается интенсивность, пропорциональная взятому по радиусу бесконечно малому расстоянию между двумя соседними токами, ибо в противном случае результат интегрирования зависел бы от числа бесконечно малых отрезков, на которые радиус разделен окружностями, представляющими токи, что является абсурдом. Так как круговой ток притягивается в той своей части, где он имеет одинаковое направление с действующим на него током, и отталкивается в части, где его направление противоположно, то действие на поверхность круга, перпендикулярного к оси магнита, выразится в равнодействующей силе, равной разности между притяжениями и отталкиваниями, разложенными параллельно этой равнодействующей, и в равнодействующей паре, которую притяжения и отталкивания будут равным образом стремиться вызвать. Величина действия будет найдена интегрированием по радиусам круговых токов, пределы которых должны быть взяты от нуля до радиуса поверхности сплошного магнита или между радиусом внутренней и наружной поверхностей полого цилиндра. Полученный результат следует умножить: 1) на бесконечно малую толщину слоя и на интенсивность, общую для токов, из которых этот слой состоит; 2) на интенсивность и длину бесконечно малого участка электрического тока, который, по предположению, действует на слой. Таким путем будут получены величины равнодействующей силы и пары, из коих состоит элементарное действие между круговым или кольцеобразным слоем и бесконечно малым участком воздействующего тока.

Поскольку речь идет о нахождении взаимодействия между магнитом и током, — прямолинейным конечной длины или криволинейным, — то, зная элементарное действие, остается лишь выполнить интегрирования, требуемые для вычисления равнодействующих силы и пары для всех элементарных действий между каждым слоем магнита и каждым бесконечно малым участком электрического тока.

Если же вопрос идет о взаимодействии между двумя цилиндрическими полыми или массивными магнитами, то сперва надо будет, исходя из взаимодействия между ломтиком или венцеобразным слоем и бесконечно малым элементом тока, вывести при помощи двойного интегрирования величину взаимодействия между этим слоем и другим подобным слоем, состоящим из круговых токов, так же расположенных.

Таким путем будут найдены равнодействующие сила и пара, выражающие взаимодействие двух бесконечно тонких слоев, откуда дальнейшими интегрированиями можно определить взаимодействие между двумя магнитами, ограниченными поверхностями вращения. Но предварительно нужно определить путем сравнения результатов вычислений и опыта, по какому закону изменяется интенсивность электрических токов в слоях в зависимости от расстояния слоя от одного из полюсов магнита. Я еще не закончил вычислений, как относящихся к взаимодействию магнита с электрическим током, так и к взаимодействию двух магнитов.[1] Мною закончены лишь вычисления, с помощью которых я определил взаимодействие двух прямолинейных токов конечной длины, пользуясь гипотезой относительно величины притяжения или отталкивания

---

[1] Эти вычисления предполагают, что в электрических токах магнита ничего не изменяется от присутствия воздействующего электрического тока или другого магнита, что никогда не бывает верно для мягкого железа. Но относительно стального магнита, если он возвращается полностью к своему прежнему состоянию после того, как на него действовал другой магнит или электрический ток, можно заключить, что и во время этого действия направление и интенсивность токов, из которых магнит состоит, не были заметным образом изменены. В противном случае эти изменения продолжали бы существовать, так как закаленная сталь обладает свойством сохранять те изменения, которые она испытывает, будь то при намагничивании электрическим током в опытах г. Араго или при обычных способах намагничивания.

между двумя бесконечно малыми участками электрических токов, лучше всего согласующейся с наблюдавшимися мною явлениями и с общими результатами опыта. Я сначала предполагал лишь тогда опубликовать эту формулу и ее различные применения, когда смогу проверить полученные результаты при помощи точных опытных измерений. Но тщательно рассмотрев наблюдаемые явления, я пришел к выводу, что эта гипотеза достаточно вероятна, чтобы быть вкратце изложенной уже в настоящее время, что и явится объектом одного из следующих параграфов.

Для этих опытов я устроил прибор, показанный мною 17 октября гг. Био и Гэй-Люссаку, отличающийся от прибора, изображенного на рис. 1, лишь тем, что неподвижный проводник заменен проводником, прикрепленным к кругу, который поворачивается при помощи передачи вокруг горизонтальной оси, перпендикулярной к направлению подвижного проводника. Круг градуирован так, что при различных положениях подвижного проводника на лимбе виден угол, образованный направлениями обоих проводников.

Я не даю изображения этого прибора, так как на рис. 5 показан другой сконструированный мною прибор, гораздо более пригодный для точных измерений, которые я имел в виду. В этом новом приборе я сохранил то же расположение неподвижного проводника, а подвижному придал вертикальное положение и дал возможность перемещать суппорт градуированного круга по двум новым направлениям. Помимо уже имевшейся в первом приборе возможности регулировать при помощи винта расстояние суппорта от подвижного проводника, в новом приборе суппорт имеет еще вертикальное перемещение и горизонтальное, перпендикулярное двум остальным. Первое из перемещений необходимо при всяком измерении, оно было единственным в прежнем приборе. Два новых имеют целью облегчить измерения в тех случаях, когда линия, соединяющая середины обоих токов, к ним не перпендикулярна. Я считал, что здесь можно обойтись без регулировочных винтов и делать установку перед опытом от руки, закрепив потом суппорт в заданном ему положении.

Новый прибор показан на рис. 5, и конструкцию его я сейчас объясню. Если я упоминаю о первом приборе, то лишь потому, что на нем я впервые заметил действие земного шара на электрические токи, искажавшее результаты измерявше-

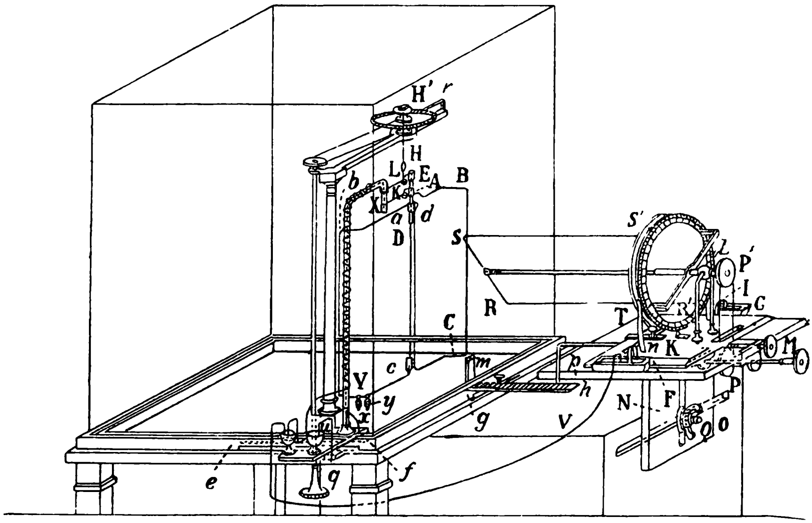


Рис. 5.

гося мною взаимодействия двух проводников. Я прервал тогда наблюдения и сконструировал два прибора, которые вполне выявляют это действие земли и при помощи которых я получил с электрическими токами движения, отвечающие направлению компаса по линии склонения в плоскости горизонта и направлению наклонения стрелки в плоскости магнитного меридиана. Эти последние приборы и опыты, которые я с ними произвел, будут описаны в следующем параграфе, так как они были изложены в труде, доложенном мною Академии наук 30 октября.

Вернемся к прибору на рис. 5 для измерения действия двух электрических токов при всевозможных положениях проводников.

Три возможных движения суппорта KFG производятся: первое при помощи регулировочного винта M, а два других путем укрепления суппорта на деревянной доске N, которая может скользить в горизонтальном и вертикальном направлениях по другой доске O, прикрепленной к основанию прибора. В одной доске сделана горизонтальная, а в другой вертикальная щель, и на пересечении направлений обеих щелей находится винт с гайкой Q, служащей для закрепления подвижной доски на неподвижной. Вращение градуированного круга для придания желаемого наклона прикрепленному к кругу проводнику производится при помощи двух шкивов P и P′. Для того чтобы земля не оказывала на подвижной проводник какого-либо действия, которое примешивалось бы к действию неподвижного проводника, первый составлен из двух равных и противоположно направленных частей ABC*d* и *abc*DE, которым я придал форму, показанную на рисунке. Для присоединения подвижного проводника к концам вольтова столба имеется промежуток в углу A. За этот угол проводник подвешен к нити HH′, закручивание коей должно уравновешивать взаимное притяжение или отталкивание токов. Ветвь BA выходит за A, ветвь DE выходит за E, и они оканчиваются остриями K и L, которые погружены в чашечки со ртутью, но не касаются их дна.

Ножка, на которой укреплены чашечки со ртутью, может быть придвинута или удалена при помощи гайки *d*, которая закрепляет ее в пазу *ef*. Чашечки могут быть железными или платиновыми, одна из них соединена с концом вольтова столба проводником *xu*, проходящим внутри стеклянной трубки. Снаружи этой трубки намотан в виде спирали с большим шагом проводник YVT, оканчивающийся медной пружиной, нажимающей в точке T на окружность градуированного круга. В точке T создается контакт с кругом из латунной проволоки, соединенным с ветвью SS′ проводника. Ветвь SR должна взаимодействовать с подвижным проводником, а ветвь RR′ соединена со вторым кругом из латунной проволоки, на который в точке Z нажимает пружина ZI, соединенная через I с другим концом вольтова столба. При поворачивании градуированного круга вокруг его горизонтальной оси, проводник SR будет поворачиваться в вертикальной плоскости и может образовать любой угол с направлением части BC подвижного проводника, на который он действует через стекло, служащее для защиты от колебаний воздуха.

Чтобы измерить притяжение или отталкивание двух проводников на различных расстояниях, когда проводники между собой параллельны и когда линия, соединяющая их середины, к ним перпендикулярна, поворачивают вертикальную ось, к которой прикреплена нить подвеса, так, чтобы часть BC проводника приходилась непосредственно над медным ножом *m*, что отвечает нулю шкалы *gh*. Указатель *np*, прикрепленный в точке *n* к суппорту градуированного круга, показывает на шкале расстояние между проводниками BC и SR. Если соединить концы контура с концами вольтова столба, проводник BC сперва выносится вперед или назад вследствие притяжения или отталкивания проводником SR, но затем его возвращают в прежнее положение, поворачивая ось нити подвеса. Число оборотов оси, отмечаемое указателем *r* на циферблате, дает величину притяжения или отталкивания двух электрических токов, измеренную закручиванием нити.

Мне нет надобности напоминать физикам, знакомым с подобными измерениями, что интенсивность тока постоянно меняется вместе с энергией вольтова столба. Поэтому необходимо между каждыми двумя измерениями на различных расстояниях производить одно измерение на постоянном расстоянии, чтобы, согласно обычным правилам интерполирования, определять по изменению действия на постоянном расстоянии, как изменяется интенсивность токов и какова их величина в каждый момент времени. Подобным же образом поступают при сравнении притяжений и отталкиваний на одном и том же расстоянии, но при различных углах между направлениями обоих токов, когда линия, соединяющая середины проводников, остается к ним перпендикулярной. В этом случае выполнение промежуточных измерений для определения, путем интерполирования, энергии столба в каждый момент будет облегчено тем, что расстояние между проводниками BC и SR не меняется, и достаточно каждый раз только поворачивать градуированный круг, чтобы приводить его в положение, параллельное BC. Наконец, если хотят измерить взаимодействие между BC и SR, когда линия, соединяющая их середины, к ним не перпендикулярна, придают желаемое положение суппорту градуированного круга и закрепляют его при помощи гайки Q. Произведя ряд измерений, подобных предыдущему, можно будет сравнить результаты при каждом из положений проводника с результатами, полученными, когда линия, соединяющая середины проводников, к ним перпендикулярна. Делая эти сравнения для наиболее короткого расстояния, а затем для разных расстояний, мы будем иметь все, что необходимо, чтобы видеть, как и до какой степени эти различные обстоятельства влияют на взаимодействие электрических токов. Затем остается посмотреть, как согласуется совокупность всех полученных результатов с вычислениями, которые должны быть проделаны, исходя из закона притяжения, допущенного для двух бесконечно малых участков электрических токов.

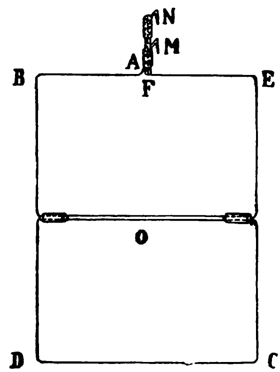


Рис. 6.

Взяв другой подвижной проводник, подвешиваемый точно таким же образом и показанный в отдельности на рис. 6, где соответствующие части обозначены одинаковыми буквами, я приспособил прибор также и для измерений момента сил, стремящихся повернуть проводник под действием другого проводника, при разных углах между проводниками, которым отвечают разные моменты сил. Подвижной проводник ABOCDEF, форма коего видна из рис. 6, подвешивается в середине своей верхней горизонтальной части, где он имеет промежуток между точками A и F. На концах проводника имеются стальные острия M и N, расположенные на одной вертикальной линии, которые погружаются в ртуть, как на рис. 5, не касаясь, благодаря подвесу на крутильной нити, дна чашечек. Чтобы измерить момент вращения, вызванный прямолинейным проводником, его помещают под стеклом, защищающим подвижной проводник от движений воздуха, очень близко к середине нижней горизонтальной части этого проводника (рис. 6). Последний будет поворачиваться под действием неподвижного проводника, причем земля не оказывает на него никакого влияния, так как ее действия на две равные и противоположно направленные половины подвижного проводника взаимно компенсируются.

§ 2. ОРИЕНТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЗЕМНОГО ШАРА [1]

Первые опыты, во время которых я хотел заставить проводник с электрическим током двигаться под действием земного шара, мне не удались не столько вследствие трудности получить достаточно чувствительный подвес, сколько потому, что я был слишком занят идеей, как можно лучше имитировать расположение электрических токов в магните, вместо того чтобы на основании теории, которая приводит магнитные явления к явлениям электрических токов, искать расположение, наиболее благоприятное для действия земли. Эта первоначальная идея руководила мною при устройстве прибора, показанного на рис. 3, и она мне помешала обратить

[1] Содержание этого параграфа было доложено на заседании королевской Академии наук 30 октября 1820 г.

внимание на то обстоятельство, что обращение южного полюса магнитной стрелки к северу и книзу, а северного полюса к югу и кверху является лишь как бы косвенным результатом действия земли. Непосредственным же результатом этого действия является то, что плоскости, перпендикулярные к оси магнита, в которых находятся электрические токи, составляющие магнит, располагаются параллельно плоскости, определяемой результирующим действием всех электрических токов земного шара, и в каждом месте проходят перпендикулярно стрелке наклонения. Отсюда следует, что действие земли должно непосредственно ориентировать плоскость, а не прямую линию. Значит в действительности нужно воспроизвести размещение электричества по замкнутой линии вдоль экватора магнитной стрелки. Затем надо посмотреть, будет ли под действием земли при таком расположении электрического тока его плоскость стремиться принять направление, параллельное экватору магнита, т. е. перпендикулярное стрелке наклонения так, чтобы электрический ток имел одинаковое направление с токами в ориентированной магнитной стрелке.

Движения, которые получает магнит, бывают различны в зависимости от того, может ли он поворачиваться в плоскости горизонта, как компасная стрелка, или же в плоскости магнитного меридиана, как стрелка наклонения, сидящая на горизонтальной оси, перпендикулярной к этому меридиану. Для того чтобы воспроизвести оба эти движения с помощью электрического тока, его плоскость должна быть в первом случае вертикальна, как экваториальная плоскость горизонтальной магнитной стрелки, и должна вращаться вокруг вертикальной оси, проходящей через ее центр тяжести, а во втором случае — плоскость электрического тока, подобно экваториальной плоскости стрелки наклонения, должна поворачиваться лишь вокруг горизонтальной линии, лежащей в этой же плоскости и перпендикулярной к магнитному меридиану.

Вначале я придал оба указанных выше расположения спирали из двух медных витков, весьма пригодной, как мне казалось, для имитирования электрических токов вдоль экваториальной линии магнита. При пропускании через нее электрического тока эта спираль поворачивалась точно так же, как это сделала бы в первом случае экваториальная плоскость компасной стрелки, а во втором случае — как такая же плоскость стрелки наклонения. Но у меня получилось то же, что у г. Эрстеда. В его опытах направляющая сила электрического тока, действовавшего на магнитную стрелку, стремилась повернуть последнюю под прямым углом к направлению тока, но, когда проводник с током был направлен по магнитному меридиану, нельзя было получить отклонения в 100°, так как действие земного шара складывалось с действием электрического тока и магнитная стрелка направлялась по равнодействующей этих двух сил.

В моих опытах с двойной спиралью направляющей силе земли противодействовало в первом случае кручение нити, на которой спираль была подвешена, а во втором случае — сила тяжести, так как центр тяжести спирали нельзя было точно поместить на горизонтали, вокруг которой эта спираль вращалась. Я полагал, что увеличением числа витков нельзя будет усилить действия земли, потому что движущая масса будет возрастать пропорционально движущей силе. Отсюда я заключил, что проще получу желаемый эффект, взяв единичный виток тока, хотя и не вполне замкнутый, — ибо иначе нельзя было бы установить в проволоке ток, — но, во всяком случае, лишь с промежутком, необходимым для соединения с концами вольтова столба.

Вместе с тем мне было ясно, что форма витка роли не играет, поскольку он расположен целиком в одной плоскости, ибо вопрос идет об ориентации именно плоскости.

Я сконструировал тогда два прибора. В одном из них проволока имеет форму окружности ABCD (рис. 7) с радиусом несколько бо́льшим, чем 2 дм. Оба конца латунной проволоки припаяны к двум медным коробочкам E и F, укрепленным на стеклянной трубке и снабженным стальными остриями M и N, которые погружены в ртуть в платиновых чашечках O и P; дна чашечки касается одно только верхнее острие. Чашечки прикреплены к медным коробочкам G и H, соединенным с концами вольтова столба двумя латунными проволоками. Одна из проволок заключена в стеклянную трубку, поддерживающую коробочки и служащую подставкой для прибора, а другая намотана поверх трубки в виде вин-

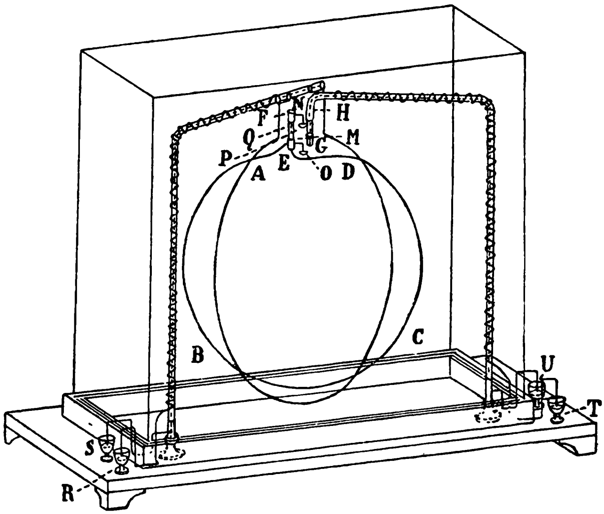


Рис. 7.

товой линии с достаточно большим шагом, по сравнению с диаметром трубки, для того, чтобы действие обеих проволок с противоположно направленными токами почти полностью взаимно компенсировалось. Я поместил под стекло еще второй неподвижный круг из латунной проволоки диаметром несколько бóльшим, чем у подвижного круга, поддерживаемый такой же подставкой, в положении, показанном на рисунке. Соединенные с неподвижным кругом проводники служат для пропускания электрического тока в том случае, если хотят наблюдать вместо действия земного шара на подвижной круг действие двух круговых токов друг на друга. Когда же хотят наблюдать действие земного шара на электрический ток, последний пропускают только через подвижной круг. Здесь я буду говорить только об этом последнем случае. Неподвижный круг служит тогда лишь для точного указания вертикальной плоскости, перпендикулярной к магнитному меридиану, куда должен притти подвижной круг под действием земли. Неподвижный круг предварительно устанавливают в этой плоскости при помощи компаса, а подвижному кругу дают какое-нибудь другое положение, например в плоскости магнитного меридиана. Если затем пропустить ток через подвижной круг, то он повернется, придет в плоскость неподвижного круга, пройдет через нее вследствие приобретенной скорости, вернется обратно и остановится в этой плоскости после нескольких колебаний.

Направление, по которому происходит движение подвижного круга, зависит от направления устанавливаемого в нем электрического тока. Чтобы предвидеть заранее это движение, рассмотрим линию, проходящую через центр круга и перпендикулярную к его плоскости. Эта линия совпадает с магнитным меридианом, когда подвижной круг придет в плоскость, перпендикулярную к этому меридиану. Тогда к северу будет направлен тот конец прямой, который расположен направо от тока, если последний рассматривается как действующий на какую-нибудь точку вне круга, и, следовательно, это будет конец, лежащий налево от наблюдателя, расположенного по направлению тока и смотрящего на стрелку. Конец, изображающий южный полюс магнитной стрелки, обращается к северу, что является достаточным для определения направления движения, которое получит подвижной круг.

В другом приборе экватор стрелки наклонения представлен прямоугольником из латунной проволоки около 3 дм в ширину и 6 в длину. Подвес такой же, как у стрелки наклонения. При помощи этих двух приборов я наблюдал во время часто повторяемых опытов явления направляющего действия земли гораздо более полно, чем мог это делать с двойной спиралью. В первом из них подвижной круг, как я сказал, останавливается точно в том положении, в какое его должно привести, согласно теории, действие земного шара. Во втором приборе проводник покидает положение, в котором он находился в устойчивом равновесии, как я мог констатировать, заставляя его колебаться, и переходит в положение более или менее близкое к тому, которое принял бы при тех же условиях экватор магнитной стрелки. После нескольких колебаний он останавливается там в равновесии между направляющей силой земли и силой тяжести, действие которой изгибает в этом положении латунную проволоку, благодаря чему центр тяжести проводника опускается ниже горизонтальной оси. Как только ток прерывается, проводник в этом приборе возвращается к своему первоначальному положению или если он не возвращается точно к этому положению, а иногда даже отходит от него довольно далеко, то из всех обстоятельств опыта каждый раз совершенно ясно, что это зависит от указанного изгиба проволоки, вызывающего легкое изменение в положении центра тяжести, остающееся и после прекращения электрического тока.

В обоих приборах я менял соединение концов проводников с концами столба, чтобы установить, что ток в столбе не был причиной производимого эффекта, ибо этот ток сохранял все время свое направление неизменным, между тем как отклонение подвижного проводника, в согласии с теорией происходило в обратную сторону. Затем, не меняя соединений со столбом, я пропускал от правой части прибора к левой проводники, ведущие к столбу, чтобы установить, что токи в этих проводниках, расположенных мною, впрочем, большей частью вдали от прибора, не оказывали заметного влияния на его движение. Нет надобности упоминать, что движения происходили во всех случаях в том направлении, в котором двигался бы экватор магнитной стрелки, т. е. что конец перпендикуляра к плоскости проводника, находящийся направо от тока и, следовательно, налево от наблюдателя, который смотрел бы на этот конец в положении, описанном в первом параграфе настоящего труда, относился к северу в первом случае и югу во втором, как это происходило в отношении южного полюса магнита, представленного этим концом. Прибор, на котором я производил этот опыт (рис. 8), состоит из латунной проволоки ABCDEFG, к которой припаян в A кусок такой же проволоки HAK, укрепленной при помощи медной втулочки H на стеклянной трубке XY. К этому куску проволоки прикреплена маленькая стальная ось, покоящаяся на ножевидной закраине железной пластинки N, на которую налита ртуть, соприкасающаяся с этой осью. Часть FG латунной проволоки проходит внутри стеклянной трубки и припаяна к медной втулочке G, на которой укреплена маленькая стальная ось, подобная первой, покоящаяся на закраине другой пластинки M, в которую также налита ртуть. Обе железные пластинки M, N поддерживаются ножками RS, PQ, находящимися в соединении с ртутью в самшитовых чашечках T, U, в которые погружены два проводника, идущие от концов столба. Чтобы помешать изгибу латунной проволоки ABCDEF, на стеклянной трубке XY укреплен при помощи еще одной медной втулочки I очень легкий и очень тонкий деревянный ромб ZV, концы коего поддерживают середины участков BC, DE латунной проволоки, параллельных стеклянной трубке XY.

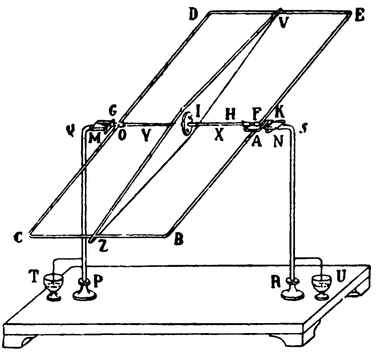


Рис. 8.

Применение ртути в качестве промежуточного звена в этом приборе, равно как и в других, описанных выше, всюду, где хотя и не всегда необходимо, является наилучшим из известных мне средств, обеспечивающих успех опытов. Так, я два раза безуспешно пытался произвести один опыт, который прекрасно удался, когда, пытаясь в третий раз, я сделал соединение более полным при помощи маленького ртутного шарика.

§ 3. О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ МЕЖДУ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРОВОДНИКОМ И МАГНИТОМ

Это взаимодействие, открытое г. Эрстедом, привело меня к открытию взаимодействия двух электрических токов друг на друга, действия земного шара на ток и к установлению того, что все те свойства, какие мы обнаруживаем у магнитов, вызываются распределением электричества вдоль замкнутых кривых, перпендикулярных к оси каждого магнита. Это распределение подобно тому, какое имеет место в проводнике электрического тока. Эти мои заключения, бóльшая часть которых подтвердилась на опыте лишь позднее, были сообщены королевской Академии наук на заседании 18 сентября 1820 г. Я перепишу здесь то, что я прочел на этом заседании, за исключением тех только мест, которые явились бы повторением сказанного выше. В частности, я опущу описание приборов, которые я намеревался построить. Эти приборы были потом построены, и их описание большей частью дано в предыдущих параграфах. Так можно будет получить более правильное представление о пути, которого я придерживался в моих исследованиях по данному вопросу.

Произведенные мною опыты с взаимодействием проводников, соединяющих концы вольтова столба, показали мне, что все относящиеся к этому действию факты могут быть сведены к двум общим выводам, которые следует сперва рассматривать исключительно как общие результаты наблюдений, в ожидании, что их можно будет привести к единому принципу, как я это вскоре попытаюсь сделать. Я начну с изложения этих выводов в форме, которая мне кажется наиболее простой и наиболее общей.

Эти выводы состоят, с одной стороны, в направляющем действии одного из этих тел на другое и, с другой стороны, в притягивающем или отталкивающем, смотря по обстоятельствам, действии, которое устанавливается между этими телами.

Направляющее действие. Пусть магнит и проводник действуют друг на друга, причем один из них неподвижен, а другой может только вращаться в плоскости, перпендикулярной к кратчайшему расстоянию между проводником и осью магнита. Тогда подвижное тело стремится занять такое положение, чтобы направления проводника и оси магнита образовали прямой угол и чтобы полюс магнита, который обычно обращен к северу, был слева от так называемого *гальванического тока* (название, которое я счел нужным изменить на электрический ток), а противоположный полюс был справа. При этом само собою понятно, что линия, измеряющая кратчайшее расстояние от проводника до оси магнита, встречает направление этой оси между двумя полюсами. Чтобы сохранить за этой формулировкой всю общность, которую ей можно придать, следует различать два вида проводников: 1) самый столб, в котором электрический ток, в том смысле этого слова, в каком я его употребляю, переносится от конца, где при разложении воды выделяется водород, к концу, где выделяется кислород; 2) металлическая проволока, соединяющая оба конца столба, в которой тот же ток следует рассматривать как переносящийся, напротив, от конца, который дает кислород, к концу, где освобождается водород. Можно подвести оба эти случая под одно определение, говоря, что под электрическим током подразумевается направление, по которому переносятся водород и основания солей под действием всякого столба, считая, что последний образует с проводником единый контур, прерванный для помещения воды или соляного раствора, разлагаемого действием столба. Впрочем, все, что я далее буду излагать, ни в какой мере не предполагает, что ток происходит действительно в этом направлении, и на употребление мною здесь названия электрический ток можно смотреть лишь как на удобный и употребительный способ обозначать это направление.

В опытах г. Эрстеда направляющее действие всегда сочетается с действием, которое земной шар оказывает на магнитную стрелку, и иногда сочетается, кроме того, с действием, которое я сейчас опишу под названием *притягивающего* или *отталкивающего действия*. Это приводит к сложным результатам, для которых трудно анализировать условия и установить законы.

Чтобы иметь возможность наблюдать эффекты, производимые *направляющим действием* электрического тока на магнит без того, чтобы эти эффекты искажались вследствие разных причин, я построил прибор, который назвал *астатической магнитной стрелкой*. Этот прибор, изображенный на рис. 9, состоит из магнитной стрелки AB, укрепленной перпендикулярно к оси CD. Последней можно придать любое направление, наподобие телескопа, при помощи двух регулировочных винтов E и F. Стрелка может при этом только вращаться в плоскости, перпендикулярной к оси, на которой должен точно находиться ее центр тяжести, так что до того, как стрелка намагничена, следует тщательно удостовериться, что сила тяжести не оказывает никакого действия, которое могло бы менять положение стрелки. Потом стрелку намагничивают, и поскольку плоскость, в которой она движется, не перпендикулярна к направлению стрелки наклонения, прибор показывает, что земной магнетизм стремится установить магнитную стрелку вдоль той из прямых в плоскости ее вращения, которая лежит возможно ближе к направлению стрелки, т. е. вдоль проекции этого направления на плоскость вращения магнитной стрелки. Затем ось ставят параллельно направлению стрелки наклонения. Плоскость, в которой вращается магнитная стрелка, будет тогда перпендикулярна к этому направлению, и земной магнетизм больше не окажет никакого направляющего действия на ма-

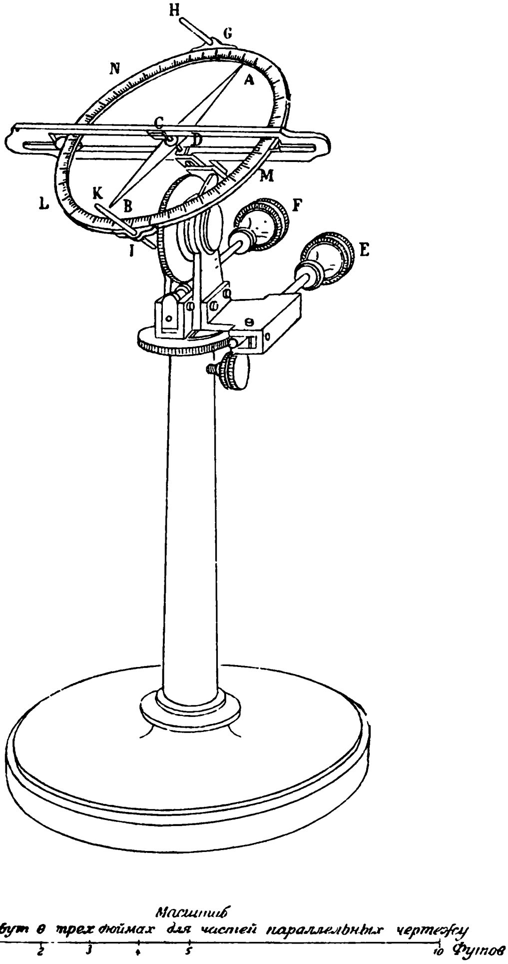


Рис. 9.

гнитную стрелку, которая становится, таким образом, совершенно астатической. В плоскости этой стрелки прибор имеет разделенный на градусы круг LMN, на котором укреплены две стеклянные палочки GH, IK для присоединения проводников с током, которые теперь влияют на стрелку исключительно своим направляющим действием без усложняющего влияния силы тяжести и земного магнетизма.

Основной опыт, производимый на этом приборе, служит доказательством того, что угол между направлениями стрелки и проводника всегда равен прямому углу, когда существует исключительно *направляющее действие*.

Притягивающее или отталкивающее действие. Этот второй общий вывод состоит в следующем: 1) проводник, соединяющий два конца вольтова столба, и магнит, ось коего образует прямой угол с направлением тока, текущего в этом проводнике, притягиваются, в соответствии с предыдущими определениями, когда южный полюс находится слева от действующего на него тока, т. е. когда проводник и магнит занимают то положение один относительно другого, какое они стремятся принять в силу их взаимодействия. 2) Они отталкиваются, когда южный полюс магнита находится справа от тока, т. е. когда проводник и магнит удерживаются в положении, противоположном тому, какое они стремятся придать друг другу. Из самой формулировки этих двух выводов видно, что действие между проводником и магнитом всегда взаимно. Эту взаимность я старался сперва проверить, хотя она мне показалась достаточно очевидной сама по себе. Я считаю излишним приводить здесь описание опытов, которые я произвел, чтобы ее констатировать; достаточно указать, что они полностью удались.

Изложенных выше двух видов действия между магнитом и проводником с током, если их рассматривать как простые выводы из опыта, достаточно для объяснения явлений, которые наблюдал г. Эрстед, и для предвидения того, что должно произойти в аналогичных случаях, относительно которых еще совершенно нет наблюдений. Например, можно заранее указать все, что должно произойти, когда электрический ток действует на стрелку наклонения. Я не буду входить ни в какие детали на этот счет, ибо все, что я могу по этому поводу сказать, непосредственно вытекает из предыдущих формулировок. Я ограничусь указанием, что, сделав только первый общий вывод из заметки г. Эрстеда, я вывел из него объяснение магнитных явлений, основанное на существовании электрических токов в земном шаре и в магнитах, и что это объяснение привело меня ко второму общему выводу и подсказало мне опыт для его подтверждения, который вполне удался. Когда я сообщил о нем г. Араго, он справедливо заметил, что достаточно только этого притяжения между магнитом и проводником, расположенными под прямым углом в направлении, которое они взаимно стремятся друг другу придать, и отталкивания при противоположном направлении, чтобы объяснить результаты, опубликованные автором открытия, в случае, когда к горизонтально расположенной магнитной стрелке приближают вертикальный гальванический проводник, и даже чтобы легко вывести закон одного из опытов г. Эрстеда, который он формулирует так: *если проволока (верхний конец которой сообщается электрически с отрицательным концом гальванической батареи) располагается точно между полюсом и серединой стрелки, то она направляет полюс на запад.*

Это движение магнитной стрелки, происходящее, как указано, независимо от того, находится ли проводник к западу или к востоку от стрелки, есть в первом случае притяжение, потому что южный полюс расположен слева от тока, а во втором случае это есть отталкивание, потому что полюс находится справа.

При всей справедливости этого замечания, мне кажется, однако, что сделанное мною различие между двумя общими выводами из взаимодействия между магнитом и проводником с током становится поэтому лишь более важным для объяснения происходящих явлений. Если в данном случае мы имеем притяжение или отталкивание, всегда отвечающее правилу, изложенному мною выше во втором общем выводе, то в опыте, который г. Эрстед формулирует непосредственно перед этим следующим образом: *если соединительная проволока помещена вертикально перед одним из полюсов стрелки и верхняя часть проводника соединена с отрицательным концом батареи, то полюс смещается к востоку*, движение происходит лишь для того, чтобы магнитная стрелка приняла относительно проводника направление, определяемое первым общим выводом, при соблюдении всех условий, включенных в его формулировку, и, в частности, замечания, которое сделано в конце.

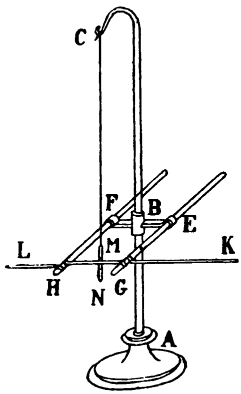


Рис. 10.

Мне остается описать прибор, при помощи которого я констатировал существование между электрическим током и магнитом действия, названного выше *притягивающим* или *отталкивающим действием*, и наблюдал производимые им эффекты без того, чтобы последние искажались примешивающимся *направляющим действием*. Этот прибор, изображенный на рис. 10, состоит из ножки ABC и ветвей BEG и BFH, поддерживающих горизонтальный проводник с током KL, возле которого подвешивается на шелковой нити MC, прикрепленной к концу ножки C, маленькая цилиндрическая магнитная стрелка MN то южным, то северным своим полюсом.

Я начал свое рассуждение, когда хотел найти причины новых явлений, открытых г. Эрстедом, с того, что порядок, в котором были отрыты два явления, не имеет никакого значения для вывода аналогий, наблюдаемых в этих явлениях. Мы могли бы предположить, что, прежде чем узнали о способности магнитной стрелки принимать постоянное направление с юга на север, было известно ее свойство быть приводимой электрическим током в положение, перпендикулярное к этому току, таким образом, что южный полюс стрелки относится влево от тока. Лишь затем будто бы открыли ее свойство постоянно поворачивать к северу тот из своих концов, который относился влево от тока. Для того, кто хотел бы дать объяснение постоянному направлению стрелки с юга на север, разве не показалась бы самой простой мысль, которая непосредственно должна у него возникнуть, что в земле существует электрический ток, направленный таким образом, что север находится налево от человека, который, лежа на поверхности и обратившись лицом к стрелке, имел бы этот ток в направлении от ног к голове, т. е. что в земле существует электрический ток с востока на запад, в направлении, перпендикулярном к магнитному меридиану.

Эта гипотеза становится тем правдоподобнее, чем внимательнее учесть всю совокупность известных фактов. Этот ток, если он существует, должен быть сравниваем с током внутри столба, действующим, как я показал, на магнитную стрелку, имея направление от конца-медь к концу-цинк, если эти концы соединены проводником, и который равным образом существовал бы, если бы столб образовал замкнутую кривую и его концы были соединены парой такой же, как и все остальные. В земном шаре, вероятно, нет ничего, что походило бы на непрерывный однородный проводник. Но различные вещества, из которых он состоит, как раз отвечают случаю вольтова столба, состоящего из случайно расположенных элементов и образующего, замыкаясь на самого себя, как бы непрерывный пояс вокруг всего земного шара. Конечно, расположенные таким образом элементы дают меньше электрической энергии, чем если бы они были расположены в периодически правильном порядке. Но все же ряд различных веществ, образующий замкнутую кривую по окружности земли, должен быть нарочито подобранным, чтобы не дать тока в том или другом направлении. Оказывается, согласно расположению веществ в земле, что этот ток проходит с востока на запад и он повсюду направляет магнитную стрелку перпендикулярно к своему собственному направлению. Это последнее направление описывает, таким образом, по земле магнитную параллель, так что полюс стрелки, который должен быть слева от тока, оказывается постоянно обращенным к северу и стрелка направлена по магнитному меридиану.

В связи с этим я отмечу, что эффект, производимый столбом английской конструкции, когда при помощи даже одной только пары, у которой цинк и медь погружены в кислоту, можно сжечь тонкую металлическую проволоку, служит достаточным доказательством того, что слишком ограниченным является допущение, будто электродвижущее действие существует только между металлами, а находящуюся между ними жидкость нужно рассматривать лишь как проводник. Несомненно имеется действие между двумя металлами — Вольта доказал это наиболее полным образом, — но разве это является основанием для того, чтобы не было действия между металлами и другими телами или только между этими последними? Вероятно, оно имеется в контакте между всеми телами, которые могут более или менее проводить электричество при небольшом напряжении. Однако это действие более заметно в столбах, составленных из металлов и слабых кислот, как потому, что в этих веществах оно развивается с большей энергией, так и потому, что эти вещества лучше всего проводят электричество.

Как бы ни располагать неметаллические тела, мы не сможем вследствие малых размеров, какие могут быть приданы нашим приборам, создать электродвижущее действие, напоминающее собою действие вольтаического столба из металлических дисков, попеременно разделенных жидкостями. Столб длиною в окружности всего земного шара несомненно сохранит некоторую интенсивность, даже если он не будет состоять из металлов и если его элементы будут иметь случайное расположение, ибо на такой большой длине расположение должно быть нарочитым, чтобы действия в одном направлении в точности уничтожались действиями в другом направлении.

По этому поводу я считаю нужным заметить, что электрические токи в одном и том же теле не могут быть не зависящими друг от друга, если только они не разделены веществами, которые вполне изолировали бы их на всем их протяжении, и даже в этом последнем случае они должны были бы влиять друг на друга, потому что их действие передается через все тела. Тем паче токи, сосуществующие в земном шаре, все части коего соприкасаются между собой, должны направиться все по одному и тому же направлению, которое стремится им придать совокупность всех электродвижущих действий этого шара. Впрочем, я очень далек от мысли, что исключительно в этих действиях лежит причина электрических токов, на существование коих указывает принимаемое в каждой точке земной поверхности направление магнитной стрелки. Напротив, я считаю, что основная причина совершенно иная, как я буду иметь случай это изложить в другом месте. Однако эта причина, зависящая от вращения земли, давала бы в каждом месте одно постоянное направление стрелке, что противоречит наблюдению. Поэтому я считаю, что электродвижущее действие веществ, из которых состоит обитаемая нами планета, прибавляется к общему действию, чем и объясняются его колебания по мере того, как прогрессирует окисление в одном или в другом земном континенте.

Что касается колебаний в течение дня, то они легко объясняются поочередным изменением температуры этих двух континентов в течение одного оборота земного шара, тем более, что уже давно известно влияние температуры на электродвижущее действие, влияние, относительно которого г. Десэнь сделал весьма интересные наблюдения. Среди электродвижущих действий различных частей земного шара следует также учесть действие содержащихся в них магнитных руд, которые, как мы увидим, должны быть рассматриваемы как настоящие вольтовы столбы. Повышение температуры, наблюдаемое в проводниках электрических токов, должно происходить также в тех проводниках, которые заключены в земном шаре. Не в этом ли причина внутренней теплоты, недавно констатированной при помощи опытов, о которых на одном из последних заседаний Академии было доложено ее членам? Эти работы о теплоте подчинили данную часть физики математике. И если принять во внимание, что это повышение температуры, когда ток достаточно энергичен, вызывает непрерывное накаливание, сопровождающееся очень сильным свечением без сжигания или потери вещества, то нельзя ли отсюда заключить, что темные небесные тела лишь потому отличаются от светящихся, что электрические токи, устанавливающиеся в первых, имеют мало энергии, а более активные токи во вторых являются причиной их тепла и света.

Мы знаем, что некогда объясняли магнитные явления токами, но предполагали, что они параллельны оси магнита, т. е. так расположены, что они не могли бы существовать, не перекрещиваясь и не уничтожаясь взаимно.

Далее, если электрические токи являются причиной направляющего действия земли, то электрические токи будут также причиной направляющего действия одного магнита на другой. Следовательно, надлежит рассматривать магнит как собрание электрических токов, проходящих в плоскостях, перпендикулярных к его оси и направленных таким образом, что южный полюс магнита, которым он обращается к северу, находится справа от этих токов, поскольку этот полюс всегда расположен слева от помещенного магнита. Этот полюс располагается на торцевой поверхности магнита в направлении, параллельном его оси. Вернее, эти токи сперва устанавливаются в магните по наиболее коротким замкнутым кривым, слева направо или справа налево, и затем линия, перпендикулярная к плоскости этих токов, становится осью магнита, а ее концы образуют два его полюса. Таким образом, на каждом из полюсов магнита электрические токи, из которых он состоит, направлены по замкнутым концентрическим кривым. Я воспроизвел это расположение, насколько это было возможно, при помощи электрического тока по согнутому в спираль проводнику; эта спираль была устроена из латунной проволоки и имела на концах два прямолинейных участка из той же проволоки, которые были заключены в стеклянные трубки,[1] чтобы не сообщаться между собой и чтобы их можно было присоединить к двум концам столба.

В зависимости от направления, в котором пропускают ток через такую спираль, она действительно с силой притягивается или отталкивается полюсом магнита, который подносят к ней таким образом, чтобы направление его оси было перпендикулярно к плоскости спирали. Притяжение или отталкивание зависит от того, направлены ли электрические токи спирали и магнитного полюса одинаково или противоположно. Заменяя магнит второй спиралью, в которой ток направлен так же, как в магните, мы получаем такие же притяжения и отталкивания. Этим путем я открыл, что два электрических тока притягиваются, когда они одинаково направлены, и отталкиваются в обратном случае.

Затем, производя опыт с взаимодействием между одним из полюсов магнита и током в металлической проволоке, согнутой в спираль, и заменяя эту спираль вторым магнитом, мы и теперь получим те же результаты как в отношении притяжения, так и в отношении отталкивания, в соответствии с уже известным нам законом магнитных явлений. Очевидно, впрочем, что все особенности магнитных явлений являются необходимыми следствиями расположения электрических токов, из которых эти магниты состоят, зависящими от того, в каких случаях эти токи притягиваются и в каких случаях они отталкиваются.

Я построил другой прибор, в котором проводник согнут по винтовой линии вокруг стеклянной трубки. Согласно теории, которую я себе создал относительно явлений этого рода, такой проводник, если через него пропустить электри-

---

[1] Впоследствии я изменил это расположение, как будет сказано ниже.

ческий ток, должен оказывать действие подобно магнитной стрелке или стержню во всех тех случаях, когда последние действуют на другие тела или движутся под влиянием земного магнетизма.[1] Мне уже удалось наблюдать часть результатов, которые я ожидал получить от применения проводника, согнутого по винтовой линии, и я не сомневаюсь, что чем больше будут варьироваться опыты, основанные на аналогии, которую теория устанавливает между этим прибором и магнитным стержнем, тем больше будет получено доказательств, что существование электрических токов в магнитах есть единственная причина всех магнитных явлений.

Я мог закончить в Академии чтение того, что я выше переписал, лишь в заседании 25 сентября; я привел в конце своего чтения резюме, в котором сделал из изложенных фактов следующие выводы.

1) Два электрических тока притягиваются, когда они текут параллельно в одном направлении; они отталкиваются, когда они текут параллельно в противоположных направлениях.

2) Отсюда следует, что, когда металлические проволоки, по которым текут токи, могут лишь вращаться в параллельных плоскостях, каждый из двух токов стремится привести другой ток в положение, при котором он был бы ему параллелен и направлен в ту же сторону.

3) Эти притяжения и отталкивания совершенно отличны от обычных электрических притяжений и отталкиваний.

---

[1] Когда я это писал, я еще не знал хорошо действия, оказываемого витками винта параллельно его оси, и я думал, что этим действием можно пренебречь, чего на самом деле делать нельзя. Но все, что я здесь говорю, будет справедливо, если считать, что это относится к винту, в котором уничтожили указанное действие при помощи обратно направленного прямолинейного тока, установленного внутри стеклянной трубки, которую винтовая линия окружает своими витками, так что остается лишь действие, которое каждый виток оказывает в плоскости, перпендикулярной к оси винта, как я это объяснил в первом параграфе настоящего труда.

4) Все явления, открытые г. Эрстедом и вызываемые взаимодействием электрического тока и магнита, которые я проанализировал и свел к двум общим явлениям в предыдущем моем труде, прочитанном в Академии 18 сентября 1820 г., охватываются изложенным выше законом притяжения и отталкивания двух электрических токов, если принять, что магнит есть лишь собрание электрических токов, создаваемых действием друг на друга частиц стали, аналогичным действию элементов вольтова столба и токов, которые существуют в плоскостях, перпендикулярных к линии, соединяющей два полюса магнита.

5. Когда магнит занимает то положение, которое он стремится принять под действием земного шара, эти токи имеют направление, обратное направлению видимого движения солнца, так что, если придать магниту обратное положение, при котором оба его полюса обращены к однородным с ними полюсам земли, те же токи оказываются направленными одинаково с видимым движением солнца.

6) Знакомые нам явления, наблюдаемые при действии двух магнитов друг на друга, охватываются тем же законом.

7) То же относится к действию земного шара на магнит, если принять, что в земле существуют электрические токи, текущие с востока на запад, в плоскостях, перпендикулярных к направлению стрелки наклонения под этим направлением.

8) На одном из полюсов магнита нет ничего такого, чего бы не было и на другом полюсе. Единственная разница между ними состоит в том, что один из полюсов находится слева, а другой — справа от электрических токов, которые сообщают стали магнитные свойства.

9) Когда Вольта показал, что два электричества, положительное и отрицательное, двух концов столба притягиваются и отталкиваются по тем же законам, как и два электричества, полученные известными до него способами, он этим не доказал еще вполне тожественности жидкостей, приводимых в действие столбом и трением. Но эта тожественность

была доказана, поскольку может быть доказана физическая истина, когда он показал, что два тела, из которых одно было наэлектризовано посредством контакта металлов, а другое посредством трения, действовали друг на друга при всех обстоятельствах, как если бы они оба были наэлектризованы при помощи столба или же обычной машины трения. Такого же рода доказательство мы имеем относительно тожественности притяжений и отталкиваний электрических токов и магнитов. Выше я показал Академии взаимодействие двух токов. Ранее известные явления, относящиеся к взаимодействию двух магнитов, охватываются тем же законом. Исходя из этого сходства, можно показать только, что электрические и магнитные жидкости подчинены одним и тем же законам, как это уже давно принято, и единственное изменение, которое надо внести в обычную теорию намагничивания, — это принять, что магнитные притяжения и отталкивания должны быть уподоблены не тем, которые являются результатом электрического напряжения, а тем, которые я наблюдал между двумя токами. Опыты г. Эрстеда, в которых электрический ток дает такие же результаты, действуя на магнит, доказывают, кроме того, что в обоих случаях действуют одни и те же жидкости.

На заседании 9 октября я снова настаивал на тожественности электричества и причины магнитных явлений, показывая, что магнит обладает характеризующими его свойствами лишь потому, что в плоскостях, перпендикулярных к линии, соединяющей его полюсы, имеется такое же расположение электричества, какое существует в проводнике, который соединяет два конца вольтова столба. Это расположение было мною названо *электрическим током*, причем я подчеркивал в прочитанных мною в Академии трудах, что тожественность между магнитными параллелями и проводниками в вольтовом столбе, установить которую я в особенности имел в виду, совершенно не зависит от того, как себе представлять это расположение электричества.

Чтобы доказать эту тожественность непосредственно на опытах, повторенных мною на заседании Академии наук 9 октября, я построил прибор, уже упомянутый в первом параграфе настоящего труда и изображенный на рис. 1. Он помещается на цоколе *mn*, на котором укреплена рама со стеклянным колпаком, служащим для защиты всего прибора от слабых колебаний воздуха. Вне этого колпака я поместил четыре самшитовых чашки R, S, T, U для ртути, в которые погружены латунные проволоки, пропущенные сквозь раму и припаянные к четырем ножкам M, N, P и Q. Первые две ножки поддерживают неподвижный проводник AB, который можно удалять и приближать к другому проводнику, заставляя скользить эти ножки в пазах J, I, где они по желанию закрепляются при помощи находящихся под цоколем гаек. Две другие ножки P и Q имеют на концах стальные шляпки X, Y, достаточные для того, чтобы удерживать помещаемые в них шарики ртути, в которые погружены два стальных острия, прикрепленных к медным втулочкам E, F, в которые входят концы стеклянной трубки OZ. По середине этой трубки имеется другая медная втулка, с припаянной к ней медной трубкой V, в которую входит с трением стержень противовеса N, изогнутый, как показано на рисунке, чтобы можно было изменить положение центра тяжести всей подвижной части прибора, поворачивая коленчатый стержень в медной трубке. Ножки P и Q можно приближать или удалять друг от друга, заставляя их скользить в пазу KL, где их можно закрепить на нужном расстоянии при помощи помещенных под цоколем гаек. К медным втулочкам E и F припаяны концы латунной проволоки ECDF, участок коей CD, параллельный AB, образует то, что я назвал *подвижным проводником*.

При пользовании этим прибором закрепляют ножки P и Q так, чтобы центры шляпок X, Y соответствовали стальным остриям на коробочках E, F, а ножки M и N закрепляют на таком расстоянии от первых двух, какое считают наиболее подходящим. Стальные острия опускают в шляпки и поворачивают стержень противовеса H в цилиндре V, пока подвижной проводник не будет оставаться сам по себе в том положении, какое хотят ему придать, причем его ветви EC и FD будут приблизительно вертикальны. Затем, если хотят показать притяжение двух токов в случае, когда они текут в одном направлении, то соединяют противоположные концы обоих проводников AB и CD при помощи проходящей под прибором латунной проволоки, концы коей загнуты и погружены в две самшитовые чашечки R и U или же в S и T, а остальные две чашечки соединяют с концами столба при помощи двух других латунных проволок. Если же хотят наблюдать отталкивание, то нужно установить при помощи первой латунной проволоки сообщение между двумя чашечками R и S или же между T и U, отвечающими концам обоих проводников, расположенным с одной стороны, а чашечки, расположенные с другой стороны, соединить с концами столба.

При желании эти чашечки дают возможность установить электрический ток только в одном из проводников, погрузив обе проволоки, идущие от концов столба, в две чашечки, соединенные с этим проводником. Так как устройство из четырех самшитовых чашечек, расположенных подобным образом, встречается в других приборах, уже описанных или же которые мне предстоит описать, я его здесь объясняю раз навсегда и в дальнейшем ограничусь лишь изображением его на рисунках этих приборов, не говоря о нем в тексте, во избежание ненужных повторений.

Чтобы сделать вполне наглядной тожественность токов в проводниках и токов, существующих, как я предполагаю, в магнитах, я обзавелся двумя маленькими сильными магнитными стрелками, имеющими посередине двойной латунный крючок и стрелку, указывающую направление тока в магните. На рис. 1 изображены эти магнитные стрелки, одна с лицевой стороны, а другая сбоку; *ab* — магнитная стрелка, *cd* —

двойной крючок, ef — указатель тока. При помощи двойных крючков эти магнитные стрелки, по желанию, можно насадить на проводники AB и CD так, чтобы линия, соединяющая полюсы, была вертикальна и чтобы токи в стрелках были параллельны токам в проводниках и одинаково с ними направлены или же, по желанию, направлены в обратную сторону. Применение этих магнитных стрелок следующее: после того как были вызваны притяжения и отталкивания между AB и CD, при пропускании тока через оба проводника пропускают ток только через один из них, а на другой проводник сажают одну из магнитных стрелок в указанном выше положении, сперва таким образом, чтобы ток, проходящий в ней, как я принимаю, был направлен одинаково с током, который раньше протекал в проводнике, на который данная стрелка насажена. При этом явление *притяжения* или *отталкивания*, наблюдавшееся раньше между двумя проводниками, наблюдается и теперь, в силу действия, которое я назвал в начале этого параграфа притягивающим или отталкивающим. Затем ту же стрелку располагают таким образом, чтобы ее ток был направлен в противоположную сторону, и получают обратное явление в силу того же действия совершенно так же, как если бы мы изменили направление замещаемого этой стрелкой тока, соединив в порядке, обратном тому, который был раньше, концы столба с концами проводника этого тока.

Наконец, не пропуская электрического тока ни через один из проводников и помещая на каждом из них по магнитной стрелке в том же вертикальном положении, при котором ось стрелки образует прямой угол с несущим ее проводником, так что токи в ней параллельны этому проводнику, мы снова получим, в соответствии с известным уже действием двух магнитов друг на друга, притяжение или отталкивание так же, как при токах в проводниках. Это будет наблюдаться, если в обеих магнитных стрелках токи направлены одинаково замещаемыми электрическими токами или если в обеих стрелках токи направлены в обратную предыдущему сторону. Мы получим явления противоположные прежним, если в одной из стрелок токи направлены в одинаковую сторону с замещаемым током, а в другой стрелке — в обратную.

Все это соответствует теории, основанной на тожественности токов в магните и токов, полученных при помощи вольтова столба.

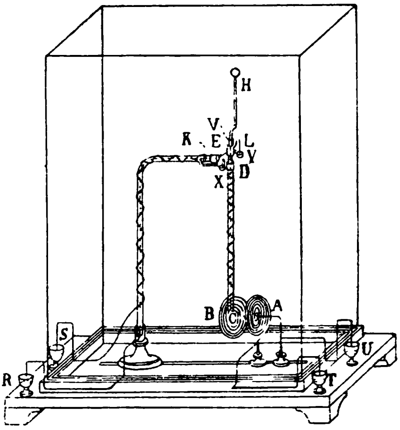


Рис. 11.

Эту тожественность можно также проверить на приборе, изображенном на рис. 2. Если заменить неподвижный проводник AB горизонтальным магнитным стержнем, расположенным перпендикулярно к направлению этого проводника таким образом, чтобы токи в магните были того же направления, что и ток, ранее существовавший в неподвижном проводнике, и пропускать ток только через подвижной проводник, то можно наблюдать, что последний поворачивается под действием магнита совершенно так же, как он это делал, когда ток проходил по обоим проводникам, а магнитного стержня совершенно не было. Для укрепления этого стержня я прибавил к прибору ножку XY, оканчивающуюся открытой с обеих концов насадкой Z, в которой при помощи винта V зажимается магнит в указанном выше положении.

Что касается прибора, изображенного на рис. 11, то, как видно из этого рисунка, средства соединения с концами столба и способ подвеса подвижного проводника приблизительно такие же, как у прибора, изображенного на рис. 1, и эти два прибора отличаются лишь тем, что в приборе, изображенном на рис. 11, два проводника A, B согнуты в спираль и подвижной проводник B подвешен на вертикальной стеклянной трубке CD. Эта трубка оканчивается снизу у центра спирали, образованной этим проводником, и латунная проволока, являющаяся продолжением спирали, проходит внутри трубки. Проволока эта припаяна вверху трубки к медной втулочке E с медной же трубкой V, в которую входит с трением противовес H, и стальным острием L, погружаемым в шарик ртути в шляпке Y, а другой конец той же латунной проволоки намотан по винтовой линии на трубку и припаян к медной втулочке D, на которой укреплено другое стальное острие K, также погружаемое в шарик ртути в шляпке X. Эти две шляпки изготовлены из стали, дабы они не портились от ртути. Острия опираются на их вогнутые поверхности, как в приборе, изображенном на рис. 1.

Здесь было бы уместно сказать о другого рода действии электрических токов на сталь, благодаря которому они сообщают ему магнитные свойства, и показать, что все обстоятельства, сопровождающие это действие, знанием коих мы обязаны г. Араго, являются прямыми доказательствами изложенной в настоящем труде теории электрической природы магнита. Мне кажется, можно утверждать, что эти доказательства окончательно подтверждают данную теорию. Чтобы ничего не пропустить из того, что известно о взаимодействии проводников с током и магнитов, я должен был бы также сказать о весьма интересных опытах, сообщенных Академии в труде, прочитанном на заседании 9 октября 1820 г. чрезвычайно проницательным физиком г. Буажиро [12]. Один из этих опытов не оставляет никакого сомнения по одному важному вопросу теории взаимодействия между проводником с током и магнитом, показывая, что это взаимодействие осуществляется между проводником и всеми поперечными слоями, перпендикулярными к линии, соединяющей полюсы маленького магнита, на который этот проводник действует, не проявляя большей энергии на полюсах магнита, как это наблюдается при действии, которое оказывают на маленькую стрелку различные точки по длине магнитного стержня.

Но открытия г. Араго были изложены им самим в настоящем журнале. Я также надеюсь, что г. Буажиро вскоре опубликует свои опыты, и я буду иметь случай в другом труде,[1] в котором я займусь математической теорией явлений, вызываемых электрическими токами, привести, как доказательство точности этой теории, следствия, которые я выведу и которые естественно вытекают из наблюдений г. Буажиро.

[1] Так как то, что я могу сказать о взаимодействии двух магнитов, в меньшей степени состоит из новых фактов, чем из вычислений, при помощи которых это взаимодействие приводится к взаимодействию двух электрических токов, то я счел нужным отложить до этого второго труда параграф, где я предполагал исследовать законы, согласно которым такое взаимодействие происходит, и показать, что эти законы являются необходимыми следствиями той причины, которую я положил в основу этого взаимодействия в выводах. прочитанных мною в Академии 25 прошедшего сентября.

ОТВЕТ НА ПИСЬМО г. ФАН-БЕКА ОТНОСИТЕЛЬНО НОВОГО ОПЫТА ПО ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМУ [1]

Милостивый государь!

Я крайне сожалею о том, что принужден был задержаться с ответом на письмо, которое я имел честь получить от вас через г. Блэнвиля. Будучи болен и чрезвычайно перегружен занятиями, я не мог найти времени, которое мне требовалось для этого.

Я с большим удовольствием познакомился с вашим интересным опытом, о котором вы пишете в своем письме. Он с очевидностью подтверждает предположение о том, в каком виде электрические токи существуют в магнитах, предположение, которое я считаю наиболее вероятным и о котором я доложил в своей работе год тому назад королевской Академии наук. Я бы и тогда уже считал это предположение единственно возможным, если бы лица, которым я об этом сообщил, прежде чем прочитать доклад в Академии, не отнеслись к нему отрицательно. Именно это отрицательное отношение заставило меня представить Академии эту теорию как несколько более вероятную, чем всякая другая, в ожидании, пока я не произведу необходимых опытов, которые позволили бы окончательно решить этот вопрос. Я пробовал множество таких опытов для достижения поставленной цели. Я хотел, однако, представить такие доказательства, которые не оставляли бы никакого сомнения, и лишь тогда опубликовать полученные результаты. Я еще не успел достигнуть этого, когда пнеймония, от которой я страдал последний год, заставила меня прекратить всякую исследовательскую работу. Тем не менее, в июле 1821 г. я произвел опыт, который окончательно подтвердил мое мнение по этому поводу, хотя данный опыт только косвенным путем доказывает, что электрические токи существуют в магнитах вокруг каждой отдельной частички. Этот опыт вместе с тем непосредственно доказывает, что близость электрического тока не возбуждает в медном металлическом контуре никакого тока путем влияния, даже при самых благоприятных условиях для такого влияния. Вот описание опыта, который я тогда произвел для того, чтобы удостовериться в этом факте.

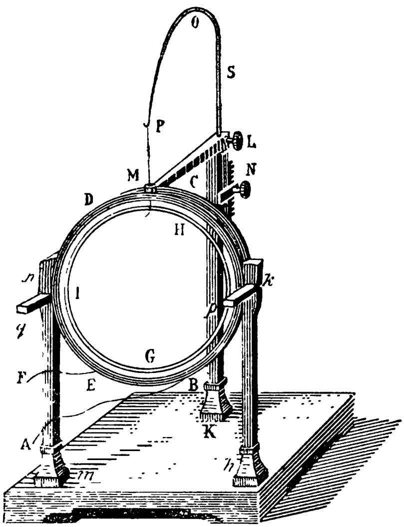


Рис. 1.

Я изготовил спираль BCDE из длинной медной проволоки ABCDEF, обмотанной лентой. Отдельные витки этой спирали были, таким образом, отделены друг от друга шелком покрывающей их ленты. Я расположил эту спираль, как показано на рис. 1, на двух стойках *hkmn*. Оба конца проводника спирали A и F были приключены к полюсам столба, состоящего из двенадцати элементов, площадью в 1 кв. фут, которым я пользуюсь для большинства своих опытов. Через верхнюю часть спирали я пропустил небольшую стеклянную трубку, проходящую между витками, так что часть из них проходила впереди трубки, а часть позади. Сквозь стеклянную трубку я пропустил очень тонкую металлическую проволоку, не касавшуюся внутренних стенок трубки. Один конец проволоки был прикреплен к подвесу KSOP, который можно было поднимать и опускать при помощи маховичка N и устанавливать на определенной высоте при помощи стопорного винта L. К другому концу проволоки был привешен подвижной круг GHI, помещенный концентрически со спиралью в той же плоскости и очень близко к виткам спирали. К стойкам *hkmn* были прикреплены, кроме того, две небольшие линейки *kp* и *nq*. На них можно было опирать магниты, которые должны были воздействовать на подвижной круг. Такое расположение представлялось мне наиболее пригодным для того, чтобы возбудить в круге электрические токи через влияние, если это вообще возможно. Однако, заставляя действовать на круг чрезвычайно сильный магнит, я все-таки не смог заметить никакого его перемещения, несмотря на очень большую подвижность такого рода подвеса.

Когда этот опыт был сделан, я вывел из него заключение, что электрические токи, присутствие которых вокруг каждой частицы магнита я уже предполагал, существуют вокруг этих частичек в железе, никеле и кобальте уже до намагничивания. Будучи, однако, направлены во всевозможные стороны, они не могут вызвать никакого результирующего внешнего действия, так как одни из них стремятся притянуть то, что другие отталкивают, подобно тому как свет, различные лучи которого поляризованы во всех направлениях, не обнаруживает никаких признаков поляризации. Если дело обстоит действительно таким образом, то намагничивание должно происходить каждый раз, когда действие магнита или проводника сообщает всем этим токам одинаковое направление, в результате чего их действия на некоторую точку, расположенную снаружи тела, складываются, вместо того чтобы уничтожать друг друга. Это действие оказывает тогда на эти токи такой же эффект, какой в моих опытах оно производит на подвижную часть проводника, которая вращается, стремясь принять то направление, которое вызывается этим воздействием.

Не следует ли думать, что не только тела, способные намагничиваться, обладают частичками, вызывающими в жидкости, образованной соединением двух электричеств, в которой эти частички постоянно погружены, разложение или, как его обыкновенно называют, электродвижущее действие, возбуждающее вокруг этих частичек появление электрических токов. Быть может, то же самое действие производится частичками всех тел, причем токи, текущие вокруг этих частичек, определяют температуру тела, которая потом приходит в равновесие, как это обычно принято объяснять. Таким образом, единственная разница, имеющаяся в этом отношении между телами, способными намагничиваться, и теми, которые не способны намагничиваться, заключается, быть может, в том, что частички первых тел не препятствуют перемещению электрических токов, циркулирующих вокруг них, в то время как в других телах токи, возбужденные вокруг каждой частички, не могут изменить своего направления или не изменяют его лишь под влиянием силы, превышающей ту, которая до сих пор применялась для воздействия на эти токи.

Если эта точка зрения правильна, то можно надеяться возбудить до некоторой степени магнетизм в тех телах, которые до сих пор, казалось, не могут быть намагничены, если применить более энергичные средства для того, чтобы ориентировать электрические токи в этих телах в определенном направлении. И тогда можно весьма просто объяснить некоторые наблюдения, указывающие на следы намагничивания в большинстве тел, а также и опыт г. Араго над намагничиванием при помощи вольтова столба платиновой проволоки, сохранявшей на несколько мгновений после прекращения действия проводника способность притягивать железные опилки [2].

Г. Эрстед считает соединения и разложения электричества, которые я обозначил названием *электрические токи*, единственной причиной тепла и света, т. е. колебаний жидкости, заполняющей все пространство. Эту жидкость нельзя рассматривать, согласно всеми принятой гипотезе двух электрических жидкостей, иначе, как соединение двух жидкостей в пропорции, в которой они друг друга насыщают. Это мнение великого физика, которому мы обязаны первыми опытами над воздействием проводников на магниты, находится в полном соответствии с совокупностью явлений и получает еще дополнительную степень вероятности, если учесть следующие обстоятельства.

1) При ударе или сжатии двух тел, из которых одно, по крайней мере, является идиоэлектрическим [3], возникает электричество противоположного напряжения в обоих телах, т. е. разложение нейтральной жидкости, образующейся от соединения двух электричеств. Очень вероятно, что такое же разложение происходит при ударе или сжатии двух тел, проводящих электричество, но это разложение нельзя констатировать наблюдением их электрического состояния, потому что, как только они оказываются в различных электрических состояниях, оба электричества вновь соединяются благодаря электропроводности подобных тел. Это соединение является, вероятно, причиной тепла, развивающегося в данном случае, и производит возмущение окружающего эфира подобно тому, как быстрое соединение кислорода и водорода возмущает воздух, когда смесь этих газов превращается в воду и производит колебания окружающего воздуха, которые и являются причиной шума при взрыве.

2) При соединении друг с другом двух субстанций, из которых одна является электроположительной, а другая электроотрицательной, вообще говоря, происходит образование тепла, которое естественно объясняется соединением двух электричеств в той пропорции, в которой они друг друга нейтрализуют. Для того чтобы представить себе отчетливо, каким образом происходит это соединение, надо заметить, что перенос электроотрицательных веществ к положительному полюсу столба и электроположительных — к отрицательному полюсу доказывает, согласно мнению людей, открытия которых больше всего расширили наши познания в химии и физике, что частички этих веществ находятся

в противоположных электрических состояниях и что их химические свойства, по крайней мере в большой своей части, зависят от электрического состояния, в котором они находятся. Так как ничто не может изменить свойства простых веществ, то нет никакого сомнения, что их электрическое состояние коренится в их сущности, так что частица кислорода, например, никогда не может потерять свойственное ей отрицательное электричество, так же как частица водорода свое положительное электричество. Однако конечный объем одного из этих двух газов или любого другого тела в тех же условиях не может проявлять никакого признака электричества, так как электричество, которое свойственно каждой частице, согласно обычным законам электрических действий должно разложить нейтральную жидкость, заполняющую пространство вокруг этой частицы, оттолкнуть электричество того же знака и притянуть электричество противоположного знака, образовав из последнего своего рода маленькую атмосферу, действие которой равно и направлено противоположно действию электричества, свойственного самой частице, так что в результате нельзя наблюдать никакого эффекта.

Так, например, лейденская банка, заряженная внутри одним родом электричества, а снаружи — противоположным электричеством, не притягивает сколько-нибудь заметно легкие тела, которые к ней приближают, и не оказывала бы никакого воздействия на них, если бы она была изготовлена из бесконечно тонкого стекла и если бы оба электричества были бы поэтому в точном равновесии.

Будем рассматривать частицу отрицательного кислорода и окружающую ее положительную атмосферу как лейденскую банку, внутренняя обкладка которой отрицательна, а наружная положительна, в то время как частица водорода может быть рассматриваема как лейденская банка, заряженная в противоположном смысле. Каждый раз, когда какаянибудь причина, например повышение температуры, установит связь между положительным электричеством, находящимся в свободном состоянии вокруг частичек кислорода, и отрицательным электричеством, которое окружает частички водорода в смеси этих обоих газов, оба электричества соединятся, чтобы образовать нейтральную жидкость, и в результате, согласно тому, что мы сказали выше, образуется тепло и свет, в то время как частицы обоих газов соединяются в воду. Предполагая, как это следует из других соображений, что две частицы воды образуются из двух частичек водорода и одной частицы кислорода и что эти частицы остаются всегда в некотором электрическом состоянии, свойственном им, то очевидно, что частица воды будет вести себя так, как будто бы она не имеет никакого электричества, если электричество частицы водорода составляет +1, а электричество частицы кислорода равно —2. В этом случае вода не будет иметь никакого действия на окружающую ее нейтральную жидкость, и вокруг частичек воды за счет этой жидкости не образуется электрической атмосферы для установления относительного равновесия, ибо это равновесие уже существует между обоими противоположными электричествами элементов воды, что и наблюдается приблизительно на самом деле. В других комбинациях двух тел, одного — электроотрицательного, другого — электроположительного, в которых первое по количеству входящих в комбинацию частиц даст в сумме некоторое количество отрицательного электричества, не равное положительному электричеству второго, частица составного тела будет вести себя так, как будто бы она заряжена лишь одним электричеством, аналогичным тому из двух электричеств, которое преобладает, и равным их разности.

Электричество, остающееся в частичках составного тела, удерживает вокруг себя электрическую атмосферу противоположного знака, и очевидно, что если в составном теле преобладают электроотрицательные частички, то часть положительных атмосфер явится источником электричества такого же рода, как атмосферы частичек электроотрицательного составного тела, а избыток образует нейтральная жидкость с отрицательными атмосферами частичек электроположительного тела. Так именно происходит с кислотами, электроотрицательная природа которых установлена уже давно. Когда же в составном теле преобладают электроположительные частицы, отрицательное электричество их атмосфер останется в небольшом количестве вокруг частичек, а избыток нейтрализует положительные атмосферы электроотрицательного элемента. Это бывает тогда, когда составное тело обладает щелочным характером.

Так как частички кислот и щелочей окружены электричеством, противоположным тому, который свойствен им, т. е. частицы первых — атмосферами положительного электричества, а частицы вторых — атмосферами отрицательного электричества, то когда они соединяются и образуют соли, происходит одновременно образование нейтральной жидкости. Когда разноименные электричества этих элементов друг друга уравновешивают, получается нейтральная соль. Если же в составном теле имеется избыток электричества отрицательного или положительного, то соль получается кислая или щелочная, причем этот избыток электричества всегда компенсируется в отношении их действия на любом заметном расстоянии атмосферами электричества противоположного знака, которые неизбежно образуются вокруг каждой частички соли.

Такое представление о вещах я считаю необходимым следствием высказанного многими знаменитыми физиками предположения, что химические свойства простых тел определяются электрическим состоянием их частиц и что, когда частица находится в определенном электрическом состоянии, она поневоле отталкивает в окружающем ее пространстве электричество одноименное и притягивает к себе электричество противоположное. Если принять эту теорию, то необходимо допустить:

1) что каждый раз, когда два тела соединяются, происходит соединение двух электричеств. Это предположение я поставил себе целью доказать;

2) что количество нейтральной жидкости, полученной в результате этого воссоединения, тем больше, чем значительнее разница между электрическим состоянием частиц этих тел.

Однако я слишком отдалился от вопроса, который нас занимает теперь, а именно — от расположения электрических токов в магнитах не вокруг их осей, но вокруг каждой их частички. Мне сначала казалось, что я нашел очень убедительное доказательство в пользу этого предположения, доказательство, которое казалось мне более решающим, чем те, которые были приведены до сих пор. Оно явилось результатом опыта, который я произвел в декабре 1821 г. и о котором я сделал сообщение Академии наук в заседании 7 января минувшего года. В своем докладе от 11 сентября 1821 г. г. Фарадей сказал, что ему не удалось заставить вращаться вокруг своей оси ни магнит, находящийся под воздействием проводника, ни проводник, находящийся под воздействием магнита. Я попытался проверить то, что утверждает по данному вопросу этот великий физик, и наблюдал эффекты, совершенно противоположные тому, что он утверждает. Я поместил для этой цели в пробирку, наполненную ртутью, цилиндрический магнит в вертикальном положении. С обоих концов магнит был снабжен двумя углублениями с винтовыми нарезками для того, чтобы в одно из них ввинтить платиновый противовес, назначение которого — заставить магнит погрузиться в ртуть и сохранить то положение, которое я ему придал. Углубление другого конца магнита, которое поднималось над уровнем ртути на $^1/_6$ часть длины магнита, содержало немного ртути, в которую был погружен нижний конец вертикальной медной проволоки, сообщающейся с одним из полюсов вольтова столба. Вольтов столб с другой стороны соединялся в первом опыте со ртутью в пробирке посредством четырех медных проволок, параллельных первой проволоке, в части их длины, расположенной над пробиркой. В дальнейшем соединение осуществлялось одной проволокой, проходившей через дно пробирки. Магнит вращался вокруг своей оси, очень быстро в первом случае и несколько медленнее во втором, однако достаточно быстро, чтобы можно было отчетливо различить действие на него электрического тока вольтова столба. Вращение магнита прекращалось, как только прерывалось соединение со столбом.[1] Мне удалось также заставить вращаться проводник, по которому проходил ток, располагая его точно так, как был расположен магнит в предыдущем опыте. В верхней части проводника находилась маленькая чашечка, наполненная ртутью для соединений. Под влиянием намагниченного стержня проводник вращался, хотя довольно слабо. Действие это было настолько слабо сначала, что оно не могло преодолеть трения проводника о ртуть, в которую он был погружен, по крайней мере, на две трети длины. Для уменьшения этого трения достаточно было легонько постучать по столу, на котором стояла пробирка, и тогда ожидаемый эффект проявлялся настолько отчетливо, что не оставлял никакого сомнения относительно причин его возникновения. Констатировав эти факты и приписывая вращение магнита единственно действию проводника, а вращение проводника — действию магнита, мне было уже не трудно решить вопрос относительно расположения предполагаемых мною электрических токов магнита и доказать, что они по необходимости должны окружать каждую отдельную частицу и не могут быть расположены концентрически вокруг оси магнита.

Вот ход моих рассуждений. Когда в течение опыта магнит вращается под воздействием некоторого отрезка проводника, помещенного над ним в продолжении его оси, то применяя формулу, данную мною для расчета вели-

[1] После того как я сообщил о своем опыте г. Фарадею, он мне написал, что на следующий же день по получении моего письма повторил мой опыт и получил такое же движение, как и я.

чины взаимодействия двух бесконечно малых отрезков электрических токов, мы найдем, что это взаимодействие всегда равно нулю, если один из этих отрезков взять на продолжении вертикальной оси магнита, а другой — на горизонтальной окружности, концентрической к этой оси, потому что в число сомножителей формулы, определяющей общую величину взаимодействия, входит косинус угла, образуемого двумя плоскостями, проходящими через прямую, соединяющую середины обоих малых отрезков, и которые, кроме того, проходят одна — через линию, изображающую направление одного из токов, а другая — через линию, изображающую направление другого тока. В данном случае одна из этих плоскостей соединяет ось магнита с некоторой точкой окружности, а другая — это плоскость, проведенная тангенциально к этой же точке окружности через середину небольшого отрезка электрического тока, помещенного на продолжении оси магнита. Эти две плоскости, очевидно, перпендикулярны друг другу и образуют прямой угол, косинус которого равен нулю, благодаря чему и взаимодействие этих маленьких отрезков электрического тока равно нулю. Таким образом, если предположить, что все электрические токи цилиндрического магнита расположены концентрически к его оси, то не было бы никакого взаимодействия между ними и проводником, направленным в продолжение оси магнита, что противоречит проделанному мною опыту. Вот почему я был принужден отбросить это предположение. Наоборот, если предположить, что токи вертикально расположенного магнита находятся в горизонтальных плоскостях, но вокруг каждой частички этого магнита, то ось его пересекает плоскости маленьких окружностей, описываемых этими токами вне окружностей. Действие проводника, расположенного на продолжении оси вертикального магнита, равно, однако, нулю по той же причине, что и в предыдущем случае для двух точек, которые находятся с обеих сторон диаметра, проведенного через их центр перпендикулярно к оси магнита, но оно не равно нулю, согласно той же формуле для точек, расположенных на двух полуокружностях справа и слева от этого диаметра. Легко убедиться, что во всех точках одной полуокружности существует притяжение, а во всех точках другой полуокружности — отталкивание. Вертикальные составляющие этих сил не могут переместить магнит вверх или в сторону благодаря устойчивости его равновесия в вертикальном положении в пловучем состоянии. Горизонтальные же составляющие складываются вместе и вращают магнит вокруг проводника в том направлении, которое фактически обнаруживается на опыте.

В настоящее время нет нужды прибегать к таким доказательствам, так как новые опыты и выводы, которые я из них сделал, убедили меня в том, что вращение магнита вокруг своей оси, которое я осуществил первый, и вращение магнита вокруг вертикально расположенного проводника, открытое Фарадеем, гораздо меньше зависят от действия проводника, чем от действия электрических токов в ртути, реакция которых является причиной вращения ртути в опыте сэра Г. Дэви.

Я не располагаю временем, чтобы дать сейчас все необходимые по этому поводу объяснения. Их я вынужден рассмотреть в специальном труде, которым я сейчас занимаюсь. Нет, однако, никакого сомнения относительно эффекта, производимого электрическими токами в ртути, ибо мне удалось получить прямолинейное перемещение плавающего магнита единственно действием этих токов.

Анализируя детали фактов, относящихся к тому роду действия, которое нас занимает сейчас, я нашел еще несколько доказательств того, что электрические токи располагаются вокруг отдельных частичек магнита. Многие обстоятельства лучше объясняются, если принять эту точку зрения и если предположить, что токи эти существуют в металлах, способных воспринимать магнетизм и до их намагничивания, а быть может, и во всех других телах, но что они могут оказать какое-либо действие лишь тогда, когда получают вполне определенное направление под действием либо какого-нибудь другого магнита, либо вольтаического тока. Тогда становится сразу очевидным, что:

1) намагничивание не может изменить температуру намагниченного тела, потому что, согласно предлагаемой мною теории намагничивания стального стержня, в нем происходит после намагничивания столько же разложений и соединений электричества, сколько их было и до намагничивания;

2) причина, которая намагничивает тело, отнюдь не сообщает ему способности проявлять электродвижущее действие, чего не считали возможным допустить некоторые физики, видевшие в этом затруднении возражение против моей теории. Но эта причина только направляет электрические токи, уже заранее существующие в теле, таким же точно образом, как она направляет подвижной участок вольтаической цепи в моих опытах;

3) можно намагнитить стрелку на весьма большом расстоянии и через непроводящие тела, если воздействовать на нее проводником, находящимся в соединении с двумя полюсами вольтова столба, ибо опыт показывает, что этот же проводник действует направляющим образом на подвижной проводник, несмотря на те же препятствия;

4) стальная проволока, расположенная сэром Г. Дэви параллельно соседнему вольтаическому проводнику, приобретает поперечный магнетизм, как будто бы она состоит из маленьких магнитов, перпендикулярных ее направлению, причем магнетизм этот исчезает, как только прерывается соединение этого проводника с полюсами вольтова столба, в то время как стальная проволока, расположенная под прямым углом к этому же проводнику, намагничивалась в продольном направлении как стрелка компаса и сохраняла неопределенно долго свой магнетизм после того, как был прерван ток вольтова столба. Легко убедиться, что согласно законам взаимодействия двух электрических токов, установленных мною, круговые токи, вращающиеся в одинаковом направле-

нии, отталкивают друг друга и стремятся изменить взаимно свое направление, когда они находятся в одной и той же плоскости. Когда же они расположены в параллельных плоскостях, а центры их расположены на прямой, перпендикулярной к этим плоскостям, то получается эффект противоположный. Последнее положение соответствует круговому току в плоскости, перпендикулярной к данной плоскости (рис. 2), проекция которого обозначена на этой плоскости буквами $a'd'$, и другому току, аналогичному первому и вращающемуся в том же направлении, проекция которого на той же плоскости обозначена буквами ad. В таком положении эти токи, при том же расстоянии между ними, обнаруживают более значительную притягивающую силу. Если, не меняя расстояния, переместить ток в $a'''d'''$, то получим положение максимума отталкивания. Следовательно, если предположить, что плоскости этих токов остаются параллельными друг другу,

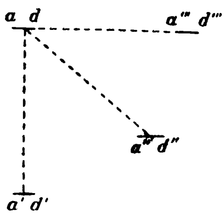


Рис. 2.

то должно существовать некоторое промежуточное положение, например $a''d''$, в котором их притягивающая и отталкивающая силы становятся равными нулю. Отсюда легко вывести заключение, что в случае, о котором упоминает знаменитый физик при намагничивании в поперечном направлении стальной проволоки, помещенной параллельно вольтаическому проводнику, при перерыве должны исчезнуть магнитные свойства этой проволоки, приобретенные ею в направлении, перпендикулярном ее длине, вследствие чего она действовала так, как будто состояла из небольших магнитов, расположенных перпендикулярно к ее длине. Между тем, та же стальная проволока, помещенная в направлении, поперечном к проводнику, и намагничиваемая обычным путем, сохраняла неопределенно долго оба полюса, получившиеся у ее концов. Действительно, в обоих случаях воздействие проводника должно придать всем токам, которые циркулируют вокруг частичек стали, такое направление, чтобы в одной плоскости с проводником оно соответствовало направлению тока в проводнике в той части каждого из токов, которая находится со стороны этого проводника. В случае поперечного намагничивания, какой-нибудь из этих токов находится в одном из тех положений, каковые изображены на рис. 2 там, где расположены проекции ad и $a'd'$ и которые соответствуют притяжению по отношению к токам, находящимся рядом с ними в толще магнита лишь на небольшой части его длины, в то время как этот же ток отталкивается всеми остальными токами всего магнита. Нет ничего удивительного в том, что такое расположение, получившееся под влиянием проводника, сейчас же исчезает, как только проводник перестает действовать, ибо все токи в магните стремятся изменить взаимное расположение. Когда же направление стальной проволоки образует прямой угол с направлением проводника, ток одной частички отталкивается лишь токами тех частичек, которые находятся рядом с ним и близко к нему. Все же остальные токи в магните находятся по отношению к нему в таком положении, при котором существует притяжение, а потому тот порядок, в котором эти токи установились под влиянием проводника, гораздо легче может сохраниться, когда влияние проводника исчезает, что и происходит на самом деле. Надо все же иметь в виду, что токи меняют свое направление вокруг частичек с некоторым затруднением. Если бы это было не так, то, благодаря их взаимодействию, они приняли бы такое положение, при котором между соседними токами не было бы отталкивания, и тогда все токи были бы расположены в разных направлениях и не оказывали бы никакого действия вовне. Это условие может быть осуществлено бесконечным числом способов. Для иллюстрации можно взять случай восьми токов, расположенных в плоскостях правильного октаэдра и направленных таким образом, чтобы токи двух соседних граней имели бы одинаковое направление со стороны ребра, соединяющего эти грани.

Последнее соображение объясняет, почему частички мягкого железа, токи которого меняют направление с наибольшей легкостью, не сохраняют магнетизма, который они приобрели, когда уничтожается причина, вызывающая их магнитное состояние.

Из всего вышесказанного становится ясной причина затруднения, которое мы испытываем, когда стараемся намагнитить даже кратковременно стальную пластину таким образом, чтобы ее полюсы были расположены по середине обеих плоскостей этой пластины. Это затруднение констатировал великий физик, замечательную работу которого я цитировал выше, пытаясь намагнитить стальные пластины для того, чтобы заставить их заменить собою проводник, изогнутый в виде спирали.

Новые факты, указанные в этом первом докладе г. Фарадея, и факт отталкивания, испытываемого очень тонким вертикальным проводником со стороны ртути, в которую он погружен своим нижним концом, о чем он упомянул в своем втором докладе [4], являются новым доказательством правильности моей теории, которая предвидела эти факты раньше, чем опыт их подтвердил, так как они являются непосредственным следствием закона, выведенного мною из моих первых опытов и послужившего мне основой почти для всего, что я установил с того времени. А именно, что небольшие отрезки двух электрических токов, которые протекают по двум сторонам угла, притягиваются, когда они идут в том же направлении, т. е. когда они оба одновременно приближаются или удаляются от вершины угла, и отталкиваются, когда они протекают по сторонам угла в разных направлениях, т. е. один приближается к вершине угла, а другой от него удаляется, причем взаимодействие этих токов проходит через максимум при сохранении одинакового расстояния между этими малыми частями тока, когда вершина угла, образованного ими, удаляется в бесконечность и токи становятся параллельными.

Последний опыт г. де-ля-Рива, опубликованный им в декабрьском номере „Bibliothèque universelle“, т. XVIII, стр. 276 и 277, в разделе „Sciences et Arts“, и который этот искусный ученый считает не согласующимся с моей теорией, мне представляется во всех его обстоятельствах естественным следствием моего закона, если обратить внимание на воздействие, оказываемое на кольцевой провод не только токами магнита в той части, которой кольцо касается, но и производимое всеми токами магнита в совокупности. Тогда становится ясным, почему обе ветви кольца притягиваются к магниту, хотя электрический ток пробегает по ним в противоположных направлениях, если только одна ветвь касается магнита между его полюсами, а другая—находится в промежутке между полюсом и концом магнита, ближайшим к этому полюсу. Это — единственный случай, когда обе ветви притягиваются магнитом.

Больше года тому назад в своем докладе, прочитанном в королевской Академии наук 11 декабря 1820 г., я показал, что этот факт является результатом воздействия всех электрических токов магнита. Я наблюдал этот факт в то время, не придавая ему значения, так как он подтверждает то, что говорит Эрстед в своей первой работе о взаимодействии магнитов и вольтаических проводников, когда он описывает это взаимодействие для случая вертикального проводника и горизонтального магнита. Мой доклад не был напечатан, но г. Жиле-де-Ломон опубликовал содержание его в „Journal des Mines“, и в числе многочисленных фактов, на которых я основываю доказательства большей вероятности моей теории по сравнению с обычным объяснением магнитных явлений, он приводит следующий факт из моего доклада: *притяжение между магнитом и проводником, находящимися под прямым углом один к другому, сменяется отталкиванием, когда проводник, перемещаясь параллельно самому себе, переходит из положения внутри промежутка между обоими полюсами магнита в положение, когда он находится вне* *этого интервала.*[1] Мне кажется, что невозможно яснее выразить этот факт. Легко также убедиться, рассматривая действие токов всей массы магнита на проводник, перпендикулярный его оси, что составляющая равнодействующей всех этих сил, идущая параллельно оси, дает силу, направленную всегда в одном и том же направлении и растущую по мере того, как проводник удаляется от середины магнита по направлению к одному из его полюсов, потому что число частичек, которые действуют в том же направлении, при этом все увеличивается. В опыте де-ля-Рива, соответственно направлению тока в проводнике и токов магнита, та ветвь кольца притягивается к магниту, которая ближе расположена к его середине, а та, которая расположена дальше от середины, отталкиваясь, стремится все более удалиться. Это отталкивание, следовательно, сильнее притяжения, и кольцо должно скользить вдоль магнита, удаляясь от его середины, что и подтверждается опытом, до тех пор, пока одна из ветвей кольца, перейдя за край магнита, надевается на него, так что эта ветвь располагается по середине промежутка между двумя полюсами. В этом положении электрический ток в проводнике имеет то же направление, что и электрические токи частичек магнита, и потому притягивается ими со всех сторон. Я не буду больше распространяться на эту тему, так как предполагаю в другом месте разобрать этот случай во всех подробностях.

Письмо это я начал писать больше месяца тому назад, но мои занятия помешали мне до сего времени закончить его. Прошу вас, милостивый государь, принять мои извинения в том, что я так долго вам не отвечал. Я хотел поместить в этом письме ответы на различные возражения, которые встретила моя теория. Вы только что прочли часть этих ответов. Мне остается лишь внести ясность в некоторые затруднения, устранение которых, однако, настолько легко,

---

[1] См.: Annales des Mines, т. 5, стр. 552 и 553.

что можно отказаться от дальнейших рассуждений на эту тему и ответить на гораздо более серьезное возражение г. Эрстеда, сделанное им в прекрасной работе, помещенной в сентябрьском номере „Journal de physique“.[1] Я до некоторой степени ответил на это возражение и равным образом объяснил различные затруднения, на которые указали некоторые другие физики, учитывая обстоятельства намагничивания стали известными до сих пор способами, в обзоре всех работ об электромагнетизме, появившихся до апреля. Этот обзор[2] был сделан г. Бабинэ, профессором физики Коллежа Сен-Луи. К этому обзору я сделал различные добавления. В числе них находятся ответ на возражение г. Эрстеда и различные подробности о процессе намагничивания, которые, по моему мнению, должны устранить всякие сомнения относительно причины, которой я приписываю свойства магнитов. Я прилагаю при сем эти мои объяснения в качестве постскриптума.

Имею честь быть вашим покорным слугой и т. д.

Когда два магнита, расположенные параллельно друг против друга, $abcd$, $a'b'c'd'$ (рис. 3), одноименные полюсы которых A и A′, B и B находятся поблизости один около другого, отталкиваются, то это отталкивание происходит оттого, что токи наружной поверхности магнита A′B′, спроектированные в $a'b'$, поднимаются и отталкивают спускающиеся токи соседней поверхности cd магнита AB. Взаимодействие

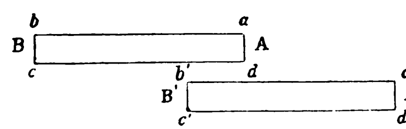


Рис. 3.

[1] Beobachtungen über den Elektromagnetismus. (Schweiggers Journal, т. XXXII, стр. 199, 1821; Journal de physique, т. XVIII, стр. 161, 1821).

[2] Этот обзор был напечатан в пятом томе последнего издания перевода „Химии“ Томсона; затем издан отдельно у Мекиньон-Марви, улица Луи, улица Леколь-де-Медесин, № 3, в Париже.

токов обеих плоскостей или, вообще говоря, всех частиц магнита определяет характер взаимодействия обоих магнитов. Совсем иначе происходит явление, когда оба эти магнита, не переставая быть параллельными один другому, не располагаются один против другого, но помещены так, как показано на этом рисунке. В этом случае токи поверхности cd не имеют больше преимуществ близкого расположения и непосредственного воздействия для отталкивания токов поверхности $a'b'$, и если ограничиться рассмотрением взаимодействия четырех вертикальных плоскостей ab, cd, $a'b'$, $c'd'$, то легко убедиться, что между cd и $a'b'$ и между ab и $c'd'$ существует отталкивание, а между ab и $a'b'$ и cd и $c'd'$ существует притяжение; если учесть, что отталкивание соседних плоскостей cd и $a'b'$ значительно более ослабляется смещением магнитов, чем притяжение плоскостей ab и $a'b'$ и cd и $c'd'$, то легко представить себе такое положение обоих магнитов, когда отталкивание прекращается и заменяется притяжением, что и подтверждается опытом.

Если оба магнита AB, A'B' всегда остаются взаимно параллельными, то при любом их положении наблюдается отталкивание между всеми соседними токами, плоскости которых образуют с линией, соединяющей их центры, больший наклон по сравнению с наклоном, при котором отталкивание превращается в притяжение, как было мною объяснено выше при анализе влияния токов ad и $a''d''$ (рис. 2). В то же самое время между всеми остальными токами, плоскости которых отличаются меньшим наклоном, существует притяжение. Отсюда следует, что если исходить из положения, при котором магниты находятся один против другого и отталкиваются, и начать смещать один магнит так, чтобы сближать два полюса противоположного наименования, например A и B' (рис. 3), то мы придем к такому положению, когда отталкивание сменится притяжением. Ибо число токов, положение которых аналогично ad и $a'''d'''$ (рис. 2) и которые вызывают отталкивание, уменьшается, а наоборот, число тех токов, которые притягиваются, так как их относительное положение приближается к положению $a'd'$ по отношению к ad, увеличивается. По этой именно причине два полюса, расположенные так, как показано (рис. 3), притягиваются, когда полюс B′ магнита A′B′ находится против точки другого магнита, достаточно близкой к A. Тогда два разноименных полюса A и B′ оказываются поблизости.

Точно так же, если исходить из положения двух магнитов, оси которых расположены по одной прямой и которые притягиваются, что бывает тогда, когда их одноименные полюсы находятся поблизости, а токи в обоих магнитах идут в одинаковом направлении, то, перемещая их в положение, указанное на рис. 3, мы заметим, что притяжение будет все более и более ослабляться, станет равным нулю и, наконец, сменится отталкиванием. В этом случае два одноименных полюса находятся поблизости.

Тожественность действия магнита и вольтаического проводника сохраняется, когда для намагничивания стального стержня применяется магнит. Действие магнита совершенно аналогично действию металлической проволоки, соединяющей оба полюса вольтова столба, если для намагничивания стержня применяется этот соединительный провод.

Предположим, что на стержень наматывается спираль, центр которой соответствует некоторой точке по длине стержня. Эта точка станет точкой разделения, и обе части стержня с каждой стороны этой точки намагнитятся. При этом электрические токи, существование которых я предполагаю в магнитах, будут течь так, как точки в спирали, в тех точках, где спираль касается стержня, и, следовательно, оба конца стержня получат полярности одинакового наименования с магнитными полюсами спирали, рассматриваемой с той стороны, с которой она воздействует на стержень. Этот, легко повторимый опыт, ничем не отличается от намагничивания стержня поперечным проводником по способу сэра Г. Дэви. Если заменить спираль полюсом магнита, в котором токи вращаются в том же направлении, как и в этой спирали, таким образом, чтобы ось его, подобно оси спирали, была перпендикулярна к стержню, то стержень намагнитится так же, как и раньше. На нем образуется разделительная точка по середине той части стержня, которой касается полюс магнита, и оба конца стержня, так же как и в предыдущем опыте со спиралью, получат полярность, одноименную с полярностью магнита, касающегося стержня.

Если перемещать спираль или магнит с одного конца стержня к другому в одном направлении, то часть стержня, находящаяся в любой данный момент с той стороны, где начинается перемещение, сохранит токи того же направления, которое они имели раньше. Однако токи другой части стержня будут менять свое направление на противоположное, по мере того как в результате перемещения спирали или магнита они очутятся по другую сторону от спирали или магнита, так что конец стержня, с которого началось перемещение, будет иметь полярность одноименную с полярностью магнита, а конец, где перемещение закончилось, будет иметь полярность разноименную, что согласуется с опытом.

Если, однако, стержень приготовлен из очень твердой стали, то часть токов, получивших сначала противоположное направление между точкой касания и тем концом стержня, к которому перемещается магнит, сохранит свое направление, несмотря на намагничивание в противоположном смысле, испытываемое всеми точками стержня, и тогда на стержне будет несколько разделительных точек, что нередко наблюдается, если применять такой способ намагничивания.

Если магнит, которым пользуются для намагничивания стержня, наклонить, то намагничивание становится более легким и количество разделительных точек уменьшится, если только наклон не будет слишком велик. Для того чтобы хорошо понять значение этого обстоятельства, надо обратить внимание на то, что если с одной стороны уменьшается величина действия одной части токов магнита, ибо их удаляют от стержня путем наклона, зато это же действие увеличивается для тех токов, которые должны сохранить свое направление в стержне после намагничивания, потому что угол, образуемый их плоскостями с плоскостями токов в магните, становится острым, благодаря чему влияние последних усиливается. Как раз противоположное происходит для токов, идущих в другом направлении, меняющих свое направление по мере того, как магнит проходит мимо них, перемещаясь вдоль стержня. Они теряют в силе с увеличением наклона оси магнита по отношению к оси стержня. Необходимо, однако, чтобы угол между этими осями не был слишком мал, ибо изменение расстояния начинает оказывать сильное влияние и действие магнита ослабевает. Стержень намагнитится слабее, чем в том случае, когда магнит не слишком наклонен по отношению к стержню. Нет необходимости повторять, что все эти различные результаты в точности подтверждаются опытом.

Если передвигать вдоль стержня не один магнит, ось которого составляет прямой угол с осью стержня, а два, расположенных на маленьком расстоянии один от другого и касающихся стержня противоположными полюсами, то очевидно, что вследствие взаимного направляющего действия электрических токов действия токов обоих магнитов будут направлены друг против друга для всех точек стержня, расположенных вне промежутка между магнитами, и, наоборот, будут складываться для того, чтобы направить в одинаковом направлении токи всех точек стержня, расположенных внутри этого промежутка.

Эти токи будут приобретать в таком смысле значительно бóльшую энергию, чем первые, и только они сохранят свое направление, когда магниты, перемещаясь по всей длине стержня, приведут к тому, что разделяющий их промежуток будет последовательно перемещаться вдоль всей длины стержня. Этот способ намагничивания известен под названием двойного касания[5]. Очень легко убедиться в том, что все обстоятельства этого намагничивания являются необходимым следствием моей теории и процесса намагничивания стального стержня вольтаическим проводником. Аналогия между объяснением, выводимым из этой теории, и тем, посредством которого объясняется процесс двойного касания при гипотезе двух магнитных жидкостей, действующих согласно тем же законам, как и жидкости электрические, избавляет меня от необходимости распространяться более подробно на эту тему.

Г. Араго показал на очень простом опыте, что если намагнитить некоторую часть стального стержня, то эта часть, воздействуя на другую часть стержня, продолжает намагничивать его в том же направлении, если только сталь не имеет слишком твердой закалки, мешающей намагничиванию, поскольку затруднительно намагнитить сталь, слишком закаленную. Но даже и в этом случае намагничивание все же распространяется, по крайней мере, на участки, находящиеся в непосредственном соседстве с уже намагниченной частью стержня. В этом можно убедиться, если участок стальной проволоки обмотать спиральным проводником, подержать спираль некоторое время и затем исследовать действие этой спирали на небольшую стрелку. Проволока оказывается намагниченной в том же направлении на длину, которая обыкновенно вдвое больше обмотанной проводом. Однако интенсивность намагниченности постепенно уменьшается, по мере удаления от обмотанной части. Этот факт является непосредственным и необходимым следствием теории, согласно которой магнитные явления производятся электрическими токами. Этот же факт весьма легко объясняется и обычной теорией магнита, так как в стержне, намагниченном не полностью, каждая частичка намагниченной области стремится разложить магнитную жидкость соседней частички таким же образом, чтобы у последней возникло два полюса, расположенных так же, как у первой, для того чтобы оба соседних полюса в этих частичках были разноименные, что должно обязательно происходить, если мы признаем, что две магнитные жидкости взаимно притягиваются и что каждая из них отталкивает магнитные молекулы того же рода, как и ее собственные.

Если к концу стального или железного стержня приложить полюс магнита на линии стержня, то последний намагничивается в той части, которая граничит с точкой соприкосновения, в том же направлении, как и магнит, что одинаково удовлетворительно объясняется обеими гипотезами. В самом деле, если предположить наличие в магните электрических токов, они должны, согласно вышеупомянутому опыту г. Араго, направить токи стержня так, чтоб они вращались вокруг его частичек в том же направлении, и превратить его, следовательно, в новый магнит, полюсы которого расположены один по отношению к другому так же, как и в первом магните. Если же, наоборот, приписать магнитные явления разделению в каждой частичке двух магнитных жидкостей, которые раньше находились там в нейтральном состоянии благодаря взаимному соединению, то действие магнита, если оно касается, например, стержня своим южным полюсом, заключается в том, что он притягивает к себе северную жидкость каждой частички и отталкивает южную так, что все частички становятся магнитами, в которых северный полюс направлен к магниту, а южный — в противоположную сторону, и, следовательно, они намагничиваются так же, как и сам магнит. Какую бы гипотезу мы ни принимали, приходится сделать вывод, что намагниченная часть стержня воздействует на остальную его часть подобно магниту, ибо полюсы этой части расположены так же, как полюсы магнита. Следовательно, эта часть стремится распространить намагничивание в том же направлении до другого конца стержня. Это действительно бывает, когда стержень состоит из мягкого железа. И тогда, как при гипотезе намагничивания путем ориентировки электрических токов, так и при гипотезе разделения двух магнитных жидкостей, распространение магнитных свойств вдоль стержня происходит очень быстро, потому что мягкое железо отличается малым сопротивлением.

Но когда стержень изготовлен из стали и притом закаленной настолько, что она с трудом принимает магнитные свойства, тогда наблюдается чрезвычайно интересное явление, объяснение которого заслуживает особого внимания. Это явление заключается в том, что на стержне образуется разделительная точка и по одну сторону от этой точки стержень получает полюсы, расположенные в противоположном направлении к полюсам той части, которая находится в соприкосновении с магнитом и получила от него аналогичный магнетизм. По роду полюсов, образующихся на концах двух смежных частей магнита, когда последний разламывают пополам, следует, что гипотеза двух магнитных жидкостей может быть принята только при том условии, как это установил знаменитый Кулон, что обе эти жидкости никогда не переходят, как это бывает с электричеством, с одной частички на другую и что все магнитные явления происходят благодаря разделению жидкостей внутри самой частички, так что магнит представляет собой не что иное, как совокупность стольких малых магнитов, сколько в нем содержится частиц, причем каждый из этих магнитов имеет южный и северный полюса. Очевидно, что если стержень намагнитить на некоторой части его длины путем соприкосновения одного из его концов с магнитом, то намагниченная часть, будучи намагничена в том же направлении, как и магнит, должна действовать так же, как и он, и прибавлять свое действие к действию магнита для того, чтобы распространять намагничивание вдоль стержня в том же направлении. Чему же можно приписать возникновение разделительной точки и противоположное намагничивание части стержня, расположенной по другую сторону этой точки?

Сначала кажется, что тот же вопрос возникает и тогда, когда магнитные явления приписываются действию электрических токов, возникающих в стержне. Ибо если есть часть стержня, в которой токи идут в одинаковом направлении, эти токи должны стремиться сообщить то же направление токам остальной части стержня. Для того чтобы рассмотреть, каким образом в сильно закаленной стали, в которой изменение направления токов встречает большие затруднения, может образоваться разделительная точка, по другую сторону которой токи идут в противоположном направлении, рассмотрим три стержня AB, A′B′, A″B″ (рис. 4) и предположим, что только первый стержень намагничен и что, расположив их в тех направлениях, как изображено на рисунке, их приближают один к другому таким образом, чтобы угол d первого коснулся угла a' второго, а угол d' этого же стержня — угла a'' третьего; если предположить, что A представляет собой южный полюс магнита AB, то его токи в передней поверхности пойдут по направлению ad, ибо если поместить наблюдателя в этом направлении спиной к оси магнита, то конец A будет находиться с правой стороны. Токи в стержне A′B′ согласно тому, что мы сказали, должны иметь такое же направление в точке, в которой угол d соприкасается с углом a'. Они пройдут, следовательно, через задний торец стержня $a'b'd'c'$ и вернутся через передний торец в направлении $d'a'$, откуда следует, что A′B′ намагнитится так, что северный полюс будет в A′ слева от наблюдателя, расположенного вдоль тока спиной к оси стержня A′B′. Будучи намагничен, этот стержень сообщит магнитные свойства стержню A″B″ таким образом, чтобы их токи имели одинаковое направление у углов a'' и d', которыми они соприкасаются. Токи стержня A″B″ пойдут, следовательно, по переднему торцу в направлении $a''d''$, а так как конец A″

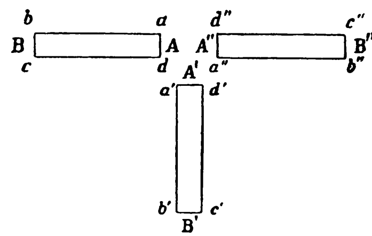


Рис. 4.

находится с правой стороны от наблюдателя, помещенного в ток таким же образом, как было указано выше, то A″ будет южным полюсом стержня A″B″.

Таким образом, магнит AB, который намагнитил бы A″B″ так, чтобы северный полюс последнего был в A″, если бы он его коснулся непосредственно своим южным полюсом A, намагнитит его так, чтобы A″ был южным полюсом, т. е. одноименным с A, если он сообщается со стержнем лишь через посредство стержня A′B′, ось которого перпендикулярна осям магнита и стержня. Именно этот случай и имеет место, когда в сильно закаленном стержне, касающемся южного полюса магнита одним из своих концов, образуется разделительная точка. Сначала намагничивается часть стержня, непосредственно прилегающая к магниту, образуя у конца северный полюс, аналогичный полюсу B магнита AB. Эту часть намагниченного стержня мы изображаем в виде магнита AB. Тогда вторая часть того же стержня изображается отрезком A′B′. Если электричество последней части могло бы свободно подчиняться действию токов AB, то у нас был бы случай, когда AB представляет собой магнит, который касается не намагниченной еще части A″B″, и тогда намагничивание распространилось бы в том же направлении. Но если твердость закалки сопротивляется распространению магнетизма, тогда в стержне, хотя и непрерывном, получается такое явление, какое изображено на рисунке, т. е. AB и A″B″ сообщаются друг с другом только через посредство стержня A′B′, ось которого перпендикулярна их направлениям. Таким образом, токи некоторых частиц стержня будут вращаться вокруг нормали к его поверхности — в направлении, в котором вращаются токи A′B′. Эти токи будут стремиться, следовательно, намагнитить остальную часть стержня в противоположном направлении, как токи A′B′ намагничивают A″B″, так что полюсы последнего будут расположены в противоположном направлении по отношению к полюсам AB, благодаря чему образуется разделительная точка в соответствии с опытом, который мы намеревались объяснить.

Сегодня, 27 марта 1822 г., я вновь вскрыл письмо к вам, начатое мною 12 января, для того чтобы сообщить вам, милостивый государь, об опыте, который я только что произвел при помощи нового прибора, детальное описание которого я скоро опубликую. Мне удалось получить очень быстрое вращение в одном направлении вертикального проводника как под влиянием земного магнетизма, так и под влиянием горизонтального проводника, изогнутого в виде спирали и включенного в вольтаическую цепь. Аналогичное движение я получил уже три месяца тому назад и также в обоих этих случаях, но очень медленное и с трудом поддающееся наблюдению из-за несовершенства прибора, которым я тогда пользовался.

КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ НОВЫХ ОПЫТОВ ПО ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМУ, ВЫПОЛНЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ ФИЗИКАМИ С МАРТА 1821 г.

Доклад, прочитанный в публичном заседании королевской Академии наук 8 апреля 1822 г. [1]

В истории наук имеются эпохи, отмеченные плодотворными открытиями, влекущими за собой множество других новых открытий. Таковой была, например, эпоха в конце предыдущего века, когда Вольта изобрел прибор, который справедливая признательность ученого мира посвятила его автору, присвоив ему название вольтова столба.

Этот прибор состоит из некоторого числа пластин двух различных металлов, чередующихся между собой и имеющих прокладки из жидкой субстанции, расположенных таким образом, что, начиная с одного конца к другому, оба металла и жидкость располагаются в определенном и повторяющемся порядке.

Первая и последняя пластины снабжены металлической проволокой: пока эти проволоки не соприкасаются друг с другом, они имеют все свойства наэлектризованных тел. Если их одновременно привести в соприкосновение с телом, способным разлагаться, действие этих проволок становится одним из самых могучих средств анализа. Химия обязана применению этого орудия открытием новых веществ и возникновением более правильных идей относительно природы главнейших материалов, из которых состоит населенный нами земной шар. Наконец, когда эти проволоки тесно соединены друг с другом, чисто электрические и химические явления исчезают, но зато электричество, текущее по проволокам непрерывным потоком и с непостижимой скоростью, обнаруживает свою активность в новых не менее замечательных эффектах. В то время были известны только такие явления, как повышение температуры проволок, их накаливание и их сгорание, когда Эрстед открыл, что те же проволоки проявляют в этом случае новый вид действия, отличный во всех отношениях от притяжений и отталкиваний, производимых обычным электричеством. Он связал таким образом со своим именем новую эпоху, которая, быть может, в истории науки будет отмечена столь же многочисленными и важными результатами, какие возникли из открытия Вольты.

Новый вид действия обычно именуют *электромагнитным*, потому что первый пример такого действия, наблюденный Эрстедом, осуществляется между магнитом и электрическим проводником, соединяющим оба конца столба.[1]

Ученый датский профессор своим великим открытием проложил физикам новый путь исследований. Эти исследования не остались бесплодными; они привели к открытию множества фактов, достойных внимания всех, кто интересуется прогрессом науки.

На публичном заседании Академии в прошлом году я считал себя обязанным дать краткий анализ явлений электромагнитного действия, которые удалось наблюдать до того

[1] С тех пор, как я открыл взаимодействие двух вольтаических проводников, которое, очевидно, имеет ту же природу, как и действие проводника иа намагниченный стержень, но которое происходит без помощи какого бы то ни было магнита, название *электромагнитное действие*, применяемое мною в данном случае только для того, чтобы не выходить из рамок принятого, вряд ли подходит для обозначения этого рода действия. Я думаю, что его следует назвать *электродинамическим действием*. Это название означает, что явления притяжения и отталкивания, характеризующие его, производятся электричеством, находящимся в движении в вольтаических проводниках, в то время как притяжение и отталкивание совершенно другого рода, вызываемые обычным электричеством, предполагают только неравномерное распределение обеих электрических жидкостей, покоящихся в телах, в которых появляется электрическое действие. Новый вид притяжения и отталкивания представляет собою новый способ проявления активности этих жидкостей, уже давно известной, которую в отличие от нового следует назвать *электростатическим действием*.

времени. Сегодня я попытаюсь вкратце изложить результаты новых опытов, появившихся к истекшему году.

Сэр Г. Дэви, заметив, что различные металлы пропускают через себя вольтаический ток с неодинаковой легкостью, измерил при помощи простых, но точных средств различные степени электропроводящей способности металлов. Он определил влияние температуры на действия вольтова столба. Он показал, что в том случае, когда вольтаический ток проходит в виде блестящего снопа через разреженный воздух, он притягивается или отталкивается намагниченным стержнем таким же точно образом, как будто бы он проходил по металлическому проводнику. Этот опыт тем более замечателен, что подтверждает глубокомысленное объяснение, данное г. Араго странному и блестящему явлению северных сияний [2]. И, наконец, последний факт, который только что был открыт ученым английским физиком. Если сильно намагниченный стержень поместить в вертикальном положении над чашкой, наполненной ртутью, или под ней и если в ртуть погрузить два проводника, соединенные с полюсами вольтова столба, то в ртути образуется вихрь вокруг каждого проводника.

Г. Фарадей, которому химия обязана открытием хлорных соединений углерода, обнаружил между магнитом и вольтаическим проводником действие, резко отличающееся по своим эффектам от того, которое было открыто г. Эрстедом. Оно только в том отношении родственно с действием, замеченным Эрстедом, что оба они могут быть выведены из общего закона, к которому я пытался свести все электромагнитные явления. Это действие заключается во вращении, сохраняющем постоянно одинаковое направление. Это вращение испытывают в равной степени проводник, могущий свободно перемещаться вокруг неподвижного магнита, или же магнит, которому сообщили подвижность, заставив его плавать на поверхности ртути. В этом случае магнит вращается вокруг точки соприкосновения проводника со ртутью.

Тот же физик произвел чрезвычайно замечательный опыт, наглядно показывающий взаимодействие двух токов, идущих в разных направлениях по двум сторонам прямого угла. Если погрузить в две чашки, наполненные ртутью, концы металлической проволоки, согнутой в виде подковы и подвешенной в состоянии равновесия в вертикальном положении, то проволока эта поднимается в тот момент, когда устанавливают контакт между чашками и концами вольтова столба. Электрический ток, идущий в ртути и металлической проволоке в противоположных направлениях, вызывает между этими телами отталкивание, которое и служит причиной вышеописанного явления.

Из первых опытов Эрстеда и из моей теории, при помощи которой явления, производимые магнитом, я свел к явлениям, производимым электричеством, следует, что если поместить свободно плавающий проводник, согнутый в виде кольца, рядом с намагниченным стержнем, то ветви кольца будут обе притягиваться или обе отталкиваться, когда полюс магнита будет находиться внутри кольца. Г. де-ля-Рив установил новый факт, а именно, что в том случае, когда обе ветви кольца притягиваются, кольцо, после того как оно прилипнет к магниту, начнет скользить до тех пор, пока одна из его ветвей не дойдет до конца и перейдет по другую сторону. Кольцо, охватывающее магнитный стержень, возвращается назад и останавливается посередине между двумя полюсами.

Когда я познакомился с работой, в которой Фарадей сообщил о вращении вольтаического проводника вокруг магнита в постоянном направлении, я смог без труда сделать заключение, что этот факт не был наблюден раньше лишь потому, что экспериментаторы применяли проводники, образующие почти замкнутые цепи, в которых электромагнитное действие не могло вызвать этот род движения, потому что оно всегда стремится вращать половину цепи в одном направлении, а вторую половину — в противоположном, как только вторая половина занимает положение первой после того, как прибор сделает полоборота. Затем я захотел убедиться, существует ли такое же действие между двумя вольтаическими проводниками, так же как и между проводником и земным шаром. В моих опытах в декабре 1821 г. мне удалось получить постоянное вращение в обоих случаях, но вследствие несовершенства аппаратов, которыми я пользовался первоначально для получения этого движения, оно происходило с необычайной медленностью. Позднее я построил прибор, при помощи которого получается гораздо более быстрое движение и поэтому более удобное для наблюдения.

Фарадей, продолжая изучение вращательного движения, о котором я только что говорил, тщетно пытался заставить вращаться магнит или вольтаический проводник вокруг своей собственной оси. Мне удалось добиться сначала вращения магнита вокруг своей оси, а затем, несколько времени спустя, и проводника. Удивленный скоростью, с которой магнит вращается вокруг самого себя, я начал доискиваться причины неуспешности первых попыток добиться этого движения. При этом я обратил внимание на то, что, согласно общим законам электродинамического действия, электрический ток, стремящийся повернуть магнит в одном направлении, приближаясь к нему, будет стремиться повернуть его в противоположном направлении, удаляясь от него. Таким образом, пока ток с одной стороны приближается к магниту, а с другой стороны от него удаляется, проходя через два тела, не связанные с магнитом, эти оба тела стремятся повернуть его в противоположном направлении, а потому магнит и остается в равновесии под действием двух равных сил. Когда же намагниченный стержень сам является проводником и заменяет одно из этих тел, то часть тока, проходящая через него, не может сообщить ему никакого движения. Одна из двух сил, уравновешивавших друг друга раньше, исчезает; вторая действует одна и вызывает вращение магнита. Это условие было осуществлено в моем опыте.

И именно потому, что оно не соблюдалось в первых опытах, попытки вызвать вращение магнита оставались безуспешными.

Наконец, г. Савари, первые научные работы которого не оставляют сомнения в том, что наука в один прекрасный день будет обязана ему своими успехами, изобрел прибор, при помощи которого можно наблюдать движение, сообщаемое проводнику, согнутому в виде спирали, действием токов, проходящих в подкисленной воде, в которую погружена спираль, когда вольтаическая цепь, частью которой являются эти токи, продолжается через проводник. Я изготовил подобный аппарат и нашел, что он действительно вращается в направлении, предсказанном этим юным физиком, которому мы обязаны данным аппаратом. Направление вращения определяется направлением витков спирали. Оно не меняется, если переменить направление токов. В этом отличие такого вращения от того, которое производится действием земного шара и которое меняет свое направление, когда направление электрических токов меняется на противоположное. Сила земного шара, будучи слабее действия токов, текущих в подкисленной воде, прибавляется или вычитается, в зависимости от того — заставляют ли обе силы вращаться спираль в одном направлении или в противоположном. Действительно, можно заметить, что вращение в первом направлении происходит быстрее, чем во втором.

Таковы новейшие успехи этой отрасли физики, о существовании которой мы даже не подозревали еще два года тому назад. Они открыли нам факты, быть может более изумительные, чем все то, что до сих пор открыла нам наука из диковинных явлений. Движение, продолжающееся постоянно в одном направлении, несмотря на трение, несмотря на сопротивление среды, и притом движение, вызываемое взаимодействием двух тел, остающихся все время в одном и том же состоянии, — беспримерный факт среди всего, что мы знаем о свойствах неорганической материи. Он доказывает, что действие, исходящее из вольтаических проводников, не может быть вызвано каким-либо распределением внутри этих проводников некоторых покоящихся жидкостей, которому обязаны своим происхождением притяжения и отталкивания обыкновенного электричества. Это действие можно приписать только жидкостям, перемещающимся в проводниках с большой быстротой от одного конца столба к другому.

Я первый указал на совершенную идентичность действия вольтаических проводников и замкнутых кривых, идущих в поперечном направлении на поверхности или внутри намагниченного стержня. Я из этого сделал вывод, что магниты обязаны своими характерными свойствами электрическим токам, подобным тем, какие производит аппарат Вольты, и направленным по этим кривым. Некоторые физики пытались опрокинуть эту аналогию и продолжали объяснять магнитные явления так, как их объясняли до сих пор, предполагая, что частицы проводников, под влиянием вольтова столба, превращаются в настоящие магниты с осями, направленными перпендикулярно к осям проводников.

Эту гипотезу я подверг критическому анализу, прежде чем окончательно принять ту, которую я сам предложил, и я отбросил ее на основании скорее соображений общего порядка, чем на основании прямых доказательств. Прямые доказательства в настоящее время вытекают из новых явлений, о которых я только что упомянул, ибо они свойственны только подвижным частям вольтаических проводников, не образующих почти замкнутые цепи и, следовательно, не представляющих никакой аналогии с магнитами. В то же время, как я уже давно это показал, все явления, свойственные магнитам, можно получить при помощи проводников, если согнуть их таким образом, чтобы получить почти замкнутые цепи. Они действуют тогда, как намагниченный стержень, и самое естественное объяснение фактов привело меня к предположению о наличии в магните электрических токов, образующих всегда замкнутые цепи. Таким образом, из двух гипотез, предложенных для объяснения определенного числа явлений, та, которую с трудом можно еще примирить с существующими фактами, обычно опровергается новыми явлениями, открытие которых постепенно происходит со временем. Другая же гипотеза, являющаяся, наоборот, так сказать, выражением действительного соотношения между фактами, которые она призвана объяснить, подтверждается каждый раз, как опыт обогащает нас новыми фактами.

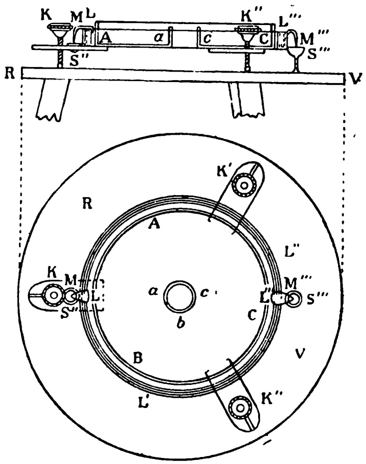
О ВОЗДЕЙСТВИИ ЗЕМЛИ НА ВОЛЬТАИЧЕСКИЕ ПРОВОДНИКИ[1]

После открытия мною в октябре 1820 г. влияния земного шара на подвижные проводники, я зачитал 30 числа того же месяца в королевской Академии наук статью, в которой после описания изготовленных мною приборов и опытов, проделанных мною в целях полнейшего обнаружения этого влияния, я ограничился заявлением, что точно такое же влияние могли бы оказать электрические токи, идущие по земному шару с востока на запад по направлениям, в средне совпадающим с тем, что принято называть *магнитным экватором*. Правильность этого утверждения доказана на сегодня всеми наблюдениями. Но я ограничусь общим рассмотрением, согласуется ли оно с фактами, отложив до другого времени сравнение с ним результатов опыта в каждом отдельном случае.

Я признал, кроме того, что для отображения фактов необходимо допустить возрастание интенсивности токов по мере приближения их к экватору, и высказал это соображение в заметке, прочитанной мною в открытом заседании Академии наук 2 апреля 1821 г.

После открытия г. Фарадеем непрерывного вращательного движения, сообщаемого током подвижному проводнику, я проделал опыты, описанные в XX томе „Annales de chimie", на стр. 60 и последующих, и обнаружил то же самое движение, вначале вызванное влиянием неподвижного, свернутого в спираль проводника, а затем — исключительно влиянием земного шара. Мне хотелось в то время подробнее рассмотреть явления, в которых это влияние обнаруживается.

Иные занятия и на сей раз отвлекли меня от этой задачи, и я даже не заметил, что влияние спирального проводника LL'L" [2] (см. рисунок) и влияние земли должны, согласно моей теории, вызывать совершенно разные явления в подвижном проводнике, вращающемся вокруг вертикальной, все время параллельной ему, оси. Дело в том, что ось спирального проводника находится внутри цилиндрической проволоки, описанной



подвижным проводником, и параллельна сторонам этой поверхности, тогда как ось земных токов образует с теми же сторонами угол, равный дополнительному углу магнитной широты. Таким образом, она находится вне цилиндрической поверхности и очень далеко от нее, повсюду, где эта широта меньше 90°. Отсюда следует, согласно законам электродинамики, установленным мной в 1820 г., что влияние спирального проводника стремится повернуть подвижной вертикальный проводник всегда в одну сторону, в то время как земные токи стремятся придать ему постоянное направление, двигая его в ту сторону, откуда они сами исходят, а именно к востоку, если ток неподвижного проводника имеет нисходящее, сближающее его с земными токами, направление. Те же земные токи сдвигают его по направлению своего движения, т. е. к западу, в случае восходящего тока подвижного проводника.

Нетрудно также вывести из той же теории для подвижного горизонтального проводника, вращающегося вокруг одного из своих концов, что как спиральный проводник, так и земные токи стремятся повернуть его всегда в одном направлении, так как они равно находятся вне вертикального цилиндра, основание которого — окружность, описанная этим подвижным проводником.

Г. де-ля-Рив (сын), в соответствии с тем, что я сообщил ему по этому поводу, подробно показал, как легко можно сделать эти непосредственные выводы из моей теории. Однако я еще не успел их сделать, когда этот искусный молодой физик в целом ряде опытов, для которых он придумал новые приборы, проделал наблюдения над всеми случаями движений, вызванных действием земного шара на подвижные проводники. Лишь увидев эти опыты, я признал, что заблуждался, сравнивая электродинамическое влияние земли с влиянием неподвижного спирального проводника, действующего на подвижной вертикальный проводник. Я увидел, что результаты, полученные г. де-ля-Ривом (сыном), неизбежно вытекают из моей теории и дают ей новое подкрепление.

Желая, чтобы этот сборник [3] содержал не только мои работы, но также и опыты, которыми мы обязаны другим физикам, если только они продвигают вперед это новое направление науки, я счел должным включить сюда имеющую большое значение статью г. де-ля-Рива (сына), так же как включил статью г. Фарадея с описанием блестящего открытия, о котором я говорил выше, и большого количества других интересных фактов. Я лишь изменил некоторые выражения г. де-ля-Рива (сына) с тем, чтобы они находились в согласии с терминологией, которой я пользуюсь на протяжении всего остального сборника. Я прибавил также несколько пояснений и четыре примечания к той части его статьи, где он прилагает к своим опытам мою теорию [4].

О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВОЛЬТАИЧЕСКОГО ПРОВОДНИКА И МАГНИТА[1]

В работе,[1] доложенной Парижской Академии наук 3 февраля 1823 г., г. Савари вывел закон, предложенный г. Био в 1820 г. для представления действия, происходящего между элементом вольтаического проводника и магнитной молекулой. Г. Савари пользовался формулой, при помощи которой я выразил взаимодействие двух элементов проводников. При этом я заменял магнитную молекулу тожественным ей окончанием электродинамического соленоида, если мыслить магнит как совокупность электрических токов, окружающих его частицы. Я показал также, что это должно быть именно так, чтобы отсюда проистекли все явления, обнаруживаемые магнитами. Хотя упомянутый молодой физик также свел эти явления к действиям, вызываемым электричеством в движении, но я полагал, что было бы важно исследовать в отдельности взаимодействие вольтаического проводника и магнита, исходя из рассмотрения этого закона как просто данного в опыте. Действительно, если бы он не вытекал из самых первых опытов, из которых его вывел г. Био, описанных им во втором издании „Précis élémentaire de physique" [2] — опытов, которые даже не могли быть согласованы с этим законом, — то в настоящее время он полностью подтвержден результатами новых опытов, изложенных им в третьем издании того же труда. Как физики, принимающие мою теорию, так и возражающие против

[1] Бо́льшая часть этой статьи, вместе с приложенным здесь письмом, была послана в начале 1826 г. д-ру г. Герарди. С тех пор я ее пересмотрел и добавил некоторые доказательства, которые должны уяснить все затруднения, еще имеющиеся по отношению к предмету этой работы.

нее сходятся в том, что рассматривают правильность самого этого закона как не подлежащую сомнению. Он утверждает, что сила, возникающая в результате взаимодействия между элементом вольтаического проводника и тем, что носит название магнитной молекулы, перпендикулярна к плоскости, соединяющей магнитную молекулу с элементом, а ее величина для одного и того же элемента и одной и той же молекулы обратно пропорциональна квадрату их расстояния и прямо пропорциональна синусу угла, образуемого прямой, измеряющей это расстояние, с направлением элемента.

Направление и величина этой силы, таким образом, вполне определены. Но это не значит, что определена и точка, которую надлежит считать точкой ее приложения. Эта точка зависит от того или иного предположения, которое мы делаем относительно причины электродинамических явлений. Таких предположений имеется три. Первое состоит в том, что допускается существование двух жидкостей, называемых южной и северной, причем они распределяются так, что в результате наблюдается упомянутый закон.[1]

Второе предположение — то, при помощи которого я объяснил наблюдаемые явления, рассматривая магнит как совокупность электрических токов, обегающих вокруг его частиц и действующих либо на электрические токи другого магнита, либо на токи проводника совершенно так же, как в опыте,

[1] Так, многие физики полагали, что возможно объяснить явления, открытые г. Эрстедом и впервые наблюдавшиеся мною, определенным расположением двух магнитных жидкостей, южной и северной. Но для объяснения фактов, составляющих эту новую отрасль физики, недостаточно смутных и общих представлений. Необходимо было прежде всего найти то распределение магнитных элементов, которое в точности представило бы интересующий нас закон. Я это и сделал в работе, доложенной мною Парижской Академии наук 28 ноября 1825 г. и содержащей основные результаты, дальнейшее развитие которых закончено в работе, печатаемой мною сейчас. Я покажу в ней, какие электродинамические явления могут быть объяснены этим способом и какие доказывают, что он применим не во всех случаях.

которым я доказал, что токи двух проводников действуют друг на друга.

Наконец, третья гипотеза предполагает, что между элементом проводника и магнитной молекулой происходит первичное элементарное действие, которое стремится вращать одновременно молекулу вокруг элемента и элемент вокруг молекулы.

Это последнее предположение отличается от двух других тем, что вместо того, чтобы допустить между действующими друг на друга материальными точками только силы, направленные по соединяющим их прямым, оно подразумевает, что взаимодействие между элементом вольтаического проводника и магнитной молекулой может быть представлено двумя равными и противоположными силами, перпендикулярными к плоскости, проходящей через элемент и через магнитную молекулу, причем эти силы приложены одна к середине элемента, а другая — к молекуле. Поэтому они образуют то, что г. Пуансо назвал парой. Таким образом, если бы даже элемент и молекула были неизменно связаны между собою, жесткая система, ими образованная, в силу одного только их взаимодействия должна была бы приобрести вращательное движение. Хотя это предположение кажется противоречащим основным принципам динамики, согласно которым взаимодействие частей одной и той же твердой системы никогда не может сообщить ей какого-либо движения, мне представилось необходимым специально его рассмотреть, чтобы сравнить вытекающие из него результаты с результатами двух предыдущих предположений. Я хочу также доказать, что если даже допустить это предположение, то беспредельно ускоряющееся вращательное движение[1] невозможно, как и в случае двух других

[1] В этом труде я всегда буду называть, таким образом, движение, возникающее в некоторых случаях взаимодействия либо вольтаических проводников, либо проводника и магнита. Это движение представляет ту своеобразную особенность, что скорость проводника или подвижного магнита все время возрастает до тех пор, пока трение и сопротивле-

предположений, когда часть вольтаического проводника, действующая на магнит, образует твердый и замкнутый контур.

Эти три предположения представляют собою также разительный пример того, как иногда оказывается возможным заменить систему сил, действующих на совокупность жестко связанных между собою материальных точек, другой системой сил, совершенно отличных, но которые, взятые вместе, оказывают на эту жесткую совокупность абсолютно те же действия в смысле равновесия и движения. Так, например, если тело погружено в весомую жидкость, можно, ничего не изменяя в условиях равновесия или движения этого тела, заменить систему давлений, оказываемых жидкостью на его поверхность, системой вертикальных сил, приложенных снизу вверх ко всем частицам этого тела, причем каждая из этих сил будет представлена весом объема жидкости, равного объему частицы тела, на которую она, по предположению, действует.

Необходимое и достаточное условие того, чтобы две системы сил, приложенных таким образом к твердой совокупности, были эквивалентными, дается, как известно, шестью уравнениями. Первые три из них выражают то, что суммы составляющих для сил, параллельных трем произвольно выбранным осям, одинаковы в обеих системах, а три остальных — что суммы моментов одних и тех же сил вокруг одних и тех же осей также одинаковы в обеих системах.

Если обозначим через $d\omega$ элемент твердой совокупности, через $\mathrm{X}d\omega$, $\mathrm{Y}d\omega$, $\mathrm{Z}d\omega$ — силы, приложенные к этому элементу, а через x, y, z — координаты произвольной точки, через которую проходит направление равнодействующих сил X, Y, Z, когда такая равнодействующая имеется, то эти шесть уравнений состоят в том, что выражения

ние среды не положат предела этому возрастанию. После этого она остается постоянной, несмотря на трение и сопротивление. В этом случае можно было бы сказать, что опыт доказывает непрерывное возникновение живой силы, какова бы ни была ее причина.

$$\int X d\omega, \int Y d\omega, \int Z d\omega,$$

$$\int (Yz - Zy)\, d\omega, \int (Zx - Xz)\, d\omega, \int (Xy - Yx)\, d\omega$$

имеют одни и те же значения в обеих системах.

Я замечу по этому поводу: 1) что $d\omega$ представляет бесконечно малую величину первого, второго или третьего порядка, смотря по тому, представляет ли собою рассматриваемая совокупность линию, поверхность или объем; 2) я сказал, что x, y, z — координаты некоторой точки, лежащей на равнодействующей сил X, Y, Z, а не той точки, где находится элемент $d\omega$, потому что такая общая формулировка, которая включает и случай, когда взяты координаты элемента $d\omega$, приводит к несравненно более простым результатам, когда все силы, приложенные к твердой системе, направлены к одной неподвижной точке. Ибо тогда можно взять за x, y, z координаты этой точки, а так как они одни и те же для всех элементов $d\omega$, то суммы моментов могут быть написаны следующим образом:

$$z\int Y d\omega - y\int Z d\omega, \quad x\int Z d\omega - z\int X d\omega, \quad y\int X d\omega - x\int Y d\omega,$$

так что три первых интеграла, которые необходимо вычислить, чтобы установить три первых уравнения, дают непосредственно три последних, причем нет необходимости в каком-либо новом интегрировании. Притом вполне очевидно, что мы вправе рассматривать x, y, z таким более обобщенным способом, ибо когда дело идет о твердой системе, можно всегда представить себе, что сила перенесена в какую угодно точку в ее направлении.

Прежде чем подвергнуть расчету три предположения, о которых я только что упоминал, мне кажется необходимым установить одну теорему, при помощи которой это вычисление чрезвычайно упрощается. Представим себе сначала некоторую поверхность GHK и данную точку M, отнесенную к трем прямоугольным осям OX, OY, OZ (рис. 1). Проведем через точку M прямую MP, параллельную одной из осей, например оси x; проведем, далее, через эту прямую две плоскости, образующие бесконечно малый угол $d\varphi$. Они вырежут из поверхности GHK, которую обозначим через σ, полосу, которую обозначим через $d\sigma$, а из плоскости yz — сектор PLl. Возьмем на этой полосе элемент $Nnn'N' = d^2\sigma$,

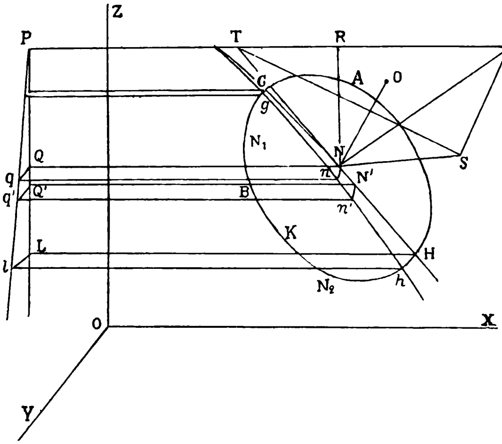


Рис. 1.

проекция которого на плоскость YZ будет бесконечно малой частью $Qqq'Q'$ сектора PLl, ограниченной частями QQ' и qq' прямых PL и Pl и дугами кругов Qq, $Q'q'$ с центром в P. Пусть x, y, z — координаты точки M; x', y', z' — координаты точки N; ρ — расстояние MN, u — его проекция PQ на плоскость YZ; a, b, c — три угла, образуемые нормалью NO в точке N поверхности GHK с тремя осями; i — угол, образуемый той же нормалью с прямой MN, и, наконец, $d^2\sigma$ — элемент поверхности $Nnn'N'$. Как известно, для удвоенной площади сектора PQq имеем выражение

$$2PQ = u^2 d\varphi = (y - y')\, dz' - (z - z')\, dy',$$

площадь $Qqq'Q' = u\,du\,d\varphi$, а площадь $Nnn'N' = \dfrac{u\,du\,d\varphi}{\cos a}$.

Разделим теперь удвоенную площадь сектора PQq на куб расстояния MN, тогда получим величину $\frac{u^2 d\varphi}{\rho^3}$, дифференциал которой, взятый в предположении, что бесконечно малый угол $d\varphi$ является постоянным, будет равен

$$\frac{[3(x-x')\cos i-\rho\cos a]\,d^2\sigma}{\rho^4},$$

так что упомянутая теорема состоит в том, что

$$d\,\frac{u^2 d\varphi}{\rho^3}=\frac{[3(x-x')\cos i-\rho\cos a]\,d^2\sigma}{\rho^4}.$$

Чтобы ее доказать, нужно заметить сначала, что в дифференциале, входящем в первый член, угол $d\varphi$ рассматривается как постоянный потому, что он остается одним и тем же для всех частей полосы GHhg, откуда получается

$$d\,\frac{u^2 d\varphi}{\rho^3}=\left(\frac{2udu}{\rho^3}-\frac{3u^2 d\rho}{\rho^4}\right)d\varphi=\frac{\left(2\rho-\frac{3ud\rho}{du}\right)udud\varphi}{\rho^4}.$$

Если теперь представить себе плоскость NST, касающуюся поверхности σ в точке N и пересекающую MP в T, и опустить из точки M перпендикуляр MS на эту плоскость, то из двух прямоугольных треугольников MSN и MST получаются два значения MS:

$$\mathrm{MS}=\mathrm{MN}\cos\mathrm{SMN}=\mathrm{MN}\cos\mathrm{MNO}=\rho\cos i,$$
$$\mathrm{MS}=\mathrm{MT}\cos\mathrm{SMT}=\mathrm{MT}\cos a,$$

откуда

$$\mathrm{MT}=\frac{\rho\cos i}{\cos a}.$$

Если проведем в плоскости MPQN прямую NR, равную и параллельную QP, которую обозначим через u, то имеем

$$\mathrm{MT}=\mathrm{MR}+\mathrm{RT}=x-x'+\mathrm{RT}.$$

Но сравнивая прямоугольный треугольник NRT с подобным ему дифференциальным треугольником, стороны которого суть du и dx', имеем

$$\mathrm{RT} = \frac{udx'}{du},$$

и, стало быть,

$$\mathrm{MT} = x - x' + \frac{udx'}{du}.$$

Поэтому

$$\frac{udx'}{du} = \rho \frac{\cos i}{\cos a} - (x - x').$$

Но уравнение

$$\rho^2 = u^2 + (x - x')^2$$

дает

$$\rho d\rho = udu - (x - x')\, dx',$$

откуда

$$\frac{ud\rho}{du} = \frac{u^2 - (x - x')\dfrac{udx'}{du}}{\rho} = \frac{u^2 - \dfrac{(x - x')\rho\cos i}{\cos a} + (x - x')^2}{\rho} =$$

$$= \rho - \frac{(x - x')\cos i}{\rho \cos a}.$$

Подставляя это значение в выражение, найденное нами для $d\frac{u^2 d\varphi}{\rho^3}$, получим

$$d\frac{u^2 d\varphi}{\rho^3} = \frac{[3(x - x')\cos i - \rho\cos a]\, udud\varphi}{\rho^4 \cos a},$$

или

$$d\frac{u^2 d\varphi}{\rho^3} = \frac{[3(x - x')\cos i - \rho\cos a]\, d^2\sigma}{\rho^4},$$

что и требовалось доказать.

Первое применение, которое мы сделаем из этой теоремы, относится к взаимодействию магнитной молекулы и совокупности весьма маленьких объемов, ограниченных каждый со всех сторон бесконечно тонким слоем двух магнитных жидкостей, южной и северной, в равных количествах. Они образуют магнитные элементы, как их мыслят физики, не принимающие моей теории. В труде, где г. Пуассон [3] установил принципы и вывел следствия, которые должны вытекать из действия, приписываемого магнитным жидкостям, я почерпнул точное представление о том, что следует подразумевать под действием магнитных элементов в этой гипотезе о двух жидкостях.

Согласно формулам, приведенным на стр. 22 упомянутого труда, действие одного из этих элементов на магнитную молекулу зависит: 1) от положения элемента относительно молекулы; 2) от бесконечно малого объема, занимаемого элементом и обозначаемого автором через h^3, от величины δ, которую можно рассматривать как интенсивность его действия, и от углов, определяющих направление прямой, в котором это действие является *максимальным*; эти последние величины остаются постоянными для одного и того же элемента, как бы ни изменялось положение молекулы.

Представим себе теперь поверхность σ неизменной формы GHK (рис. 1), на которой распределены и закреплены на равных расстояниях магнитные элементы такие, что объемы h^3 и величина δ для каждого из них одинаковы. Это можно выразить, сказав, что магнетизм равномерно распределен по поверхности и что, кроме того, для каждого элемента направление, в котором действие достигает наибольшей величины, перпендикулярно к этой поверхности. После того как магнитные жидкости распределены на ней таким образом, допустим, что они удерживаются на каждом из элементов коэрцитивной силой, достаточной для того, чтобы они не могли сместиться ни под влиянием своего взаимодействия, ни под действием магнитной молекулы, находящейся вне поверхности, которую мы исследуем в смысле действия на нее этих жидкостей.

Пусть a, b, c — углы, образуемые с тремя координатными осями нормалью NO к поверхности σ, проведенной через некоторую точку N этой поверхности, взятую внутри магнитного элемента; x', y', z' — координаты этой точки N; x, y, z — координаты другой точки M, где находится магнитная молекула; ρ — расстояние MN между этими двумя точками;

i — угол MNO, составленный этой прямой с нормалью NO в точке N. Тогда, по формулам, полученным г. Пуассоном на стр. 22 его цитированной работы по теории магнетизма, имеем для значений трех составляющих силы притяжения или отталкивания, направленной по прямой ρ — силы, с которой магнитный элемент действует на молекулу M,

$$-\frac{h^3\sigma\,[3\,(x-x')\cos i-\rho\cos a]}{\rho^4},\qquad -\frac{h^3\sigma\,[3\,(y-y')\cos i-\rho\cos b]}{\rho^4},$$

$$-\frac{h^3\sigma\,[3\,(y-y')\cos i-\rho\cos c]}{\rho^4}.$$

Обозначим через u, v, w проекцию прямой $z=\mathrm{MN}$ на плоскости yz, zx и xy, а через φ, χ, ψ — углы, образуемые этими проекциями соответственно с осями y, z и x. Представим себе, что мы провели через координату $\mathrm{MP}=x$ точки M две плоскости, составляющие бесконечно малый угол $d\varphi$, и найдем действие, оказываемое на молекулу M всеми магнитными элементами, которые лежат на бесконечно узкой полосе, заключенной на поверхности σ между этими плоскостями. Мы можем вообразить себе эту полосу разложенной на элементарные площадки, проекция которых на плоскость yz будет равна $udud\rho$, и, обозначая эти элементарные площадки попрежнему через $d^2\sigma$, будем иметь

$$d^2\sigma=\frac{udud\varphi}{\cos a}.$$

Если обозначим через k постоянный малый промежуток, который, как сказано выше, разделяет равномерно распределенные на поверхности σ магнитные элементы, то $\frac{1}{k}$ будет число этих элементов, расположенных друг за другом по длине, равной линейной единице. Поэтому $\frac{1}{k^2}$ определит число элементов, расположенных на единице поверхности. Число же их на рассматриваемой нами элементарной площади будет $\frac{d^2\sigma}{k^2}$. Ясно, что мы получим их действие на магнитную молекулу M, умножив на эту величину $\frac{d^2\sigma}{k^2}$ те значения сил, относящихся к одному элементу, которые дал г. Пуассон и о которых мы только что упоминали. Мы имеем таким образом для действия всех элементов, которые находятся на площади $d\sigma$, разбитой в направлении возрастающих x,

$$-\frac{h^3\delta\,[3\,(x-x')\cos i-\rho\cos a]\,d^2\sigma}{k^2\rho^4}$$

или, обозначая через m отношение $\frac{h}{k}$ малых отрезков h и k, которое по предположению постоянно для всех магнитных элементов поверхности,

$$-\frac{m^2h\delta\,[3\,(x-x')\cos i-\rho\cos a]\,d^2\sigma}{\rho^4}.$$

Согласно теореме, установленной нами выше, это выражение обращается в

$$m^2h\delta d\,\frac{u^2d\varphi}{\rho^3}.$$

Интегрируя его по всему протяжению полосы G$g$$h$H и обозначая через u_1 и ρ_1, u_2 и ρ_2 значения u и ρ на двух концах этой полосы, получаем

$$m^2h\delta\left(\frac{u_2^2d\varphi}{\rho_2^3}-\frac{u_1^2d\varphi}{\rho_1^3}\right)$$

для действия, оказываемого на молекулу M магнитными элементами, распределенными на этом участке GgHh поверхности σ, который заключен между плоскостями, проходящими через MP и составляющими угол $d\varphi$. Если предположим, что поверхность σ ограничена замкнутым контуром s, оба края которого пересекаются этими плоскостями, то пределами данного интеграла, определяемыми значениями ρ_1 и u_1, ρ_2 и u_2, будут малые дуги этого контура, заключенные между плоскостями, проходящими через MP.

Если мы предположим далее, что поверхность σ замкнута со всех сторон, подобно поверхности шара или эллипсоида, то рассматриваемая полоса образует полную зону, которая замыкает сама себя. В этом случае мы возвращаемся к тому же пределу, от которого исходили; имеем $\rho_2=\rho_1$, $u_2=u_1$, и предыдущее выражение обращается в нуль. Таким образом, ни одно из зон не оказывает никакого действия, а потому и вся поверхность не будет оказывать никакого действия на магнитную молекулу M. Следовательно, она не будет оказывать действия и на любую совокупность молекул, т. е. на самый магнит.

Но если мы предположим, что поверхность не такова, а ограничена замкнутым контуром s, то нужно будет интегрировать относительно φ две части, из которых состоит выражение

$$m^2h\delta d\varphi\left(\frac{u_1^2}{\rho_1^3}-\frac{u_2^2}{\rho_2^3}\right),$$

соответственно на двух участках AN_1B, AN_2B контура s, определяемых двумя касательными плоскостями PMA и PMB, проведенными через прямую MP. Тот же результат мы получим, интегрируя $m^2h\delta\frac{u^2d\varphi}{\rho^3}$ по всему протяжению контура s. Действительно, если подставить вместо u и φ их значения, выведенные из уравнения кривой s, то мы видим, что при переходе от участка AN_1B к участку BN_2A $d\varphi$ изменяет знак, а вследствие этого элементы одного из этих участков имеют знак, противоположный элементам другого.

В соответствии с этим, если обозначим через X параллельную оси x составляющую полного действия, оказываемого совокупностью магнитных элементов поверхности σ на молекулу M, то получим

$$X=m^2h\delta\int\frac{u^2d\varphi}{\rho^3},$$

где величины ρ, u и φ относятся уже только к контуру s.

Точно так же, обозначая через Y и Z составляющие, параллельные осям y и z, будем иметь

$$Y=m^2h\delta\int\frac{u^2d\chi}{\rho^3},\quad Z=m^2h\delta\int\frac{w^2d\psi}{\rho^3}.$$

Из выражений сил X, Y, Z видно, что полное действие, оказываемое совокупностью магнитных элементов поверхности σ на молекулу M, получается в точности таким же, как если бы каждый элемент ds контура s оказывал на молекулу M действие, выражаемое силой, у которой составляющие, параллельные осям, были бы

$$m^2h\delta\,\frac{u^2d\varphi}{\rho^3},\quad m^2h\delta\,\frac{v^2d\chi}{\rho^3},\quad m^2h\delta\,\frac{w^2d\psi}{\rho^3}.$$

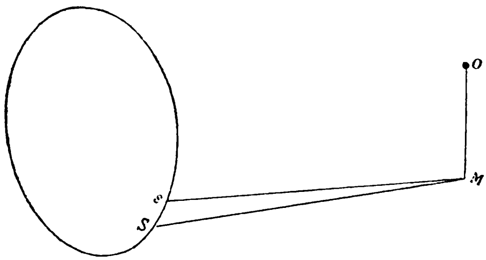


Рис. 2.

Действительно, суммы этих составляющих по всем элементам ds будут

$$m^2h\delta\int\frac{u^2d\varphi}{\rho^3},\quad m^2h\delta\int\frac{v^2d\chi}{\rho^3},\quad m^2h\delta\int\frac{w^2d\psi}{\rho^3},$$

т. е. они тожественны с силами X, Y, Z, к которым сводится действие поверхности σ. Мы видим также, что это действие не зависит от формы поверхности σ, так что можно произвольно менять эту форму, и действие не изменится, если только контур s останется одним и тем же.

Заметим теперь, что $u^2d\varphi$, $v^2d\chi$, $w^2d\psi$ представляют собою проекции на три координатные плоскости удвоенной площади малого сектора MsS (рис. 2), вершиной которого служит точка M, а основанием элемент $s\mathrm{S} = ds$ контура s. Обозначая через θ угол, образованный направлением элемента ds с направлением прямой ρ, а через λ, μ, ν — углы, образованные перпендикуляром к плоскости сектора MsS с осями, получим для удвоенной площади этого сектора значение $\rho ds \sin\theta$, а для ее проекций

$$u^2 d\varphi = \rho ds \sin\theta \cos\lambda,$$

$$v^2 d\chi = \rho ds \sin\theta \cos\mu,$$

$$w^2 d\psi = \rho ds \sin\theta \cos\nu.$$

Три силы, параллельные осям, которые, по предположению, действуют со стороны элемента ds на молекулу M, выражаются, следовательно, таким образом:

$$m^2 h\delta \frac{ds \sin\theta \cos\lambda}{\rho^2}, \quad m^2 h\delta \frac{ds \sin\theta \cos\mu}{\rho^2}, \quad m^2 h\delta \frac{ds \sin\theta \cos\nu}{\rho^2},$$

поскольку они соответственно пропорциональны косинусам углов λ, μ, ν. Они дают в качестве равнодействующей силу, равную по величине $m^2 h\delta \frac{ds \sin\theta}{\rho^2}$ и направленную к плоскости сектора MsS по перпендикуляру, образующему с тремя осями углы λ, μ, ν. Таким образом, каждый элемент sS контура s действует на молекулу M с силой, пропорциональной длине этого элемента и синусу угла, образуемого его направлением с направлением прямой SM. Эта сила обратно пропорциональна квадрату расстояния SM и перпендикулярна к плоскости сектора MsS. А как раз сила, определенная таким образом, и действует между магнитной молекулой и элементом проводника согласно закону, о котором я упоминал в начале этой работы. Отсюда следует, что действие рассматриваемой здесь поверхности, покрытой магнитными элементами, на магнитную молекулу тожественно с действием, которое оказывал бы на ту же молекулу проводник с током, если бы заменить им замкнутый контур, на который опирается поверхность. Таким образом, мы можем объяснить этот закон для случая первой гипотезы, где все должно сводиться к взаимодействию южных и северных магнитных молекул.

Второе применение доказанной выше теоремы заключается в том, чтобы показать, что если, наоборот, мы будем рассматривать этот закон как общий факт, независимо от каких-либо предположений, то найдем, что действие электродинамического соленоида на магнитную молекулу тожественно с действием на ту же молекулу магнита, полюсы которого расположены на двух концах соленоида.

Для этого заметим сначала, что если мы сохраним все предыдущие обозначения и обозначим через μ постоянный коэффициент, то закон, о котором здесь идет речь, состоит в том, что сила, с которой элемент проводника действует на магнитную молекулу, имеет величину

$$\frac{\mu ds \sin\theta}{\rho^2}$$

и что ее три составляющие, параллельные осям x, y, z, соответственно равны

$$\frac{\mu u^2 d\varphi}{\rho^3},\quad \frac{\mu v^2 d\chi}{\rho^3},\quad \frac{\mu w d\psi}{\rho^3}.$$

Чтобы получить составляющие действия замкнутого контура AGBH (рис. 1), на который опирается участок некоторой поверхности, обозначенной через σ, нужно было бы проинтегрировать эти выражения по всей длине контура. Можно также, рассматривая, например, первое из них и проведя через PM касательные плоскости PMA, PMB, проинтегрировать от A до B разность двух значений этого выражения, которые относятся к двум соответствующим элементам Gg, Hh, заключенным между двумя плоскостями, проходящими через PM и образующими угол $d\varphi$. Тогда, если обозначим через u_2, r_2 и u_1, r_1 значения u, относящиеся к дугам AHB и AGB, получим для искомой составляющей

$$\mu\int\left(\frac{u_2^2}{\rho_2^3}-\frac{u_1^2}{\rho_1^3}\right)d\varphi=\mu\int d\varphi\int d\frac{u^2}{\rho^3}=\mu\int\int d\frac{u^2 d\varphi}{\rho^3}.$$

Двойной интеграл, входящий в это выражение, берется по всей площади поверхности, опирающейся на контур AGBH. В силу нашей теоремы, это значение обращается в

$$\mu \int\int \frac{[3(x-x')\cos i - \rho\cos a]\, d^2\sigma}{\rho^4}.$$

Если поверхность плоская, а ее размеры столь малы, что в вычислении следует сохранять лишь первые ее степени, то в этом двойном интеграле можно будет рассматривать как постоянные величины прямые x, ρ и углы a, i. Поэтому получим выражение

$$\frac{\mu[3(x-x')\cos i - \rho\cos a]}{\rho^4} \int\int d^2\sigma.$$

$\int\int d^2\sigma$, очевидно, представляет площадь этой поверхности, так что, обозначив ее через λ, имеем для составляющей, параллельной оси x, действия, оказываемого маленьким контуром на магнитную молекулу, на которую опирается эта площадь, выражение

$$-\frac{\mu\lambda[\rho\cos a - 3(x-x')\cos i]}{\rho^4}.$$

Соленоид представляет собою совокупность таких контуров, которые расположены на данной прямой в плоскостях, находящихся на равных расстояниях друг от друга и перпендикулярных к этой прямой. Поэтому, если обозначим через g расстояние между двумя соседними плоскостями, а через ds — бесконечно малый отрезок данной прямой, то нужно будет умножить предыдущее выражение на $\frac{ds}{g}$. Легко, однако, видеть, что $ds\cos i = d\rho$, а $ds\cos a = dx$, так что действие участка соленоида, соответствующего ds, будет

$$-\frac{\mu\lambda}{g}\cdot\frac{\rho dx - 3(x-x')d\rho}{\rho^4},$$

а интеграл его равен $\frac{\mu\lambda}{g}\left(C - \frac{x-x'}{\rho^3}\right)$, т. е.

$$\frac{\mu\lambda}{g}\left(\frac{x_1-x'}{\rho_1^3}-\frac{x_2-x'}{\rho_2^3}\right),$$

где x_1 и x_2 — абсциссы двух концов соленоида.

Точно так же найдем для составляющих, параллельных осям y и z,

$$\frac{\mu\lambda}{g}\left(\frac{y_1-y'}{\rho_1^3}-\frac{y_2-y'}{\rho_2^3}\right), \qquad \frac{\mu\lambda}{g}\left(\frac{z_1-z'}{\rho_1^3}\right)-\frac{z_2-z'}{\rho_2^3}\Big).$$

Эти три силы проходят через магнитную молекулу, какое бы мы ни приняли предположение относительно точки приложения элементарных сил, поскольку токи соленоида образуют замкнутые контуры, а мы докажем далее (стр. 352—353), что в этом случае все три предположения ведут тожественно к одним и тем же результатам. Впрочем, очевидно, что их можно заменить шестью силами, а именно

$$\frac{\mu\lambda}{g}\cdot\frac{x_1-x'}{\rho_1^3}, \quad \frac{\mu\lambda}{g}\cdot\frac{y_1-y'}{\rho_1^3}, \quad \frac{\mu\lambda}{g}\cdot\frac{z_1-z'}{\rho_1^3},$$

$$-\frac{\mu\lambda}{g}\,\frac{x_2-x'}{\rho_2^3}, \quad -\frac{\mu\lambda}{g}\cdot\frac{y_2-y'}{\rho_2^3}, \quad -\frac{\mu\lambda}{g}\cdot\frac{z_2-z'}{\rho_2^3}.$$

Равнодействующая первых трех равна $\frac{\mu\lambda}{g\rho^2}$, поскольку $\sqrt{(x_1-x')^2+(y_1-y')^2+(z_1-z')^2}=\rho_1$, и направлена по прямой, соединяющей магнитную молекулу с оконечностью соленоида, координаты которой суть x, y, z, так как косинусы углов, образуемых этой равнодействующей с тремя осями, пропорциональны $x-x'$, $y-y'$, $z-z'$ и потому равны

$$\frac{x_1-x'}{\rho_1}, \quad \frac{y_1-y'}{\rho_1}, \quad \frac{z_1-z'}{\rho_1}.$$

Точно так же найдем для равнодействующей трех остальных сил силу $\frac{\mu\lambda}{g\rho_2^2}$, косинусы углов которой с координатными осями равны

$$-\frac{x_2-x'}{\rho_2}, \quad -\frac{y_2-y'}{\rho_2}, \quad -\frac{z_2-z'}{\rho_2}$$

и которая направлена по прямой, соединяющей магнитную молекулу с другой оконечностью соленоида. Однако вследствие противоположных знаков косинусов эта сила — отталкивающая, когда первая сила — притягивающая, и наоборот.

Эти две силы, очевидно, те же, с какими действовал бы на молекулу магнит, два полюса которого были бы расположены на двух концах соленоида.

Поскольку намагниченный брусок всегда можно рассматривать как совокупность малых магнитов, отсюда вытекает, что можно приписать действие, оказываемое им на магнитную молекулу и тем самым на другой брусок, той же элементарной силе, как и взаимодействие, открытое г. Эрстедом, между проводником и магнитом. Для этого, однако, необходимо рассматривать магнит как совокупность электрических токов, которые образуют столько же соленоидов, сколько в нем предполагается малых магнитов.

Возвратимся теперь к результатам, при помощи которых мы, наоборот, свели действие, открытое г. Эрстедом, к действию поверхности, покрытой магнитными элементами, происходящему лишь тогда, когда проводники образуют замкнутый контур.

Заметим, что совокупность батареи и всех проводников всегда образует контур или, вернее, систему контуров этого рода. Действительно, проводники, в особенности батарея, не могут быть рассматриваемы как простая линия, образующая замкнутый контур; их следует рассматривать как множество замкнутых контуров, проходящих через все точки поперечного сечения проводника. Они удаляются друг от друга, входя в элемент, чтобы затем последовательно пройти через медную и цинковую пластинки в различных точках поверхности этих пластинок.

Из изложенных соображений и из произведенных нами ранее вычислений следует, что можно представить таким же образом все эксперименты, в которых мы заставляли действовать на магнит, рассматриваемый как собрание магнитных молекул, неподвижный проводник любой формы, поскольку указанный проводник образует с элементом вполне замкнутый контур. При этом предполагается, что, как мы видели, токи заменены поверхностями, покрытыми магнитными элементами. Во всяком случае, проводники всегда образуют замкнутые контуры, когда они неподвижны.

Но, кроме действий неподвижного проводника на магнит, нам необходимо еще рассмотреть действия неподвижного магнита на подвижную часть проводника. Поскольку все части магнита неизменно связаны между собой, нужно, чтобы весь магнит был или неподвижным, или подвижным. В проводнике же могут иметься и неподвижные, и подвижные части. Мы будем всегда предполагать только одну подвижную часть и считать остальную часть вольтаического контура неподвижной, ибо к каждому участку, либо подвижному, либо неподвижному, можно применить все то, что мы установили для одного участка.

Нужно тщательно различать два случая: первый, когда подвижная часть проводника образует сама по себе жесткий замкнутый или, вернее, почти замкнутый контур, ибо невозможно, чтобы подвижная часть была замкнута в строгом смысле, поскольку два ее конца должны сообщаться с остальной частью контура. Неподвижная часть также образует в этом случае замкнутый контур. Во втором случае подвижная часть, а следовательно, и остальной контур не образуют каждый в отдельности замкнутого контура, а замкнутой является лишь их совокупность. Так, в моем „Description d'un nouvel appareil électro-dynamique" проводники на рис. 4—6 образуют почти замкнутые контуры, и тому, чтобы они были вполне замкнутыми, препятствует лишь промежуток между двумя точками x и y. Контуры же на рис. 13, 14, 15 не замкнуты.

Разберем случай, когда части проводника образуют замкнутые контуры.

Из двух частей проводника одна всегда считается неподвижной, другая — подвижной. Рассмотрим для каждого случая все, что должно произойти от взаимодействия магнита и полного контура. Представим себе неподвижный магнит и подвижную часть проводника, которая образует замкнутый контур. Согласно только что сказанному, мы можем заменить эту замкнутую часть поверхностью, покрытой равномерно распределенными магнитными элементами, как было описано выше. Тогда действие, которое одна из молекул магнита оказывает на эту подвижную часть, представляет результирующую всех действий, оказываемых на магнитные элементы, покрывающие поверхность. Отсюда следует, что три составляющие X, Y, Z, параллельные осям, также проходят через эту молекулу. Эти три составляющие равны

$$m^2h\delta\int\frac{u^2d\varphi}{\rho^3},\quad m^2h\delta\int\frac{v^2d\chi}{\rho^3},\quad m^2h\delta\int\frac{w^2d\psi}{\rho^3},$$

а их моменты относительно трех координатных осей будут

$$\mathrm{X}y-\mathrm{Y}x=m^2h\delta\left(\int y\int\frac{u^2d\varphi}{\rho^3}-x\int\frac{v^2d\chi}{\rho^3}\right)=m^2h\delta\int\frac{yu^2d\varphi-xv^2d\chi}{\rho^3},$$

$$\mathrm{Z}x-\mathrm{X}z=m^2h\delta\int\frac{xw^2d\psi-zu^2d\varphi}{\rho^3},$$

$$\mathrm{Y}z-\mathrm{Z}y=m^2h\delta\int zv^2d\chi-\int\frac{yw^2d\psi}{\rho^3},$$

замечая, что x, y, z при интегрировании являются постоянными.

В „Précis de la théorie de phénomènes électro-dynamiques“ я дал три составляющие и три момента действия, оказываемого замкнутым вольтаическим контуром на конец неограниченного соленоида, другой конец которого предполагается находящимся на бесконечно далеком расстоянии. Из полученных мною формул следует, что три составляющие действия, которое оказывает этот контур на конец соленоида, равные и противоположные действиям конца соленоида на контур, в точности равны величинам, приведенным выше. Различие только в том, что постоянный коэффициент $m^2h\delta$ заменяется здесь половиной произведения двух сил i и i' тока в контуре и сил тока в соленоиде; поэтому они становятся равными, если предположить, как мы имеем на то право, что

$$\frac{1}{2}ii' = m^2h\delta.$$

Однако моменты, на первый взгляд, не будут равными, ибо силы, которые я дал как действие соленоида на контур, приложены к серединам элемента контура. Тем не менее мы докажем, что всякий раз, когда мы имеем дело с замкнутым контуром, значения моментов будут одни и те же, независимо от того, приложены ли силы к самим элементам или они все проходят через одну точку, связанную с контуром и помещенную в том месте, где находится магнитная молекула или конец соленоида.

Обозначая через x_1'', y_1'', z_1'' координаты элемента ds контура, найдем, что суммы моментов, стремящихся вращать контур вокруг оси z, если силы приложены к элементу ds, равны

$$\frac{1}{2}ii'\int\frac{y''u^2d\varphi - x''v^2d\chi}{\rho^3}.$$

Но если бы эти самые силы были приложены к точке с координатами x, y, z, которую мы считаем связанной с проводником, но не связанной с магнитной молекулой, то сумма моментов вокруг оси z, попрежнему в предположении, что $m^2h\delta = \frac{1}{2}ii'$, была бы, как мы видели,

$$\frac{1}{2}ii'\int\frac{yu^2d\varphi - xv^2d\chi}{\rho^3};$$

Разность между этими двумя суммами моментов, относящихся к двум (различным) гипотезам, будет

$$\frac{1}{2}ii'\int\frac{(y''-y)\,u^2d\varphi - (x''-x)\,v^2d\chi}{\rho^3}.$$

Но имеем

$$u^2 d\varphi = (y'' - y)\,dz'' - (z'' - z)\,dy'',$$
$$v^2 d\chi = (z'' - z)\,dx'' - (x'' - x)\,dz''.$$

Если подставим эти значения в предыдущее выражение, то оно обратится в

$$\frac{1}{2}\,ii' \int \frac{[(x'' - x)^2 + (y'' - y)^2]\,dz - (z'' - z)[(x'' - x)\,dx'' + (y'' - y)\,dy'']}{\rho^3} =$$

$$= \frac{1}{2}\,ii' \int [\rho^2 - (z'' - z)^2]\,dz'' - (z'' - z)[\rho d\rho - (z'' - z)\,dz''] =$$

$$= \frac{1}{2}\,ii' \int \frac{\rho dz'' - (z'' - z)\,d\rho}{\rho^2} = \frac{1}{2}\,ii'\left(\frac{z'' - z}{\rho} + \mathrm{const}\right).$$

Если контур замкнутый, то этот интеграл обращается в нуль на пределах, так что разность двух сумм моментов равна нулю и обе суммы равны между собой. Отсюда следует, что равнодействующая сил, приложенных к элементам ds замкнутого контура s, проходит через магнитную молекулу, как и в гипотезе магнитных элементов. Таким образом, в моей гипотезе, согласно которой все силы приложены к элементам ds, мы имеем те же составляющие и те же суммы моментов, что и тогда, когда мы берем в рассмотрение поверхность σ, покрытую магнитными элементами, однако это тожество имеет место лишь для случая замкнутого контура.

Существует еще способ рассматривать взаимодействие магнитной молекулы и некоторого элемента, а именно предположить, что это взаимодействие вызывает одновременно две силы одинаковой интенсивности, которые обе перпендикулярны плоскостям малого сектора MsS (рис. 2) и действуют параллельно друг другу в противоположных направлениях. При этом, однако, одна проходит через магнитную молекулу, а другая через середину элемента, так что они образуют пару, которую физики, стоящие на этой точке зрения, рассматривают как первичное электромагнитное действие. Отсюда непосредственно следует, что если мы имеем подвижной магнит, а контур весь неподвижен, то действие подобных сил тожественно по самому определению с тем действием, которое вытекает из рассмотрения магнитных элементов. Между тем, когда дело идет о неподвижном магните и подвижной части замкнутого вольтаического контура, действие тожественно с предполагаемым мною. Итак, если мы имеем замкнутый контур, то силы, которые получаются из рассмотрения магнитных элементов, и силы, принимаемые мною между элементами проводников, оказываются тожественными. Но в то же время и силы, которые вытекают из гипотезы первичной пары, также с ними тожественны независимо от того, является ли магнит подвижным или неподвижным. Таким образом, нельзя установить опытным путем, какой из гипотез надо отдать предпочтение, поскольку все они дают одни и те же силы и одни и те же моменты.

Теперь мы можем доказать, что никакое непрерывное движение невозможно ни для случая подвижного магнита, ни для случая подвижной части проводника, если только эта подвижная часть, вместе с остальной частью, которая предполагается неподвижной, образует контур, рассматриваемый как замкнутый.

Согласно предыдущему, мы можем заменить замкнутый подвижной участок поверхностью σ, покрытой, как нами было указано, равномерно распределенными магнитными элементами. От этой замены действие нисколько не изменится. Но тогда мы можем рассматривать молекулы магнита и магнитные элементы поверхности σ как две твердые системы материальных точек, действующие друг на друга с отталкивающими и притягивающими силами, которые направлены по соединяющим их прямым и являются функциями расстояний (ибо они обратно пропорциональны квадратам этих расстояний).

Далее, если эти силы вызывают движение, то для обеих систем будет справедлив принцип сохранения живой силы.

На основании этого принципа, если каждая из систем свободно может лишь вращаться вокруг неподвижной точки или оси, с которой она связана, — а это имеет место при всех опытах, — то скорости, приобретаемые различными их точками, не могут возрастать неопределенно. Действительно, согласно этому принципу необходимо, чтобы сумма живых сил, т. е. сумма произведений движущихся масс на квадраты их скорости, была постоянной при отсутствии трения и сопротивления, при наличии же этих последних, она будет непрерывно убывать. Поэтому две системы не могут притти в движение, которое бы продолжалось неопределенно, с ускорением, необходимым для преодоления сопротивления и трения, ими испытываемых. Следовательно, они должны стремиться к состоянию покоя и, наконец, остановятся в некотором определенном положении равновесия, совершив вокруг него ряд колебаний. Доказано, что это положение — то, при котором сумма живых сил является *наибольшей* среди всех других значений, принимаемых ею вблизи этого положения, каково бы ни было движение.

Мы установили выше, что взаимодействие магнита и замкнутого вольтаического контура в точности то же, что и взаимодействие этого магнита и поверхности σ, покрытой магнитными элементами и опирающейся на этот контур. Тем самым доказана невозможность непрерывного и ускоренного движения как для магнита, так и для подвижной части проводника.

Согласно тому, что мы сказали выше, это утверждение правильно независимо от принятого предположения относительно точки приложения элементарных сил, действующих между молекулами магнита и элементами проводника.

В этом заключается теорема, которую я имел в виду доказать в настоящем письме. Как мы видим, доказательство ее состоит в том, чтобы свести всякое взаимодействие магнита и замкнутой части проводника к силам, являющимся просто функциями расстояний точек, между которыми они действуют, причем эти силы направлены по прямым, соединяющим данные точки. Действительно, все математики признают, что такие силы никогда не могут вызвать движение с непрерывным ускорением вокруг каких-либо неподвижных осей или точек.

Кроме того, я хочу доказать предшествующими вычислениями, что из явлений, происходящих в замкнутых контурах, нельзя сделать никаких выводов о том, какая из этих трех гипотез правильна, ибо все они дают одни и те же результаты. Можно надеяться разрешить данный вопрос, лишь перейдя к тем случаям, когда две части вольтаического проводника, одна неподвижная, другая подвижная, не образуют замкнутых контуров. Я хочу сказать об этом несколько слов.

Опыт доказывает в таком случае, что если мы имеем неподвижный магнит, то можно получить непрерывное движение подвижной части проводника, не образующей замкнутого контура вокруг неподвижной оси, если только его два конца не лежат на этой оси.

Это движение, открытое Фарадеем, описано и объяснено г. Демонферраном в его „Manuel d'électricité dynamique".

Посмотрим, какой вывод получается из указанного явления по отношению к трем рассмотренным выше гипотезам.

Существование упомянутого движения вокруг оси, если бы эта ось проходила через полюсы магнитов, рассматриваемых как магнитные молекулы, доказывает, что элементарные силы, с которыми молекулы действуют на элементы проводника, не проходят через те точки, где расположены полюсы. Таким образом, данный факт исключает первую гипотезу, и, следовательно, я могу о ней больше не упоминать.

Однако две другие остаются и дают тожественные эффекты, ибо из них одинаково получаются силы, действующие на подвижную часть проводника и проходящие через середины элементов, на которые действуют. Итак, этот опыт еще не доказывает ничего в пользу той или другой гипотезы.

Но если магнит подвижен, как и незамкнутая часть проводника, и если мы будем рассматривать движение магнита, то вначале может показаться, что должна существовать разница между тем движением, которое должно сообщиться магниту в гипотезе первичной пары, и тем, которое он должен принять согласно моей гипотезе. Действительно, силы, приводящие в движение магнит, в гипотезе первичной пары проходят через молекулы; в моей — они проходят через элемент. Моменты этих двух систем сил, рассматриваемые для случая взаимодействия магнита и незамкнутой подвижной части проводника, различаются в этих двух случаях, ибо интеграл, выражающий разность этих моментов, именно

$$\frac{1}{2}ii'\left(\frac{z''-z}{\rho}+\text{const}\right),$$

обращается в

$$\frac{1}{2}ii'\left(\frac{z_2''-z}{\rho_2}-\frac{z_1''-z}{\rho_1}\right).$$

Здесь z_1'', ρ_1 и z_2'', ρ_2 относятся к двум концам незамкнутой части проводника. Этот интеграл может обратиться в нуль единственно в том случае, когда оба конца данной части лежат на той же прямой, что и молекула.

В таком случае, однако, на магнит действует не только подвижная часть вольтаического контура. Необходимо также учесть действие, оказываемое на него неподвижной частью контура, в который включен элемент. Приведенное соображение полностью изменяет те следствия, которые могли бы быть выведены из только что вычисленной нами разности моментов, ибо указанная разность уже не существует для полного контура, образованного этими частями, поскольку он необходимо является замкнутым. Принимая во внимание данное обстоятельство, мы видим, что возникающие движения должны быть одними и теми же в обеих гипотезах, и чтобы составить себе ясное представление об этих движениях, нужно различать еще два случая. Первый случай — когда магнит, приходя в движение и стремясь к тому положению, где он остановился бы в равновесии, совершив вокруг него колебания, если бы весь вольтаический контур был неподвижен, перемещает подвижную часть проводника. Второй случай — когда магнит остается на прежнем месте. Этот случай тожествен с тем, когда весь проводник неподвижен и потому не может возбудить непрерывного движения. Но если магнит при своем движении перемещает подвижную часть проводника, то смещается и его собственное положение равновесия, а может случиться, что проводник все время будет удаляться, так что магнит никогда его не достигнет. В этом и причина тех непрерывных или неограниченно ускоренных движений, которые магнит может принять в различных случаях, когда он своим собственным движением смещает таким образом подвижную часть вольтаического контура. Это смещение может присходить различными способами, смотря по тому, будет ли ток в подвижной части контура проходить через проводящую жидкость, на которой плавает магнит, или же через самый магнит, или ток будет пробегать по медной проволоке, связанной с данным магнитом и движущейся с ним вместе. Я исследовал первый из этих трех случаев в письме к профессору Герарди, приложенном в конце настоящей работы. Здесь я ограничусь рассмотрением двух остальных, когда магнит и подвижной участок вольтаического контура образуют систему, все части которой неизменно связаны между собой. Для этого замечу сначала следующее. В намагниченном бруске EF (рис. 3) имеются две точки A и B такие, что результирующую всех сил, с которыми магнитные элементы бруска EF действуют на магнитную молекулу M, можно считать равной результирующей двух сил, приложенных в M и действующих по прямым MA, MB. Одна из них — притягивающая, другая — отталкивающая, и обе по величине обратно пропорциональны квадратам этих расстояний. Пусть $AM = r$ и $BM = r'$. Тогда, следовательно, если сила MU, направленная по MA, будет равна $\frac{\mu}{r^2}$, то сила MV, направленная по MB, будет $-\frac{\mu}{r'^2}$.

Точки A и B представляют собою то, что называется полюсами магнита EF.

Собственно говоря, когда мы сводим все силы, с которыми магнитные элементы действуют на магнитную моле-

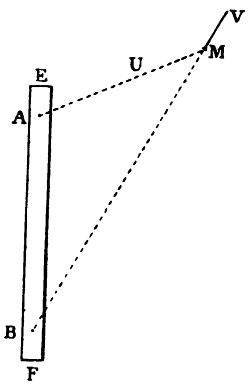


Рис. 3.

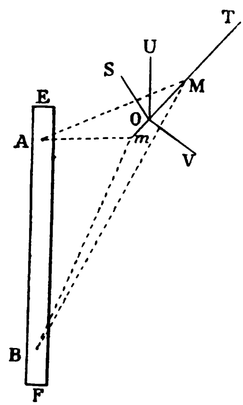


Рис. 4.

кулу M, к этим двум силам $\frac{\mu}{r^2}$ и $-\frac{\mu}{r'^2}$, то это является лишь приближением, но его достаточно для объяснения основных явлений, наблюдаемых в магнитах. Г. Пуассон доказал, что это допущение следует делать для любого магнитного элемента.

Два полюса такого элемента можно считать расположенными на его оси на весьма малом расстоянии, которое выбираем произвольно внутри магнита, изменяя постоянную μ обратно пропорционально квадрату расстояния. Необходимо лишь, чтобы последнее всегда оставалось достаточно малым по отношению к расстоянию магнитного элемента от точки, на которую он действует.

Предположим теперь, что магнит EF действует не на молекулу M (рис. 3), а на бесконечно малый участок проводника mM (рис. 4), направление которого произвольно.

Пусть попрежнему $AM = r$, $BM = r'$. Назовем через ω и ω' углы AMT, BMT, которые эти прямые образуют с направлением MT малой части mM проводника, а через ds — длину этого малого отрезка, и проведем через те же полюсы A, B бруска EF и через Mm плоскости AmM, BmM, согласно рассмотренной формуле. Тогда результирующая всех сил, с которыми магнитные элементы бруска EF действуют на mM, будет та же, что и для двух сил OU, OV, приложенных к mM в ее середине O, перпендикулярных к плоскостям AmM, BmM, обратно пропорциональных квадратам расстояний AM, BM и прямо пропорциональных синусам углов AMT, BMT и длине mM. Таким образом, величины этих сил будут

$$\frac{\mu ds \sin \omega}{r^2}, \quad -\frac{\mu ds \sin \omega'}{r'^2}.$$

Приведение всех сил, с которыми магнитные элементы бруска EF действуют на mM, к этим двум силам

$$\frac{\mu ds \sin \omega}{r^2}, \quad -\frac{\mu ds \sin \omega'}{r'^2}$$

также следует рассматривать как некоторое приближение, достаточное для объяснения явлений. Согласно вычислениям, о которых не может быть речи здесь, ибо мы рассматриваем эти силы как выведенные из опыта, такое приведение было вполне точным для каждого магнитного элемента, если приписать ему два полюса, как мы сказали выше.

Впрочем, г. Био проверил упомянутые опыты, предполагая это приведение правомерным для двух полюсов достаточно малого магнита, имеющего форму параллелепипеда, и оно оказалось столь точным, как только можно желать.

Вот каким способом я преобразовал значения этих сил.

Если обозначим через dv удвоенную площадь малого сектора mAM, основание которого $m\text{M} = ds$, а высота, очевидно, равна $r \sin \omega$, то получим

$$dv = r ds \sin \omega,$$

а так как величину $\frac{\mu ds \sin \omega}{r^2}$ силы OU можно написать следующим образом: $\frac{\mu r ds \sin \omega}{r^3}$, то это выражение обратится в $\frac{\mu dv}{r^3}$.

Составляющая этой силы по прямой OS, образующей с направлением OU некоторый угол ε, равна $\frac{\mu dv \cos \varepsilon}{r^3}$. Но $dv \cos \varepsilon$ представляет собою удвоенную проекцию площади AmM на плоскость, перпендикулярную к прямой OS. Отсюда следует, что, обозначая через du эту удвоенную проекцию, получим для составляющей по OS

$$\frac{\mu du}{r^3}.$$

Обозначая через du' удвоенную проекцию площади BmM на ту же плоскость, перпендикулярную к OS, найдем точно так же для проекции OV на ту же прямую OS

$$-\frac{\mu du'}{r'^3}.$$

Откуда следует, что полная сила по OS равна

$$\frac{\mu du}{r^3} - \frac{\mu du'}{r'^3}$$

Найдем теперь момент вращения малой части проводника mM (рис. 5) вокруг оси GH бруска EF, т. е. вокруг прямой, проходящей через его полюсы A и B. Проведем для этого плоскость через GH и через середину O части mM и возьмем величину составляющей OS, перпендикулярной к этой плоскости. du, как удвоенная проекция AnN площади AMm на ту же плоскость, будет равна произведению квадрата радиуса-вектора $AN=r$ на угол nAN. Если назовем через θ угол GAn, то имеем, очевидно, $nAN=d\theta$, следовательно $du=r^2d\theta$, а потому первый член выражения $\frac{\mu du}{r^3}-\frac{\mu du'}{r'^3}$ для силы OS обращается в $\frac{\mu d\theta}{r}$. Чтобы получить момент вращения, зависящий от этого члена, нужно помножить его на перпендикуляр $OP=r\sin\theta$, и мы видим, что расстояние r исключается из выражения для этого момента, равного

$$\mu d\theta \sin\theta.$$

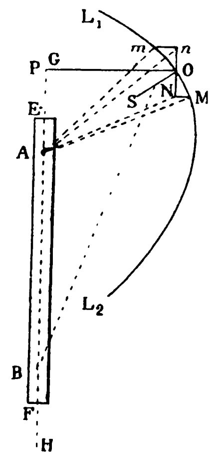


Рис. 5.

Подобным же образом находим, что если обозначим угол GBn через θ', то значение второго члена для той же силы обращается в $-\frac{\mu d\theta}{r'}$, которое нужно умножить на $OP=r'\sin\theta$, чтобы получить обусловленный ею момент. Он будет равен

$$-\mu' d\theta' \sin\theta'.$$

Следовательно, для полного момента, с которым магнит стремится вращать малую часть mM проводника вокруг его оси, имеем выражение

$$\mu(d\theta\sin\theta - d\theta'\sin\theta').$$

Полная сила, с которой магнит EF действует на Mm, может быть разложена на две силы OU, OV (рис. 4). Она вычисляется различными способами из сил действия различных точек магнита на Mm. Они направлены по прямым, соединяющим эти точки с частью Mm проводника, предполагаемой бесконечно малой, причем эта последняя реагирует такими же силами на те же точки и по тем же прямым. Но чтобы силы OU, OV могли быть перпендикулярны к плоскости AmM, BmM, необходимо, чтобы среди сил, исходящих из каждой точки магнита и действующих на mM, одни были притягивающими, а другие — отталкивающими. Это, как известно, и наблюдается для всех сил, с которыми действуют различные точки магнита. Указанное условие равенства действия и противодействия по тем же прямым, между mM и всеми точками магнита, является необходимым следствием того, что молекулы невесомых жидкостей могут действовать только таким же образом, как и молекулы весомых тел. Подобно этим последним, они, даже находясь в движении, должны в каждый момент оказывать то же действие, как если бы они были в покое там, где находятся в этот момент. К тому же известно, что движение двух электрических жидкостей в вольтаическом контуре происходит путем ряда воссоединений и разложений нейтральной жидкости, причем она не выходит из контура и не входит в него, ибо можно покрыть его изолирующим веществом, ничего не изменяя в оказываемых им действиях.

Таким образом, если мы хотим отвергнуть это следствие о равенстве действия и противодействия по одним и тем же прямым, да, впрочем, и вообще все, что нам известно об общих законах природы, то мы должны связать mM (рис. 5) с магнитом EF так, чтобы они образовали систему неизменной формы. Тогда их взаимодействие не сможет вызвать в этой системе никакого движения. Дело будет обстоять так, как будто бы этого действия вовсе не существовало, ибо все силы, которые его вызывают, оказываются попарно равными и противоположными, причем они приложены к точкам, неизменно связанным между собой, а потому находятся в равновесии.

Предположим, как это было сделано в опытах, произведенных для уяснения данного вопроса, что малая часть mM и магнит EF могут двигаться лишь, вращаясь вокруг какой-либо оси. Если они неизменно связаны, то все останется неподвижным. Если нарушить связь, их соединяющую, то они будут вращаться в противоположных направлениях с равными по величине моментами и, следовательно, со скоростями, обратно пропорциональными их моментам инерции, взятым относительно оси, вокруг которой они должны вращаться.

Если мы выберем в качестве этой оси ось магнита EF, то будем иметь

$$\mu(d\theta \sin\theta - d\theta' \sin\theta')$$

для момента вращения mM вокруг GH, и

$$-\mu(d\theta \sin\theta - d\theta' \sin\theta')$$

для момента вращения магнита вокруг той же оси.

Если проинтегрировать это последнее выражение по дуге L_1L_2 проводника, и обозначить через θ_1, θ_2 значения θ в точках L_1, L_2, а через θ'_1, θ'_2 — значения θ' в тех же точках, то для момента вращения, сообщенного магниту дугой L_1L_2, получится выражение

$$\mu(\cos\theta_2 - \cos\theta_1 - \cos\theta'_2 + \cos\theta'_1).$$

На рис. 6

$$\theta_1 = GAL_1,$$

$$\theta_2 = GAL_2,$$

$$\theta'_1 = GBL_1,$$

$$\theta'_2 = GBL_2.$$

Из полученного выше значения следует, что момент вращения магнита вокруг его оси GH, сообщенный ему дугой проводника L_1OL_2, не зависит от формы и величины этой дуги, а зависит лишь от положения ее концов L_1, L_2 по отношению к полюсам A и B бруска EF.

Если заменить дугу L_1OL_2 другой дугой L_1KL_2, начало и конец которой лежат в тех же точках L_1, L_2, то момент будет в точности тем же самым, если только ток пробегает по обеим дугам в одном и том же направлении, например от L_1 к L_2, как указано стрелками на рис. 6.

Если же изменить направление тока в L_1KL_2, заставляя его пробегать эту дугу от L_2 к L_1, как указывают стрелки на рис. 7, то совокупность L_1OL_2 и L_2KL_1, образующая замкнутый контур $L_1OL_2KL_1$, уже не будет вызывать действия, которое заставило бы магнит вращаться вокруг оси GH. Действительно, обе части, составляющие данный контур, дадут для магнита два момента вращения, равных по величине и

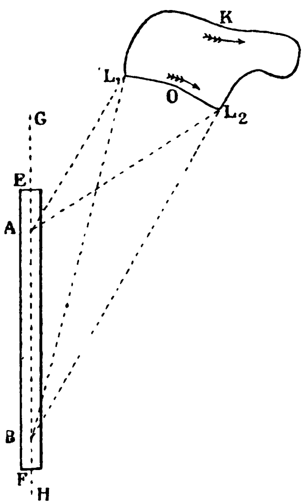


Рис. 6.

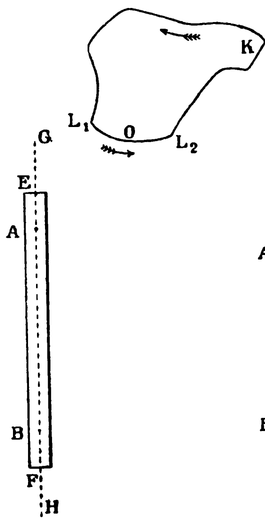


Рис. 7.

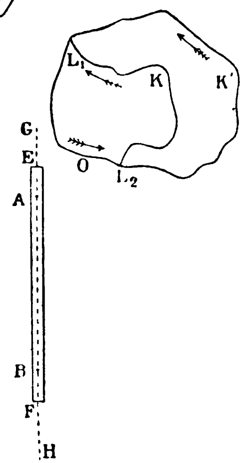


Рис. 8.

противоположных по знаку. Это следует также из общего выражения

$$\mu(\cos\theta_2 - \cos\theta_1 - \cos\theta'_2 + \cos\theta'_1),$$

ибо для замкнутого контура, у которого два предела L_1, L_2 находятся в одной точке, имеем

$$\cos\theta_2 = \cos\theta_1,$$
$$\cos\theta'_2 = \cos\theta'_1.$$

Это будет справедливо и тогда, когда магнит находится вне контура, т. е. когда

$$\theta_2 = \theta_1,$$
$$\theta'_2 = \theta'_1,$$

и тогда, когда он находится внутри контура, т. е. когда

$$\theta_2 = \theta_1 + 2\pi,$$
$$\theta'_2 = \theta'_1 + 2\pi.$$

Женевские физики проверили это весьма многочисленными и тщательными опытами. При помощи крайне подвижных приборов, изменяя самыми различными способами форму замкнутых контуров, они стремились заставить магнит вращаться под влиянием этих токов, однако им не удалось осуществить такое движение.

Мы доказали посредством опыта, что при любой форме замкнутого контура его действие всегда равно нулю. Очевидно, мы констатируем одновременно и правильность того результата вычисления, что момент вращения, вызываемый некоторой дугой, не зависит ни от ее формы, ни от ее величины, а только от положения ее концов относительно полюсов магнита. В самом деле, если действия двух замкнутых контуров $L_1OL_2KL_1$ и $L_1OL_2K'L_1$ (рис. 8), имеющих общую часть L_1OL_2, оба равны нулю, то действия, оказываемые дугами L_2KL_1, $L_2K'L_1$, по необходимости равны, ибо они оба уравновешивают действие части L_1OL_2.

Когда г. Фарадей объявил, что, согласно его опытам, невозможно заставить магнит вращаться вокруг своей оси действием проводника с током, я легко обнаружил причину этого в том, что совокупность проводников и батареи по необходимости представляет систему замкнутых контуров, а мы видели, что ее вращательное действие всегда равно нулю. Мне тогда пришла мысль пропустить часть тока через магнит. Поскольку эта часть в данном случае составляет с магнитом неизменяемую систему, она не оказывает более никакого действия, которое могло бы заставить его двигаться: она как бы уничтожилась. А отсюда следует, что остальная часть контура, оказывающая действие, равное и противоположное действию предыдущей, одна остается активной и заставляет магнит вращаться, если только момент

$$\mu (\cos \theta_2 - \cos \theta_1 - \cos \theta'_2 + \cos \theta'_1)$$

не окажется случайно равным нулю.

В этом случае одна из точек L_1, L_2 будет той, где ток входит в магнит, а другая — той, где он выходит.

Замечу по этому поводу, что когда точки входа и выхода L_1, L_2 (рис. 9) лежат на оси магнита, вращение не может происходить, ибо в этом случае

$$\theta_1 = 0,\ \theta'_1 = 0,\ \theta_2 = \pi,\ \theta'_2 = \pi,$$

а отсюда получается

$$\cos \theta_2 - \cos \theta_1 - \cos \theta'_2 + \cos \theta'_1 = -1 - 1 + 1 + 1 = 0.$$

Я указал несколько позднее в письме к г. Фарадею, напечатанном в „*Annales de physique*", что можно объяснить таким же образом наблюдавшийся им факт, а именно, вместо того чтобы пропускать часть тока через магнит, для получения его вращения вокруг оси достаточно пропустить ток через часть металлического проводника, неизменно с ним связанную, но два конца которой не лежат на оси. В самом деле, поскольку эта часть образует с магнитом неизменную систему, она на него более не действует, а остальная часть контура, концы которого находятся в тех же точках, заставляет его вращаться.

Я давно доказал в опубликованных мною работах по этому вопросу, что, согласно выражению момента вращения, данному выше, движение магнита остается одним и тем же, какую бы форму ни придать данной части контура. Сказать, что следует пренебречь действием этой части, потому что оно не меняется при изменении формы, это все равно, как если бы мы сказали, что следует пренебречь тепловым действием части оболочки при постоянной температуре, ибо это тепловое действие не зависит от формы данной части.

Вот некоторые следствия, которые непосредственно вытекают из предшествующих соображений и вычислений и которые вначале не входили в настоящий труд. Я добавляю их во время печатания, ибо эти следствия в общих чертах те же, что получил г. Пулье из опытов, произведенных им по тому же вопросу в 1827 г.

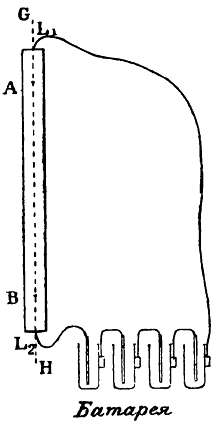


Рис. 9.

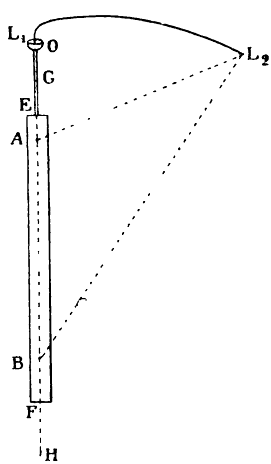


Рис. 10.

Если мы желаем заставить вращаться часть проводника вокруг магнита или магнит вокруг своей оси под действием той части общего контура, которая не связана с ним в неизменяемую систему, то удобно придать оси магнита вертикальное положение и погрузить эти части проводника в чашку O (рис. 10), помещенную на продолжении GO оси магнита. В первом случае эта чашка неподвижна, находится ли она или не находится в соприкосновении с магнитом, который также предполагается неподвижным. Во втором же случае она, при том расположении, которое представлено на рисунке, должна быть спаяна с магнитом и должна двигаться с ним вместе.

Когда точка L_1 лежит на продолжении оси магнита, имеем

$$\theta_1 = 0, \quad \theta'_1 = 0,$$

откуда следует, что

$$\cos \theta_1 - \cos \theta'_1 = 1 - 1 = 0.$$

Поэтому момент вращения, сообщенного дуге L_1, L_2 магнитом, равен

$$-\mu (\cos \theta_2 - \cos \theta'_2).$$

а момент вращения, сообщенный магниту всей той частью контура, который с ним не связан, равен

$$\mu (\cos \theta_2 - \cos \theta'_2),$$

где θ_2 и θ'_2 означают углы OAL_2, OBL_2.

Когда мы имеем установку, изображенную на рис. 10, то $\cos \theta'_2 > \cos \theta_2$, так что первый момент будет

$$\mu (\cos OBL_2 - \cos OAL_2),$$

а второй

$$-\mu (\cos OBL_2 - \cos OAL_2).$$

Если точка L_2 лежит над горизонтальной плоскостью, проходящей через полюс A, то эти значения содержат только разность двух косинусов и становятся весьма малыми, когда точка L_2 находится вблизи продолжения GO оси магнита, ибо тогда оба эти косинуса мало отличаются от единицы.

Если точка L_2 лежит в упомянутой горизонтальной плоскости, то $\cos OAL_2 = 0$. Тогда для значений моментов имеем только

$$\mu \cos OBL_2$$

и

$$-\mu \cos OBL_2.$$

Если точка L_2 оказывается между этой горизонтальной плоскостью, проходящей через другой полюс B, то угол OAL_2 становится тупым, как можно видеть на рис. 11. Имеем тогда $\cos OAL_2 = -\cos BAL_2$, и, поскольку можно написать ABL_2 вместо OBL_2, выражения моментов будут

$$\mu (\cos ABL_2 + \cos BAL_2)$$

и

$$-\mu (\cos ABL_2 + \cos BAL_2).$$

Значения этих моментов, содержащие суммы косинусов вместо их разности, будут гораздо больше, чем в первом случае.

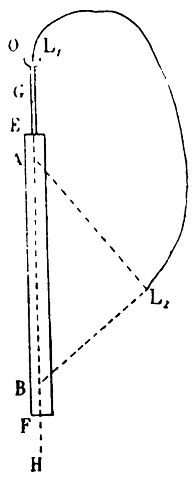


Рис. 11.

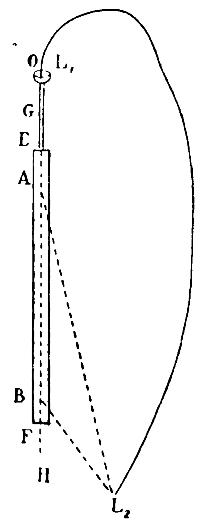


Рис. 12.

Если мы предположим, что точка L_2, оставаясь попрежнему на том же расстоянии от оси магнита, соответствует последовательно различным точкам по длине этой оси, легко видеть из вышеприведенных значений:

1) что они достигнут *максимума*, когда точка будет соответствовать середине магнита. Тогда они обратятся в

$$2\mu \cos ABL_2$$

и

$$-2\mu \cos ABL_2;$$

2) что они будут одними и теми же на равных расстояниях над и под этой серединой. Таким образом, когда точка L_2 окажется в горизонтальной плоскости, проходящей через полюс B, эти значения будут

$$\mu \cos BAL_2$$

и

$$-\mu \cos BAL_2.$$

Это — те же значения, какие мы нашли для случая, когда L_2 лежит в горизонтальной плоскости, проходящей через полюс A. Наконец, если точка L_2 расположена так, как указано на рис. 12, имеем $\cos ABL_2 = -\cos HBL_2$ и значения двух моментов обращаются в

$$\mu (\cos BAL_2 - \cos HBL_2)$$

и

$$-\mu (\cos BAL_2 - \cos HBL_2).$$

Эти значения, очевидно, равны тем, которые были найдены нами ранее, когда мы считали, что L_2 расположена совершенно таким же образом над горизонтальной плоскостью, проходящей через полюс A.

Из этих вычислений следует, что направление вращения остается всегда одним и тем же, каково бы ни было положение точки L_2. Но после того как вращение достигло *максимума*, т. е. когда точка L_2 оказалась против середины магнита, оно все более замедляется, по мере того как точка L_2 удаляется от этой середины. Оно становится весьма слабым, так что его может остановить трение, когда точка L_2 оказывается близ оси магнита и вне промежутка, заключенного между двумя горизонтальными плоскостями, проходящими через полюсы A и B.

Если мы рассмотрим, в частности, случай, когда точка L_2 лежит в горизонтальной плоскости, проходящей через середину K (рис. 13) расстояния между двумя полюсами, то моменты будут

$$2\mu \cos BAL_2$$

и

$$-2\mu \cos BAL_2.$$

Для одного и того же магнита это значение будет тем больше, чем меньше расстояние KL_2 и тем самым и угол BAL_2.

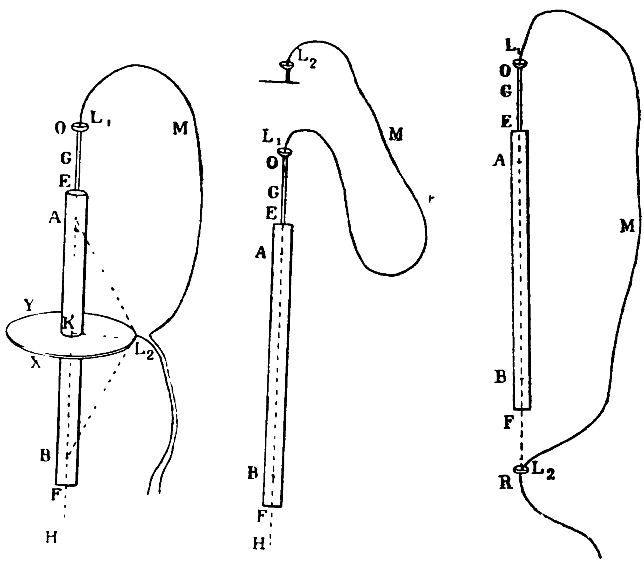


Рис. 13. Рис. 14. Рис. 15.

Поэтому, когда магнит неподвижен, а L_1ML_2 представляет собою подвижную часть проводника, последняя будет тем быстрее вращаться вокруг магнита, чем ближе ее конец L_2

к поверхности магнита. Если же, наоборот, магнит может вращаться вокруг своей оси, а часть полного контура проходит через этот магнит и через неизменно с ним связанное металлическое колесико XL_2Y, от точки L_1 до точки L_2, то движение, которое приобретает брусок под действием остальной части L_1ML_2 контура, будет тем быстрее, чем меньше радиус KL_2 этого колесика.

Здесь представляется некоторая трудность, которую полезно выяснить.

Когда точка L_2 находится также на продолжении оси магнита, либо по ту же сторону, что и точка L_1, как можно видеть на рис. 14, либо по другую сторону, как на рис. 15, то оба угла θ_2 и θ_2' становятся равными 0 или π. Разность их косинусов равна нулю, стало быть равен нулю и момент вращения. В этом случае наблюдается, что, когда два конца дуги L_1ML_2 находятся на оси, вокруг которой она может свободно вращаться, она остается неподвижной, если данная ось совпадает с осью магнита EF. Если же совпадение не вполне точное, то она движется тем медленнее, чем ближе друг к другу эти две оси. Однако затем она все же принимает некоторое определенное положение, а не продолжает непрерывно вращаться вокруг оси, проходящей через ее концы.

Рассмотрим магнит, согнутый, как показано на рис. 16, чтобы середина оси GH, соединяющей два ее полюса, находилась вне бруска и чтобы второй конец L_2 проводника L_1ML_2, как и первый L_1, мог быть помещен на этой же оси, но между двумя полюсами A и B. Из вычислений г. Савари, а также опытов над кольцеобразными магнитами, произведенных несколько лет назад различными физиками, следует, что кривизна магнита не имеет никакого влияния на оказываемое им действие и что оно остается равным действию прямолинейного магнита с полюсами в тех же точках A и B. Отсюда следует, что момент вращения

$$-\mu(\cos\theta_2-\cos\theta_2')$$

дуги L_1ML_2 вокруг оси GH обращается в 2μ, ибо имеем $\cos\theta_2 = -1$, а $\cos\theta'_2 = 1$. В этом случае мы видим, что часть проводника L_1ML_2 вращается вокруг оси GH, пока не соприкоснется с магнитом. Это неизбежно будет происходить для одной из его точек K, лежащей между двумя полюсами A и B, каждый раз, когда конец L_2 окажется на оси GH между этими полюсами, как это предположено здесь.

На первый взгляд кажется, что только одно это обстоятельство препятствует дуге L_1ML_2 непрерывно вращаться вокруг оси GH. Действительно, если мы удалим этот проводник из чашек O и R, через посредство которых он соединяется с двумя полюсами батареи, и сейчас же вновь погрузим его в те же чашки, чтобы он оказался по другую сторону от магнита, то он будет вращаться в том же направлении вокруг GH, пока не соприкоснется с магнитом в той же точке K. Если мы вновь заставим его таким же образом перейти на другую сторону магнита, то такое же движение будет продолжаться непрерывно.

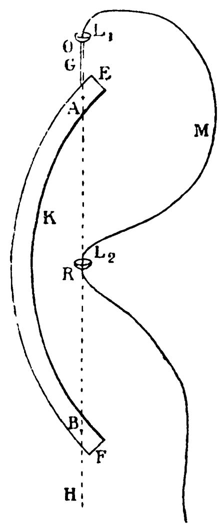


Рис. 16.

Из этого и проистекает трудность, которую имеется в виду разъяснить и на которую обратил мое внимание г. Герарди.

Она состоит в следующем. Пользуясь выражениями, которые употребляет он, можно думать, что лишь *физическая* причина препятствует тому, чтобы взаимодействие магнита и проводника, оба конца которого находятся на оси, вызвало неограниченно ускоренное вращательное движение. Если же рассматривать вещи с чисто *математической* точки зрения, с которой проводник мог бы пройти сквозь магнит между действующими на него магнитными элементами, то такое ускоренное движение могло бы происходить. Между тем это находится в противоречии с чисто математическим доказательством невозможности такого движения, данным мною в другом месте, где я вывел его из формулы, которой я выразил взаимодействие двух вольтаических проводников. В настоящей работе я даю это доказательство вновь, исходя только из закона взаимодействия между магнитом и проводником с током.

Ответ на это затруднение основан на том, что, как я заметил в начале настоящей работы, величина силы, проистекающей из взаимодействия магнита и бесконечно малой части проводника с током, для магнита конечных размеров должна быть рассматриваема лишь как приближенная. Сколь бы она ни была близка в этом случае к истинному значению, ее можно считать математически точной лишь для каждого из магнитных элементов, из которых состоит магнит.

Легко между тем видеть, если бы мы предположили, что часть L_1ML_2 проводника, встретив магнит в K, проникла бы сквозь него и прошла между магнитными элементами, то, чтобы заставить его вращаться вокруг оси GH, действие этих элементов должно было бы изменить направление. В этом случае совершенно недопустимо было бы рассматривать момент, вычисленный относительно двух полюсов всего магнита, как некоторое приближение. Он прежде всего имел бы обратный знак относительно того момента, который существует в действительности и обусловлен совокупными действиями всех магнитных элементов.

Я объясняю это подробнее на довольно простом примере, чтобы легче было усвоить объяснение. Этот пример состоит в том, что мы рассматриваем вместо магнита лишь ряд магнитных элементов одной и той же интенсивности, оси которых расположены на какой-либо кривой AB (рис. 17), где они все лежат на равных расстояниях друг от друга. Предположим вначале, что полюсы этих элементов находятся для одного в точках a, b, для следующего в точках a', b' и т. д. Тогда, не изменяя действия этих элементов на точку O, расположенную на расстоянии, которое можно считать бесконечно большим по отношению к промежуткам ab, $a'b'$ и т. д., мы можем представить себе, что оба полюса каждого элемента удаляются друг от друга, причем их сила изменяется обратно пропорционально их расстоянию. Пусть это продолжается до тех пор, пока северный полюс элемента ab не сольется с южным полюсом элемента $a'b'$, и пусть то же произойдет с полюсами всех прочих элементов. Поскольку все они, согласно предположению, находятся на равных расстояниях друг от друга и обладают одинаковой силой, два разноименных полюса, из которых один принадлежит одному элементу, а другой — предыдущему или последующему, будучи наложены таким образом друг на друга, взаимно нейтрализуются. Останется только действие крайних полюсов, т. е. южного полюса α элемента A и северного полюса β элемента B, в точности так же, как если бы вместо всех магнитных элементов линии AB существовал только южный полюс на конце A этой линии, а северный полюс — на ее конце B.

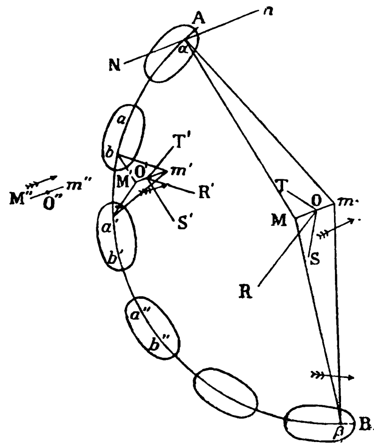


Рис. 17.

Итак, магнит может быть заменен кривой любой формы, на которой расположены на равных расстояниях элементы одинаковой интенсивности, причем два ее конца будут находиться в двух полюсах этого магнита.

Представим теперь себе такой ряд магнитных элементов и посмотрим, что должно произойти с элементом вольтаического тока Mm, направленного так, как указывает стрелка на чертеже, причем этот элемент находится на достаточно большом расстоянии, чтобы действие AB свелось, согласно только что сказанному, к действию двух крайних полюсов A и B.

Сила, относящаяся к южному полюсу α, будет стремиться переместить элемент Mm по перпендикуляру OS к плоскости αMm, по ту сторону этой плоскости, которая находится влево от наблюдателя, помещенного на линии Nn, параллельной Mm и проходящей через точку α так, чтобы он, имея ноги в N, а голову в n, смотрел на элемент Mm. По той же причине сила, относящаяся к полюсу β, будет стремиться переместить элемент Mm по перпендикуляру OT к плоскости βMm, влево от наблюдателя, помещенного таким же образом в β. Равнодействующая этих двух сил, направленная так, как мы видим на рисунке, будет поэтому стремиться, в данном случае, приблизить элемент Mm к линии AB, представляющей магнит. Легко видеть, что если поместить элемент Mm по другую сторону AB, в M$''m''$, то он будет стремиться от нее удалиться. Отсюда как будто следует, что элемент мог бы возвратиться в Mm, если предположить, что он вынужденно вращается вокруг соответственно расположенной оси. Вслед за тем элемент мог бы вновь приблизиться к AB и таким образом продолжать вращаться, беспредельно ускоряясь, если бы он мог перейти через эту линию, пройдя, например, между двумя магнитными элементами ab, $a'b'$. Однако в опыте это не происходит, ибо проводник упирается в магнит, и возражение заключается в том, что утверждают, будто бы проводник мог бы пройти таким образом, не будь того *физического* препятствия, которое для него представляет магнит. Поэтому если рассуждать чисто *математически*, то можно было бы вызвать неограниченно ускоренное движение действием магнита и замкнутого контура, элементом которого является Mm. Предполагается, что он при этом движении встретился бы с линией AB.

Ответ состоит в следующем. Даже если рассматривать явления с такой точки зрения, элемент Mm никогда не смог бы пройти между магнитными элементами ab, $a'b'$. Действительно, как только он оказался бы, например, в положении Мm, т. е. настолько к ним близко, что уже нельзя предположить, не изменяя самого действия, совпадения двух полюсов b и a', то необходимо было бы рассматривать вместо ряда магнитных элементов AB два других ряда Ab, a'B. Эти последние, под влиянием сил, относящихся к полюсам b и a', действовали бы в направлении, обратном действиям разноименных полюсов α и β, которые одни существовали в предыдущем случае. Это можно видеть на рисунке, рассматривая направления этих сил O'S', O'T' и их равнодействующей O'R'. К тому же, вследствие весьма малого расстояния, эти силы в тот момент, когда элемент Мm как раз должен был бы пройти между магнитными элементами ab, $a'b'$, приняли бы бесконечно большие значения в сравнении с силами, относящимися к полюсам α, β. Поэтому элемент Мm должен был бы получить мощный толчок в направлении, обратном направлению приобретенного им движения, которое даже, если рассматривать явления с чисто математической точки зрения, понемногу ослабевало бы и заменилось бы обратным. Таким образом, мы получили бы лишь колебания вокруг некоего постоянного положения, а не движение в том же самом направлении, беспредельно ускоряющееся. Это, впрочем, строго доказано для случая, когда проводник, часть которого составляет Мm, образует замкнутый контур, ибо в этом случае действие может быть приведено к силам, обратно пропорциональным квадрату расстояния. Эти силы никогда не могут вызвать неограниченно ускоренного движения.

Мы рассмотрели изменение направления действия, оказываемого рядом магнитных элементов AB, происходящее для элемента проводника Мm, в предположении, что он помещается сначала вне магнита, а затем — внутри него, между двумя его составляющими магнитными элементами. То же изменение направления происходит и для другого магнитного элемента, если представить себе, что он помещен в тех же двух положениях. Действительно, очевидно, что в случае, если бы этот магнитный элемент был помещен в M достаточно далеко от линии AB, он установился бы так, чтобы его южный полюс пришелся на рисунке внизу со стороны северного полюса β, а его северный полюс — вверху со стороны южного полюса α. Однако если бы он находился между двумя магнитными элементами ab, $a'b'$, то он, наоборот, установился бы так, чтобы его южный полюс был вверху возможно ближе к северному полюсу b, а его северный полюс — внизу вблизи южного полюса a.

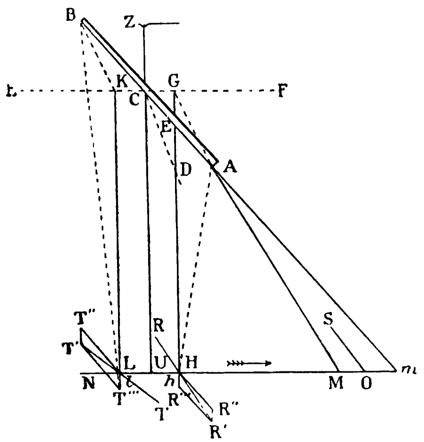


Рис. 18.

Я закончу эти соображения о движениях, сообщаемых проводником магниту, вычислением сил, вызывающих движение, которое приобретает магнит в опытах Эрстеда. Для определенности я предполагаю, что мы желаем вычислить действие, которое прямолинейный неограниченный горизонтальный проводник NM (рис. 18) оказывает на магнит AB, подвешенный на шелковой нити ZC к крючку Z, причем его середина находится в вертикальной плоскости EFMN, проходящей через этот проводник. Магнит AB предполагается также горизонтальным и способным вращаться вокруг этой точки C.

Пусть CD — перпендикуляр, восставленный в точке C к этой плоскости и лежащий в той же плоскости, что и ось BA магнита; пусть ε — угол колебания DCA, который мы предполагаем весьма малым.

Пусть длина перпендикуляра $AH = a$, расстояние $AM = r$, угол $HAM = \theta$. Согласно правилу, сформулированному впервые г. Био, действие южного полюса A на элемент Mm проводника с серединой в точке O, направлено по перпендикуляру OS к плоскости AMm и равно $\mu\frac{\mathrm{M}m \sin \mathrm{AMH}}{r^2}$. Я показал, что это выражение можно представить в виде

$$\mu\frac{2\mathrm{AM}m}{r^3}=\mu\frac{d\theta}{dr},$$

ибо

$$2\mathrm{AM}m=r^2 d\theta.$$

Но в прямоугольном треугольнике AHM имеем $r=\frac{a}{\cos\theta}$, поэтому сила по OS будет

$$\mu\frac{d\theta\cos\theta}{a},$$

интеграл которой между пределами θ_1, θ_2 дает значение равнодействующей всех параллельных сил, действующих на AB

$$\mu\frac{(\sin\theta_2-\sin\theta_1)}{a}.$$

Если предположить, что проводник AB простирается бесконечно в обе стороны, имеем $\theta_1=\frac{\pi}{2}$, $\theta_2=\frac{\pi}{2}$, а следовательно, $\sin\theta_1=-1$, $\sin\theta_2=1$. Равнодействующая будет

$$\frac{2\mu}{a}.$$

Итак, она обратно пропорциональна расстоянию $\mathrm{AH}=a$ от полюса A до проводника.

Эта равнодействующая, как и все ее составляющие, направлена перпендикулярно плоскости ANM в одной из точек прямой NM.

В случае если проводник безгранично простирается в обе стороны, то эта точка находится в H, т. е. она является основанием перпендикуляра, опущенного из полюса A на NM. Таким образом, равнодействующая направлена по горизонтали HR, перпендикулярной к NM, поскольку на равных расстояниях по обе стороны от этой точки H составляющие равны и потому дают попарно частные равнодействующие, проходящие через H.

Опустив из северного полюса B перпендикуляр BL на NM, найдем другую, относящуюся к этому полюсу, равнодействующую всех сил, с которыми магнит действует на проводник NM. В данном случае, когда мы предполагаем, что середина магнита лежит в вертикальной плоскости ENMF, эта равнодействующая одинакова с первой и имеет также величину $\frac{2\mu}{a}$.

Чтобы найти действие, которое в свою очередь оказывает проводник NM на магнит AB, необходимо, в согласии с основными принципами статики:

1) вообразить в H точку h, не связанную с этим проводником, но неизменно связанную с магнитом. Первой силой, действующей на магнит, будет сила, равная и противоположная силе $\frac{2\mu}{a}$, приложенной в H и направленной по HR. Эта первая сила, приложенная в точке h, связанной с магнитом, будет иметь ту же величину и будет направлена по hR′;

2) вообразить в L точку l, также не связанную с проводником NM и неизменно связанную с магнитом. В этой точке l приложена вторая сила, равная и противоположная LT, а потому направленная по lT′ и равная $\frac{2\mu}{a}$.

Все движения, которые может приобрести магнит, будут обусловлены этими силами. Обозначив через φ угол AHG, равный BLK, можно разложить каждую из них на две, одну горизонтальную, другую вертикальную, т. е. всего получим четыре силы, а именно:

1) LR″ и lT″, равные $\frac{2\mu\cos\varphi}{a}$;

2) LR‴ и lT‴, равные $\frac{2\mu \sin \varphi}{a}$.

Эти две последние действуют в одном направлении, параллельном вертикальной линии CU, и расположены от нее на равных расстояниях. Поэтому они слагаются в одну силу, направленную по CU и точку приложения которой можно предоставить себе находящейся в C. Она уничтожается нитью CZ, на которой в настоящем опыте подвешен магнит, в противном случае она переместила бы магнит к проводнику NM. Именно эту силу я назвал *притягивающим* или *отталкивающим* действием[1] в моей первой работе, посвященной явлениям этого рода, в которой я исследовал движения, полученные в опытах Эрстеда.

Что касается двух горизонтальных сил, направленных по прямым hR″, lT″ и равных $\frac{2\mu \cos \theta}{a}$, то они, очевидно, образуют пару, величина которой получится, если умножить это значение на расстояние lh между двумя силами, равное $2b \cos \varepsilon$. Здесь b — половина длины CA или CB магнита, взятая от одного его полюса до другого.

Искомый момент будет поэтому равен $\frac{4\mu b \sin \varepsilon \cos \varphi}{a}$, а уравнение движения будет

$$\frac{d\omega}{dt} \int r^2 dm = \frac{4mb \sin \varepsilon \cos \varphi}{a},$$

где ω — скорость вокруг CU на расстоянии, равном 1. Чем короче магнит, тем меньше угол φ. Можно считать, что $\varphi = 0$ и

$$\frac{d\omega}{dt} \int r^2 dm \; \frac{4mb \sin \varepsilon}{a}.$$

[1] Здесь это действие — отталкивающее, ибо магнит расположен так, что его южный полюс A находится влево от проводника с током NM.

$\int r^2 dm$ в этом уравнении представляет момент инерции магнита вокруг оси CU, проходящей через центр инерции C.

С первого взгляда на чертеж видно, что силы, направленные по hR″, lT″, складываются между собой и стремятся установить магнит в направлении CD, перпендикулярном к плоскости ENMF, вращая его вокруг CU. Но если бы он находился первоначально в этом положении, то оставался бы там в равновесии, ибо тогда обе эти силы были бы направлены навстречу друг другу по одной прямой. Это следует из того, что в данном случае угол $\varepsilon=0$, а поэтому $\sin\varepsilon=0$, и значение, найденное нами для пары, также обращается в нуль. Сила, которая, действуя на расстоянии b от оси CU под углом ε, дала бы тот же эффект, что и эта пара, т. е. заставила бы магнит вращаться вокруг CU, очевидно равна $\frac{4\mu}{a}$, поскольку $\cos\varphi$ можно опять принять равным 1. Эта сила, как нашел г. Био, обратно пропорциональна a.

Расстояния от двух полюсов до проводника NM, а следовательно, и силы, относящиеся к этим полюсам, оказались равными именно потому, что мы предположили магнит горизонтальным и его середину C — в вертикальной плоскости ENMF. Отсюда получилось следствие, что их горизонтальные составляющие, направленные по hR″ и lT″, образуют пару. В этом случае очевидно, что результат совершенно тожествен тому, какой дает гипотеза первичной пары. В самом деле, пару можно перенести в любую плоскость, параллельную той, в которой она расположена, причем вызываемые ею действия не изменятся, если только она сохраняет ту же величину и если новые точки приложения сил неизменно связаны с прежними.

Эта тожественность результатов, вызываемых силами, действительно приложенными в точках h и l и равными им предполагаемыми силами, приложенными к полюсам A и B непосредственно, усматривается в исследованном нами здесь случае. Действительно, в данном случае горизонтальные составляющие этих сил образуют пару, которую можно перенести в любое место. Этот способ доказательства не применим, когда полюсы А и В не находятся на одном и том же расстоянии от проводника, ибо тогда относящиеся к ним силы не равны между собою и не могут образовать пару. В этом случае то же самое тожество зависит от другого условия, а именно того, чтобы проводник, действующий на магнит, образовал замкнутый контур или систему замкнутых контуров. Тожество при этом условии всегда существует, как я показал в „Théorie des phénomènes électro-dynamiques", опубликованной мною в 1826 г., на стр. 102. Нетрудно представить себе, что если только часть электрического контура не проходит через магнит или через проводник, связанный с магнитом, то это условие всегда выполнено, как я показал в том же труде. Действительно, батарея, реофоры и все части проводника, которые их соединяют, всегда образуют на самом деле замкнутый контур.

Когда г. Био производил свои опыты, на магнит фактически действовал замкнутый контур, и этого одного было достаточно для доказательства того, что результаты должны быть одинаковы как при моей точке зрения на взаимодействие проводника и магнита, так и в гипотезе первичной пары. (См. об этом цитированный мною труд, примечание V, стр. 216 и следующие [[4]]).

ПИСЬМО К г. д-ру ГЕРАРДИ

(*Дополнение к исследованию о взаимодействии вольтаического проводника и магнита*) [1]

Очень вас благодарю за письмо, которым вы меня почтили некоторое время назад. Вы даете в нем новые возражения по поводу моего утверждения, что взаимодействие двух жестких и замкнутых контуров или двух совокупностей таких контуров никогда не может вызвать непрерывного движения, в котором скорость все время возрастает до тех пор, пока трение и сопротивление среды не сделают эту скорость постоянной.

Как мне показалось, эти возражения частично зависят от того, что вы, может быть, придали иной смысл, чем я, сказанному мною относительно ограничений в этом утверждении. Я говорил только о взаимодействии двух твердых замкнутых контуров или двух систем таких контуров. Кроме того, вы, может быть, не обратили внимание на следующее: различие смысла, который обычно вкладывается в слова *вращение* и *обращение*, дало мне право сделать различие между *обращением* плавающего в ртути магнита вокруг проводника, открытым г. Фарадеем, и *вращательным* движением того же магнита вокруг своей оси, которое я получил в то время, когда оно считалось невозможным, как вы можете усмотреть из работы Фарадея, относящейся к 11 сентября 1821 г. Поэтому вы, естественно, должны были подумать, что я сказал о первом (роде движения) то, что я на самом деле утверждал лишь о втором, именно, что оно может происходить только в случае, когда ток проходит через магнит или через часть проводника, неизменно связанную с магнитом.

Я прошу вас прочесть мое письмо к г. Фарадею, имеющееся в моем сборнике [2], чтобы убедиться в том, что я говорю там только о *вращательном* движении. Вы увидите также и причину, по которой *вращательное* движение невозможно, когда ток не проходит ни через магнит, ни через проводник, связанный с магнитом. Она состоит в том, что магнит подвержен тогда действию полного контура, замкнутого вместе с батареей, и что совокупные действия всех частей такого контура сводятся к двум силам. Одна из них проходит через один из полюсов магнита, другая — через другой, и потому они не могут вызвать вращения вокруг оси, проходящей через эти два полюса. Эта причина действительна лишь для случая *вращения* магнита вокруг своей оси. Она делает это вращение одинаково невозможным, будет ли полный контур, который замыкается батареей и в который не входит ни магнит, ни какая-либо часть проводника, связанная с магнитом, целиком жестким, или частично твердым, а частично жидким.

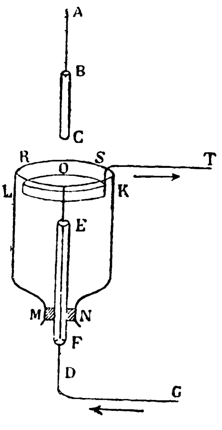


Рис. 1.

Чтобы убедиться в этом, вы можете произвести следующий опыт.

Дно сосуда KLMN (рис. 1) замкнуто пробкой MN, через которую проходит стеклянная трубка EF. В нее заделан один из реофоров, например положительный реофор GDO. В сосуд наливается ртуть, которая, покрывая верхний конец E стеклянной трубки, касается погруженной в нее части EO этого реофора. К неподвижной точке A, расположенной на вертикали, проходящей через точку O, подвешен магнит BC. Его ось также лежит на этой вертикали, а подвес осуществляется при помощи некрученой шелковой нити такой толщины, чтобы она как раз могла выдержать вес магнита, оставляя ему полную свободу вращаться вокруг той же вертикали. Край сосуда покрыт внутри круговой медной пластинкой RS, которая сообщается с другим реофором STH [3].

Приняв такое расположение, приводим батарею в действие. Мы увидим, что ртуть в сосуде KLMN начинает вращаться, но магнит остается неподвижным.

В первый момент этот эффект кажется поразительным. Поскольку всякое действие между двумя телами является взаимным, то сначала можно ожидать, что магнит BC не может привести во вращение ртуть в сосуде KLMN в некотором направлении, не испытывая реакции, которая заставит его вращаться в обратном направлении. Несомненно, он испытывает эту реакцию, которая стремится вращать его в направлении, обратном направлению вращения ртути. Однако остальной контур STHGDO также действует на магнит BC, а действие полного контура, состоящего из этой части STHGDO и токов в ртути, сводится к двум силам, проходящим через полюсы магнита BC. Таким образом, сумма моментов вращения вокруг его оси равна нулю, и действие, оказываемое частью STHGDO, выражается моментом вращения, равным и противоположным моменту вращения, представляющему действие токов ртути. В этом заключается причина неподвижности магнита при данных условиях. Вы можете наблюдать эту неподвижность в любое время. Мне кажется, что указанная причина устраняет и одно из ваших возражений, которое основано на том, что в силу принципа равенства действия и противодействия подвижная система может вращаться под влиянием неподвижной лишь постольку, поскольку она сама могла бы заставить вращаться эту последнюю, если бы она стала неподвижной, а первая — подвижной. Такой принцип верен, однако, лишь тогда, когда каждая из двух систем испытывает действие только со стороны другой системы. Он перестает быть применимым, когда одна из них испытывает со стороны некоторой третьей системы, также неподвижной, действие, способное уравновесить то, которое оказывает на нее другая система. Так, в предыдущем опыте подвижная ртуть вращается под действием неподвижного магнита BC. Но если вы сделаете магнит подвижным, подвесив его на нити AB, то он не будет вращаться, ибо третья система, неподвижная в обоих случаях, т. е. остальная часть STHGDO полного контура, оказывает на магнит действие, уравновешивающее реакцию токов ртути. Последняя же будет продолжать вращаться таким же образом, будет ли магнит неподвижен или подвешен на шелковой нити AB.

Вообще, когда я сказал, что действие жесткого и замкнутого контура на магнит, стремящееся вращать его вокруг его оси, равно нулю, то очевидно, что я имел в виду лишь момент вращения вокруг этой оси. Он равен нулю, но не потому, что равны нулю силы, с которыми замкнутый твердый контур действует на магнит, что, конечно, не имеет места, а потому, что две результирующие этих сил проходят через полюсы. Вследствие этого моменты вращения равны нулю при любой величине сил. Но эти моменты уже не могут быть равны нулю, и результирующие не проходят через полюсы магнита, если часть всего тока проходит через магнит или через проводник, неизменно с ним связанный. В самом деле, поскольку эта часть полного тока уже не действует на магнит, она не уравновешивает магнита вращения, вызываемого действием остальной части контура на магнит, действием, которое приводит его во вращение. Я первый это наблюдал и объяснил именно таким образом. Мне представляется, что это объяснение вполне удовлетворительно, и, повидимому, вы его принимаете, как и я. Поэтому я не буду больше на этом останавливаться.

Все сказанное мною в письме к Фарадею [4] было основано на том, что полный момент вокруг оси магнита равен нулю, и потому может быть применено лишь к *вращательному* движению вокруг этой оси, а не к *обращению* магнита или совокупности магнитов вокруг проводника. Именно к такому обращению относится опыт г. Нобили [5]. Вы полагаете, что такое движение можно получить действием проводника, все части которого неизменно связаны между собою и с батареей. Я настаиваю на том, что это невозможно, но по причинам, совершенно отличным от тех, которые относятся к *вращению* магнита вокруг собственной оси. Правда, сумма действий, оказываемых на магнит таким проводником, всегда проходит через полюсы этого магнита, как я доказал в своем „Précis de la théorie des phénomènes électro-dynamiques“;[1] это следует из моей теории, но предполагается также и теми физиками, которые ее не принимают. Однако эти силы, проходя через полюсы магнита, могут иметь момент вращения вокруг проводника, не проходящий через эти полюсы. Действительно, магнит начинает вращаться в большом числе случаев вокруг соседней части проводника, твердого на протяжении от одного конца батареи до другого. Но как бы я ни видоизменял опыт, пока все части проводника оставались неподвижными, магнит приходил во вращение лишь с тем, чтобы остановиться, в одном случае — упершись в проводник, в другом — приняв положение, где он оставался в равновесии после того, как совершил вокруг него несколько колебаний. Первый случай наблюдается тогда, когда магнит расположен так, что при своем движении встречает между двумя полюсами часть проводника, второй — в случае, когда при том же движении два полюса проходят или оба внутри, или оба вне твердого контура, замкнутого батареей и полностью действующего на магнит.

Это, однако, бывает только тогда, когда все части этого контура абсолютно неподвижны. Достаточно попеременно изменять рукою положение некоторых частей проводника, чтобы вызвать непрерывное движение. Однако контур уже не будет *твердым* в моем *обозначении*, и этот случай будет отличаться от случая, когда магнит, плавающий на поверхности

[1] Напечатан в 1824 г. у книгопродавца Крошара, улица Клуатр-Сен-Бенуа, № 16, и книгопродавца Башелье, Набережная Дез-Огюстен, № 55.

ртути, приходит в непрерывное вращение, лишь тем, что здесь мы изменяем форму проводника рукой, тогда как токи в ртути смещаются по мере продвижения магнита, переходя с одной стороны этого момента на другую в силу самого его движения.

Именно это смещение токов в ртути, вследствие движения магнита, устанавливает полное различие между данным случаем и случаем контура, все части которого неподвижны. По-моему, вследствие этого и оказывается возможным непрерывное *обращение* магнита вокруг проводника. Прежде чем вы отвергнете мое мнение по этому вопросу, я очень вас прошу не высказывать своего суждения до тех пор, пока я не ознакомлю вас с доказательствами двоякого рода, на которых я основываюсь.

Эти доказательства состоят: 1) в самих опытах, о которых я только что говорил. Я видоизменял их всеми возможными способами, и ни разу магнит не пришел в движение, которое продолжалось бы неопределенно долго, пока все части вольтаического контура оставались неподвижными. Если мы пропускаем проводник через полный цилиндрический магнит с вертикальной осью, подвешенный так, что он может свободно вращаться вокруг своей оси, то, как показывает опыт, магнит оставался бы совершенно неподвижным, если бы был намагничен вполне равномерно по всей этой оси. Однако на практике это недостижимо. Неравномерность намагниченности является, согласно теориям, причиной того, что магнит вращается, стремясь к определенному положению устойчивого равновесия, и останавливается в этом положении после ряда колебаний вокруг него. Действительно, в этом случае необходимо, чтобы полюсы каждого из отдельных магнитов, из которых следует считать состоящим полый магнит, оба проходили внутри контура, образованного проводником и батареей. Легко повторить опыт, доказывающий этот факт, подвесив полый цилиндрический магнит на некрученой шелковой нити, которая, будучи прочна лишь настолько, чтобы выдержать его вес, обладает лишь весьма малой силой кручения. При этом проводник расположен так, как указано на рис. 1. Мне очень хотелось бы, чтобы вы сами произвели этот опыт, а также опыт, предложенный мне вами, и все те, о которых я упоминаю в этом письме. Вы сами тогда удостоверитесь на опыте в истинности всех тех выводов, которые я в нем излагаю.

2) В работе, которую я вам посылаю при этом письме, содержится полное и строгое доказательство невозможности вызвать путем воздействия твердого и замкнутого контура на магнит движение с безгранично возрастающей скоростью, пока она не делается равномерной вследствие сопротивления и трения.

Я основываю это доказательство не на своих формулах. Я исхожу единственно из закона, формулированного первоначально г. Био, хотя этот закон и не согласовался с опытами, сделанными им в то же время. Однако впоследствии, посредством новых опытов, он с полной убедительностью установил правильность этого закона. Вам известно, что этот закон представляет собою следствие из моей формулы, если мыслить магниты как совокупности электрических токов, образующих вокруг их частиц соленоиды весьма малого диаметра. Согласно вычислениям, основанным на этой формуле и выполненным г. Савари, концы таких соленоидов действуют в точности как те магнитные молекулы, какие предполагаются для объяснения явлений теми, кто не принимает моей теории. Хотя я убежден более чем когда-либо, что это предположение лишено основания и что явления, наблюдаемые в магнитах, вызываются электрическими токами их частиц, я все же буду употреблять название *магнитных молекул* для тех точек, где, согласно одному воззрению, находятся действительно молекулы южной и молекулы северной жидкостей, а согласно другому — концы маленьких соленоидов, образованных токами магнитов. Я не буду делать никаких иных предположений и только допущу, вместе с физиками, которые оспаривают мою теорию, что эти точки действуют на каждый элемент проводника, поскольку решительно все согласны в том, что полюсы магнита в самом деле действуют на элементы этого проводника. Таким образом, говоря лишь о фактах и о законах, которые выводятся из фактов, признаваемых теми, чьи мнения в особенности противоречат моим, я полагаю, что [эти физики] уже ничего не смогут противопоставить чисто математическому доказательству, основанному исключительно на их собственных принципах.

Вы прекрасно показали, что опыт г. Нобили отнюдь не противоречит моей *электродинамической теории*, поскольку она выражена формулой, представляющей взаимодействие двух элементов вольтаических проводников; наоборот, он является ее естественным следствием. Однако вы продолжаете настаивать на том, что этот опыт противоречит высказанному мною принципу о невозможности непрерывного движения, независимо от трения и сопротивления. Этот принцип был бы в таком случае в противоречии с моей теорией, и я первый от него отказался бы. Но противоречие зависит лишь от расширенного толкования, какое вы ему придали. Указанный принцип не даст противоречия, если ограничить его случаем двух контуров или совокупностью контуров, замкнутых и твердых. В опыте же Нобили часть контура, состоящая из токов во ртути, не является твердой и смещается, переходя с одной стороны магнита на другую, при движении этого магнита.

С этим ограничением принцип правилен, ибо он представляет собою математическое и строгое следствие из закона, формулированного сначала Био и с тех пор вполне проверенного и принятого всеми физиками.

Впрочем, очевидно, что объяснение *обращения* магнита, плавающего на поверхности ртути, вокруг части проводника, расположенного вне этого магнита, в том виде, как я дал его в своем сборнике и как повторено в „Manuel d'électricité dynamique“ г. Демонферрана (стр. 147—149), не зависит ни в какой мере от того, проходит ли электрический ток через магнит или нет.

Действительно, я постарался в этом объяснении показать, что все участки токов, находящиеся вне магнита в ртути, на поверхности которой он плавает, стремятся заставить его обращаться вокруг точки P (рис. 2; Руководство по динамическому электричеству, рис. 58), независимо от того, проходит ли ток, приближаясь к магниту, как в частях Pn, Pn', или удаляясь от него, как в частях mM, m'M$'$, или же он проходит сбоку, как в частях Pe, Pe'.

Если бы было возможно устроить, чтобы внутри магнита имелись участки тока, проходящие по прямым nm, $n'm'$ и не составляющие с ним одного целого, которые могли бы, таким образом, сообщить ему движение в направлении, обратном тому, какое он принимает вследствие действия остальной части контура, то магнит остановился бы в некотором определенном положении, совершив вокруг него ряд колебаний.

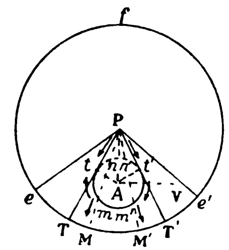


Рис. 2.

В самом деле, мы видим из чертежа, где круг $ntmm't'n'$ изображает один из токов магнита, что эти части отталкивали бы дугу ntm и притягивали бы дугу $m't'n'$, т. е. совершили бы два действия, которые стремятся перемещать магнит в направлении VA. Действия же, оказываемые всеми токами, внешними по отношению к этому магниту, стремятся, наоборот, перемещать его в направлении AV. Это предположение, однако, не может осуществиться, ибо если магнит покрыт изолирующим веществом, как в опыте г. Нобили, то внутри магнита нет тока; если же токи есть, потому что электричество проходит через брусок, то их действие уничтожается равным противодействием, которое оказывают на них токи магнита. В соответствии с этим соображением, явления, получаемые в том и другом случаях, необходимо должны быть тожественными: брусок точно так же вращается вокруг проводника, и опыт Нобили, как и Фарадея, отнюдь не противоречит тому, что я утверждал в моем сборнике. Эти явления, напротив, являются необходимым следствием объяснения, данного мною этому последнему опыту в том месте сборника, о котором я только что упоминал.

Когда я читал описание опыта г. Нобили, я не мог понять, почему он считает его опровержением того, что говорил я. Только благодаря письму, которым вы меня почтили, я понял, что это произошло по двум причинам. С одной стороны, он распространил на *обращение* магнита вокруг проводника то,

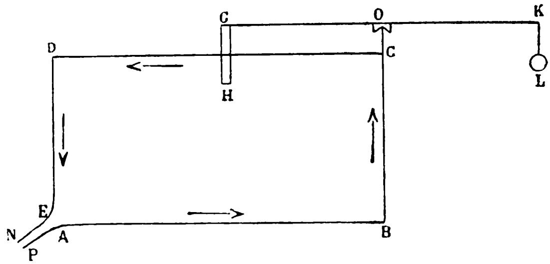


Рис. 3.

что я говорил относительно равенства нулю момента сил действующих на магнит при *вращательном* движении только намагниченного бруска вокруг его оси. С другой стороны, он не обратил внимания на те места моего сборника, где я поставил условием невозможности вращения, продолжающегося непрерывно, несмотря на сопротивление, жесткость двух замкнутых контуров, действующих друг на друга. Эти места я приводил в моем последнем письме, напечатанном в „Annales de chimie et physique", т. XXIX, стр. 375 и 376.

Нам могут возразить следующее. Представим себе проводник, расположенный, как показано, в PABCDEN (рис. 3), с острием C в точке CO, на котором вращается горизонтальный стержень KG, как стрелка буссоли на своей оси. Представим себе, что на конце G этого стержня, поддерживаемого в горизонтальном положении противовесом L, находится магнит GH. Последний будет вращаться вокруг точки O и придет в соприкосновение с проволокой CD по ту ее сторону, где его южный полюс окажется слева от тока, проходящего через эту проволоку. Если теперь перенести его на другую сторону, то он будет вращаться в том же направлении, удалится от проводника и, совершив оборот, опять упрется в ту же точку проволоки CD. Отсюда как будто можно заключить, что если это движение не может продолжаться неопределенно долго, то это зависит не от природы электродинамической силы, а от встречи, в известном смысле насильственной, магнита с проволокой CD. Нет ничего более неверного, чем подобное заключение. Если бы было возможно, чтобы проволока могла пройти через магнит, не вступая при этом в соединение с ним, то, как только часть проволоки оказалась бы внутри бруска, она стала бы действовать в противоположном направлении и остановила бы магнит. Во всяком случае, если бы ей была сообщена скорость, достаточная, чтобы пройти через магнит, она уменьшила бы свою живую силу, обусловленную этой скоростью, на столько же, на сколько она увеличилась действием проводника ABCD во время оборота, который совершил бы магнит с момента, когда он покинул противоположную сторону проволоки CD, до момента, когда он вновь столкнулся с CD.

Это — следствие теоремы, доказательство которой я даю в работе, приложенной к настоящему письму. Но в этом легко убедиться, заменив магнит GH круговым током, который получается, если согнуть подвижной проводник MOQRS так, как показано на чертеже (рис. 4). На одном из концов этого проводника имеется острие M, погруженное в чашку F со ртутью. Эта чашка соединяется с концом C ветви BC проводника PABCTVDEN, прерванного между точками C и T, чтобы ток мог пройти в подвижной проводник.

Если слегка совместно согнуть обе проволоки MO, RS так, чтобы круговая часть OQR встретилась с VD, то эта часть будет вести себя в точности, как малый магнит GH (рис. 3). Она будет притягиваться неподвижным проводником, пока не остановится, наткнувшись на него. Если же ее перевести на другую сторону, как показано на рисунке, она будет постоянно от него удаляться и, совершив полный оборот, опять соприкоснется с VD, как и в первый раз. Не может ли показаться, что ее обращение вокруг вертикали BCT останавливается только потому, что она натолкнулась на VD? А между тем это вовсе не так. Если мы немного уменьшим легкое искривление, которое мы придали проволокам MO,

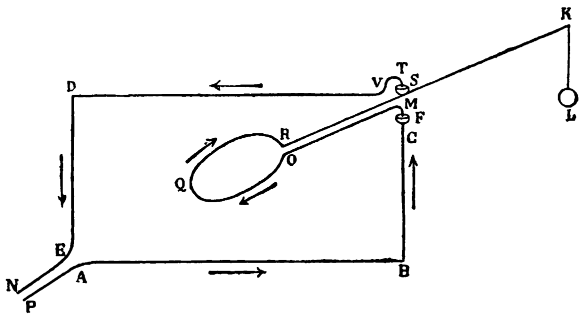


Рис. 4.

RS, то тем самым мы сделаем движение возможным, ибо круговая часть OQR не встречает более VD, а проходит несколько ниже. Однако она остановится в равновесии в изображенном нами положении (рис. 5). Если мы теперь пожелаем заставить ее двигаться в том направлении, в каком она вращается вокруг BCT, находясь или впереди, или позади VD, то мы ощутим сильное сопротивление и увидим, что она отступит к указанному положению равновесия. Это объясняется тем, что силы, действующие на две противоположные стороны OQR, соединяются, чтобы заставить ее отступить. Между тем в случае, когда круг QOR, расположенный впереди или позади VD, стремился вращаться в обратном направлении, действовала лишь их разность.

Магнит GH (рис. 3) останавливается также и тогда, когда он расположен так, что может пройти над неподвижным проводником CD, приближаясь к нему вплотную своим нижним концом H, но его не касаясь.

После того, как мы выяснили принцип, доказанный в упомянутой выше работе, согласно которому устанавливается невозможность движения, продолжающегося неопределенно долго, несмотря на сопротивление, под действием проводника, составляющего замкнутый жесткий контур, — нам необходимо

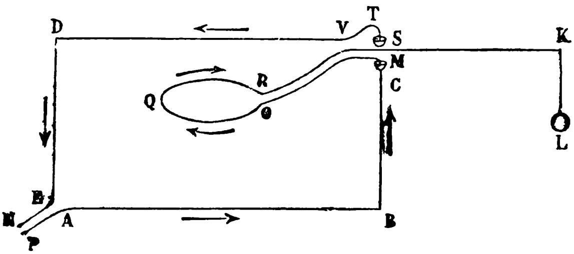


Рис. 5.

ответить на одно возражение, возникающее само собою. В рассмотренном случае магнит вращается под влиянием действия, оказываемого на него таким проводником, но лишь до некоторого определенного положения, вокруг которого он будет стремиться колебаться, пока не остановится в этом положении вследствие сопротивления и трения, ведущих к уничтожению его движения. Почему же то же самое не может происходить тогда, когда, ничего не изменяя в расположении магнита, мы заменяем проводник совокупностью двух его частей, образующих в точности тот же контур, но уже не связанных неизменно между собой, причем один из них неподвижный, а другой подвижной?

Действительно, можно думать, что это обстоятельство ничего не изменяет во взаимодействии магнита и двух частей контура. Однако это так лишь в том случае, когда магнит помещается вне этого контура и может достигнуть своего положения равновесия, не заставляя перемещаться подвижную часть. Тогда, и только тогда, мы видим, что магнит стремится остановиться в определенном положении, совершив вокруг него ряд колебаний в точности так, как если бы эта часть была неподвижной, хотя мы и сделали один участок электрического контура подвижным, заставляя ток проходить через ртуть. В этом случае дело обстоит так же, как в случае, описанном мною выше, когда магнит подвешен на весьма тонкой нити над ртутью, которую он приводит во вращение, оставаясь сам неподвижным.

Даже при вращении ртути проходящий в ней ток не смещается, ибо он устанавливается всегда в одних и тех же точках и в новой ртути, замещающей ту, в которой он проходил ранее. Но с момента, когда магнит погружается в ртуть, по мере того как он приближается к тому положению, где он находился бы в равновесии, если бы электрический ток не смещался, он сдвигает его, прекращая его там, где он проходил ранее, чтобы дать ему проходить в новом месте, которое покидается магнитом и замещается ртутью. Это смещение изменяет и положение равновесия, и может случиться так, что оно будет все время уходить от магнита, так что он никогда его не достигнет, а будет все время стремиться двигаться с возрастающей скоростью. Это — *обращение* (вокруг проводника), продолжающееся непрерывно. То же самое происходит, когда магнит неизменно связан с подвижной частью контура, которую он увлекает за собой, это будет *вращение* магнита вокруг своей оси. И то и другое движения происходят потому, что, поскольку часть контура перемещается, все то, что было доказано для твердого замкнутого контура, уже не может быть приложено к указанным случаям.

Прошу вас извинить меня за это длинное письмо и за многочисленные повторения, которые мне неизбежно пришлось делать. Я начал его в то время, когда получил ваше, и писал различные его части с большими перерывами, во время которых мне пришлось заниматься совсем другими вопросами. Притом, будучи связан временем, я каждый раз принимался за него вновь, не имея возможности перечесть то, что уже было мною написано. Если у вас есть время рассмотреть мои рассуждения и повторить вычисления, произведенные в работе, которую я прилагаю, то, я думаю, мы будем с вами одного мнения и вы примете мой принцип в том ограниченном смысле, какой я придаю ему здесь. Вы согласитесь с тем, что он не противоречит ни моей собственной теории, ни опыту г. Нобили, а является простым математическим следствием общепризнанного закона о взаимодействии магнита и элемента проводника с током. Согласно этому закону, упомянутое действие составляется из двух сил, соответствующих двум полюсам магнита и определяемых формулой, которую я даю в начале работы, приложенной к настоящему письму.

Что касается невозможности вызвать непрерывно ускоренное движение, исключая трение при действии друг на друга двух участков проводника, образующих твердые и замкнутые контуры, то это положение доказывается аналогичным способом. Необходимо исходить из моей формулы, а не только из закона, о котором я сейчас упомянул и который применим только к случаю, когда мы пользуемся магнитом. Это доказательство слишком длинно, чтобы я мог поместить его здесь, но вы можете найти его в другой работе [6], корректуры которой я уже читаю и в которой оно было бы уже опубликовано, если бы особые обстоятельства не задержали печатания этой работы.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ АМПЕРА И ЕЕ МЕСТО В ИСТОРИИ ФИЗИКИ

Последний год XVIII в. ознаменовался крупнейшим открытием в области физики электрических явлений — изобретением в 1799 г. „вольтова столба". „Этот столб из разнородных металлов, разделенных небольшим количеством жидкости, составляет снаряд, чуднее которого человек никогда не изобретал, не исключая даже телескопа и паровой машины". Так охарактеризовал изобретение его современник Араго.[1] Впервые, таким образом, экспериментальная физика получила источник электродвижущей силы, дававший постоянный ток, который именовали то „вольтаическим", то „гальваническим", то „течением гальвани-вольтовской жидкости". Не следует забывать, что этот постоянный ток далеко не отличался постоянством: электродвижущая сила вольтова столба постепенно спадала. Тем не менее это был длительный ток.

Исследование особенностей постоянного электрического тока, проводившееся Дэви в Англии, Петровым в России и Раттером в Германии, было вначале сосредоточено главным образом на химических и световых явлениях. Так, В. В. Петров произвел в Петербурге опыты по разложению воды, алкоголя и „выжатых масел", затем он перешел к „светоносным" явлениям и сжиганию „многосложных" твердых тел. Лишь постепенно стали появляться сообщения о тех или иных магнитных действиях тока. Однако эти сообщения носили

[1] F. Arago, Oeuvres complètes, т. I. Paris, 1854.

противоречивый характер. Так, Альдини в своем „Traité sur le galvanisme“, Paris, 1804 (Трактат о гальванизме), сообщил об опытах Можона, заметившего намагничивание тонких швейных игл, присоединенных к полюсам вольтовой батареи. Между тем, В. В. Петров писал: „Мне... не удалось сообщить и магнитных свойств железным и стальным пластинкам, которые однажды с час, а в другой раз около 6 часов находились в соединении с обоими полюсами гальвани-вольтовской батареи“.[1]

Сомнительный характер носили и опыты Романьози (1802), наблюдавшего отклонение от магнитного меридиана стрелки компаса, через которую пропускался ток.

В течение последующих лет вопросу о возможной связи между магнетизмом и электричеством почти не уделялось внимания. И вот в конце лета 1820 г. многочисленные ученые общества, редакции научных журналов и отдельные известные физики получили из Копенгагена маленькую брошюру на латинском языке, помеченную 21 июля 1820 г.,[2] под заглавием „Опыты по воздействию электрического конфликта на магнитную стрелку“. Автор брошюры, копенгагенский профессор Ганс Эрстед, был мало известен в научных кругах. Брошюра привлекла к себе внимание. Удивительные опыты, описанные Эрстедом, нетрудно было повторить. Сначала их повторил и подтвердил немецкий физик И.-Т. Майер, а затем в Женеве швейцарский физик де-ля-Рив, продемонстрировав их на публичном собрании естествоиспытателей. Статья Эрстеда вскоре появилась одновременно в двух распространенных немецких журналах.[3] В одном из них имелась приписка от редакции, в которой указывалось, что новое открытие

---

[1] В. В. Петров. Известия о гальвани-вольтовских опытах. СПб., 1803.

[2] H.-Chr. Oersted. Experimenta circa efficaciam conflictus electrici in acum magneticam. Hafniae, 1820.

[3] Schweiggers Journal, т. XXIX, 1820, стр. 275—281; Gilbert's Annalen, т. LXVI, 1820, стр. 295.

было сделано Эрстедом случайно. В ответ на это примечание Эрстед поспешил опубликовать статью,[1] в которой подробно осветил историю своего открытия. Сославшись на свою книгу „Воззрение на химические законы природы",[2] Эрстед указал, что уже в этой книге им было впервые высказано соображение, приведшее его впоследствии к замечательному открытию. В этой книге Эрстед писал: „Следовало бы выяснить на опыте, действительно ли электричество в своем наиболее скрытом состоянии не оказывает никакого влияния на магнит, как таковой".[3] Читая весной 1820 г. специальный курс лекций по электричеству, гальванизму и магнетизму, Эрстед вспомнил о своей идее и решил проверить ее путем опытов. „Я обратил внимание на изменения, происходящие в магнитной стрелке во время бури, и в то же время высказал предположение, что электрический разряд может произвести некоторое действие на магнитную стрелку, помещенную вне гальванической цепи. Так как я больше всего ожидал действия от того разряда, который должен накаливать добела, то я вставил очень тонкую платиновую проволоку в то место соединительного провода, где стрелка находится внизу".[4] Эрстед добавил: „Все мои слушатели могут засвидетельствовать, что я заранее определил результат опыта".[5] Из приведенных строк видно, что если Эрстед и ожидал какого-то воздействия на магнитную стрелку, то, во всяком случае, он ожидал его главным образом от процесса нагревания током, а вовсе не от самого течения электричества. Включив тонкую платиновую проволоку последовательно в цепь, Эрстед фактически намеренно даже уменьшил силу тока. Характерно, что, проделав значительное число опытов

---

[1] Там же, т. XXXII, 1821, стр. 202.

[2] Ansicht über chemischen Naturgesetze, durch die neueren Entdeckungen gewonnen. Berlin, 1812.

[3] Там же, стр. 251.

[4] Schweiggers Journal, т. XXXII, 1821, стр. 202, примечание.

[5] Там же.

с проводами из разнообразных материалов, Эрстед упорно продолжал отстаивать свою первоначальную точку зрения. Он утверждал, что при столкновении друг с другом частиц противоположных „электрических жидкостей“ возникает новое состояние, при котором столкнувшиеся частицы противоположного знака действуют на магнитную стрелку. Итак, хотя Эрстед и привлек внимание кругов ученых к новому, открытому им замечательному явлению, он сам давал этому явлению заведомо неправильное толкование, приписывая его не течению электричества, а именно столкновению электричеств — „электрическому конфликту“.

Но историческая заслуга Эрстеда заключалась в том, что его опыты послужили мощным толчком, вызвавшим множество исследований, породивших величайшие открытия.

Уже 18 сентября 1820 г. профессор Политехнической школы Андрэ-Мари Ампер сделал сообщение Парижской Академии наук об открытом им новом явлении — взаимодействии двух проводников, по которым течет ток. Ампер открыл, что два проводника, по которым текут токи одинакового направления, взаимно притягиваются; два проводника, по которым текут токи противоположных направлений, взаимно отталкиваются. В отличие от Эрстеда, Ампер подчеркнул, что эти явления обусловлены действием течения электричества. При этом Ампер впервые предложил заменить принятые в ту эпоху термины „вольтаический ток“ или „гальванический ток“ новым, более точным термином „электрический ток“. Вместе с тем докладчик предложил отожествлять направление электрического тока с направлением движения положительного электричества.

Кратко резюмируя свой доклад 18 сентября 1820 г., Ампер писал: „Я свел явления, наблюденные г. Эрстедом, к двум общим фактам, я показал, что ток, существующий в вольтовом столбе, действует на магнитную стрелку так же, как и ток соединительной проволоки. Я описал опыты, при помощи которых я установил притяжение или отталкивание всей магнитной стрелки под действием соединяющей проволоки. Я описал приборы, которые предполагал соорудить, и, между прочим, гальванические винты и спирали. Я указал, что последние будут производить во всех случаях те же действия, что и магниты. Затем я коснулся некоторых подробностей относительно своего воззрения на магниты, согласно которому они обязаны своими свойствами единственно электрическим токам, расположенным в плоскостях, перпендикулярных их оси. Я коснулся также некоторых подробностей относительно подобных же токов, предполагаемых мною в земном шаре. Таким образом, все магнитные явления я свел к чисто электрическим действиям".[1]

Следовательно, уже в первом докладе Ампера, 18 сентября 1820 г., содержалась вся его революционная теория, ликвидирующая представление о двух магнитных жидкостях.

В XVIII в. существовали фактически две теории магнетизма. Одна из них приписывала все магнитные свойства некоей магнитной жидкости, избыток которой против нормального количества принимался за северный (положительный) магнитный заряд, а недостаток до нормального количества — за южный (отрицательный) магнитный заряд. Эта теория была впервые математически разработана в 1759 г. петербургским академиком Эпинусом (1724—1802).[2] Впоследствии на смену этой унитарной теории магнетизма пришла теория двух магнитных жидкостей, разработанная впервые Кулоном (1736—1806). Опираясь на свои опытные исследования, обнаружившие невозможность получить одну из этих магнитных жидкостей хотя бы в некотором избытке против другой, Кулон пришел к выводу, что обе магнитные жидкости существуют в равных количествах в самих молекулах вещества. Разделение этих „магнетизмов" внутри каждой молекулы представляет собою, по Кулону, процесс намагничивания.

[1] Journal de physique, т. XCI, 1820, стр. 166.

[2] Ф.-У.-Т. Эпинус. Теория электричества и магнетизма. Серия „Классики науки". Изд. АН СССР, М.—Л., 1951.

Уже Эпинус пытался приложить свою унитарную теорию магнетизма к земному шару, предположив, что последний содержит железное ядро. Однако Эпинус не смог объяснить, чем вызвано неравномерное разделение магнитной жидкости в этом железном ядре. Не лучше обстояло дело с объяснением земного магнетизма и в теории Кулона. Вообще никакой принципиальной разницы между унитарной теорией и теорией двух магнитных жидкостей, разумеется, не существовало.

Важнейшим выводом из всех своих работ Ампер считал ликвидацию представления о магнитных жидкостях. Но именно этот вывод Ампера в течение долгого времени вызывал возражения в ученом мире. Это сильно раздражало Ампера. В одном из своих писем он писал по этому поводу: „Потешно видеть, в самом деле, те усилия, которые делают некоторые умники, пытающиеся связать с новыми фактами беспочвенную гипотезу о магнитных жидкостях, отличных от жидкостей электрических. И делают они это исключительно потому, что еще не обзавелись собственным разумом“.[1]

Нельзя, однако, не заметить, что новое воззрение Ампера в тот момент не было прочно обоснованным. Между тем Ф. Араго (1786—1853), присутствовавший при опытах де-ля-Рива (сына) в Женеве, предпринял со своей стороны исследование явлений, наблюденных Эрстедом. При этом Араго сделал замечательное наблюдение: проволока, по которой течет электрический ток, не только ориентирует магнитную стрелку, но и притягивает „опилки мягкого железа, как это сделал бы настоящий магнит“.[2]

Араго, первый сообщивший Академии важное открытие Эрстеда, почти немедленно добавил к нему следующий факт: и ток и „обыкновенное электричество“[3] развивают магнитную

[1] A.-M. Ampère et J.-J. Ampère. Correspondance et souvenirs, т. I. Paris, 1875, стр. 186.

[2] См. в настоящем сборнике, стр. 440.

[3] Разряд от электростатической машины или лейденской банки именовался „обыкновенным электричеством“, в отличие от тока, возбуждаемого вольтовым столбом.

силу в таких железных и стальных стержнях, которые ранее его совершенно не имели. В самом деле, Араго намагнитил таким образом маленькие кусочки стали и швейную иглу.

Незадолго до выступления со своим сообщением Араго показал эти опыты Амперу, который уже ранее теоретически заключил из собственного открытия о взаимодействии двух электрических токов, что притяжения и отталкивания в тех или иных случаях, в зависимости от обстоятельств, оказываемые магнитами друг на друга, происходят от электрических токов, циркулирующих вокруг железа или стали. И тут Ампер, руководствуясь своими теоретическими воззрениями и, повидимому, своими опытами по взаимодействию проводов, свернутых в спираль, указал Араго, что можно получить более интенсивное намагничение, если заменить прямой соединительный провод проволокой, согнутой в виде винта, в центре которого была бы помещена стальная стрелка.

Опыт, произведенный Ампером и Араго совместно, полностью подтвердил указание Ампера. Все эти факты изложил Араго 25 сентября 1820 г. на заседании Парижской Академии наук.

Прошел месяц, и вот 23 октября вновь выступил на заседании Ампер. Он подробно сообщил о своих дальнейших опытах по изучению закона взаимодействия проводов, несущих электрический ток.[1] В этом сообщении Ампер указал, между прочим, первое возможное практическое приложение явлений электромагнетизма, открытых к тому времени Эрстедом и им самим.

Предложенный им телеграф, в котором буквы, соединенные с магнитными стрелками, связаны многочисленными проводами, оказался непрактичным. Дороговизна многочисленных проводов воспрепятствовала осуществлению этого предложения Ампера, да и Ампер им никогда всерьез не занимался. Лишь через 12 лет, в 1832 г., русский изобретатель Павел

[1] См. в настоящем сборнике, стр. 223.

Львович Шиллинг (1786—1857) построил подобный телеграф, причем число проводов было сведено им сначала к шести, а затем к двум. Телеграф Шиллинга успешно действовал в Петербурге между Зимним дворцом и зданием Министерства путей сообщения.

30 октября 1820 г. Ампер выступил вновь на собрании Парижской Академии наук с докладом об ориентации электрических токов под действием земного поля.[1]

Ампер развил свое представление о происхождении земного магнетизма. По его мнению, существует электрический ток с востока на запад, в направлении, перпендикулярном к магнитному меридиану. Эток ток якобы должен быть сравним с током внутри вольтова столба. Ампер понимает, что в земном шаре нет, вероятно, ничего, что походило бы на непрерывный однородный проводник; но он утешается мыслью, что различные вещества, из которых состоит земной шар, „как раз отвечают случаю вольтова столба, состоящего из случайно расположенных элементов и образующего, замыкаясь на самого себя, как бы непрерывный пояс всего земного шара“.[2] Такова гипотеза Ампера о происхождении земных электрических токов, вызывающих земное магнитное поле. Но вещества, из которых должен состоять этот гигантский вольтов столб, мало походят на металлические диски обычного столба. Как известно, Вольта объяснял действие своей батареи контактом разнородных металлов, которых земной шар почти не содержит.

Однако Ампер не видит в этом серьезных возражений. Он считает слишком ограниченным допущение, будто электродвижущее действие существует только между металлами, а находящуюся между ними жидкость нужно рассматривать лишь как проводник. „Вероятно, — говорит Ампер, — оно имеется в контакте между всеми телами, которые при не-

---

[1] См. в настоящем сборнике, стр. 254.

[2] Там же, стр. 268.

большом напряжении могут более или менее проводить электричество".[1]

Излагая свою теорию земного магнетизма, Ампер упомянул, впрочем, что, помимо указанной выше причины, имеется также другая причина, зависящая от вращения земли, и даже высказал предположение, что она играет решающую роль.

При этом Ампер высказал предположение, что электрические токи, вызванные контактом разнородных тел в толще земного шара, могут быть ответственны за внутреннюю его теплоту.

Ампер указал, что если электрические токи являются причиной направляющего действия земли, то они должны быть также и причиною направляющего действия одного магнита на другой. Следовательно, надлежит рассматривать магнит как собрание электрических токов, проходящих в плоскостях, перпендикулярных к его оси. Таким образом, он утверждал, что на каждом из полюсов магнита электрические токи, из которых он состоит, направлены по замкнутым концентрическим кривым. Ампер пытался воспроизвести это расположение, насколько было возможно, при помощи электрического тока по согнутому в спираль проводнику.

Так, в докладе 30 октября 1820 г. Ампер впервые изложил свою концепцию магнетизма. На этом же заседании выступил с докладом Ж.-Б. Био (1774—1862), сообщивший об опытах, произведенных им совместно с Ф. Саваром (1791—1841) над действием длинного прямолинейного тока на магнитную стрелку. Био и Савар установили впервые в этой работе, что „полное действие соединительного провода на любой магнитный элемент, будь то южный, будь то северный, обратно пропорционально прямолинейному расстоянию от этого элемента до провода".[2] Следует отметить, что ни в этой работе, ни в последующих Био не считал

[1] Там же, стр. 269.

[2] J.-B. Biot et F. Savart, Annales de chimie et de physique, т. XV, 1820.

возможным отказаться от представления о магнитных жидкостях и стал в дальнейшем ярым противником амперовой теории магнетизма. В докладе Био 30 октября не содержалось еще никаких намеков на общеизвестный закон Био—Савара—Лапласа, открытый значительно позже.

6 ноября Араго доложил, в присутствии большого числа ученых, о своих опытах (отчасти произведенных совместно с Ампером) по намагничиванию стальных стержней, окруженных винтообразно намотанным проводом, через который пропускались электрические разряды.[1] Ученый секретарь Академии Деламбр особо подчеркнул то место доклада Араго, из которого следует, что „обыкновенное электричество" вызывает все те явления намагничивания, которые ученый наблюдал, пользуясь „вольтаическим электричеством". Вспомним, что вопрос о тожественности этих „обоих видов" электричества в 1820 г. еще далеко не был решен. Даже в 1833 г. Фарадей посвятил ему специальное исследование.[2]

Дальнейшие исследования Ампера были направлены в основном на выявление точного математического закона взаимодействия между элементами токов и на получение более убедительных доказательств его воззрений на магнетизм.

4 декабря 1820 г. на заседании Парижской Академии наук Ампер впервые указал, что „величина притяжения или отталкивания между бесконечно малыми отрезками dx и dz электрических токов выражается просто формулой

$$\frac{k dx dz \sin\alpha \sin\beta \cos\gamma}{r^2},$$

если обозначить расстояние через r".[3] Это был уже зачаток известного закона Ампера.

Итак, основная концепция Ампера в тот период уже выкристаллизовалась, однако необходимо заметить, что ни

---

[1] См. в настоящем сборнике, стр. 440.

[2] М. Фарадей. Экспериментальные исследования по электричеству, т. I. Изд. АН СССР, 1947, стр. 110—146.

[3] См. в настоящем сборнике, стр. 151.

в одной печатной работе еще не встречается знаменитая его идея о молекулярных токах. Лишь в кратком резюме своих выступлений 8 и 15 января 1821 г. Ампер впервые ставит вопрос „о необходимости выяснить, расположены ли замкнутые кривые, вдоль которых текут электрические токи, сообщающие намагниченной стали ее характерные свойства, концентрически вокруг линии, соединяющей оба полюса магнита, или же эти токи распределены по всей массе вокруг каждой из его частиц.[1]

При этом Ампер осторожно указал, что вторая точка зрения представляется ему несколько более вероятной, но что все известные до сих пор явления одинаково хорошо объясняются и с первой точки зрения.

Комментатор Ампера Жубер приводит отрывок из его незаконченного и неизданного труда „Теория магнетизма“: „Эта гипотеза [гипотеза токов вокруг частиц] была сообщена мне г. Френелем, который видел ряд преимуществ в таком представлении об электрических токах в магните“.[2] В бумагах Ампера найдены также две собственноручные заметки Френеля по этому вопросу.

Над „Теорией магнетизма“ Ампер работал летом и осенью 1821 г., когда тяжелая болезнь заставила его временно прервать экспериментальные исследования. В январе 1822 г. Ампер направил голландскому физику Фан-Беку ответ на его письмо.[3]

В своем ответе Ампер, между прочим, уже подробно рассматривает различные магнитные явления с позиций теории молекулярных токов. В частности, он разбирает некоторые способы намагничивания постоянных магнитов и показывает, что гипотеза молекулярных токов позволяет дать этим способам разумное объяснение. С точки зрения гипотезы одной

---

[1] Collection de mémoires relatifs à la physique, т. II, стр. 139.

[2] Там же, стр. 140.

[3] См. в настоящем сборнике, стр. 283.

магнитной жидкости все эти явления впервые были объяснены петербургским академиком Ф.-У.-Т. Эпинусом в 1759 г. в его знаменитом „Опыте теории электричества и магнетизма“.[1]

В „Ответе на письмо г. Фан-Бека“ Ампер впервые рассматривает магнитное взаимодействие частиц, несущих молекулярные токи, и приходит к замечательному выводу, что при условии свободы вращения частиц в твердом теле „они приняли бы такое положение, при котором между соседними токами не было бы отталкивания, и тогда все токи были бы расположены в разных направлениях и не оказывали бы никакого действия вовне... Последнее соображение объясняет, почему частички мягкого железа, токи которого меняют направление с наибольшей легкостью, не сохраняют приобретенный ими магнетизм, когда уничтожается причина, вызвавшая их магнитное состояние“.[2] Как видим, Ампер отчетливо понимал, что чисто магнитное взаимодействие между элементарными магнитиками не может способствовать намагничиванию, а наоборот, должно размагничивать образец. Интересно отметить, что, тем не менее, после Ампера на протяжении целого века не прекращались безуспешные попытки объяснить ферромагнетизм чисто магнитным взаимодействием между элементарными магнитиками.

Следует заметить, что „Ответ на письмо г. Фан-Бека“ содержит ряд других интересных вопросов. В частности, здесь впервые Ампер высказывает замечательную мысль о том, что в молекуле воды каждый атом водорода имеет заряд +1, между тем как атом кислорода имеет заряд —2. Иными словами, за 13 лет до открытия законов электролиза Ампер отчетливо представлял себе, что существуют элементарные заряды, и правильно предвидел относительные заряды некоторых ионов.

„Ответ на письмо г. Фан-Бека“ интересен и тем, что в нем содержится подробное изложение точки зрения Ампера относи-

---

1 Ф.-У.-Т. Эпинус, ук. соч.

2 См. в настоящем сборнике, стр. 300.

тельно причины, вызывающей магнитное поле тока. Ампер указывает, что именно „соединения и разложения электричества“, которые он обозначает названием „электрического тока“, являются, по взглядам Эрстеда, „единственной причиной тепла и света, т. е. колебаний жидкости, заполняющей все пространство“.[1] Эту жидкость — эфир — Ампер рассматривает как своеобразное соединение двух электричеств. Он считает, что „это мнение великого физика“ (Эрстеда) находится в полном соответствии с совокупностью опытных данных. Ампер полагает далее, что всякий раз, когда оба электричества соединяются, происходит возмущение окружающего эфира. Таким образом, оказывается, что в 1822 г. точка зрения Ампера относительно процесса воздействия тока на магнит мало чем отличалась от позиции Эрстеда.

В 1822 г. появилась обширная работа Фарадея „О некоторых новых электромагнитных движениях и теории магнетизма“,[2] в которой он оспаривал теорию магнетизма Ампера. В ответ на различные возражения и скептические высказывания Ампер опубликовал в 1822 г. „Сборник наблюдений по электромагнетизму“,[3] в который, по обычаю того времени, вошли как оттиски собственных работ автора, так и работы других авторов, в том числе и упомянутый труд Фарадея, снабженный критическими примечаниями, доказывавшими, что опыты Фарадея не опровергают, а подтверждают теорию Ампера.

Ампер мотивировал выпуск сборника желанием, чтобы этот сборник содержал не только его работы, но также и опыты, которыми он обязан другим физикам. Этим Ампер надеялся убедить ученый мир в своей правоте. В числе работ, включенных в сборник и подтверждающих идеи и формулы Ампера, находится работа молодого швейцарского ученого Августа де-ля-Рива (сына) „О воздействии земного шара на

[1] Там же, стр. 288.

[2] М. Фарадей. Экспериментальные исследования по электричеству, т. II. Изд. АН СССР, 1952, стр. 183.

[3] Recueil d'observations électro-dynamiques. Paris, 1822.

подвижной участок вольтаического контура",[1] снабженная небольшим введением Ампера.[2]

Как явствует из переписки Ампера, он придавал большое значение опытам молодого де-ля-Рива и считал, что тот „несомненно будет великим физиком". Ампер провел в сентябре 1822 г. в Женеве ряд опытов совместно с де-ля-Ривом.

В сборнике была также опубликована работа молодого французского физика Савари „О применении анализа к электродинамическим явлениям", в которой автор впервые показал путем строгого расчета, что идеи Ампера о природе магнетизма нисколько не противоречат законам, найденным из опыта, а именно закону Кулона для взаимодействия длинных магнитов и закону Био — Савара — Лапласа для взаимодействия тока и магнита.

В 1823 г. Ампер опубликовал брошюру под заглавием „Конспект теории электродинамических явлений г. Ампера, служащий дополнением к его же Сборнику наблюдений по электродинамике и к Руководству по электричеству г. Демонферрана".[3] В этой брошюре Ампер впервые суммировал результаты всех своих исследований. „Конспект" явился первым эскизом будущей „Теории электродинамических явлений", и многие разделы брошюры впоследствии целиком вошли в этот капитальный и основной труд Ампера. Выпуск краткой брошюры был вызван тем обстоятельством, что Ампер в это время был крайне загружен преподаванием и не мог быстро написать большую книгу, о которой он уже давно мечтал.

Некоторые воззрения и идеи Ампера получили в „Конспекте" более развернутое изложение, чем в предшествующих статьях. В частности, в ней был весьма подробно изложен

[1] См. в настоящем сборнике, стр. 449.

[2] Там же, стр. 325.

[3] Précis de la théorie des phénomènes électro-dynamiques, par M. Ampère, pour servir de supplément à son Recueil d'observations électro-dynamiques et au Manuel d'Electricité de M. Demonferrand. Paris, 1823.

упомянутый нами выше вопрос о воззрениях Ампера на природу взаимодействия между токами. „Оно развивается, — пишет Ампер, — между двумя материальными частицами лишь тогда, когда в этих обеих частицах происходит одновременно либо разделение, либо воссоединение двух электрических жидкостей, как если бы оно возникло из того, что г. Эрстед назвал электрическим конфликтом, причем взаимодействие зависит как от обоих направлений, вдоль которых происходит конфликт, так и от расстояния между частицами. Эта сила существует лишь в продолжение того мгновения, когда происходит либо разделение, либо воссоединение. Но поскольку они вновь возникают непрестанно во всех точках проводников, покуда они приключены к концам столба, то вызванные ими эффекты совершенно таковы, как если бы они производились постоянной силой, зависящей одновременно как от расстояния, так и от направлений элементов электрического тока, между которыми данная сила действует. Эти направления, повидимому, совпадают с направлениями, по которым движутся обе электрические жидкости, либо удаляясь друг от друга, либо стремясь друг к другу для воссоединения. Силы, которые исходят из электрического конфликта, имеют совершенно иную природу, чем притяжения и отталкивания, присущие молекулам обеих электрических жидкостей, действие которых обнаруживается при неравномерном распределении этих жидкостей в телах“.[1]

В течение 1824—1826 гг. Ампер работал над своим капитальным трудом, и, наконец, в октябре 1826 г. он мог сообщить в письме своему сыну: „Мой труд появится под заглавием «Теория электродинамических явлений, выведенная исключительно из опыта». Этой книге, которая предполагает известными общие факты, должны были бы предшествовать описание аппаратов и история открытий в их последовательности. Тогда я имел бы полный трактат, о котором я уже

[1] Collection de mémoires relatifs à la physique, т. III, стр. 104—105.

мечтаю в течение трех лет. Я не знаю, позволит ли мне время когда-либо осуществить этот замысел. Покамест труд Демонферрана заменит собою эту первую часть".[1]

Амперу так и не довелось написать полный трактат. Исходя из приведенных его пожеланий, мы сочли необходимым сопроводить „Теорию электродинамических явлений" Ампера рядом избранных фундаментальных его работ, а также некоторых важнейших работ его современников, сыгравших наибольшую роль в истории создания электродинамики.

„Теория" Ампера написана настолько ясно и четко, что вряд ли нуждается в специальных разъяснениях. Ее редакционным недостатком следует признать лишь отсутствие разбивки на главы или параграфы. Повидимому, этот недостаток сознавал и сам автор, снабдивший книгу оглавлением, (см. стр. 217), в котором выделены отдельные вопросы. Мы позволили себе в примечаниях указать, где читатель найдет начало каждого такого раздела.

„Теория электродинамических явлений" Ампера подвергалась многократно на протяжении XIX в. детальному критическому разбору. Особого внимания заслуживают замечания К. Максвелла и В. Вебера.

Максвелл дал следующую оценку „Теории" Ампера. „Экспериментальный метод, посредством которого Ампер установил законы механического взаимодействия электрических токов, составляет одно из наиболее блестящих достижений науки. Кажется, будто вся эта совокупность теории и опыта во всей своей мощи, в полном своем вооружении выскочила из головы «Ньютона электричества». Форма ее совершенна, строгость безупречна, и все резюмируется в одной формуле, из которой могут быть выведены все явления и которая должна будет остаться навсегда в качестве фундаментальной формулы электродинамики... Но метод Ампера

---

[1] A.-M. Ampère et J.-J. Ampère. Correspondance et souvenirs, т. I. Paris, 1875, стр. 380.

хотя и облечен в форму индукции, не позволяет нам все же проследить последовательность идей, руководивших им. Нам трудно поверить, что Ампер действительно открыл свой закон взаимодействия посредством опытов, которые он описывает. Мы вынуждены подозревать, что, как он это и сам говорит, он открыл свой закон посредством метода, которого он нам не показывает, и что, построив в итоге его совершенное доказательство, он снял затем все следы лесов, посредством которых он его соорудил".[1]

Максвелл противопоставляет Амперу Фарадея и отмечает: „Фарадей, напротив, показывает нам все свои эксперименты, и удачные и неудачные, все свои идеи как в стадии наброска, так и в стадии полного развития. И читатель, как бы он ни уступал Фарадею в мощи индукции, испытывает скорее даже симпатию, чем восхищение, и он чувствует искушение верить в то, что и он сам мог бы, при подходящем случае, сделать эти открытия. Каждый исследователь должен будет читать исследования Ампера как величественный образец научного стиля в изложении открытия. Но он обязан также изучить Фарадея для того, чтобы воспитать научные тенденции своего ума посредством действий или противодействий, которые возникнут между вновь открытыми формами, как их изображает Фарадей, и теми идеями, которые возникают в его собственном уме".

В. Вебер писал: „Ампер считал необходимым особо подчеркнуть в самом заглавии своего труда, что математическая теория электродинамического явления выведена исключительно из опыта, и в ней действительно во всех подробностях мы находим изложение столь же простого, как и остроумного метода, приведшего его к цели. Там находишь изложение опытов со всеми желательными подробностями и точностью, с выводами, которые извлечены для теории, и описание инструментов, которыми он пользовался. Но в фундамен-

[1] Treatise on electricity and magnetism, т. II. 1869, стр. 216.

тальных опытах, подобных тем, о которых здесь идет речь, недостаточно доказать общий смысл эксперимента, описать аппараты, служившие в этих опытах, и сказать в общем, что опыт дал ожидаемый результат. Совершенно необходимо войти в подробности самого опыта и сказать, сколько раз он был повторен, как изменялись условия и каков был эффект этих изменений. Одним словом, необходимо представить своего рода протокол всех обстоятельств, который бы позволил читателю вынести суждение о степени точности и надежности результата. Ампер не дает никаких точных данных о своих опытах, и доказательство фундаментального закона ожидает еще этого необходимого дополнения“.[1]

Критика „Теории“ Ампера Максвеллом и Вебером вполне справедлива. Читатель „Теории“ видит, что Ампер подчас ссылается на опыты, фактически вообще не осуществленные им, но результаты которых он считает неизбежными. Таким образом, в „Теории“ Ампера действительно произведенные опыты подчас перемешаны с воображаемыми экспериментами, которые представляют собою не что иное, как наглядный метод изложения теоретических заключений. В этом вопросе Ампер следовал в известной степени примеру Ньютона, чьи „Математические начала натуральной философии“ служили ему образцом.

Вебер в 1846 г. особо подчеркнул тот факт, что „Ампер не продолжил своих исследований“ после появления „Теории“. В самом деле, единственными значительными сочинениями по физике, опубликованными Ампером после его „Теории“ и дополняющими ее, являются „О взаимодействии вольтаического проводника и магнита“ [2] и „Письмо к г. д-ру Герарди (Дополнение к исследованию о взаимодействии вольтаического проводника и магнита)“.[3] Обе эти работы опубликованы в 1826 г. Естественно возникает вопрос, почему же Ампер

---

[1] Elektrodynamische Maassbestimmungen. Leipzig, 1846, стр. 3—4.

[2] См. в настоящем сборнике, стр. 331.

[3] Там же, стр. 387.

не развил далее своей электродинамики ни в экспериментальном, ни в теоретическом направлении?

То обстоятельство, что Ампер не развивал экспериментальной части вопроса, вытекает, с одной стороны, из твердого убеждения Ампера в справедливости его формул. С другой стороны, мы знаем из статей и переписки Ампера, что он тщетно изыскивал экспериментальные пути к проверке своей гипотезы о природе магнетизма. Но ему не удалось найти эти пути. Как известно, лишь Максвелл впервые наметил, 40 лет спустя, путь проверки гипотезы молекулярных токов. Указание Максвелла было осуществлено, однако, как известно, лишь в начале нашего века Барнеттом, с одной стороны, и Эйнштейном и де-Хаазом — с другой. Максвелл пришел к идее о жироскопических свойствах магнитов, исходя из гипотезы, что электричество, циркулирующее, по идее Ампера, в молекулах ферромагнетика, обладает основным свойством „обыкновенной материи" — инерцией. Ампер же был твердо убежден, что электрические жидкости невесомы, безинерционны, поэтому Ампер не мог притти к тем плодотворным выводам в этом вопросе, к которым пришел Максвелл.

То обстоятельство, что Ампер не развивал теоретической стороны электродинамики и остановился на своем законе взаимодействия токов

$$\frac{ii'dsds'}{r^2}\left(\cos\varepsilon - \frac{3}{2}\cos\vartheta\cos\vartheta'\right),$$

также вытекает из воззрений Ампера на природу этих взаимодействий. Мы уже отмечали, что представления Ампера мало чем отличались от взглядов Эрстеда. Эти воззрения Ампера зафиксированы им в его „Теории": „Если те же молекулы[1] движутся в проводниках, где они в каждое мгновение воссоединяются в нейтральную жидкость и вновь разъединяются, то из их взаимодействия возникают силы, зависящие

[1] Т. е. молекулы электрической жидкости.

в первую очередь от длительности чрезвычайно коротких промежутков времени между последовательными соединениями и разъединениями, а затем от направлений, в которых происходят эти чередующиеся соединения и разложения нейтральной жидкости. Возбужденные таким образом силы становятся постоянными, как только это динамическое состояние электрических жидкостей в проводниках станет перманентным. Именно эти силы и производят все открытые мною явления притяжения и отталкивания между двумя проводами".[1]

Таким образом, Ампер, как и Эрстед, полагал, что движущееся равномерно электричество одного знака не способно действовать на магнитную стрелку, а действие это вытекает лишь „из взаимодействия" обоих электричеств друг с другом. Именно эта ошибочная и, в сущности, ни на чем не основанная концепция помешала, повидимому, Амперу совершить тот знаменательный шаг, который вскоре сделали сначала Гаусс, а затем, независимо от него, В. Вебер, сформулировав закон взаимодействия между движущимися заряженными частичками. В 1835 г. Гаусс выразил этот закон в следующем виде:

$$\frac{ee'}{r^2}\left\{1+\frac{1}{c^2}\left[u^2-\frac{3}{2}\left(\frac{dr}{dt}\right)^2\right]\right\}.$$

Однако эта работа Гаусса стала известной лишь более десятилетия спустя. В 1846 г. В. Вебер пришел независимым путем к тому же закону, который он выразил в следующем виде:

$$\frac{ee'}{r^2}\left\{1+\frac{1}{c^2}\left[r\left(\frac{d^2r}{dt^2}\right)-\frac{1}{2}\left(\frac{dr}{dt}\right)^2\right]\right\}.$$

Любопытно отметить, что в истории физики обычно не указывается, по какой причине Ампер не пошел далее представления об элементарных токах и ограничился лишь формулой зависимости

$$\frac{ii'dsds'}{r^2}\left(\cos\varepsilon-\frac{3}{2}\cos\vartheta\cos\vartheta'\right).$$

---

[1] См. в настоящем сборнике, стр. 194.

Между тем Вебер придерживался существенно иного представления о магнитных взаимодействиях, чем Ампер. Он начинает свою знаменитую работу „Электродинамические измерения“ следующими словами (курсив В. Вебера): „*Движение* электрических жидкостей в весомых телах порождает между *молекулами этих весомых тел* взаимодействия, служащие причиной всех гальванических и электродинамических явлений“.[1] Таким образом, прогресс электродинамики в период от выхода в свет основного труда Ампера (1826) до опубликования труда Вебера (1846) явился результатом не только сведе́ния электрических токов к движущимся заряженным частичкам, а коренного изменения в воззрениях на самую причину электродинамических явлений, ибо Ампер, впервые введший термин „электрический ток“, исходил из представления об „электрическом конфликте“, а Вебер — из представления о течении электричества, т. е. об „электрическом токе“.

Такова вкратце историческая картина развития электродинамики Ампера. Несмотря на свою неизбежную историческую ограниченность, „Теория электродинамических явлений“ Ампера представляет собою выдающийся вклад в теорию электричества и магнетизма в эпоху между появлением „Теории электричества и магнетизма“ Ф.-У.-Т. Эпинуса (1759) и опубликованием „Трактата об электричестве и магнетизме“ К. Максвелла (1869).

Проф. *Я. Г. Дорфман.*

---

[1] Elektrodynamische Maassbestimmungen, стр. 1.

КРАТКАЯ БИОГРАФИЯ А.-М. АМПЕРА

Андрэ-Мари Ампер родился 22 января 1775 г. в Лионе в семье образованного коммерсанта. Отец его вскоре переселился с семьей в имение, расположенное в окрестностях Лиона, и лично руководил воспитанием сына. Уже к 14 годам Ампер прочитал все 20 томов знаменитой „Энциклопедии" Дидро и д'Аламбера. Проявляя с детства большую склонность к математическим наукам, Ампер к 18 годам в совершенстве изучил основные труды Эйлера, Д. Бернулли и Лагранжа. К этому времени он хорошо владел латынью, греческим и итальянским языками. Иными словами, Ампер получил глубокое и энциклопедическое образование.

В 1793 г. в Лионе вспыхнул контрреволюционный мятеж. Отец Ампера — жирондист, исполнявший обязанности судьи при мятежниках, после подавления мятежа был казнен как сообщник аристократов. Имущество его было конфисковано. Юный Ампер начал свою трудовую деятельность с частных уроков. В 1801 г. он занял должность преподавателя физики и химии центральной школы в г. Бурге. Здесь он написал первый научный труд, посвященный теории вероятности „Опыт математической теории игры". Эта работа привлекла внимание д'Аламбера и Лапласа. И Ампер стал преподавать математику и астрономию в Лионском лицее. В 1805 г. Ампер был назначен репетитором по математике в знаменитой Политехнической школе в Париже и с 1809 г. заведовал кафедрой высшей математики и механики. В этот период Ампер публикует ряд математических трудов по теории рядов. В 1813 г. его избирают членом Института (т. е. Парижской Академии наук) на место скончавшегося Лагранжа. Вскоре после избрания Ампер доложил в Академии свое исследование о преломлении света. К этому же времени относится его знаменитое „Письмо к г. Бертолле“, в котором Ампер сформулировал открытый им независимо от Авогадро химический закон, именуемый ныне законом Авогадро—Ампера.

В 1816 г. Ампер опубликовал свою классификацию химических элементов, первую в истории химии серьезную попытку расположить химические элементы по их сходству между собой.

Открытие Эрстедом в 1820 г. действия электрического тока на магнитную стрелку привлекает внимание Ампера к явлениям электромагнетизма. Ампер ставит многочисленные опыты, изобретает для этой цели сложные приборы, которые изготовляет за свой счет, что сильно подрывает его материальное положение.

С 1820 по 1826 г. Ампер опубликовал ряд теоретических и экспериментальных трудов по электродинамике и почти еженедельно выступал с докладами в Академии наук. В 1822 г. он выпустил „Сборник наблюдений по электромагнетизму“, в 1823 г. — „Конспект теории электродинамических явлений“ и, наконец, в 1826 г. — знаменитую „Теорию электродинамических явлений, выведенную исключительно из опыта“. Ампер получает всемирную известность как выдающийся физик.

Гигантская работа Ампера над „Теорией“ протекала в очень трудных условиях. „Я принужден бодрствовать глубокой ночью... Будучи нагружен чтением двух курсов лекций, я тем не менее не хочу полностью забросить мои работы о вольтаических проводниках и магнитах. Я располагаю считанными минутами“, — сообщает он в одном из писем.[1] Лекции

[1] A.-M. Ampère et J.-J. Ampère. Correspondance et souvenirs, т. I. Paris, 1875, стр. 275.

Ампера по высшей математике пользовались широкой известностью и привлекали многочисленных слушателей. Одним из них был в 1822—1824 гг. прибывший из России молодой Михаил Васильевич Остроградский.

С 1827 г. Ампер почти не занимается вопросами электродинамики, исчерпав, повидимому, свои научные замыслы в этом направлении. Он возвращается к проблемам математики, и в последующие девять лет жизни публикует „Изложение принципов вариационного исчисления" и ряд других замечательных математических работ.

Но творчество Ампера никогда не ограничивалось математикой и физикой. Энциклопедическое образование и разносторонние интересы то и дело побуждали его заниматься самыми разнообразными отраслями наук. Так, например, он много занимался сравнительной зоологией и пришел к твердому убеждению об эволюции животных организмов. На этой почве Ампер вел ожесточенные споры с Кювье и его сторонниками. Когда однажды его противники спросили, действительно ли он считает, что „человек произошел от улитки", Ампер ответил: „После тщательного исследования я убедился в существовании закона, который внешне кажется странным, но который со временем будет признан. Я убедился в том, что человек возник по закону, общему для всех животных".[1]

Но наряду с научными проблемами Ампер уделял немало внимания богословию. В этом сказалось влияние клерикальной домашней среды. Уже с молодых лет Ампер попал в цепкие лапы иезуитов, не отпускавших его до конца жизни. Одно время он пытался преодолеть влияние, однако избавиться от этого окружения ему не удалось.

Ампер не мог пройти равнодушно мимо острых социальных вопросов своей эпохи. В своих письмах 1805 г. он проявляет резкое критическое отношение к Бонапарту. В пись-

[1] П. С. Кудрявцев. История физики, т. 1. Учпедгиз, 1948, стр. 392.

мах 1814 г. выражается глубокая скорбь и боль патриота Франции, оккупированной иностранными войсками. В письмах 20-х годов Ампер высказывает горячее сочувствие Греции, борющейся за независимость, и выражает возмущение политикой великих держав в греческом вопросе. В письмах Ампера вместе с тем содержатся самые нелепые рассуждения о догматах католической церкви и т. п. Эта двойственность и противоречивость воззрений Ампера резко сказываются во всех его трудах, где затрагиваются общественные и философские вопросы.

Заслуживает внимания большой труд Ампера „Опыт философии наук или аналитическое изложение естественной классификации всех человеческих знаний". Первый том этого труда вышел в 1834 г., второй том остался незаконченным и был издан после смерти Ампера, в 1843 г. Несмотря на ряд ошибочных и подчас нелепых высказываний, Ампер предстает перед нами в этом труде как человек, глубоко и искренне убежденный в беспредельном прогрессе человечества и глубоко болеющий за благо народов. Ампер рассматривает любую науку как систему объективных знаний о действительности. Вместе с тем он считает, что любая область знания призвана не только объяснять явления, происходящие в природе, человеческом обществе и сознании, но и воздействовать на них. Ампер наметил несколько новых, еще не существующих наук, которые должны быть созданы для удовлетворения различных людских запросов. Особое место он уделяет новой науке, названной им „ценольбогенией", науке о человеческом счастье. Эта наука призвана прежде всего выяснить обстоятельства и причины, оказывающие благоприятное или неблагоприятное воздействие на человеческое общество. „Почему там установилось рабство или состояние, мало отличающееся от него, а там — некоторая степень свободы, более соответствующая достоинству человека и его счастью. Наконец, каковы причины, приведшие к гигантскому обогащению нескольких семейств и к нищете большинства. Таковы вопросы, — говорит Ампер, — изучаемые наукой, которой я дал название «ценольбогении». Но эта наука не только осмысливает то, что наблюдено статистикой и объяснено «хрематологией»[1] и приведено в законы «сравнительной ценольбогенией»,[2] — она указывает, какими средствами можно постепенно улучшить социальное состояние и привести мало-помалу к исчезновению все те причины, которые удерживают нации в состоянии слабости и нищеты".[3]

Забота Ампера о благе народа также проявилась в его неутомимой деятельности по улучшению народного просвещения. Во время одной из своих поездок по инспектированию школ Ампер тяжело заболел и скончался 10 июля 1836 г. в Марселе.

Проф. *Я. Г. Дорфман.*

---

[1] Хрематология (по Амперу) — наука о народном богатстве.

[2] Сравнительная ценольбогения (по Амперу) — наука, обобщающая данные статистики и выводящая из этих данных законы.

[3] Essai sur la philosophie des sciences, т. II. 1843, стр. 134.

Г.-Хр. Эрстед

ОПЫТЫ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К ДЕЙСТВИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНФЛИКТА НА МАГНИТНУЮ СТРЕЛКУ

Первые опыты по вопросу, рассматриваемому в настоящем труде, связаны с лекциями об электричестве, гальванизме и магнетизме, читанными мною прошедшей зимой. Основной вывод из этих опытов состоит в том, что магнитная стрелка отклоняется от своего положения равновесия под действием вольтаического аппарата и что этот эффект проявляется, когда контур замкнут, и он не проявляется, когда контур разомкнут. Именно потому, что контур оставался разомкнутым, не увенчались успехом попытки такого же рода, сделанные несколько лет тому назад известными физиками. Так как мои первые опыты производились с недостаточно мощным аппаратом и явления не обнаруживались со всей той четкостью, которая была желательна ввиду их важности, то я попросил моего друга г. Эсмарха, советника королевского суда, присоединиться ко мне, чтобы повторить опыты посредством более значительного аппарата. Г. президент Влейгель, кавалер ордена Дании, любезно согласился ассистировать при этих экспериментах. Свидетелями были также известный ученый г. Гаух, профессор естественной истории г. Рейнгардт, весьма искусный экспериментатор г. Якобсен и, наконец, доктор философии Цейзе, профессор медицины и выдающийся химик.

Чаще всего я экспериментировал один, но всякий раз, когда мне удавалось наблюдать какое-нибудь замечательное явление, я повторял опыт в присутствии этих ученых.

В дальнейшем я совершенно не буду входить в подробности тех идей, которые руководили мною при моих исследованиях, так как это не может содействовать уяснению полученного результата. Я ограничусь только фактами, которые делают этот результат очевидным.

Наш гальванический аппарат состоял из двадцати прямоугольных медных ящиков, имевших в длину и в высоту около 12 дюймов, а в ширину $2^1/_2$ дюйма. Каждый ящик состоит из двух медных пластинок, одна из которых оканчивается отростком, поддерживающим цинковую пластинку в жидкости следующего ящика. Этой жидкостью служит вода, к которой прибавлены $^1/_{60}$ по весу серной кислоты и $^1/_{60}$ азотной кислоты. Опущенная в жидкость часть цинковой пластинки представляет собою квадрат со стороною около 10 дюймов. Можно, впрочем, пользоваться и менее мощными аппаратами: достаточно, чтобы они могли накалить докрасна металлическую проволоку.

Противоположные концы гальванического аппарата соединяют при помощи металлической проволоки, которую мы будем называть для краткости проволокой-проводником или соединительной проволокой. Действия, которые происходят в этом проводнике и в окружающем его пространстве, мы назовем *электрическим конфликтом*.

Предположим, что прямолинейный участок этой проволоки протянут над подвешенной обычным способом *магнитной стрелкой* параллельно направлению последней. Проволоку оставляют достаточно гибкой, чтобы этот участок можно было по желанию перемещать.

В данном случае стрелка изменит свое положение, и полюс, находящийся под той частью соединительной проволоки, которая ближе к отрицательному концу гальванического аппарата, отклонится к западу.

Если расстояние от проволоки до стрелки не превосходит $^3/_4$ дюйма, отклонение составляет около 45°. Если расстояние увеличивать, то угол пропорционально уменьшается. Впрочем, абсолютная величина отклонения изменяется в зависимости от мощности аппарата.

Перемещая соединительную проволоку к востоку или к западу, оставляя ее параллельной направлению стрелки, мы ничего не изменяем, кроме величины самого действия. Отсюда следует, что наблюдаемый эффект не может быть приписан притяжению, так как если бы отклонение стрелки зависело от притяжений или отталкиваний, то полюс, который приближается к проволоке, когда последняя находится к востоку, должен был бы приближаться к ней и тогда, когда эта проволока переходит к западу.

Проводник может быть образован из нескольких проволок или лент, соединенных в пучок. Природа металла безразлична, и если она имеет какое-либо значение, то, возможно, только в отношении величины производимого эффекта. Мы применяли с одинаковым успехом проволоки из платины, золота, серебра, латуни и железа, свинцовые и оловянные ленты и ртуть. Если в проводник включить водяной столб, то эффект не исчезает полностью, по крайней мере, если промежуток имеет всего лишь несколько дюймов в длину. Действие соединительной проволоки на магнитную стрелку передается сквозь стекло, металлы, дерево, воду, смолу, гончарные сосуды и камни. Пластинки из стекла, металла или дерева, проложенные в отдельности и все вместе между проводником и стрелкой, повидимому, не уменьшают заметным образом влияния последних друг на друга. То же самое относится к диску электрофора, к пластинке из порфира или к наполненной водою тарелке. Опыт нам показал, что тот же эффект получается, если стрелка помещена в латунный ящик, наполненный водой.

Вряд ли нужно указывать, что такая передача действий сквозь эти различные вещества не наблюдалась еще ни у обычного электричества, ни у электричества вольтаического. Таким образом, действия, которые проявляются при электрическом конфликте, весьма отличны от тех, которые могут произвести одно или другое из двух электричеств.

Если соединительная проволока расположена горизонтально под стрелкой, то эффект будет таким же, как и тогда, когда проволока расположена сверху, но действие будет направлено в обратную сторону. Иными словами, полюс стрелки, под которым находится та часть проволоки, которая ближе всего к отрицательному концу батареи, отклоняется в этом случае к востоку. Чтобы легче запомнить эти результаты, мы будем пользоваться следующей формулой: полюс, который видит отрицательное электричество входящим над собой, отклоняется к западу, а полюс, который видит его входящим под собой, отклоняется к востоку.

Если смещать соединительную проволоку в горизонтальной плоскости таким образом, чтобы она образовывала все больший и больший угол с магнитным меридианом, отклонение стрелки увеличивается, если проволока смещается в ту же сторону, в какую происходит это отклонение. Оно уменьшается, если смещение проволоки производится в обратную сторону.

В том случае, когда соединительная проволока расположена точно в горизонтальной плоскости, в которой может двигаться уравновешенная надлежащим образом стрелка, и когда проволока параллельна направлению стрелки, она не отклоняет ее ни к западу, ни к востоку, а лишь стремится сместить ее в плоскости наклонения. Полюс, более близкий к концу, через который входит отрицательное электричество, опускается, когда он имеет проволоку к западу от себя, и поднимается, когда проволока находится к востоку от него.

Когда соединительная проволока расположена перпендикулярно к меридиану выше или ниже стрелки, последняя сохраняет свое положение равновесия, если, однако, проволока не очень близка к одному из полюсов: он поднимается, когда вход происходит через западную часть проволоки, и опускается, когда вход происходит через восточную часть.

Если проволока помещена вертикально перед одним из полюсов стрелки и верхняя часть проволоки сообщается с отрицательным концом батареи, то полюс идет к востоку. Если проволока, оставаясь вертикальной, находится между полюсом и серединой стрелки, этот полюс обращается к западу. Если верхняя часть проволоки сообщается с положительным концом, действия имеют противоположное направление.

Если согнуть соединительную проволоку таким образом, чтобы образовались две параллельные ветви, то такая система в различных случаях отталкивает или притягивает и тот и другой полюс стрелки. Предположим, что эта система расположена против одного из полюсов, причем плоскость ветвей перпендикулярна к магнитному меридиану, восточная часть сообщается с отрицательным полюсом батареи, а западная — с положительным: более близкий полюс стрелки отталкивается к востоку или к западу, в зависимости от положения плоскости. Если изменить направление соединения с батареей, полюс, наоборот, притягивается. Если плоскость ветвей пересекает стрелку между полюсом и серединой, происходят такие же явления, но обратного направления.

Латунная стрелка, подвешенная так же, как магнитная стрелка, совершенно не приводится в движение под влиянием соединительной проволоки. То же самое относится к стрелке из стекла или из гуммилака.

Рассмотрим вкратце, на основании всех этих фактов, как можно представить себе это явление.

Электрический конфликт действует только на магнитные частицы вещества. Все немагнитные тела проницаемы для электрического конфликта. Однако магнитные тела или, лучше сказать, магнитные частицы этих тел сопротивляются прохождению этого конфликта, так что они оказываются увлеченными столкновением противоположных действий.

Согласно изложенным фактам, электрический конфликт, повидимому, не ограничен проводящей проволокой, но имеет довольно обширную сферу активности вокруг этой проволоки.

Кроме того, из сделанных наблюдений можно заключить, что этот конфликт образует вихрь вокруг проволоки. Иначе было бы непонятно, как один и тот же участок проволоки, будучи помещен под магнитным полюсом, относит его к востоку, а находясь над полюсом, увлекает его к западу.

Именно вихрям свойственно действовать в противоположных направлениях на двух концах одного диаметра.

Вращательное движение вокруг оси, сочетающееся с поступательным движением вдоль этой оси, обязательно дает винтовое движение. Однако, если я не заблуждаюсь, такое винтовое движение, повидимому, не является необходимым для объяснения какого-либо из явлений, наблюдавшихся до сих пор.

Все действия, которые наблюдаются по отношению к северному полюсу и были описаны нами выше, легко объясняются, если предположить, что отрицательная электрическая сила, или материя, описывает спираль слева направо и действует на северный полюс, не влияя на южный. Действия на южный полюс объясняются подобным же образом, если допустить, что положительная электрическая материя движется в противоположном направлении и обладает свойством действовать на южный полюс, не влияя на северный. Чтобы ясно представить себе этот закон и видеть, как он согласуется с фактами, повторение опытов лучше всяких объяснений. Весьма полезно, для лучшей ориентировки в опытах, как-нибудь отметить на самой проволоке направление электрических сил.

Я добавлю только еще одно слово: в работе, опубликованной семь лет тому назад,[1] я доказал, что теплота и свет являются результатом электрического конфликта.

Из наблюдений, которые я привел, можно заключить, что этот конфликт создает, кроме того, вихревые движения; я убежден, что в этих движениях будет найдено объяснение явлений, известных под названием *поляризация света.*[2]

Ганс-Христиан Эрстед

кавалер ордена Дании, профессор
физики Копенгагенского университета,
секретарь королевского Научного общества

Копенгаген, 21 июля 1820 г.

---

[1] Эрстед имеет в виду „Recherches sur l'identité des forces électriques et chimiques“, Paris, 1813. *Прим. ред.*

[2] Объяснение поляризации света было впервые дано А. Френелем (1788—1827) в 1821 г. в работе „Considération mechanique sur la polarisation de la lumière“ (Механическое соображение о поляризации света) на основе гипотезы, высказанной Т. Юнгом (1773—1829) в 1817 г., о поперечности световых колебаний. *Прим. ред.*

Ф. Араго

ОПЫТЫ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К НАМАГНИЧИВАНИЮ ЖЕЛЕЗА И СТАЛИ ДЕЙСТВИЕМ ВОЛЬТАИЧЕСКОГО ТОКА [1]

Блестящее открытие, сделанное недавно г. Эрстедом, состоит, как известно, в действии, оказываемом вольтаическим током на предварительно намагниченную стальную стрелку. Повторяя опыты датского физика, я обнаружил, что тот же ток развивает в большой степени магнитную силу в таких пластинках железа и стали, которые первоначально были ее совершенно лишены.

Я сообщу об опытах, устанавливающих это, придерживаясь почти в точности того же порядка, в котором опыты производились.

Приделав достаточно тонкую медную цилиндрическую проволоку к одному из концов вольтаической батареи, я заметил, что в то мгновенье, когда эта проволока соединялась с противоположным полюсом, она притягивала опилки мягкого железа, как это сделал бы настоящий магнит.

Когда проволока была погружена в опилки, они приставали к ней со всех сторон, так что она благодаря этому достигала толщины, почти равной обычному диаметру трубки пера.

---

[1] Опубликовано впервые в „Annales de chimie et de physique“, [2], т. XV, стр. 93—102. *Прим. ред.*

Как только связь соединительной проволоки с обоими полюсами батареи прекращалась, опилки отделялись от нее и падали.

Эти результаты не могли зависеть от первоначальной намагниченности опилок, так как проволока из мягкого железа или из стали не притягивала ни одной частички из этих опилок.

Точно так же они остаются необъясненными, если их приписать обыкновенным электрическим действиям, так как при повторении того же опыта с медными, латунными или древесными опилками ни в одном случае нельзя было заметить их притяжения к соединительной проволоке.

Это притяжение, оказываемое соединительной проволокой на железные опилки, очень быстро уменьшается по мере ослабления действия батареи. Может быть, в весе опилок, поднятых проволокой определенной длины, когда-нибудь будет найдено мерило энергии этого прибора в различные периоды одного и того же опыта.

Действие соединительной проволоки на железо проявляется на расстоянии: действительно, легко видеть, что опилки поднимаются значительно раньше, чем их касается проволока.

Я до сих пор говорил только о латунной соединительной проволоке, но проволоки из серебра, платины и т. д. дают аналогичные результаты. Остается, во всяком случае, исследовать, действуют ли проволоки из разных металлов, при одинаковой форме, массе или диаметре в точности с одной и той же интенсивностью.

Соединительная проволока сообщает мягкому железу только временную намагниченность. Если употреблять маленькие частички стали, то им иногда сообщается постоянная намагниченность. Мне даже удалось вполне намагнитить таким образом швейную иголку.

Г. Ампер, которому я показал эти опыты, сделал незадолго до того важное открытие, что две прямолинейные и параллельные проволоки, через которые проходят два электрических тока, притягиваются, когда токи идут в одинаковом направлении, и отталкиваются, когда токи направлены противоположно. Кроме того, он отсюда заключил по аналогии, что притягивающие и отталкивающие свойства магнитов зависят от электрических токов, циркулирующих вокруг молекул железа и стали в направлении, перпендикулярном к линии, соединяющей оба полюса. Г. Ампер предположил еще, что на верхней части горизонтальной, обращенной к северу магнитной стрелки ток движется с запада на восток. Эти теоретические воззрения тотчас же подсказали ему мысль, что более сильная намагниченность получится, если вместо прямой соединительной проволоки, какой пользовался я, взять проволоку, согнутую по винтовой линии, в центре которой была бы помещена стальная стрелка. Он надеялся, кроме того, что расположение полюсов будет благодаря этому постоянным, что не наблюдалось при моем способе. Эти предположения мы, г. Ампер и я, следующим образом подвергли проверке на опыте.

Свернутая в виде винта медная проволока заканчивалась двумя прямолинейными участками, которые по желанию могли быть прилажены к противоположным концам сильной горизонтальной вольтаической батареи. Завернутая в бумагу стальная стрелка была введена внутрь винта, но только после того, как было установлено сообщение между обоими полюсами, дабы ожидаемый результат не мог быть приписан электрическому разряду, который появляется в тот самый момент, когда происходит примыкание соединительной проволоки к обоим полюсам. Во время опыта участок этой проволоки, внутри которого находилась стальная стрелка, оставался постоянно расположенным перпендикулярно к магнитному меридиану, так что не приходилось опасаться действия земного шара.

И вот, после нескольких минут пребывания внутри винта, стальная стрелка получила достаточно сильную дозу магнетизма. Положение северного и южного полюсов вполне соответствовало при этом результату, который заранее был выведен г. Ампером из направления элементов винта и из гипотезы, что электрический ток проходит по соединительной проволоке, идя от конца *цинк* батареи к концу *медь*.

Эти опыты свидетельствуют, как видно, что положение полюсов у стальной проволоки, намагниченной проходящим вдоль нее гальваническим током, не определяется одним только направлением тока и что незначительные, почти неощутимые обстоятельства, как, например, слабые зачатки намагниченности, легкая неправильность в форме или в строении проволоки, могут совершенно изменить получающиеся результаты. Между тем, если гальванический ток циркулирует вокруг стали, вдоль витков винта, то всегда можно заранее предвидеть, где будут находиться северный и где южный полюсы.

Думая все же о странных несоответствиях в опытах с намагничиванием посредством электрических разрядов, которые обнаруживались у физиков, занимавшихся этим исследованием, я считал, что нужно подвергнуть более решающим испытаниям явления токов в винте.

Читатель сможет судить, достигли ли мы этой цели.

Я задумал сперва сделать из медной проволоки два симметричных винта,[1] около 5 см длиной каждый, разделенных

[1] Эти симметричные винты подобны тем, которые ботаники обозначают словами dextrorsum для одного и sinistrorsum для другого.* Их диаметры равны, витки имеют одинаковый наклон, но они никак не могут быть наложены друг на друга, как их ни прикладывать один к другому: так что никаким поворачиванием нельзя изменить их вид. Винт (навернутый) dextrorsum встречается в природе у большого числа ползучих растений, также и в технике применяется почти исключительно винт этого рода. Стальной цилиндр, помещенный внутри винта dextrorsum, получает южный полюс (обращающийся к северу) с отрицательной стороны проводящей проволоки, т. е. со стороны меди. Между тем тот же полюс образуется с положительной стороны, или со стороны цинка, если пользоваться винтом sinistrorsum. Эти результаты согласуются с теорией г. Ампера.

* Dextrorsum — вправо вращающееся; sinistrorsum — влево вращающееся. *Прим. ред.*

прямолинейным участком той же проволоки. Обороты витков первого винта были направлены в одну сторону, а второго — в другую, но с таким же наклоном; диаметры были равны. Стальная проволока, заключенная в маленькую стеклянную трубочку, была вложена в первый винт. Затем я поместил в соседний винт точно такую же проволоку, также защищенную стеклянной оболочкой от всякого электрического разряда. Небольшой кусок медной проволоки устанавливал постоянное сообщение между этим последним винтом и положительным полюсом батареи. Поэтому, чтобы начать опыт, достаточно было прикрепить к отрицательному полюсу проволоку, которой оканчивался другой винт, и в тот момент, когда такое присоединение происходило, электричество, скопившееся на положительном полюсе прибора, вытекало через прямолинейную часть соединительной проволоки, достигало первого винта, проходило последовательно по всем его виткам, приходило ко второму винту через прямую проволоку, которая отделяла этот винт от предыдущего, проходило по его виткам и направлялось к отрицательному полюсу. Обе стальные проволоки оказываются, таким образом, подверженными во время опыта действию гальванического тока одной и той же силы. Этот ток в целом двигался в одном направлении, но если вокруг первой проволоки он циркулировал слева направо, то вокруг второй проволоки то же движение совершалось справа налево. И во всех опытах такого рода, которые мы производили у г. Ампера при помощи имеющейся у него достаточно сильной батареи, было достаточно этого простого изменения в направлении тока, циркулировавшего вокруг стальных проволок, чтобы вызвать полное обращение полюсов. Таким образом, две проволоки, заключенные в двух симметричных винтах, одновременно были намагничены в противоположных направлениях.

В другом опыте я сгибал медную проволоку по винтовой линии справа налево на длине в 5 см, затем слева направо по такой же длине и, наконец, еще раз справа налево. Эти три винта были разделены прямолинейными участками той же проволоки.

Одна и та же стальная проволока, достаточно длинная, диаметром более 1 мм, заключенная в стальную трубку, была помещена во все три винта сразу. Гальванический ток, проходя по виткам этих различных винтов, намагничивал каждый из соответствующих участков стальной проволоки, как если бы он был отделен от остальных. В самом деле, я нашел, что на одном из концов находился северный полюс, на расстоянии 5 см от него — южный полюс, дальше — второй южный полюс, за которым следовал северный, и, наконец, — третий северный полюс, а в 5 см от него, на другом конце стрелки — южный полюс. Таким образом, этот метод позволил бы произвольно увеличивать число таких промежуточных полюсов, которые были названы физиками последовательными точками.

Я должен, однако, отметить, что в этих опытах винты вообще оказывают влияние не только на те участки стальной проволоки, которые они охватывают, но также и на соседние участки. Так, например, если интервалы между последовательными винтами малы, то соответствующие им участки стальной проволоки сами будут намагничены, как если бы вращательное движение, сообщенное, по представлению г. Ампера, магнитной жидкости под влиянием винта, продолжалось за пределами последних витков.

Когда изложенное выше было уже в печати, я пытался открыть, от каких обстоятельств зависит изменение положения полюсов, когда гальванический ток проходит по стальным проволокам в продольном направлении, и я неизменно находил, даже пользуясь очень активной батареей, что стальная проволока, помещенная на соединительной проволоке, если последняя совершенно прямая, не получает никакого магнетизма. Правда, швейная иголка, которой я пользовался при моих первых опытах, получила полюсы, но тогда действие формы соединительной проволоки не было известно, и я, чтобы легче было удержать иголку, слегка обернул проволокой ее концы.

Из сказанного видно, что в предыдущих опытах я постоянно стремился к тому, чтобы никакой разряд не переходил с соединительной проволоки на стальной стерженек, с которым я манипулировал.

Следовательно, нужно установить существенное различие между таким способом намагничивания и способом, который был предметом исследований Вильке, Франклина, Далибара, Беккариа, Фан-Свиндена и Фан-Марума, так как при этом втором способе намагничивание производится прохождением сильной электрической искры через стальной стержень. Во всяком случае, представляло интерес исследовать, не будет ли искра, даваемая батареей, вести себя так же, как искра, выскакивающая из обычной машины. Я узнал от г. Буажиро, репетитора физики в Военной школе в Сен-Сире, что он с успехом произвел этот опыт. Он подозревает, что при таком способе магнитная сила становится слегка заметной только в том случае, если участки, служащие для соединения иголки с полюсами медь и цинк, сами также стальные и образуют как бы две обкладки этой иголки. Г. Буажиро обещает произвести по этому вопросу новые опыты, о которых мы поспешим сообщить читателям.

Медная соединительная проволока обладает, как мы видели, весьма интенсивной магнитной силой, поскольку она соединена с обоими полюсами батареи. Иногда мне удавалось находить у нее следы этого свойства еще спустя несколько мгновений после того, как сообщение между обоими полюсами было полностью прервано. Но это явление было крайне мимолетным, и я не мог воспроизводить его по произволу. Г. Бауживо оказался не более счастливым, чем я, хотя в одном случае платиновая проволока, которой он пользовался, после того как она была совершенно изолирована от батареи, сохранила достаточную силу, чтобы поддержать маленькую швейную иголку.

Опыты г. Эрстеда могут, как мне кажется, быть повторены в условиях, которые еще более увеличили бы внушаемый ими интерес, позволив сделать дальнейший шаг к объяснению столь не постижимого до сих пор явления, как северное сияние.[1]

В Королевском институте в Лондоне имеется вольтаическая батарея, состоящая из 2000 двойных пластинок по 4 дюйма в квадрате. Пользуясь этим мощным аппаратом, сэр Гемфри Дэви обнаружил, что между двумя угольными остриями, приделанными к концам положительного и отрицательного проводников, происходит электрический разряд даже тогда, когда эти острия еще отстоят друг от друга на $^1/_{30}$ или $^1/_{40}$ дюйма. Первым результатом разряда является накаливание углей докрасна. Но как только накаливание установилось, острия могут быть постепенно удалены до 4 дюймов без того, чтобы промежуточный свет разрывался. Этот свет чрезвычайно яркий, и он больше посередине, чем у концов: он имеет форму дуги.[2]

---

[1] Первую теорию электрического происхождения северных сияний предложил М. В. Ломоносов в своем „Слове о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих“ (1753). Некоторую смутную догадку об электрической природе северных сияний высказал независимо и одновременно также В. Франклин. Араго, видимо, исходит из ломоносовского представления о северном сиянии как об эффекте электрического разряда в верхних слоях атмосферы и связывает магнитные бури, сопровождающие северные сияния, с эффектом, наблюденным Эрстедом. Примерно ту же мысль высказал Г. Дэви, производивший в то время аналогичные опыты (Collected works of Sir Davy, т. VI, стр. 217—229). *Прим. ред.*

[2] Дуговой разряд был, как известно, впервые наблюден В. В. Петровым в 1802 г. в опытах с вольтовой батареей, состоявшей из 4200 медных и цинковых кружков. *Прим. ред.*

Опыт удается тем лучше, чем более разрежен воздух. При давлении в $^1/_4$ дюйма разряд с одного угольного острия на другое начинался на расстоянии $^1/_2$ дюйма. Затем, удаляя постепенно угли, сэр Гэмфри Дэви получил непрерывное пурпурное пламя, имевшее до 7 дюймов в длину.

Конечно, вполне естественно предположить, что такой электрический ток будет действовать на магнитную стрелку все равно, как если бы он двигался вдоль металлической соединительной проволоки.[1] Тем не менее, мне кажется, опыт заслуживает того, чтобы его рекомендовали физикам, имеющим в своем распоряжении вольтаические батареи большой силы, в особенности потому, что это может породить новые воззрения относительно северных сияний. Впрочем, независимо от какого бы то ни было непосредственного применения, разве не достойно быть отмеченным такое явление, как создание в пустоте или в сильно разреженном воздухе пламени, которое, действуя на магнитную стрелку, в свою очередь притягивалось бы или отталкивалось полюсами магнита?

---

[1] Опыт, предлагаемый Араго, описан в 1883 г. Г. Герцем в исследовании „Versuche über die Glimmentladung". (Wiedemanns Annalen, т. 19, 1883). (Опыты по тлеющему разряду). Но опыт привел к отрицательному результату, так как Герц не учел обратного тока, текущего по стенкам эвакуированной трубки. В 1913 г. А. Ф. Иоффе удалось впервые с полной определенностью обнаружить воздействие поля катодных лучей на магнитную стрелку и доказать эквивалентность потока электронов электрическому току в металлах. (А. Ф. Иоффе. Элементарный фотоэлектрический эффект. Магнитное поле катодных лучей. СПб., 1913). *Прим. ред.*

А. де-ля-Рив (сын)

О ВОЗДЕЙСТВИИ ЗЕМНОГО ШАРА НА ПОДВИЖНОЙ УЧАСТОК ВОЛЬТАИЧЕСКОГО КОНТУРА[1]

Среди многочисленных интересных исследований г. Ампера в новой области физики, начало которой положило открытие Эрстеда, безусловно одно из самых примечательных — обнаруженное этим сведущим ученым воздействие земного шара на подвижную часть электрического тока.

После того как целый ряд теоретических умозаключений привел Ампера к признанию наличия такого воздействия, он проделал на сей предмет два главных опыта. В первом опыте было обнаружено, что изогнутый в виде прямоугольника или круга металлический проводник, находящийся в замкнутой цепи, стремится избрать постоянное направление. Направление его таково, что плоскость прямоугольника или круга, в случае если он может вращаться вокруг вертикали, проходящей через точку его подвеса и центр тяжести, всегда располагается так, чтобы стать перпендикулярно магнитному меридиану и чтобы ток в нижней части контура шел с востока на запад.

---

[1] А. де-ля-Рив (сын) (1801—1873) — крупный швейцарский физик. Настоящая его статья была им доложена в Женевском обществе физики и естественной истории 4 сентября 1822 г. Опубликована в „Annales de chimie et de physique“, т. XXI, стр. 24—48, и в „Recueil d'observations électro-dynamiques“. Данный текст, слегка отредактированный Ампером (см. предисловие Ампера в настоящем сборнике, стр. 325), заимствован из „Recueil“. *Прим. ред.*

Автор данного эксперимента сопоставил его с другим опытом, где тот же прямоугольник приводится находящимися под ним токами в такое положение, что ток нижней его части становится параллельным токам цепи. Из этого автор заключает, что в земном шаре существуют подобные же токи, направленные с востока на запад параллельно магнитному экватору.[1]

Второй опыт Ампера в его последней статье[2] показывает другой вид все того же воздействия земного шара на подвижной участок вольтаического тока. Металлический провод, изогнутый в форме подковы, подвешен за острие, укрепленное посредине его горизонтальной части. Прибор расположен так, что ток, идущий от острия подвеса, расходится по двум горизонтальным ветвям, расположенным по обеим сторонам этого острия, и, таким образом, не меняя направления, снова нисходит через обе вертикальные ветви. В этом случае плоскость подковы получает постоянное вращательное движение, прекращающееся, если разомкнуть цепь, и направление которого меняется, если изменить направление тока. Г. Ампер в указанном выше труде, приписывая это влияние исключительно обеим вертикальным ветвям прибора, объясняет его также, исходя из предположения наличия электрического тока, направленного по земному шару с востока на запад.

Прежде чем рассмотреть некоторые опыты, проделанные мною на этот предмет, я кратко опишу прибор, которым пользовался.

---

[1] См. первую статью Ампера и § 18, стр. 22 в „Exposé de nouvelles découvertes sur le magnétisme et l'électricité“ гг. Ампера и Бабинэ.*

* Брошюра „Обзор новых открытий в области магнетизма и электричества“, написанная в основном Бабинэ, содержит ряд неточностей, отмечавшихся еще самим Ампером. Она опубликована в 1822 г. в качестве дополнения к пятому изданию французского перевода „Системы химии“ Томсона.

[2] См. „Bibliothéque universelle, Sciences et Arts“, июль, 1822; „Annales de chimie et de physique“, т. XX, стр. 64. Об этом опыте сообщалось уже в „Annales de chimie et de physique“, т. XVIII, стр. 333.

Он состоит из двух деревянных дисков — одного ABCD (рис. 1) в 0.406 м и другого *abcd* в 0.364 м диаметром. По краям их выдолблено по желобку в 0.013 м глубины,

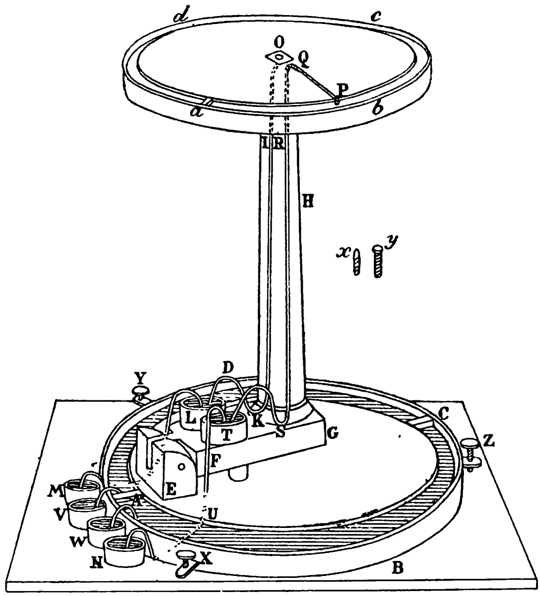


Рис. 1.

причем 0.040 м ширины для первого и 0.027 м ширины для второго. Каждая из этих круглых канавок, предназначенных для ртути,[1] разделена на два равных отделения двумя перемычками A, C и *a*, *c*, которые могут, по желанию, прилаживаться или сниматься. Для большего удобства эти перемычки

[1] Можно пользоваться вместо деревянных дисков тарелками из обожженной глины тех же размеров и заканчивающихся такими же канавками. Это дает то преимущество, что поверх ртути можно нанести слой подкисленной воды, который облегчает движение металлических шпеньков, погруженных в ртуть. Это дает возможность пользоваться несколько менее мощной вольтовой батареей, чем в случае деревянных дисков, требующих тока большой интенсивности.

могут быть ниже боковых стенок канавок, чтобы ртуть из обоих отделений, если налить ее в достаточном количестве, могла слиться и образовать одну сплошную канавку. Меньший диск поддерживается над бóльшим на высоте в 0.487 м посредством прочной стойки EFGH, которая может сдвигаться назад по FG, чтобы освободить место для вертикали, соединяющей центры обоих дисков. Кроме того, необходимо чтобы все четыре перемычки A, C, *a*, *c*, которые попарно помещаются на одном диаметре, находились на вертикальной плоскости, проходящей через горизонтальную часть FG подставки. В центре O верхнего диска находится гайка, врезанная в поверхность на 7 или 8 мм глубины, к которой можно попеременно привинчивать либо острие *x*, покрыв его колпачком, либо подпятник *y*, поместив в нем острие. Эта гайка прилажена к концу проводника OTKLM, проходящего вдоль стойки и погруженного в точке M в чашечку с ртутью. Проводник размыкается в точке L, чтобы можно было наклонять на шарнире F верхний диск при заполнении ртутью верхней канавки *abcd*. Разрыв этот восполняется чашечкой с ртутью, металлически соединяющей оба конца разомкнутого проводника. Другой проводник, выходящий в точке P из верхней канавки *abc*, спускается в точке Q вдоль стойки *b* RSTU параллельно первому и погружается в чашечку с ртутью в точке N. Как и первый проводник, он имеет в точке T разрыв, который восполняется тем же способом. Каждое из отделений нижней канавки имеет по небольшой платиновой пластинке, погруженной в чашечку, наполненную ртутью, и загнутой в точках V и W. Через них можно непосредственно присоединять батарею ко ртути в обеих канавках, не погружая в нее реофоров, которые ее взбалтывают и грязнят. Три винта X, Y, Z, поддерживающие нижний диск, служат для установления уровня прибора, который во время опытов постоянно должен располагаться таким образом, чтобы вертикальная плоскость, проходящая через все четыре перемычки, никогда не совпадала с магнитным меридианом или экватором, дабы избежать препятствий по главным направлениям с юга на север и с востока на запад.

Несколько времени тому назад отец мой[1] сделал наблюдение:[2] если от прямоугольного амперовского контура, который, находясь в вольтаической цепи, неизменно ориентируется, изъять нижнюю его часть, то при прочих равных условиях это изъятие не изменит результатов опыта и прямоугольник, лишенный одной стороны, будет ориентироваться точно так же, как и целый.

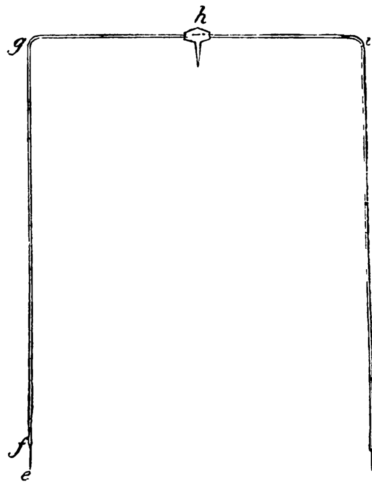


Рис. 2.

Латунная проволока *fghik* (рис. 2), сложенная подковой, подвешена на подпятник *y*, укрепленный в точке О (рис. 1) при помощи шпенька *h* (рис. 2), помещенного посреди горизонтальной части провода *gi*. Обе ее вертикальные ветви, оканчивающиеся каждая платиновой проволочкой *fe* и *kl*, слегка погружены в ртуть каждого из двух отделений нижнего диска ABCD.[3] Как только этот прибор включается в вольтаическую цепь погружением в ртуть, находящуюся в чашечках V и W, обоих электрических проводов, соединенных с полюсами батареи и названных Ампером реофорами (токоносителями), — как сразу латунный провод *fghik* занимает такое положение, что его плоскость становится перпендикулярной магнитному меридиану. Ток его при этом направлен на запад в его горизонтальной (и в данном случае

[1] Ж. де-ля-Рив (отец) (1773—1834) — швейцарский физик. *Прим. ред.*

[2] См. письмо профессора де-ля-Рива к Араго (Annales de chimie et de physique, т. XX, стр. 269 и сл.).

[3] Для этого опыта верхний диск не нужен.

единственной) верхней части. Таким образом, он называется восходящим в вертикальной ветви, находящейся на восточной стороне, и нисходящим в ветви на западной стороне.

Если изменить направление тока цепи на обратное, то прибор меняет положение и начинает безразлично поворачиваться в ту или другую сторону. Затем, описав дугу в 180°, он занимает прежнее положение. При этом, однако, обе перемычки A и C мешают ему закончить окружность, и он останавливается перед этим препятствием. Переменив направление тока, можно возвратить прибор в исходное положение.

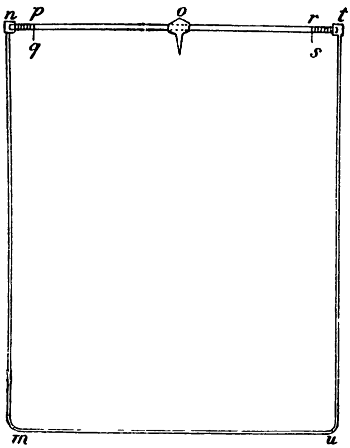


Рис. 3.

Токи, которые во время опыта возникают в ртути, не влияют на исследуемое явление, и этот металл служит только проводником, в чем легко убедиться, погружая реофоры батареи в ртуть в любой точке обеих канавок ABC и ADC. При этом никаких изменений в результатах опыта не происходит. То же замечание относится и ко всем последующим опытам, где ртуть применялась в качестве проводника.

Факт, который я сейчас изложил, давал основание предположить, что наличие всех частей прямоугольного контура не обязательно для того, чтобы он ориентировался, и что в нем имеются, следовательно, части, которые, будучи необходимыми, производят это обнаруженное явление в то время, как другие в нем не участвуют.

Чтобы распознать те и другие, я последовательно продолжал отнимать у прямоугольника все его части.

После изъятия нижней части, я исключил верхнюю. Довольно тонкая стеклянная трубка *nt* (рис. 3) оканчивается двумя вертикальными проводниками *nm* и *tu*, соединенными ниже посредством горизонтального проводника. Этот прямоугольник покоится на подпятнике *y*, укрепленном в точке O (рис. 1) шпеньком *o*, который помещается по середине стеклянной трубки. Каждый из верхних концов вертикальных проводников соединен с платиновыми проволочками *npq* и *trs*, которые, будучи согнуты на несколько миллиметров, погружены в ртуть обеих соответствующих им частей *abc* и *adc* верхнего канала.[1] Если поместить оба реофора в канавки, то прибор, включенный таким образом в цепь, займет то же положение, что и предшествующий, т. е. его плоскость станет перпендикулярной магнитному меридиану. Теперь, однако, ток направлен по горизонтальной, в данном случае нижней, части с востока на запад, следовательно, как и в двух других опытах — снизу вверх по восточному вертикальному проводнику и сверху вниз по западному.

Необходимо следить, чтобы платиновые горизонтальные части *np* и *rt* и вертикальные *pq* и *rs*, замыкающие поверху цепь, для большей убедительности опыта были очень малы. Изменяя их величину от 0.027 до 0.007 м, я убедился по неизменной успешности опыта, что во всяком случае их действие ничтожно.

Сравнивая между собой все три опыта, в которых определялись направления, получаемые под влиянием земли подвижным участком в вольтаическом контуре, первый с целым прямоугольником и два других, где попеременно изъяты нижняя и верхняя часть, мы замечаем, что явление остается неизменным. При этом направление тока в горизонтальной части меняется, однако оно остается неизменным в вертикальных ветвях.

Нельзя ли из этого заключить, что горизонтальные токи

---

[1] Из этого опыта видна необходимость в подвижной подставке GF (рис. 1), чтобы горизонтальная часть *mu* подвижного контура (рис. 3) не мешала движению этого прямоугольника.

не оказывают никакого действия на данное явление и что оно обязано своим происхождением лишь вертикальным.

Чтобы убедиться в правильности этого предположения, достаточно изъять из прямоугольника сразу обе части — верхнюю и нижнюю. Первую следует заменить стеклянной трубкой *nt* (рис. 4), посреди которой закреплен шпенек *o*, и закончить оба вертикальных проводника двумя платиновыми остриями *m* и *u*, погруженными каждое в соответствующее ему отделение нижней канавки. Если тщательно замкнуть проводником оба отделения верхней канавки и поместить реофоры батареи в чашечки V и W (рис. 1), то мы увидим, что прибор, включенный в вольтаическую цепь, получит то же направление, что и подобные ему приборы в предыдущих опытах.

Короче говоря, плоскость двух вертикальных проводников, могущих вращаться вокруг общей оси, располагается перпендикулярно магнитному меридиану в том случае, если в каждом из них идет ток противоположного направления. Кроме того, эта плоскость занимает такое положение, что ток восходит в западном проводнике и нисходит в восточном. Если направление тока цепи изменить на обратное, то прибор трогается с места и, безразлично поворачиваясь, как и в других опытах, то в одну, то в другую сторону, прислоняется к перемычкам, которые мешают ему описать 180°, чтобы возвратиться в устойчивое положение.

Нельзя ли заключить, рассматривая этот последний опыт и отвлекаясь от всех остальных, что в подобном приборе и один единственный проводник должен располагаться на востоке, если ток его восходящий, и на западе, если он нисходящий? Чтобы проверить эту мысль, можно поместить один реофор в верхний канал *abc*, а другой — в соответствующий нижний канал ABC. При таком расположении только один из двух вертикальных проводов включен в цепь, и в предыдущих опытах сам провод при этом перемещается на восток, если ток его нисходящий, и на запад, если ток восходящий.

Чтобы как следует проделать этот опыт, который очень важен, так как показывает влияние земного шара на единственный прямолинейный вертикальный проводник, — можно воспользоваться тем же прибором (рис. 5), что и в предыдущем опыте, если не считать, что одна из вертикальных ветвей заменена противовесом, уравновешивающим остав-

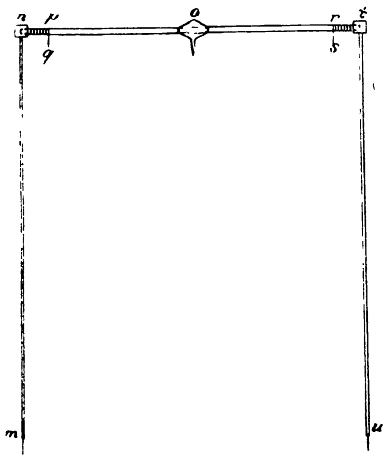


Рис. 4.

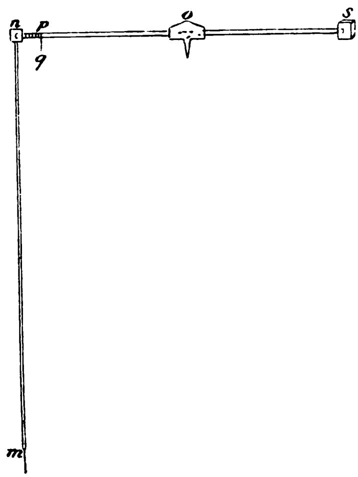


Рис. 5.

шуюся ветвь. Теперь, если оба нижних отделения соединить в одну канавку и то же самое сделать с верхними, то вертикальная ветвь сможет описать полную окружность.

Действительно, как только мы подключим прибор в цепь, — что можно сделать, поместив электрические провода батареи в чашечки V или W и чашечку N (рис. 1), — ветвь начинает перемещаться в такое положение, чтобы плоскость, проходящая через нее и вертикальную ось, вокруг которой она вращается, стала перпендикулярна магнитному меридиану. Так, ветвь останавливается на восточной стороне, если ток ее нисходящий, и на западной, если он восходящий. Если ветвь заняла одно из этих двух положений, то при перемене полюсов она поворачивается на 180°, безразлично в каком направлении, с тем чтобы опять занять устойчивое положение, где и остается, сделав несколько колебательных движений.

Этот последний факт является наиболее простым из всех, до сих пор мною рассмотренных, так как здесь действие земного шара распространяется всего лишь на один прямоугольный проводник. В то же время оно наиболее общее, так как, приняв его, мы можем объяснить все то, что относится к ориентации подвижных проводников под действием земли.

Что можно заключить, исходя из этого последнего факта, о том случае, когда ток идет по обеим ветвям прибора в одном и том же направлении (рис. 4)? Так как обе части тока одновременно будут стремиться на восток или на запад, то в результате прибор, не получив никакого движения, останется в безразличном равновесии. Это можно проверить, поместив шпенек *o* прибора (рис. 4) на подпятник *y*, укрепленный в O (рис. 1), и опустив один из реофоров в чашечку W, а другой — в ртуть верхней канавки *adc*, соединив между собой проводниками чашечки V и N. При таком расположении ток имеет восходящее или нисходящее направление в обеих ветвях одновременно и прибор неподвижен и безразличен к любому положению.

Последний опыт находится в кажущемся противоречии с опытом Ампера, согласно которому этот ученый делает вывод, что вертикальный ток или два вертикальных тока, соединенных между собой и направленных в одну сторону, получают непрерывное вращательное движение вокруг своей оси. Легко повторить этот опыт, поместив острие *h* прибора *fghik* (рис. 2) на подпятник, прикрепленный в O (рис. 1), в который помещают ртутный шарик, и соединить в одну канавку оба отделения ABC и ADC с погруженными в них платиновыми концами *fe* и *kl* двух вертикальных ветвей. Если поместить положительный реофор в чашечку M, а отрицательный реофор в чашечку V или W, то ток, поднявшись, дойдет до подпятника, помещенного в точке O, и, разделившись там на две горизонтальные ветви hg и hi (рис. 2), по которым он таким образом пойдет в противоположных направлениях, наконец, спустится в одном направлении по обеим вертикалям. Плоскость подковы получает тотчас же непрерывное вращательное движение, направление которого можно изменять, меняя направление тока.

Существенная разница между этим и предыдущим опытами состоит в том, что в последнем, кроме двух вертикальных, направленных в одну сторону, токов, имеется два горизонтальных, выходящих из центра и направленных в противоположные стороны. Очевидно, что именно им и нужно приписать вращательное движение, так как если ограничиться только вертикальными, то никакого движения нет.

Чтобы убедиться в этом, возникла необходимость изучить природу влияния земного шара на горизонтальный ток.

На примере такого тока Ампер заметил впервые в 1820 г.[1] влияние земного шара, увидев на своем приборе, предназначенном для демонстрации притяжения и отталкивания двух параллельных токов, что подвижной горизонтальный провод, включенный в вольтаическую цепь и находившийся в единственном числе, начал передвигаться параллельно самому себе то в одном, то в другом направлении, в зависимости от направления тока по всем азимутам. Г. Фарадей в своей недавно опубликованной статье,[2] присоединяя новые факты к тем, которыми наука уже ему обязана, упоминает тот же опыт. Подвесив на очень длинной шелковой нити горизонтальный металлический проводник, легко согнутые концы которого погружены были в сосудики с ртутью, он увидел, как этот проводник, после включения его в вольтаическую цепь, двигался так, словно его притягивали параллельные и равные по всей его длине силы. Это явление

---

[1] Annales de chimie et de physique, т. XV, стр. 183.

[2] Статья эта не была переведена,* она находится в „Quarterly journal of sciences and arts“, т. XII, стр. 416, ст. V.

* На французском языке. *Прим. ред.*

происходило независимо от направления, которое придавалось горизонтальному проводнику — с запада на восток или с севера на юг, или в любом промежуточном положении. Но тот же проводник начинал двигаться в обратном направлении, если направление тока менялось. Отсюда следует, что горизонтальный проводник, могущий вращаться лишь около своей точки подвеса, укрепленной в его середине, не получит никакого движения, так как эта точка противостоит параллельным силам, действующим на ток по всей длине в одном и том же направлении. Опыт, действительно, это и подтверждает.

Но если поместить неподвижную точку не по середине проводника, а у одного из ее концов, то проводник, притягиваемый параллельными силами, начнет вращаться около этой точки. А так как эти силы заново возникают при каждом новом положении проводника, то он получит непрерывное вращательное движение. В действительности так это и происходит, в чем можно убедиться, поместив скобу *o* горизонтального проводника *np* (рис. 6) на шпенек *x* (рис. 1), привинченный к гайке O на место подпятника *y*. Своими платиновыми концами *nm* и *pq* (рис. 6) проводник погружен в каждое из двух отделений верхней канавки (рис. 1). Если пустить ток только по одной его половине, что можно сделать, поместив реофоры в чашечки с ртутью M и N, то эта половина получит постоянное вращательное движение вокруг точки O — в том или другом направлении, в зависимости от направления тока цепи. Однако это движение будет прервано перемычками *a* и *c*. Мы можем их убрать. И так как ток, приходящий попрежнему от точки подвеса, течет по обеим половинкам горизонтального проводника в разные стороны, то вращательные действия, испытываемые каждой из них, накладываются друг на друга, а не уничтожаются взаимно, как это происходит в случае, когда ток течет по обеим поло-

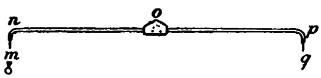


Рис. 6.

винкам в одинаковом направлении. Теперь проводник непрерывно вращается вокруг точки O, и мы можем изменять его направление, меняя направление тока. Это точно такой же опыт, как и опыт г. Ампера, за исключением того, что в нем имеется два вертикальных ответвления, по которым идет одинаково направленный ток. Но так как они оба безразличны ко всем положениям, то для вращения прибора вокруг оси достаточно одного лишь действия горизонтальных ответвлений.[1]

Фарадей получил то же вращательное движение, пропустив ток через проводник, наклоненный под довольно большим углом к вертикальной оси, вокруг которой он мог описать конус. Нижний конец проводника был погружен в сосудик с ртутью, чтобы подключить его к батарее. Этот проводник так же, как и горизонтальный, вращался, словно параллельные силы тянули его то в одну, то в другую сторону, в зависимости от направления тока.[2]

Теперь, когда характер воздействия земли на горизонтальный провод достаточно выяснен, мы можем, чтобы показать это воздействие на вертикальный проводник, воспользоваться прибором более удобным, чем тот, который мы употребляли до сих пор.

Деревянный стаканчик *hi* (рис. 7) помещается в центре деревянного диска, который поддерживают три винта *m*, *n*, *p*, устанавливающие его уровень. Из центра стаканчика выходит стеклянная трубка, содержащая металлический стержень. Выходя из точки *c* трубки, стержень заканчивается наверху стальным стаканчиком. Латунная проволока, имеющая в точке

[1] Г. Ампер, повторяя свои опыты во время пребывания в Женеве, действительно, изъял вертикальные части своего прибора вращения, показанного на рис. 1 его „Recueil“ и приведенного в статье, опубликованной им в т. XX, стр. 60 и сл. „Annales de chimie et de physique“ и в „Bibliothèque universelle, Sciences et Arts“, июль, 1822; действие земли стало тогда проявляться только в горизонтальных ответвлениях, а вращательное движение продолжалось, как и прежде.

[2] См. статью Фарадея, упомянутую на стр. 459.

d острие, погруженное в этот стаканчик, имеет с одной стороны противовес, а с другой стороны согнута в *defg*. В точке *g* находится кольцо, свободно поворачивающееся вокруг стеклянной трубки. К нему прикреплено платиновое острие, погруженное в деревянный стаканчик. Два проводника — один *ba*, выходящий из нижнего конца вертикального стержня, другой *kl*, выходящий из стаканчика *hi*, — неподвижно прикреплены друг другу до точек *a* и *l*, где каждый из них погружается в чашечку, наполненную ртутью. Если, заполнив сначала деревянный и стальной стаканчики *hi* и *d*, поместить электрические провода батареи в чашечки *a* и *l*, то ток, выходя, к примеру, из точки *a*, поднимается по стержню *bcd*, пойдет затем по *de*, спустится по *ef* и войдет по *fg* в ртуть чашечки *hi*, откуда он по *kl* соединится в точке *l* с отрицательным реофором. При таком расположении ток по обеим горизонтальным ветвям *ed* и *fg* разветвляется по разным направлениям. Следовательно, каждая из ветвей стремится с одинаковой силой повернуться вокруг оси *bd* в противоположные стороны. Таким образом, действие их взаимно уничтожается, и только влияние вертикальной части *ef* так или иначе определяет движение прибора, который всегда располагается согласно действию, оказываемому, как мы видели выше, земным шаром на единичный, вертикальный проводник.

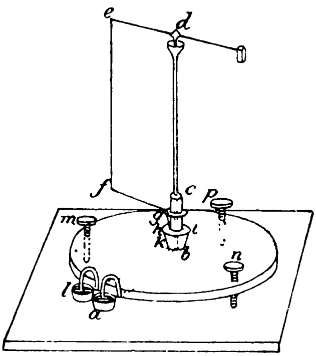


Рис. 7.

В общем, все известные до сих пор [1] явления, относящиеся к влиянию земного шара на подвижной участок вольтаического

[1] Имею в виду здесь не только те факты, которые я перечислил в статье. Мы можем, приняв те же общие явления, объяснить все, имеющее отношение к этому виду действия, а между прочим также и то,

контура, могут быть сведены к двум, наиболее простым, но и наиболее общим фактам.

Первый. Вертикальный ток, могущий вращаться только вокруг вертикальной оси, стремится занять такое положение, чтобы плоскость, соединяющая его с осью, была перпендикулярна магнитному меридиану. Он стремится остановиться на западе, если он восходящий, и на востоке, если он нисходящий.

Второй. Горизонтальный ток из каждого положения, в котором он находится, стремится передвигаться параллельно самому себе в том или ином направлении, в зависимости от перемены собственного направления.

Теперь следовало бы, — чтобы связать между собою эти два явления, — связать их с одной общей причиной или, по крайней мере, отнести их к другому, еще более общему явлению, могущему включить в себя их обоих. Труд этот, однако, выше моих сил.

Ученому физику, почтившему это Общество своим присутствием,[1] подобает как раз показать, в какой степени эти явления согласуются с его остроумной теорией пояса электрических токов, текущих по земному шару с востока на запад в направлении магнитного экватора.

После того как г. Ампер признал, что действительно все явления, относящиеся к влиянию земли на электрические токи, можно свести к двум главным, упомянутым мною выше фактам, он в устном объяснении показал, каким образом они неизбежно вытекают из его гипотезы электрических токов, направленных по земному шару с востока на запад. Не имея времени в момент своего пребывания в Женеве письменно изложить это объяснение, он поручил это сделать мне, дабы

почему некоторые приборы, построенные Ампером, в которых токи безразличны к влиянию земного шара, действительно совершенно не подвергаются его воздействию.

[1] Ампер присутствовал 4 сентября 1822 г. на заседании Женевского общества во время доклада А. де-ля-Рива (сына). *Прим. ред.*

оно непосредственно следовало за изложением тех фактов, к которым оно относится.[1]

Принцип, на который опирается объяснение разнообразных влияний, оказываемых друг на друга токами, направления которых образуют между собою углы, — это принцип разложения небольшого участка тока на два или три, также очень маленьких, участка, перпендикулярных между собой. Разложение это подобно разложению сил на составляющие в статике.

Этот принцип основан на том, что изогнутый проводник, какой бы формы он ни был, точно так же действует на подвижной контур, как другой прямолинейный проводник, параллельный плоскости первого, если он при этом равен ему по длине и по нему идет тот же ток. Если совместить плоскость изогнутого проводника с плоскостью обоих прямолинейных, поставленных вертикально, разлагая каждый отрезок проводника на два — вертикальный и горизонтальный, то сумма вертикальных частей составит прямолинейный проводник. Следовательно, только эти ее части играют в данном случае роль, а влияние горизонтальных частей уничтожается их взаимодействием.

Исходя, следовательно, из принципа разложения небольших участков тока и из хорошо известного факта притяжения и отталкивания (в зависимости от их направления) двух параллельных токов, мы приходим к общему заключению, что между двумя токами, направленными под углом, имеется

[1] Так как это изложение моих идей о причинах электродинамических явлений, находящееся в статье г. де-ля-Рива (сына), и написанное столь же ясно, как и точно, было записано на основе простой беседы, причем автор не знал еще моей работы, которую я изложил Академии наук в заседаниях 10 и 24 июня 1822 г. и которая была опубликована лишь недавно, в августовском номере 1822 г. „Annales de chimie et de physique", т. XX, стр. 396 (ст. XIX и XX), — я счел необходимым сделать в этом изложении некоторые добавления и исправления, с тем чтобы оно более четко выражало результаты моих экспериментальных и теоретических исследований. *(Ампер).*

притяжение всегда, когда они одинаково приближаются к вершине этого угла или удаляются от нее. Между ними имеется отталкивание, если один из токов удаляется от вершины угла, а другой к ней приближается.

То же можно сказать о двух токах, находящихся в пространстве, а не на плоскости, но в этом случае следует заменить вершину угла перпендикуляром, измеряющим между ними кратчайшее расстояние.

Пусть AB и AC (рис. 8) — две части токов, образующих между собою прямой угол и удаляющихся от вершины A. Возьмем по их длине два небольших отрезка *mn* и *pq*. Мы можем их заменить: *mn* — двумя перпендикулярами *mk* и *kn*, образующими две стороны прямоугольника, диагональю которого служит *mn*. Точно так же *pq* заменим двумя перпендикулярами *pl* и *lq*. Взаимодействие двух отрезков *mk* и *pl*, токи которых направлены в одну сторону, есть притяжение. Ампер в сообщении, которое он зачитал в королевской Академии наук 24 июня с. г., вывел из формул, полученных им в статье, зачитанной в той же Академии 10 июня, что взаимодействие двух отрезков *kn* и *lq* есть также притяжение. Этот результат был подтвержден первым из двух новых опытов, которые будут описаны в конце этой статьи.[1] Наконец, тот же ученый в своих сообщениях, которые он присоединил к заметкам, зачитанным в королевской Академии наук 8 апреля

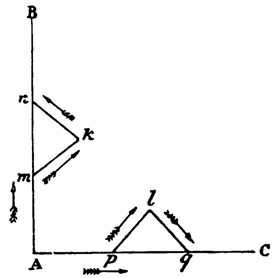


Рис. 8.

[1] Этот опыт наглядно показывает, что между двумя отрезками тока, направленными в одну и ту же сторону вдоль одной прямой, происходит отталкивание. Но так как, если изменить направление одного тока, ничего не трогая в другом, притяжение заменится отталкиванием и наоборот, то отсюда следует, что между двумя участками тока, которые, как kn и gl, направлены по одной прямой в противоположные стороны, непременно должно иметь место притяжение. (*Ампер*).

1822 г., показал, что взаимодействие между *mn* и *lq* и между *pl* и *kn* равно нулю. Отсюда он выводит, что каковы бы ни были расстояния А*m* и А*p*, взаимодействие двух отрезков *mn* и *pq*, которое согласно только что приведенному принципу должно быть равным сумме их четырех действий, есть всегда притяжение. Рассматривая таким способом влияние каждого маленького отрезка одного тока на каждую бесконечно малую часть другого, мы увидим, что из них складывается суммарное влияние, которое будет притяжением. Мы получили бы тот же результат, если бы токи шли по АВ и CD, направляясь к вершине А, и получили бы обратный результат, т. е. отталкивание, если бы один из токов приближался к А, другой же от нее удалялся. Убедиться в этом можно методом разложения, подобным тому, которое только что было проделано.

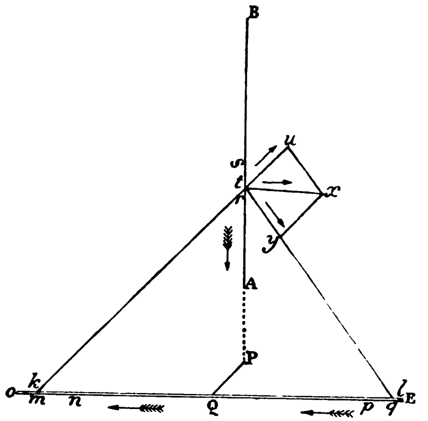


Рис. 9.

Теперь, я полагаю, потребуется определить воздействие горизонтального тока Е*o* (рис. 9) на вертикальный ток АВ, расположенный позади Е*o* и выше его. Провожу перпендикуляр PQ, измеряющий кратчайшее расстояние между Е*o* и продолжением АВ. Я предполагаю, что ток направлен от Е к *o* по Е*o* и от В к А по АВ так, что последний приближается к Е*o*. Возьмем на Е*o*, на равном расстоянии от точки Q, два отрезка *mn* и *pq*. Мы видим, что отрезок *mn* отталкивает отрезок *rs* вертикального тока АВ, так как в *mn* ток удаляется от PQ, а в *rs* — приближается к нему. Это отталкивание направлено по прямой *kt*, которая проходит посередине между двумя отрезками, и мы можем на ее продолжении взять прямую *tu*, выражающую это отталкивание в виде силы, действующей на *rs* по направлению *tu*. Таким же образом отрезок *pq* притягивает *rs* по направлению *lt* с силой, равной отталкиванию, так как оба тока *mn* и *pq* одинаковой силы находятся на равном расстоянии от *rs*. Это притяжение может быть выражено прямой *ty*, равной *tu*.

Равнодействующая[1] *tx* будет, таким образом, диагональю ромба и, следовательно, параллельна E*o* вследствие равенства наклонных прямых *kt*, *lt* и т. д. Каждый участок тока

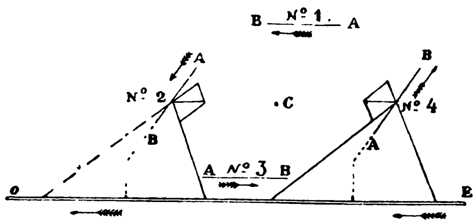


Рис. 10.

AB будет таким же образом увлекаться силой, параллельной E*o*, и весь он, следовательно, будет притягиваться в сторону E, откуда исходит ток E*o*. Но если этот ток, притягиваемый силами, параллельными E*o*, может двигаться только вокруг оси, вертикальной, как и он сам, то он поместится так, чтобы его вертикальная плоскость стала параллельна вертикальной плоскости, проходящей через E*o*, и чтобы сам он находился на стороне E. Если бы ток был направлен не от B к A, а от A к B, то он переместился бы на сторону *o*, куда направляется ток E*o*, причем плоскость, соединяющая его с осью, оставалась бы параллельной вертикальной плоскости, проходящей через E*o*.

Если рассмотреть влияние тока горизонтального проводника E*o*, направленного от E к *o*, на другой горизонтальный проводник AB, направленный от A к B (рис. 10) и находя-

[1] Направления сил отмечены на рис. 9 неоперенными стрелками, чтобы отличить их от направлений токов.

щийся за первым и выше его, то нужно будет притти к следующим заключениям.

1. Если AB (*№ 1*) расположен параллельно E*o* и ток его направлен в ту же сторону, что и ток в E*o*, то наблюдается притяжение. При этом AB, будучи подвижен, переместится параллельно самому себе в сторону E*o*.

2. Если он расположен (*№ 2*) горизонтально и перпендикулярно вертикальной плоскости, проходящей через E*o*, и ток его приближается к E*o*, то он перемещается параллельно самому себе к E по тем же причинам, по которым вертикальный ток (рис. 9) приближается к E, в чем можно убедиться из аналогичного рассмотрения.

3. Если он помещен (*№ 3*) параллельно E*o*, но ток его направлен в обратную сторону, то произойдет отталкивание, и AB переместится параллельно самому себе, удаляясь от E*o*.

4. Если он расположен (*№ 4*) так же, как в *№ 2*, то его ток не приближается к E*o*, а удаляется, и он переместится параллельно самому себе.

Наблюдатель, помещенный в точке C, увидел бы, следовательно, что горизонтальный проводник AB приближается к нему при всех четырех положениях, а следовательно, и при всех промежуточных положениях, в чем можно легко убедиться.[1]

Если приладить подвижной проводник AB так, чтобы он вращался вокруг горизонтальной, как и он сам, оси, то он

[1] Обобщая эти рассуждения, мы легко приходим к следующему выводу. Ток AB, последовательно помещаемый в различные точки окружности, описанной вокруг точки C, и направленный всегда по касательной к этой окружности, под влиянием неограниченного и более удаленного от центра C тока E*o* будет передвигаться к этому центру. Это будет происходить всякий раз, когда наблюдатель, находящийся в центре, увидит, что оба тока движутся в противоположные стороны — один справа налево, другой — слева направо. Ток AB, подвергнутый тому же влиянию, будет стремиться удалиться от этого центра всякий раз, как наблюдатель увидит, что оба тока движутся вокруг него в одинаковом направлении. (*Ампер*).

займет положение №№ *1* и *3* так, чтобы находиться в одной плоскости с этой осью и током E*o*. Если направление его совпадает с № *1*, он располагается между осью и E*o*, если направление совпадает с № *2*, он располагается на стороне оси, противоположной AB. При прочих азимутах он займет положения, которые легко можно вычислить.

Влияние неподвижного проводника E*o* на подвижные проводники, безразлично горизонтальные или вертикальные, в точности такое же, как влияние земного шара на подобные проводники. Таким образом, это влияние можно при-

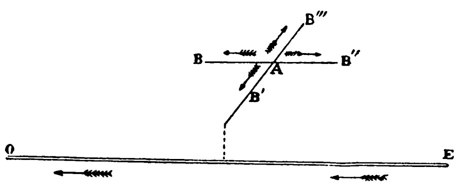


Рис. 11.

писать электрическим токам, направленным на земном шаре с востока на запад. Так как вблизи экватора они становятся гораздо значительнее, то мы можем заменить ток E*o* (рис. 9 и 10) током, направленным по этому экватору с востока на запад и вызывающим в подвижных токах, находящихся на поверхности северного полушария, рассмотренные нами явления. Предположение, что существует ток, направленный с востока на запад, объясняет два главных явления и оправдывает все частные случаи. Один из них мы считаем нужным непосредственно разобрать — а именно непрерывное вращение вокруг неподвижного острия, которое можно наблюдать при горизонтальном или слегка наклонном проводнике, подобно вращению часовой стрелки вокруг оси. Пусть AB (рис. 11)—горизонтальный проводник, помещенный вначале параллельно E*o*, ток которого идет от A и B в ту же сторону, что и ток E*o*. AB испытывает притяжение и перемещается во второе положение AB′, где ток его имеет нисходящее направление. Притянутый затем к E, он перемещается в AB″ параллельно E*o*. Отсюда, вследствие того что ток его направлен против тока E*o*, он отталкивается и перемещается в AB‴. В этом положении ток его имеет восходящее направление к *o* и опять занимает положение AB, откуда, по нашему предположению, он начал свое движение, и продолжает подряд вращаться вокруг неподвижной точки A. Вращение происходит в сторону, противоположную направлению тока E*o*, в том случае, если ток AB удаляется от точки A, если же ток приближается к ней, то вращение осуществляется по направлению тока E*o*.

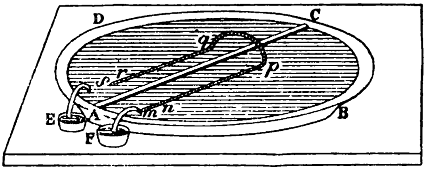


Рис. 12.

Г. Ампер, имевший случай во время своего пребывания в Женеве проделать несколько новых опытов, пожелал, чтобы я в конце этой статьи привел из них два главных и наиболее важных.

Первый является подтверждением теоретических воззрений г. Ампера, который пришел к выводу, что два отрезка проводника, направленных в одну сторону вдоль одной прямой, должны взаимно отталкиваться и что все отрезки одного и того же тока должны взаимно отталкиваться.

Действительно, на блюде ABCD (рис. 12), разделенном перегородкой AC на два равных отделения, каждое из которых наполнено ртутью, помещается обмотанный шелком латунный провод. Ответвления его *qr* и *pn* плавают на поверхности ртути параллельно перегородке AC. Оголенные концы *rs* и *nm* погружены в ртуть. Помещая полюса в чашечки E и F, мы устанавливаем два не зависимых друг от друга тока. Каждый из них имеет в качестве проводника часть, и притом значительную часть, ртути. Каково бы ни было направление тока, оба проводника *rq* и *pn* движутся параллельно перегородке AC в сторону, противоположную направлению тока.

Для обоих проводников это указывает на отталкивание между током, идущим в ртути, и его продолжением, идущим в самом проводнике.

В направлении тока движение латунных проводников более или менее беспрепятственно, так как в одном случае влияние земного шара на горизонтальную часть *qp* накладывается на полученное действие, а в другом случае наоборот — оно его уменьшает, но и само должно быть им уменьшено.

Второй опыт заключается в воздействии, испытываемом согнутой кольцом медной пластинкой со стороны пояса окружающих ее на расстоянии сильных электрических токов, посреди которых эта пластинка подвешена. Это воздействие, вначале оцененное Ампером как нулевое, было им самим в Женеве установлено весьма точно.

Подставляя к одной стороне пластинки очень сильный подковообразный магнит, Ампер увидел, что пластинка то втягивалась между ветвями магнита, то выталкивалась, в зависимости от направления тока в окружающих проводниках. Этот важный опыт показывает, что тела, не способные под действием электрических токов получить постоянные магнитные свойства, как, например, железо или сталь, могут все же, пока находятся под этим действием, приобрести какое-то временное намагничивание.[1]

---

[1] Инструмент, которым я пользовался для этого опыта, был тем же самым, что и во время первой попытки, в июле 1820 г. Он описан и изображен в „Journal de physique" и в настоящем сборнике, стр. 170 (сб. XVII, стр. 213).* (*Ампер*).

* См. настоящий сборник, стр. 286. *Прим. ред.*

ПРИМЕЧАНИЯ

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ, ВЫВЕДЕННАЯ ИСКЛЮЧИТЕЛЬНО ИЗ ОПЫТА

[1] (стр. 7). „Théorie des phénomènes électro-dynamiques, uniquement déduite de l'expérience" — основной труд Ампера. Был издан отдельной книжкой в Париже в 1826 г. и имеет подзаголовок „Произведение, в котором собраны труды г. Ампера, доложенные им королевской Академии наук в заседаниях от 4 и 26 декабря 1820 г., 10 июня 1822 г., 22 декабря 1823 г., 12 сентября и 28 ноября 1825 г.". Был опубликован под заглавием „Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électrc-dynamiques, uniquement déduite de l'expériences" (Труд о математической теории электродинамических явлений, выведенной исключительно из опыта) в „Mémoires de l'Académie des sciences", [2], т. VI, стр. 175—398 за 1823 г., появившихся в 1827 г. Этот труд во многих своих частях воспроизводит почти дословно более ранние работы Ампера. „Теория электродинамических явлений" не была разбита на разделы, но к ней Ампер приложил оглавление (см. стр. 217), содержащее названия разделов и номера соответствующих страниц. Для облегчения чтения мы указываем в примечаниях начало каждого нового раздела. Здесь начинается первый раздел: „Изложение пути, которого надлежит придерживаться при исследовании законов, управляющих явлениями природы, и сил, вызывающих эти явления".

[2] (стр. 9). Сторонники механического материализма исходили при этом из закона сохранения материи и (механического) движения.

[3] (стр. 9). В „Philosophiae naturalis principia mathematica" Ньютон пишет: „Действию всегда есть равное и противоположное противодействие; иначе, взаимодействие двух тел друг на друга между собой равны и направлены в противоположные стороны" (Ис. Ньютон. Математические начала натуральной философии. Пер. А. Н. Крылова, кн. I, СПб., 1911, стр. 38).

4 (стр. 11). Речь идет о труде „Exposé sommaire de nouvelles expériences électro-magnétiques...“, напечатанном в „Journal de physique“, т. XCIV, стр. 61. См. в настоящем сборнике, стр. 315.

5 (стр. 11). Сборник „Recueil d'observations électro-dynamiques“. Paris, 1822, представляет собою собрание отдельных оттисков работ, напечатанных Ампером ранее в различных журналах, с приложением соответствующих статей Эрстеда, Фарадея, де-ля-Рива (сына) и других.

6 (стр. 11). Речь идет о датском физике Г.-Х. Эрстеде (1777—1851) и его труде „Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam“, Hafniae, 1820 (Опыты, относящиеся к действию электрического конфликта на магнитную стрелку). Этот труд помещен в настоящем сборнике (стр. 433). Эрстед — выдающийся датский физик. С 1806 г. — профессор физики в Копенгагене. В 1812—1813 гг. издал книгу „Ansicht über die chemischen Naturgesetze durch die neueren Entdeckungen gewonnen“ (Взгляд на химические законы природы, вытекающий из новых открытий) и „Recherches sur l'identité des forces électriques et chimiques“ (Исследования тожества электрических и химических сил). В 1820 г. Эрстед открыл действие постоянного электрического тока на магнитную стрелку, которое изложил в вышеупомянутой работе „Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam“. Под словами „электрический конфликт“ Эрстед понимал столкновение противоположно заряженных, текущих в проводе электричеств, образующих электрический ток. Таким образом, Эрстед видел причину воздействия на стрелку не в течении электричеств, а в их столкновениях друг с другом. Эти столкновения обусловливали, по его мнению, также нагревание проводника. Представление о вихре вокруг провода, несущего ток, изложено Эрстедом в конце его труда (см. стр. 438).

7 (стр. 12). Ш.-О. Кулон (1736—1806) — выдающийся французский физик, открыл в 1788 г. закон взаимодействия точечных магнитных масс („магнитных молекул“), носящий его имя. К.-С. Пулье (1790—1868) — французский физик. Ж.-Б. Био (1775—1862) — выдающийся французский физик, геодезист и астроном, автор широко известных в первой половине XIX в. курсов физики „Traité élémentaire de physique expérimentale“ Paris, 1816 (Элементарный курс экспериментальной физики) и „Précis élémentaire de physique expérimentale“, Paris, 1816 (Элементарный конспект экспериментальной физики). В 1820 г. Био опубликовал (Annales de chimie et de physique, т. XV) открытый им совместно с известным французским физиком Ф. Саваром (1791—1841) закон действия неограниченной длины провода с током на точечную частицу магнетизма, расположенную на известном расстоянии от середины провода. Закон Био—Савара гласил, что равнодействующая всех сил, исходящих из провода, направлена перпендикулярно к кратчайшему расстоянию от частицы до провода и обратно

пропорциональна величине этого расстояния. Отсюда П.-С. Лаплас (1749—1827) заключил, что сила, исходящая из любого бесконечно малого отрезка этого провода, обратно пропорциональна квадрату расстояния данного отрезка до частицы магнетизма (закон Био—Савара—Лапласа).

[8] (стр. 13). Математическая теория распространения тепла была создана Ж.-Б.-Ж. Фурье (1768—1830) и опубликована в его „Théorie analytique de la chaleur“, Paris, 1822 (Аналитическая теория теплоты). Колебательная теория теплоты или теория вибраций, упоминаемая здесь Ампером, была высказана английским физиком Г. Дэви (1778—1829). Эта теория представляла собою непосредственное развитие воззрений М. В. Ломоносова (см.: М. В. Ломоносов. Сборник статей и материалов. Изд. АН СССР, т. III, 1951, стр. 33).

[9] (стр. 14). „Вольтаическая цепь“ — так именовал Ампер электрическую цепь, питаемую батареей Вольты.

[10] (стр. 14). См. в настоящем сборнике, стр. 223.

[11] (стр. 15). В этой статье Био и Савар наиболее подробно изложили свои экспериментальные исследования, приведшие их к открытию известного закона.

[12] (стр. 17). Далее начинается раздел „Описание опытов, при помощи которых устанавливаются четыре случая равновесия, приводящие к такому же числу законов взаимодействия, от которых зависят электродинамические явления“.

[13] (стр. 18). С.-Д. Пуассон (1781—1840) — выдающийся французский математик.

[14] (стр. 23). „Реофор“ (греч.), в переводе „токоноситель“ — термин, предложенный Ампером для проводников электрического тока. Этот термин распространения не получил.

[15] (стр. 24). Таким образом, Ампер здесь экспериментально устанавливает закон — суперпозиции магнитных взаимодействий.

[16] (стр. 26). Позднее Ж. Бертран (1822—1900) показал, что теорема об изогнутых токах, принятая Ампером в качестве одной из четырех основ его формулы, является, во-первых, следствием гипотезы, согласно которой сила взаимодействия двух элементов тока направлена вдоль прямой, их соединяющей, и, во-вторых, следствием теоремы, полученной Ампером при рассмотрении третьего случая равновесия и утверждающей, что действие замкнутого тока на элемент тока всегда направлено перпендикулярно к этому элементу (Journal de physique [1], т. III, стр. 297, 1874).

[17] (стр. 27). Этот вопрос рассмотрен Ампером в его труде „Mémoire sur une nouvelle expérience électro-dynamique“ (Труд, относящийся к одному новому электродинамическому опыту), доложенном Парижской Академии наук 12 сентября 1825 г. Аппарат Ампера давал очень низкую

точность вследствие значительного трения дуги. Этот опыт был повторен Эттингсгаузеном (Sitzungsberichte der Wiener Akademie, стр. 12, 1878) на улучшенной установке с бифилярным подвесом.

18 (стр. 30). Описание этого опыта Ампер доложил Парижской Академии наук 25 ноября 1825 г. Как указывается в конце настоящего труда (стр. 196), упомянутый эксперимент не был осуществлен вплоть до момента выхода книги в свет. Повидимому, Амперу вообще никогда не удалось его осуществить, главным образом вследствие неудачной конструкции описываемого им прибора.

19 (стр. 32). Далее начинается раздел „Исследование формулы, выражающей взаимодействие двух элементов вольтаических проводников".

20 (стр. 33). Единица силы тока, принятая здесь Ампером, является электродинамической единицей, выраженной через посредство единицы веса, принятой за единицу механической силы. Полагая единицу веса равной 1 г, находим, что эта электродинамическая единица силы тока равна абсолютной единице (CGS), умноженной на $\sqrt{g}$ (g — ускорение силы тяжести). С другой стороны, более употребительная абсолютная электромагнитная единица силы тока (CGSM) равна электродинамической единице, умноженной на $\sqrt{2}$, и составляет 10 а. Следовательно, единица силы тока, принятая Ампером, равна $10\sqrt{\frac{g}{2}} = 10\sqrt{\frac{981}{2}} = 221.4$ а. (Примечание Ж. Жубера; см.: Collection de mémoires relatifs à la physique, т. III. Paris, 1887, стр. 24).

21 (стр. 34). Фактически здесь сделаны два допущения: 1) что функция расстояния имеет вид $\frac{1}{r^n}$; 2) что этот вид функции остается одним и тем же для положения $a''' d'''$ и положения ad (рис. 5, стр. 34) и что, следовательно, существует коэффициент пропорциональности k, не зависящий от расстояния, определяющий соотношение сил взаимодействия в этих двух положениях. В примечании I Ампера, приложенном к настоящему труду (см. стр. 197), дано более строгое и более общее решение вопроса.

22 (стр. 39). Это преобразование имеет очень большое значение, так как оно позволило Амперу вычислить воздействие замкнутого контура на элемент тока и установить таким образом соотношение между величинами n и k.

23 (стр. 40). Далее начинается раздел „Вытекающее из третьего случая равновесия соотношение между двумя неизвестными постоянными, входящими в эту формулу".

24 (стр. 42). В своем первоначальном варианте этого раздела, доложенном Парижской Академии 10 июня 1822 г., Ампер вывел данное

соотношение, исходя из того факта, что круглый замкнутый виток не оказывает никакого действия на проводник произвольной формы, способный вращаться вокруг оси круга и опирающийся обоими своими концами на эту ось. Астроном и математик Ф. Савари (1797—1841) в своем труде „Mémoire sur l'application du calcul aux phénomènes électro-dynamiques“ (О применении анализа к электродинамическим явлениям), доложенном Парижской Академии наук 3 февраля 1823 г., воспользовался для этой же задачи тем фактом, что кольцевой магнит не производит внешнего действия. Ампер имитировал кольцевой магнит посредством замкнутой тороидальной катушки и показал экспериментально, что она не оказывает никакого действия на проводник любой формы. Этот результат эксперимента приводит к соотношению

$$kn + 1 = 0.$$

Объединяя его с первым соотношением

$$1 - n - 2k = 0,$$

мы получим, очевидно,

$$k_1 = -\frac{1}{2}, \quad n_1 = 2,$$

$$k_2 = 1; \qquad n_2 = 1.$$

После того как доказывается, что k существенно отрицательно, второе решение отпадает. Это доказательство оказывается, однако, излишним в методе, примененном здесь Ампером.

25 (стр. 42). Этот опыт был осуществлен Ампером в мае 1822 г.

26 (стр. 44). Этот опыт осуществлен Ампером в Женеве в конце августа 1822 г. в связи с работами де-ля-Рива (сына), описанными в его „Mémoire sur l'action qu'exerce le globe terrestre sur une portion mobile du circuit voltaïque“. См. в настоящем сборнике, стр. 449.

27 (стр. 44). Далее начинается раздел „Общие формулы, выражающие действие замкнутого вольтаического контура или системы замкнутых контуров на элемент электрического тока“.

28 (стр. 48). Этот важный результат Ампер получил в ноябре 1823 г. В черновиках Ампера, относящихся к этой эпохе, имеется следующая запись: „Мои три большие вещи — притяжения, проекции, площади“.

29 (стр. 49). Далее начинается раздел „Опыт, при помощи которого проверяется одно следствие из этих формул“.

30 (стр. 51). Это объяснение приводится в статье де-ля-Рива (сына). См. в настоящем сборнике, стр. 463.

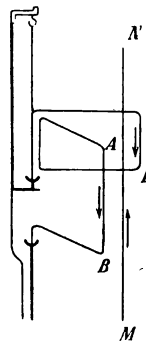
31 (стр. 51). См. статью де-ля-Рива (сына) в настоящем сборнике, стр. 449.

[32] (стр. 55). Далее начинается раздел „Приложение предыдущих формул к круговому контуру“.

[33] (стр. 56). Далее начинается раздел „Упрощение этих формул, когда диаметр кругового контура весьма мал“.

[34] (стр. 57). Далее начинается раздел „Приложение к плоскому контуру, образующему какую-нибудь замкнутую кривую, сначала для случая, когда все его размеры весьма малы, а затем для любой величины контура“.

[35] (стр. 62). Далее начинается раздел „Взаимодействие двух замкнутых контуров, расположенных в одной плоскости, сначала в предположении, что все их размеры весьма малы, а затем в случае, когда оба эти контура имеют любые форму и размеры“.



[36] (стр. 63). Далее начинается раздел „Определение двух неизвестных постоянных, которые входят в основную формулу“.

[37] (стр. 64). В неопубликованных бумагах Ампера, как указывает Ж. Жубер (Collection des mémoires relatifs à la physique, т. 3, стр. 53), имеется описание более простого эквивалентного опыта. В этом опыте (см. рисунок) прямолинейный неограниченный проводник MN действует на вертикальные параллельные различной длины отрезки AB и CD подвижной рамки. Констатируется равновесие, когда расстояния от проводника MN до отрезков AB и CD пропорциональны длинам этих отрезков. Опыт ставится на отталкивание отрезков от проводника MN. Этот опыт был применен впоследствии Ламэ (Cours de physique à l'Ecole polytechnique. Изд. 2-е, т. III, 1840, стр. 235) и обычно ему приписывается.

Отрезок длины l_1, расположенный на расстоянии a_1 от линейного провода, испытывает от элемента этого провода, по которому течет ток i', действие $ii'l_1 \frac{(1-k)\sin^n\theta + k}{r^n} ds$. Поскольку $\sin\theta = \frac{a_1}{r}$ и $ds = \frac{dx}{\cos\theta}$, сила равна

$$-\frac{ii'l_1}{a_1^{n-1}}\left[(1-k)\sin^n\theta + k\sin^{n-2}\theta\right]d\theta.$$

Пусть

$$\int_0^\pi \left[(1-k)\sin^n\theta + k\sin^{n-2}\theta\right]d\theta = A,$$

действие равно $-\frac{Aii'l_1}{a_1^{n-1}}$, значит, $\frac{l_1}{a_1^{n-1}}=\frac{l_2}{a_2^{n-1}}$, где l_2 и a_2 соответственно — расстояние и длина второго отрезка. При равновесии, как явствует из опыта,

$$\frac{l_1}{a_1}=\frac{l_2}{a_2}.$$

Значит, должно быть $n=2$.

[38] (стр. 65). Далее начинается раздел „Действие проводника с током, имеющего форму кругового сектора, на прямолинейный проводник, проходящий через центр сектора".

[39] (стр. 67). Далее начинается раздел „Описание прибора, предназначенного для проверки результатов теории на проводниках указанной формы". Описанный здесь опыт никогда не был осуществлен. Из чертежа видно, что данная установка не позволяет осуществить измерения достаточной точности.

[40] (стр. 70). Далее начинается раздел „Взаимодействие двух прямолинейных проводников".

[41] (стр. 76). В подлиннике этот рисунок ошибочно обозначен 23-м.

[42] (стр. 98). Далее начинается раздел „Действие, оказываемое на элемент проводника с током совокупностью замкнутых контуров весьма малых размеров, называемой электродинамическим соленоидом".

[43] (стр: 103). Далее начинается раздел „Действие, оказываемое на соленоид элементом или ограниченным участком проводника с током, замкнутым контуром или системой замкнутых контуров".

[44] (стр. 109). Далее начинается раздел „Взаимодействие двух соленоидов".

[45] (стр. 111). Далее начинается раздел „Тожественность соленоидов и магнитов в отношении действия, оказываемого на них проводниками с током или другими соленоидами, или другими магнитами. Обсуждение выводов, которые можно сделать на основании этой тожественности, относительно природы магнитов и взаимодействия, наблюдаемого между земным шаром и магнитом или проводником с током".

[46] (стр. 114). Эти рассуждения составляют часть примечания Ампера к его „Précis". Заслуживает внимания начало этого примечания, приводимое Ж. Жубером (Collection de mémoires relatifs à la physique, т. 3, стр. 99): „При современном состоянии физики не известно, какая из причин процессов, свидетелем которых мы являемся, может быть с уверенностью признана первичной. И подобно тому, как в химии считается простым телом или элементом всякое вещество, которое мы не можем разложить на другие вещества, так и в физике приходится при-

нимать за элементарную любую силу, которую мы не можем свести к другим силам. Сила, проявляющаяся во взаимодействии двух проводящих проволок или во взаимном действии одной из этих проволок и магнита, очевидно, не может быть сведена к притяжениям или отталкиваниям, простым функциям расстояния между частицами, между которыми они проявляются, поскольку можно получить с помощью первой или с помощью второй непрерывно ускоряющиеся вращательные движения постоянного направления. Следовательно, приходится искать элементарную силу либо во взаимодействии двух элементов проводящих проволок, как я это делал с самого начала моих исследований данного вопроса, либо во взаимодействии элемента провода с полюсами частицы магнита, полюсами, которые именуются магнитными молекулами, когда принимается гипотеза двух магнитных жидкостей. Это последнее сделал г. Био в своих трудах, сообщенных им Академии наук 30 октября и 18 декабря 1820 г.".

[47] (стр. 116). Свои воззрения на природу эфира Л. Эйлер изложил впервые в сочинении, представленном им от имени сына Иоганна-Альбрехта на конкурс Петербургской Академии наук в 1755 г. Сочинение было удостоено премии и издано под названием: J.-A. Euleri. Disqui sitio de causa physica electricitatis ab Academia scientiarum imperial petropolitano praemio coronata (Исследование физической причины электричества, удостоенное премии имп. Петербургской Академией наук) (См.: Ф.-У.-Т. Эпинус. Теория электричества и магнетизма. Изд. АН СССР, 1951, стр. 480—482). Вторично Л. Эйлер подробно изложил свои воззрения на эфир в своей популярной книге „Lettres à une princesse d'Allemagne sur divers sujets de physique et de philosophie" (Письма к немецкой принцессе по различным вопросам физики и философии), т. I. СПб., 1768, стр. 70—74; т. II, стр. 294—299.

[48] (стр. 118). См.: М. Фарадей. Экспериментальные исследования по электричеству. Статья Т. П. Кравца „О втором томе «Экспериментальных исследований по электричеству» М. Фарадея". Изд. АН СССР, т. II, 1952, стр. 412.

[49] (стр. 118). См. в настоящем сборнике, стр. 223.

[50] (стр. 119). Закон воздействия прямолинейного провода с током на магнит был доложен Био и Саваром Парижской Академии наук 30 октября 1820 г.

[51] (стр. 124). См. в настоящем сборнике, стр. 315.

[52] (стр. 128). См. в настоящем сборнике, стр. 322.

[53] (стр. 129). См. в настоящем сборнике, стр. 283.

[54] (стр. 132). Первоначально предполагалось, что гальванический ток по природе своей отличен от электрических явлений.

[55] (стр. 132). А.-Ц. Беккерель (1788—1878) — французский физик.

[56] (стр. 132). П. Прево (1751–1839) – швейцарский физик. Ж.-Б. Дюма (1800—1884) — французский химик.

[57] (стр. 132). Далее начинается раздел „Тожественность действий, оказываемых на полюс магнита или на конец соленоида замкнутым вольтаическим контуром и совокупностью двух весьма близких поверхностей, ограниченных этим контуром, на которых две жидкости, подобные двум предполагаемым магнитным жидкостям, северной и южной, неподвижно распределены таким образом, что интенсивность магнетизма повсюду одинакова“.

[58] (стр. 140). В подлиннике ошибочно ds.

[59] (стр. 141). Это распределение именуется в настоящее время „магнитным листком“.

[60] (стр. 142). В подлиннике этот рисунок ошибочно обозначен 42-м.

[61] (стр. 144). Это произведение именуется в настоящее время „силой магнитного листка“.

[62] (стр. 151). Далее начинается раздел „Разбор трех гипотез о характере взаимодействия элемента проводника с током и так называемой *магнитной молекулы*“.

[63] (стр. 153). В подлиннике этот рисунок ошибочно обозначен 39-м.

[64] (стр. 156). Далее начинается раздел „Невозможность вызвать бесконечно ускоряющееся движение посредством взаимодействия между твердым замкнутым контуром и магнитом или электродинамическим соленоидом.

[65] (стр. 157). См. в настоящем сборнике, стр. 387.

[66] (стр. 157). Далее начинается раздел „Разбор различных случаев, когда бесконечно ускоряющееся движение может быть вызвано в результате действия, которое вольтаический контур, одна часть которого может перемещаться отдельно от остального контура, оказывает на магнит или на электродинамический соленоид“.

[67] (стр. 163). В подлиннике этот рисунок ошибочно обозначен 40-м. На рисунке опущена упоминаемая далее окружность АВС.

[68] (стр. 165). В подлиннике этот рисунок ошибочно обозначен 43-м.

[69] (стр. 166). В подлиннике этот рисунок ошибочно обозначен 41-м.

[70] (стр. 185). Далее начинается раздел „Тожественность между взаимодействием двух замкнутых вольтаических контуров и взаимодействием двух совокупностей, состоящих каждая из двух весьма близких поверхностей, ограниченных соответствующим этой совокупности контуром, причем на этих поверхностях неподвижно распределены две магнитные жидкости — южная и северная, с одинаковой повсюду интенсивностью магнетизма“.

[71] (стр. 189). Далее начинается раздел „Невозможность вызвать бесконечно ускоряющееся движение посредством взаимодействия между

двумя жесткими замкнутыми вольтаическими контурами и, следовательно, посредством взаимодействия между двумя какими-нибудь совокупностями такого рода контуров.

72 (стр. 191). Далее начинается раздел „Опыт, который является окончательным подтверждением теории, согласно которой свойства магнита зависят от электрических токов; он показывает, что согнутый в виде спирали или винтовой линии проводник, по которому течет вольтаический ток, испытывает со стороны движущегося металлического диска действие, во всем подобное действию между диском и магнитом, которое открыл г. Араго".

73 (стр.192). Опыт Араго опубликован им в „Annales de chimie et de physique", т. XXVIII, 1825, стр. 325. Наблюденное Араго явление вызвано вихревыми токами, индуцированными магнитом во вращающемся диске. Объяснение явления, даваемое Ампером, неправильно. Столь же неправильны и объяснения, предложенные Пуассоном. Лишь в 1831 г. Фарадей, открыв электромагнитную индукцию, смог правильно объяснить явление Араго (см.: М. Фарадей. Экспериментальные исследования по электричеству. Изд. АН СССР, т. II, 1952, стр. 417).

74 (стр. 194). Далее начинается последний раздел „Общие выводы из опытов и вычислений, относящихся к электродинамическим явлениям".

ТРУД, ПРЕДСТАВЛЕННЫЙ КОРОЛЕВСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК 2 ОКТЯБРЯ 1820 г. И СОДЕРЖАЩИЙ РЕЗЮМЕ ДОКЛАДОВ, ПРОЧИТАННЫХ В АКАДЕМИИ 18 И 25 СЕНТЯБРЯ 1820 г. ОТНОСИТЕЛЬНО ДЕЙСТВИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ

1 (стр. 223). Под заглавием „Mémoire, présenté á l'Académie royale le 2 octobre 1820 et contenant le resumé des travaux lus à l'Académie les 18 et 25 septembre 1820 sur les actions des courants électriques" опубликовано впервые в Annales de chimie et de physique [2], т. XV, стр. 59—76, 170—218. Отдельные доклады, а также более поздние дополнения к ним, включенные в данное резюме, отмечены Ампером как „продолжения" или „параграфы" и перенумерованы. Работа была включена в „Recueil d'observations électro-dynamiques", стр. 1—68.

2 (стр. 228). Под „электродвижущей силой" Ампер понимает буквально силу, движущую электрические жидкости.

3 (стр. 229). Здесь впервые в истории физики появляется термин „электрический ток".

4 (стр. 229). Здесь впервые установлено ныне общепринятое правило определения направления тока.

5 (стр. 229). Л.-Ж. Гэй-Люссак (1778—1850) и Л.-Ж. Тенар (1777—1857) исследовали электрохимическое действие гальванического тока в 1809 г.

6 (стр. 231). Первый гальванометр с магнитной стрелкой, изобретенный в Германии И. Швейггером в конце 1820 г., носил название мультипликатора. В 1821 г. он был усовершенствован И.-Х. Поггендорфом. Изобретение Швейггера долго оставалось неизвестным во Франции.

7 (стр. 231). Т. е. электростатических машинах.

8 (стр. 232). „Энергия вольтова столба“ понималась Ампером в смысле мощности.

9 (стр. 236). Речь идет о П.-С. Лапласе (1749—1827).

10 (стр. 237). С.-Т. Земмеринг (1755—1830) предложил свой электролитический телеграф в 1809 г. Магнитный телеграф, наподобие предлагаемого здесь Ампером, был построен в 1832 г. Павлом Львовичем Шиллингом (1786—1857) в России.

11 (стр. 238). Речь идет, очевидно, о кремнецинковой соли или кремнекислом цинке $Zn_2SiO_4 \cdot 2H_2O$, кристаллы которого, подобно турмалину, обладают пироэлектрическими свойствами.

12 (стр. 280). Опыт Т. Буажиро описан в „Annales de chimie et de physique“, [2], т. XV, стр. 279. Опыт был поставлен следующим образом: маленькая магнитная стрелка плавала на воде, покрытой тонким слоем жира. Под действием магнитного поля прямолинейного тока стрелка получает поступательное перемещение параллельно себе самой.

ОТВЕТ НА ПИСЬМО г. ФАН-БЕКА ОТНОСИТЕЛЬНО НОВОГО ОПЫТА ПО ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМУ

1 (стр. 283). Под заглавием „Réponse à la lettre de M. Van Beck sur une nouvelle expérience électro-magnétique“ впервые опубликовано в 1821 г. в „Journal de physique“, т. XCIII, стр. 447, и является ответом на два письма голландского физика Фан-Бека, появившиеся в том же томе журнала (стр. 312). В своих письмах Фан-Бек сообщал о результатах, полученных при пропускании электрического тока через провод, расположенный вблизи стальной пластинки. В одном из опытов провод проходил перпендикулярно сквозь пластинку. При этом Фан-Бек не обнаружил в пластинке никакой полярности до тех пор, пока пластинка не была разрезана по диаметру. Этот опыт аналогичен опыту со стальным кольцом, произведенному Гэй-Люссаком и Вельтером в 1820 г.

2 (стр. 288). Как отмечает Ж. Жубер (Collection de mémoires relatifs à la physique, т. 2, стр. 215), в одном из писем к де-ля-Риву (отцу) Ампер указывает, что поспешность, с которой он писал свой ответ Фан-Беку, воспрепятствовала ему в этом месте написать, что электрические токи, циркулирующие в частицах вещества, должны приводить к возникновению сил притяжения или отталкивания, в зависимости от их взаимного расположения. „Это позволяет дать, на мой взгляд, —

пишет Ампер, — единственно возможное и лишенное затруднений, при современном состоянии физики, объяснение явлениям кристаллизации".

[3] (стр. 289). В XVIII в. и начале XIX в. изоляторы (непроводники электричества) именовались „первично электрическими", „сами по себе электрическими" или „идиоэлектрическими", в отличие от проводников, именовавшихся „вторично электрическими", „сами по себе неэлектрическими" и т. д.

[4] (стр. 300). М. Фарадей. Экспериментальные исследования по электричеству. Изд. АН СССР, т. II, 1952, стр. 183 и далее.

[5] (стр. 307). Метод „двойного касания" или „двойного соприкосновения" был предложен английским физиком Дж. Майчеллом в 1750 г.

КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ НОВЫХ ОПЫТОВ ПО ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМУ, ВЫПОЛНЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ ФИЗИКАМИ С МАРТА 1821 г.

[1] (стр. 315). Под названием „Exposé sommaire des nouvelles expériençes électro-magnétiques, faites par plusieurs physiciens depuis le moi de mars 1821" опубликовано впервые в „Journal de physique", т. XCIV, стр. 61. Включено в „Recueil d'observations électro-dynamiques", стр. 199.

[2] (стр. 319). Высказанное здесь предположение о том, что полярные сияния вызваны электричеством, не явилось вовсе оригинальным. Еще в 1753 г. М. В. Ломоносов в своем „Слове о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих" указал: „Весьма вероятно, что северные сияния рождаются от происшедшей на воздухе электрической силы". Эту же догадку высказал он в поэтической форме еще в 1743 г. (см.: М. В. Ломоносов, Полн. собр. соч., Изд. АН СССР, т. III, 1952, стр. 123).

О ВОЗДЕЙСТВИИ ЗЕМЛИ НА ВОЛЬТАИЧЕСКИЕ ПРОВОДНИКИ

[1] (стр. 325). Под названием „De l'action qu'exerce la Terre sur les conducteurs voltaïques" эта статья была опубликована как предисловие к труду А. де-ля-Рива (сына) „О воздействии земного шара на подвижной участок вольтаического контура" в „Recueil d'observations électro-dynamiques" (1822). См. в настоящем сборнике, стр. 449.

[2] (стр. 328). Помещаем рисунок, на который ссылается Ампер, из его статьи в Annales de Chimie et de Physique [2], т. XX, стр. 60—74, 1822, рис. 2.

[3] (стр. 329). Имеется в виду „Recueil d'observations électro-dynamiques".

[4] (стр. 329). См. в настоящем сборнике, стр. 465—472.

О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВОЛЬТАИЧЕСКОГО ПРОВОДНИКА И МАГНИТА

[1] (стр. 331). Под названием „Mémoire sur l'action mutuelle d'un conducteur voltaïque et d'un aimant" эта работа была представлена Академии в Брюсселе 26 октября 1826 г. и опубликована впервые в „Mémoires de l'Académie de Bruxelles", т. IV. Часть статьи была издана Ампером в 1828 г. в виде отдельной брошюры под заглавием „Note sur l'action mutuelle d'un aimant et d'un conducteur voltaïque" (Заметка о взаимодействии магнита и вольтаического проводника). Эта работа, как и следующая („Письмо к д-ру Герарди"), дополняют „Théorie phénomènes électro-dynamiques" Ампера.

[2] (стр. 333). Biot. Précis élémentaire de physique expérimentale. Paris, 1816.

[3] (стр. 340). C.-D. Poisson, Mémoires de l'Académie des Sciences, т. V, 1821 и 1822 (1826), стр. 247—338, 488—533.

[4] (стр. 385). См. в настоящем сборнике, стр. 210.

ПИСЬМО К г. д-ру ГЕРАРДИ

[1] (стр. 387). „Lettre à M. le Dr. Guérardi (Supplément au mémoire sur l'action mutuelle d'un conducteur voltaïque et d'un aimant)" послано в начале 1826 г. Впервые опубликовано в „Mémoires de l'Académie de Bruxelles", т. IV, 1827, стр. 71—88. Как и предыдущая работа, дополняет „Théorie des phénomènes électro-dynamiques" Ампера.

[2] (стр. 390). Имеется в виду „Recueil d'observations électro-dynamiques".

[3] (стр. 391). На рисунке не изображена замыкающая часть контура, на которой и находится точка H.

[4] (стр. 392). Имеется в виду ответ Фарадею, помещенный в „Recueil d'observations électro-dynamiques".

[5] (стр. 392). Опыт Нобили весьма сходен с опытом Фарадея.

[6] (стр. 403). В „Théorie des phénomènes électro-dynamiques".

ПЕРЕЧЕНЬ ТРУДОВ А.-М. АМПЕРА[1]

1. Considérations sur la théorie mathématique du jeu. Lyon, 1802.
2. Recherches sur l'application des formules générales du calcul des variations aux problèmes de la mécanique. Paris, 1805.
3. Sur quelques points de la théorie des fonctions dérivées. (Journal d'École polytechnique, VI, 1806).
4. Sur les avantages qu'on peut tirer dans la théorie des courbes de la considération des paraboles osculatrices. (Там же, VII, 1808).
5. Démonstration de l'égalité de volume des polyèdres symétriques. (Correspondance d'École polytechnique, I, 1808).
6. Sur la loi de la double réfraction dans les crystaux à deux axes. (Mémoires de l'Institut des savants étrangers, I, 1809).
7. Sur la détermination des proportions dans lesquelles les corps se combinent. (Annales de chimie, т. LXXXIX, 1814).
8. Considérations générales sur les intégrales des equations aux differences partielles. (Journal d'École polytechnique, X, 1815).
9. Démonstration de la loi de Mariotte. (Annales de chimie, т. LXXXIX 1815).
10. Essai d'une classification naturelle pour les corps simples. (Annales de chimie et de physique, тт. I, II, 1816).
11. Mémoire sur l'expression mathématique des attractions et des répulsions des courants électriques. (Доложен Парижской Академии наук в 1820 г., опубликован впервые в: Collection de mémoires relatifs à la physique, т. 2. Paris, 1885, стр. 128).
12. Sur l'intégration des équations aux différences partielles. (Journal d'École polytechnique, XI, 1820).
13. Sur les principes du calcul différentiel. (Там же).
14. Sur les courbes osculatrices. (Там же).

---

[1] В перечень включены все книги, сборники и сводные труды, опубликованные Ампером, а также те отдельные его статьи и заметки, которые не вошли в вышеупомянутые сборники и сводные труды.

15. Sur la démonstration du principe des vitesses virtuelles. (Там же).
16. Sur l'action des courants voltaïques. (Annales de chimie et de physique, т. XV, 1820).
17. Sur l'état magnétique des corps qui transmettent un courant d'électricité. (Там же, т. XVI, 1821).
18. Description d'un appareil électro-dynamique. (Там же, т. XVIII, 1821).
19. Réponse à la lettre de M. Van Beck, sur une nouvelle expérience électro-magnétique. (Journal de physique, т. XCIII, стр. 447, 1821).
20. Recueil d'observations électro-dynamiques. Paris, 1822.
21. Note lue à la séance du 24 juin 1822. (Опубликована впервые в: Collection de mémoires relatifs à la physique, т. 2, стр. 290).
22. Extrait d'une lettre adressée M. Faraday. (Датировано 1811 г., опубликовано впервые в: Collection de mémoires relatifs à la physique, т. 2, стр. 193).
23. Notice sur quelques expériences nouvelles relatives à l'action mutuelle de deux portions de circuit voltaïque et à la production des courants électriques par l'influence, et sur les circonstances dans laquelles l'action électro-dynamique doit, d'après la théorie, produire dans un conducteur mobile autour d'un axe fixe un mouvement de rotation continu, ou donner à ce conducteur une direction fixe. (Доложено Парижской Академии наук в 1822 г., опубликовано впервые в: Collection de mémoires relatifs à la physique, т. 2, стр. 329).
24. Nouvelles phénomènes électro-dynamiques. (Annales de chimie et de physique, т. XX, 1822).
25. Détermination de la formule qui représente l'action mutuelle de deux portions infiniment petites de conducteurs voltaïques. (Там же).
26. Sur quelques nouvelles propriétés des axes permanentes de rotation des corps etc. Paris, 1822.
27. Lettre à M. Faraday sur l'electro-magnétisme. (Annales de chimie et de physique, т. XXII, 1823).
28. Extrait d'un mémoire sur les phénomènes électro-dynamiques. (Доложен Парижской Академии наук в 1823 г., опубликован впервые в: Collection de mémoires relatifs à la physique, т. 2, стр. 395).
29. Exposé méthodique des phénomènes électro-dynamiques. Paris, 1823.
30. Description d'un appareil électro-dynamique. (Annales de chimie et de physique, т. XXVI, 1824).
31. Sur la nature du système nerveux des animaux articulés. (Annales d'histoire naturelle, т. III, 1824).
32. Précis de la théorie des phénomènes électro-dynamiques, par M. Ampère, pour servir de supplément à son Recueil d'observations électro-dynamiques et au Manuel d'Electricité de M. Demonferrand. Paris, 1824.

33. Sur les piles sèches de M. Zamboni. (Annales de chimie et de physique, т. XXIX, 1825).
34. Mémoire communiqué à l'Académie royale des Sciences dans la séance du 21 novembre 1825, faisant suite au mémoire lu dans la séance du 12 septembre. (Опубликован впервые в: Collection de mémoires relatifs à la physique, т. 3. Paris, 1887, стр. 194).
35. Précis d'un Mémoire sur l'action exercée par un circuit électro-dynamique formant une courbe plane dont les dimensions sont considérées comme infiniment petites etc. (Correspondance mathématique et physique des Pays-Bas, 1825).
36. Théorie des phénomènes électro-dynamiques uniquement déduite de l'expérience. Paris, 1826.
37. Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électro-dynamiques, uniquement déduite de l'expérience, dans lequel se trouvent réunis les mémoires que M. Ampère a communiqué à l'Académie royale des Sciences dans les séances de 4 et 26 décembre 1820, 10 juin 1822, 22 décembre 1823, 12 septembre et 28 novembre 1825. (Mémoires de l'Académie des sciences [2], т. VI, стр. 175, 1827).
38. Lettre de M. Ampère à M. Guérardi, sur divers phénomènes électro-dynamiques. (Annales de chimie et de physique [2], т. XXIX, 1827).
39. Mémoire sur l'action mutuelle d'un conducteur voltaïque et d'un aimant. (Mémoires de l'Académie de Bruxelles, т. IV, 1827).
40. Lettre à M. Dr. Guérardi (Supplément au mémoire sur l'action mutuelle d'un conducteur voltaïque et d'un aimant). (Mémoires de l'Académie de Bruxelles, т. IV, стр. 71, 1827).
41. Sur l'action mutuelle d'un aimant et d'un conducteur voltaïque. (Annales de chimie et de physique, т. XXXVII, 1828).
42. Sur la détermination de la surface courbe des ondes lumineuses dans un milieu dont l'élasticité est différente suivant les trois directions principales. (Annales de chimie et de physique, т. XXXIX, 1828).
43. Essai sur la philosophie des sciences. Paris, 1834—1843.
44. Sur la chaleur et la lumière considerées comme résultat des mouvements vibratoires. (Annales de chimie et de physique, т. LVIII, 1835).
45. Construction simple pour diviser en 17 parties la circonférence du cercle. (Comptes rendus hebdomadères de l'Académie des sciences, I, 1835).
46. Journal et correspondance de A.-M. Ampère. Paris, 1893.
47. Correspondance de grand Ampère, тт. 1—3, 1936—1943.
48. A.-M. Ampère et J.-J. Ampère Correspondance et souvenirs, т. I. Paris 1875.

ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТВОРЧЕСТВ А.-М. АМПЕРА

1. Valson C. A. La vie, les travaux d'André-Marie Ampère. Lyon, 1886.
2. Статьи и доклады, помещенные в специальном номере журнала „Révue générale d'électricité" (ноябрь 1922 г.): Appell P. Ampère — Mathématicien. — Brillouin M. Ampère — professeur au Collège de France. — Launay L., de. Ampère — son oeuvre chimique. — Pérot A. Ampère — précurseur. — Pomey J. B. Ampère et la télegraphie. — Boicherot P. Ampère, le philosophe, l'homme. — Gouy G. Ampère, son oeuvre en Electricité.
3. Launay L. de. Le grand Ampère. Paris, 1926.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Авогадро 429
Альдини 408
Араго Ф. 191, 192, 194, 196, 219, 237, 244, 266, 280, 281, 288, 308, 309, 319, 407, 412, 413, 416, 447, 448, 481

Бабинэ 303, 450
Барнетт 425
Башелье 200, 393
Беккариа 446
Беккерель А.-Ц. 132, 479
Бернулли Д. 428
Бертолле 429
Бертран Ж. 474
Био Ж.-Б. 12, 64, 112, 114, 119, 149, 151, 157, 161, 174, 177, 179, 180—182, 184, 185, 195, 197, 246, 249, 333, 361, 381, 384, 385, 396, 415, 416, 420, 473, 474, 479, 484
Блэнвиль 285
Бонапарт 430
Буажиро Т. 280, 281, 446

Вебер В. 422—424, 426, 427
Вельтер 182, 482
Вильке 446
Влейгель 433
Вольта А. 132, 269, 274, 317, 318, 414

Гаусс 426
Гаух 433
Гей-Люссак 182, 229, 249, 481, 482
Герарди 157, 333, 359, 375, 387, 424, 484
Герц Г. 448

Д'Аламбер 428
Далибар 446
Декарт Р. 11
Деламбр 416
Де-ля-Рив А. (сын) 329, 412, 419, 420, 473, 476, 483
Де-ля-Рив Ж. 301, 302, 320, 408, 453, 482
Демонферран 357, 396, 422
Десэнь 270
Де-Хааз 425
Дидро 428
Дэви Г. 182, 195, 296, 297, 305, 319, 407, 447, 448
Дюма Ж.-Б. 132, 480

Жиле-де-Ломон 301
Жубер Ж. 417, 475, 477, 478, 482

Земмеринг 237, 482

Иоффе А. Ф. 448

Кеплер 10, 12, 18
Колладон 192

Кравец Т. П. 479
Крошар 393
Крылов А. Н. 472
Кудрявцев П. С. 430
Кулон Ш.-О. 12, 18, 112, 119, 152, 177, 195, 310, 411, 412, 420, 473
Кювье 430

Лагранж 428, 429
Ламэ 477
Лаплас П.-С. 64, 113, 197 198, 236, 416, 420, 428, 474, 482
Ломоносов М. В. 447, 474, 483

Майер И.-Т. 408
Майчелл Дж. 483
Максвелл К. 422, 424, 425, 427
Мекиньон-Марви 303
Можон 408

Нобили 392, 396—398, 403, 483, 484
Ньютон И. 9, 10, 13, 115, 181, 422, 424, 472

Остроградский М. В. 430

Петров В. В. 407, 408, 447
Поггендорф И.-Х. 482
Прево 132, 480
Пуансо 335
Пуассон С.-Д. 18, 190, 191 194, 196, 340, 342, 343, 360, 474, 481, 484
Пулье К.-С. 11, 369, 473

Раттер 407
Рейнгард 433
Романьози 408

Савар Ф. 184, 415, 416, 473, 474, 479
Савари Ф. 51, 114, 182, 322, 333, 395, 420, 476

Тенар Л.-Ж. 229, 481
Томсон 303, 450

Фан-Бек 283, 418, 482
Фан-Марум 446
Фан-Свинден 446
Фарадей М. 118, 127, 153, 160, 165, 293, 294, 296, 300, 319—321, 327, 329, 357, 367, 368, 389, 390, 392, 398, 416, 419, 423, 459, 461, 479, 481, 483, 484
Франклин В. 446, 447
Френель 417, 439
Фурье Ж.-Б.-Ж. 474

Цейзе 433

Швейггер И. 482
Шиллинг П. Л. 414, 482

Эйлер И.-А. 479
Эйлер Л. 116, 428, 479
Эйнштейн 425
Эпинус Ф.-У.-Т. 411, 412, 418, 427, 479
Эрман 117
Эрстед Г.-Х. 11, 117, 128, 226, 230, 256, 261, 263, 265—267, 274, 275, 288, 301, 303, 318—320, 334, 350, 380, 383, 408—410, 419, 425, 426, 429, 440, 447, 449, 473

Юнг Я. 439

Якобсен 433

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Теория электродинамических явлений, выведенная исключительно из опыта. (Перевод Т. Н. Кладо) . . . . 7—220

Электродинамические исследования . . . . 221—404

Труд, представленный королевской Академии наук 2 октября 1820 г. и содержащий резюме докладов, прочитанных в Академии 18 и 25 сентября 1820 г. относительно действий электрических токов. (Перевод проф. Я. Г. Дорфмана) 223

Ответ на письмо г. Фан-Бека относительно нового опыта по электромагнетизму. (Перевод проф. Я. Г. Дорфмана) 283

Краткое изложение новых опытов по электромагнетизму, выполненных различными физиками с марта 1821 г. (Перевод проф. Я. Г. Дорфмана) 315

О воздействии земли на вольтаические проводники. (Перевод Е. М. Шифриной) 325

О взаимодействии вольтаического проводника и магнита. (Перевод Т. Н. Кладо) 331

Письмо к г. д-ру Герарди. Дополнение к исследованию о взаимодействии вольтаического проводника и магнита. (Перевод Т. Н. Кладо) 387

Приложения . . . . 405—490

Возникновение электродинамики Ампера и ее место в истории физики. Проф. Я. Г. Дорфман 407

Краткая биография А.-М. Ампера. Проф. Я. Г. Дорфман . . 428

Опыты, относящиеся к действию электрического конфликта на магнитную стрелку. *Г.-Хр. Эрстед*. (Перевод проф. Я. Г. Дорфмана) 433

Стр.

Опыты, относящиеся к намагничиванию железа и стали действием вольтаического тока. *Ф. Араго.* (Перевод проф. Я. Г. Дорфмана) 440
О воздействии земного шара на подвижной участок вольтаического контура. *А. де-ля-Рив* (сын). (Перевод Е. М. Шифриной) . . . 449
Примечания. (Составил проф. Я. Г. Дорфман) 472
Перечень трудов А.-М. Ампера 485
Литература о жизни и творчестве А.-М. Ампера 488
Именной указатель 489

Печатается по постановлению Редакционно-издательского совета Академии Наук СССР

*

Редактор Издательства *Н. К. Зайчик* Технический редактор *А. В. Смирнова*
Корректор *К. С. Тверитинова*

*

РИСО АН СССР № 5327. Пл. № 8—63В. М 27334. Подписано к печ. 31/III 1954 г. Бумага 70Х92 1/16. Бум. л. 15 3/8. Печ. л. 35.97. Уч.-изд. л. 22.89 + 1 вкл. (0.04 уч.-изд. л.). Тираж 5000. Зак. № 953. Номинал по прейскуранту 1952 г. 18 р. 0.5 к.

1-я типография Издательства АН СССР. Ленинград, В. О., 9 линия, д. 12.