

Е. МАХЪ.

УЧЕНІЕ

ОБЪ

ЭЛЕКТРИЧЕСТВЪ И МАГНИТИЗМЪ

ВЪ ЭЛЕМЕНТАРНОМЪ ИЗЛОЖЕНІИ.

ПЕРЕВОДЪ СЪ НѢМЕЦКАГО

ПОДЪ РЕДАКЦІЕЙ

Л. П. Геймана

Преподавателя Электротехническаго Института.

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.

ТИПОГРАФІЯ МИНИСТЕРСТВА ВНУТРЕННИХЪ ДѢЛЪ.

1894.

*Изъ Почтово-Телеграфнаго Журнала за Мартъ, Апрель, Июль и Декабрь—
1893 г. и Мартъ и Апрель—1894 г.*

ПРЕДИСЛОВІЕ.

Теорія электрическихъ и магнитныхъ явленій, достигшая въ послѣднее время столь значительнаго развитія и усовершенствованія, можетъ быть изложена во всей своей полнотѣ лишь при помощи высшаго анализа. Сочиненія по этой отрасли физики, изданныя Максвеллемъ, Маскаромъ и Жуберомъ, Васки и др., представляютъ собою классическіе образцы научнаго изложенія названныхъ явленій вооруженіи высшей математики.

Но, къ сожалѣнію, указанная зависимость полной теоріи электричества и магнетизма отъ высшаго анализа была причиною тому, что въ элементарныхъ учебникахъ физики предметъ этотъ излагался лишь съ экспериментальной стороны, при чемъ авторы довольствовались описаніемъ отдѣльныхъ явленій, и то далеко не всѣхъ, не пытаясь вывести ихъ какъ необходимыя слѣдствія изъ одного общаго закона и связать такимъ образомъ явленія эти между собою.

Однако, хотя попытка элементарнаго изложенія современнаго ученія объ электричествѣ и магнетизмѣ трудна, но не невозможна. Лучшимъ доказательствомъ этому служитъ изданное въ 1891 году профессоромъ Прагскаго Университета, Махомъ, руководство физики («Leitfaden der Physik für Studierende»), изъ котораго мы предлагаемъ читателямъ переводъ всего отдѣла объ электрическихъ и магнитныхъ явленіяхъ. Не смотря на то, что авторъ пользуется для своихъ выкладокъ только высшей математикой, ни одно изъ послѣднихъ научныхъ завоеваній въ области электричества и магнетизма не упущено имъ: ученіе о магнитныхъ слояхъ и нитяхъ, магнитная индукція и проводимость, распространеніе электрическихъ колебаній, самоиндукція и пр. все это нашло свое мѣсто въ изложеніи и приведено при помощи ученія объ электрическомъ и магнитномъ потенциалѣ въ стройную цѣльную систему. Таково достоинство этого сочиненія.

Что же касается его недостатковъ, если вообще здѣсь можетъ быть примѣнено это выраженіе, то они заключаются глав-

нымъ образомъ въ сжатости изложенія и проистекающей отсюда краткости, а иногда и отсутствіи поясненій при выводѣ одной формулы изъ другой; поэтому физика Маха нельзя рекомендовать начинающимъ или какъ руководство для среднихъ учебныхъ заведеній; но для лицъ, которыя приобрѣли нѣкоторый навыкъ въ выкладкахъ нисшей математики и желаютъ при этомъ запасъ математическихъ знаній составить точное представленіе о современномъ ученіи объ электричествѣ и магнитизмѣ, книга эта можетъ принести несомнѣнную пользу.

Въ руководствѣ Маха принята абсолютная система единицъ, при чемъ отдѣльныя единицы опредѣляются авторомъ постепенно по мѣрѣ надобности непосредственно послѣ введенія понятія о соотвѣтствующей величинѣ. Такимъ образомъ въ ученіи объ электричествѣ и магнитизмѣ Махъ опредѣляетъ лишь электрическія и магнитныя единицы, выводя ихъ изъ механическихъ, опредѣленіе которыхъ было имъ дано въ механическомъ отдѣлѣ курса. Такъ какъ мы печатаемъ переводъ только тѣхъ главъ, въ которыхъ излагается ученіе объ электричествѣ и магнитизмѣ, то, для подготовленія читателя къ пониманію встрѣчающихся въ этомъ ученіи абсолютныхъ единицъ, мы сочли нужнымъ изложить вкратцѣ въ видѣ введенія сущность абсолютной системы единицъ вообще и механическихъ единицъ въ частности.

Остается сказать нѣсколько словъ о самомъ переводѣ. Мы старались подойти возможно ближе къ подлиннику, конечно на сколько это позволяла русская рѣчь. При этомъ немаловажное затрудненіе представляла терминологія, введенная Махомъ въ свое руководство и основанная на отрѣшеніи отъ всякихъ гипотетическихъ представленій о сущности электричества и магнитизма. Такимъ образомъ термины: электричество, электрический токъ и т. п., въ основаніи которыхъ лежитъ представленіе о какой-то жидкости и объ ея движеніи, изгнаны имъ изъ употребленія и замѣнены новыми, выражающими собою понятіе объ извѣстномъ состояніи тѣла. На сколько удачно мы перевели эти термины на русскій языкъ пусть судятъ читатели.

Редакторъ.

ВВЕДЕНИЕ.

Основанія ученія объ абсолютной системѣ единицъ.

Основные и производныя единицы.

Для измѣренія каждой изъ встрѣчающихся въ физикѣ величинъ можно выбрать произвольную единицу; но можно построить систему единицъ такъ, что онѣ будутъ находиться другъ отъ друга въ известной зависимости, при чемъ придется выбрать нѣкоторыя единицы произвольно и на нихъ уже строить всю систему остальныхъ единицъ. Оказывается возможнымъ логически вывести всѣ единицы въ определенной зависимости другъ отъ друга, если произвольно выбрать три единицы. Эти три единицы называются *основными*, всѣ же остальные, зависящія отъ нихъ *производными*, единицами. Система единицъ, выведенная изъ трехъ произвольныхъ единицъ такимъ образомъ, чтобы въ формулахъ, связывающихъ между собою величины, исчезли коэффициенты пропорциональности, называется *абсолютною системою единицъ*. Три основныя единицы можно выбрать какія угодно не только по своему роду, но еще и по абсолютной величинѣ и сообразно выбору ихъ получится опредѣленная абсолютная система единицъ; мы однако будемъ разсматривать только ту систему, въ которой условно принимаются за основныя единицы—единицы длины, времени и массы и при томъ за единицу длины—сантиметръ, массы—граммъ *) и времени—секунда. Эту абсолютную систему единицъ принято для краткости называть С.Г.С. системою, т. е. системою, основанною на единицахъ длины, массы и времени и спеціально на сантиметрѣ, граммѣ и секундѣ.

Теперь постараемся послѣдовательно получить изъ принятыхъ нами основныхъ единицъ производныя единицы для величинъ, встрѣчающихся въ механикѣ, руководясь при этомъ, какъ мы уже сказали, стремленіемъ,

*) Единица массы граммъ есть масса кубическаго сантиметра воды при 4°Ц., а граммъ, французская единица вѣса—вѣсъ того же объема воды.

чтобы въ формулахъ, связывающихъ величины между собою и служащихъ для опредѣленія численнаго значенія одной изъ величинъ по заданнымъ численнымъ значеніямъ остальныхъ, коэффициенты пропорціональности исчезли, т. е. сдѣлались равными единицѣ.

1) *Скорость*. Возьмемъ формулу для скорости v въ равномерномъ движеніи, выражающую, что скорость эта прямо пропорціональна пройденному пространству и обратно пропорціональна времени, въ теченіи котораго это пространство пройдено:

$$v = C \frac{l}{t},$$

гдѣ t —время, въ теченіи котораго было пройдено пространство l , а C —коэффициентъ пропорціональности. Чтобы $C = 1$, можно выбрать произвольно только единицы для двухъ величинъ, при чемъ единица для третьей величины уже этимъ выборомъ опредѣляется; но въ данномъ случаѣ единицы для l и t уже выбраны именно сантиметръ и секунда; поэтому *C. G. S. единицею скорости есть та скорость, съ которою тьло въ одну секунду, двигаясь равномерно, проходитъ одинъ сантиметръ.*

2) *Ускореніе*. Формула для ускоренія w въ равнопеременномъ движеніи имѣетъ видъ:

$$w = C \frac{v}{t},$$

гдѣ v есть измѣненіе скорости за время t . Разсуждая подобно предыдущему и принимая во вниманіе, что единица для t уже выбрана, а для v только что опредѣлена въ п. 1, найдемъ что *C. G. S. единица ускоренія есть такое ускореніе, при которомъ скорость черезъ каждую секунду измѣняется на C. G. S. единицу скорости.*

3) *Сила*. Формула, служащая для опредѣленія единицы силы есть:

$$f = C. m. w,$$

гдѣ f —сила, m —масса, на которую эта сила дѣйствуетъ, w —ускореніе, сообщаемое силою f массѣ m . Разсуждая подобно предыдущему, найдемъ: *C. G. S. единица силы есть такая сила, которая, дѣйствуя на массу граммъ, сообщаетъ ей C. G. S. единицу ускоренія.* Эта единица называется *динъ*.

4) *Работа*. Опредѣляя единицу работы изъ формулы:

$$a = C. f. l,$$

гдѣ a —работа, произведенная силою f , на разстояніи l (при чемъ на-

правление силы совпадаетъ съ направлениемъ движенія), найдемъ: *C. G. S.* единица работы есть работа одного дина при перемещеніи точки приложения по направленію силы, равному одному сантиметру; эта *C. G. S.* единица работы называется *эргъ*.

Объ измѣреніи единицъ.

Абсолютныя величины производныхъ единицъ очевидно зависятъ отъ абсолютныхъ величинъ основныхъ единицъ и подѣ *измѣреніемъ* производной единицы подразумѣваютъ символическое выраженіе, показывающее родъ этой зависимости. Пусть напр. *A* представляетъ собою абсолютную величину какой-нибудь производной единицы, а *L*, *M* и *T*—таковыя же величины основныхъ единицъ: длины, массы и времени. Тогда формула

$$(\text{Измѣреніе } A) = L M^{3/2} T^{-2}$$

показываетъ, что абсолютная величина единицы *A* прямо-пропорціональна: первой степени абсолютной величины единицы длины, степени $3/2$ абсолютной величины единицы массы и обратно пропорціональна квадрату абсолютной величины единицы времени. Символь $L M^{3/2} T^{-2}$ называется измѣреніемъ единицы *A*.

Легко усмотрѣть, что абсолютныя величины единицъ находятся въ такой зависимости между собою, какая существуетъ между соответствующими измѣряемыми величинами въ силу формулы, связывающей эти послѣднія величины и на положеніи въ каковой формулѣ коэффиціента пропорціональности равнымъ единицѣ послѣдовалъ самый выборъ производной единицы.

На основаніи сказаннаго будемъ имѣть:

$$(\text{Измѣреніе ед. скор.}) = L T^{-1} \dots \dots \dots (1)$$

Точно также

$$(\text{Измѣреніе ед. ускор.}) = (\text{ед. скор.}) T^{-1} \dots \dots (2)$$

но, на основаніи (1), единица скорости прямо пропорціональна единицѣ длины и обратно пропорціональна единицѣ времени; поэтому изъ (1) и (2) получимъ:

$$(\text{Измѣр. ед. ускор.}) = L T^{-2} \dots \dots \dots (3).$$

Разсуждая подобно предыдущему, найдемъ:

$$(\text{Измѣр. ед. силы}) = L M T^{-2} \dots \dots \dots (4) \text{ и}$$

$$(\text{Измѣр. ед. работы}) = L^2 M T^{-2} \dots \dots \dots (5).$$

Символы, стоящіе въ правой части равенствъ: 1, 3, 4 и 5, служатъ также и для обозначенія самой единицы. вмѣсто того, чтобы писать:

$$f = 10 \text{ (ед. силы въ системѣ футъ, дециграмъ, минута)}$$

пишутъ:

$$f = 10 \text{ [(футъ) (децигр.) (минута)}^{-2}]$$

Или вмѣсто того, чтобы писать:

$$a = \frac{1}{3600} \text{ (С. G. S единиць работы)}$$

пишутъ:

$$a = \frac{1}{3600} \text{ (см.}^2 \text{ гр. сек.}^{-2}\text{)} \dots \dots \dots (6)$$

Такое обозначеніе единицъ особенно выгодно, какъ мы сейчасъ увидимъ, въ случаѣ перехода отъ одной системы единицъ въ другой.

О переходѣ отъ одной системы единицъ къ другой.

Покажемъ на частномъ примѣрѣ, какъ дѣлается этотъ переходъ. Пусть работу a равенства 6) требуется выразить не въ С. G. S ед. работы, а въ единицахъ работы такой системы, въ которой за основныя единицы приняты: миллиметръ, миллиграмъ и минута. Поставимъ въ выраженіи 6) въ символѣ единицы работы вмѣсто сантиметра равные ему 10 миллиметровъ, вмѣсто грамма равные ему 1000 миллиграммовъ и вмѣсто секунды равную ей $\frac{1}{60}$ минуты, получимъ:

$$a = \frac{1}{3600} \left[(10 \text{ ммиллимет.})^2 (1000 \text{ миллигр.}) \left(\frac{1}{60} \text{ мин.} \right)^{-2} \right]$$

Если будемъ теперь временно разсматривать символъ, заключенный въ скобки [], какъ алгебраическое сочетаніе дѣйствительныхъ величинъ, то можемъ написать:

$$a = \frac{1}{3600} \frac{10^2 \cdot 1000}{60^{-2}} \left[\text{ммиллимет.}^2 \text{ миллигр. мин.}^{-2} \right] \text{ или}$$

$$a = 100000 \text{ (ммиллимет.}^2 \text{ миллигр. мин.}^{-2}\text{)}$$

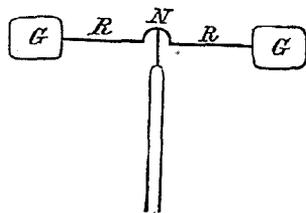
Въ послѣднемъ равенствѣ то, что заключено въ скобки, слѣдуетъ опять разсматривать, какъ символъ единицы работы въ требуемой системѣ единицъ.

І. Объ электричествѣ.

Электрическое состояніе.

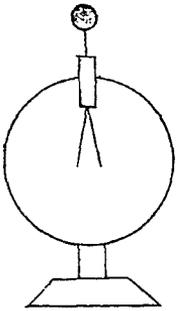
§ 1. Очень многія тѣла получаютъ послѣ тренія способность притягивать легкіе предметы. Съ явленіемъ этимъ были знакомы уже въ древности (Θалесъ Милетскій). Палочка сургуча, натертая сукномъ, притягиваетъ золотыя листочки (фиг. 1), поддерживаемыя стеклянной трубочкой RR, вращающейся на остріѣ N. Герике впервые замѣтилъ, что въ данномъ случаѣ послѣ прикосновенія происходитъ отталкиваніе между G и сургучемъ, а золотыя листочки въ свою очередь получаютъ способность притягивать легкія тѣла. И такъ работой тренія можно привести тѣла въ своеобразное состояніе (электрическое), въ которомъ они сами получаютъ способность производить работу, выражающуюся, какъ полагалъ Дюфэ (Dufay), притяженіемъ ненаэлектризованныхъ и отталкиваніемъ наэлектризованныхъ тѣлъ. Это состояніе можетъ быть передано однимъ тѣломъ другому, но только на счетъ состоянія перваго. Если въ этому еще присовокупить наблюдаемое при этомъ явленіи перескакиваніе искръ, то легко понять, какъ могло возникнуть представленіе о существованіи въ каждомъ тѣлѣ нѣкотораго количества неизвѣстнаго (переносимаго) вещества, обуславливающаго это состояніе, т. е. представленіе объ электрической жидкости. Франклинъ, напримѣръ, говоритъ объ электрическомъ огнѣ, заряжаетъ лейденскія банки веществомъ молніи и т. д.

Фиг. 1.



Электроскопъ.

Фиг. 2.

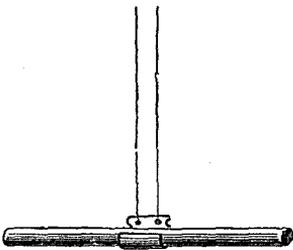


§ 2. Если тѣло устроено такимъ образомъ, что оно легко обнаруживаетъ свое электрическое состояніе, то его называютъ электроскопомъ. Удобную и простую форму представляетъ электроскопъ съ золотыми листочками (фиг. 2). Если коснуться шарика его наэлектризованнымъ тѣломъ, то вслѣдствіе взаимнаго отталкиванія золотые листочки разойдутся.

Два рода электричества.

§ 3. Стержень, подвѣшенный свободно (фиг. 3), сначала притягивается наэлектризованнымъ стержнемъ, а затѣмъ уже отталкивается имъ.

Фиг. 3.



Стержень изъ роговаго каучука, потертый лисьимъ мѣхомъ, отталкивается отъ тако-го-же стержня, потертаго тѣмъ же способомъ. Если потереть стеклянный стержень амальгамированной кожей, то онъ отталкивается отъ другаго стекляннаго стержня, потертаго подобнымъ же образомъ.

Фактами этими подтверждается положеніе Дюфэ (§ 1). Но когда Дюфэ пожелалъ доказать общность своего положенія большимъ рядомъ разнообразныхъ опытовъ, его поразило открытіе, что потертый смоляной стержень (изъ роговаго каучука) притягивался потертымъ стекляннымъ стержнемъ. Вслѣдствіе того Дюфэ былъ принужденъ допустить: 1) что существуетъ два рода электричества, стеклянное и смоляное и что 2) однородныя электричества отталкиваются, а разнородныя притягиваются.

Какъ при помощи натертаго стержня изъ роговаго каучука, такъ точно и стекляннымъ натертымъ стержнемъ можно *зарядить* электроскопъ, т. е. заставить равойтись золотые листочки его. Но при помощи перваго заряда возможно также уничтожить второй. Такимъ образомъ эти два электрическія состоянія (или вещества) относятся другъ къ другу, какъ

положительныя и отрицательныя величины. Одно и то же тѣло, натертое различными тѣлами, можетъ обнаружить то одинъ, то другой родъ электричества. Поэтому въ настоящее время уже не говорятъ объ электриствѣ стекла и смолы, но только о положительномъ и отрицательномъ электриствѣ.

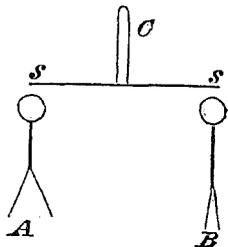
Изъ наблюдений (Ватсона, Франклина и Дюфэ) выяснилось, что изъ двухъ взаимно трущихся тѣлъ одно электризуется всегда положительно, другое отрицательно и при томъ такъ, что оба состоянія уничтожаются другъ друга при соединеніи зарядовъ. Поэтому, придерживаясь только что упомянутого представленія, мы должны допустить, что положительное и отрицательное электричество образуется всегда въ одинаковыхъ количествахъ.

Проводники и непроводники.

§ 4. Стекланный стержень только въ натертомъ мѣстѣ приходитъ въ электрическое состояніе. Но если прикоснуться наэлектризованнымъ тѣломъ къ одному концу металлическаго стержня, подвѣшеннаго на шелковинкахъ или удерживаемаго стеклянною ручкой, то тотчасъ-же и другой конецъ послѣдняго приходитъ въ электрическое состояніе. И такъ металлы имѣютъ свойство передавать электрическое состояніе отъ одной частицы къ другой, стекло же этимъ свойствомъ не обладаетъ (Грей).

Поставимъ заряженный электроскопъ (фиг. 4) А рядомъ съ такимъ-же незаряженнымъ В. Если соединимъ шарикъ стержнемъ S съ стеклянною ручкой С, то зарядъ тотчасъ-же раздѣлится между А и В, если только стержень S сдѣланъ изъ металла. Если же онъ стекланный, то зарядъ останется въ А. Если зарядимъ А положительно, а В отрицательно до одинаковаго отклоненія золотыхъ листочковъ, то при соединеніи А и В металлическимъ стержнемъ листочки тотчасъ-же сходятся.

Фиг. 4.



На основаніи сказаннаго металлы называются проводниками, стекло же и другія подобныя ему въ этомъ отношеніи тѣла—непроводниками, или изоляторами.

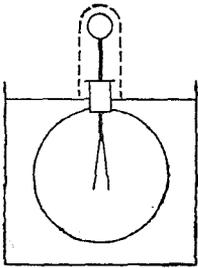
Имѣются хорошіе проводники, дурные проводники и полупроводники (дерево, бумага). Плавающее стекло—проводникъ, а ледъ при -20° Ц.—изоляторъ. Только что отколотый кусокъ слюды представляетъ проводникъ, но по прошествіи нѣкотораго времени дѣлается непроводникомъ.

Заряженіе съ поверхности.

§ 5. Ле-Монье (Le Monnier) нашелъ, что полый внутри проводникъ и массивный одинаковой съ первымъ формы и величины, при одинаковой затратѣ работы на наэлектризованіе каждаго изъ нихъ, заряжаются одинаково сильно. Отсюда онъ вывелъ заключеніе, что электрическій зарядъ распространяется лишь по поверхности. Если представить себѣ зарядъ подвижнымъ и частицы его взаимно отталкивающимися, то можно а priori предвидѣть, что частицы удалятся на возможно далекое разстояніе, то есть, что зарядъ накопится на поверхности тѣла.

Берутъ небольшой чувствительный электроскопъ (фиг. 5) и укрѣп-

Фиг. 5.



ляютъ его въ цилиндрическомъ стеклянномъ сосудѣ. Электроскопъ продолжаетъ быть чувствительнымъ даже въ томъ случаѣ, если наполнимъ сосудъ водою. Но если мы надѣнемъ металлическій колпакъ (обозначенный пунктиромъ), то золотыя листочки будутъ находиться внутри проводника (вода + колпакъ + золотыя листочки). Въ этомъ случаѣ отъ натертаго стержня изъ роговаго каучука можно получить перескакиваніе искры къ электроскопу и обратно

извлечь таковую изъ электроскопа, причемъ золотыя листочки каждый разъ останутся въ покоѣ, что и доказываетъ отсутствіе электричества во внутреннихъ частяхъ проводника, каковыми частями служатъ въ этомъ опытѣ золотыя листочки.

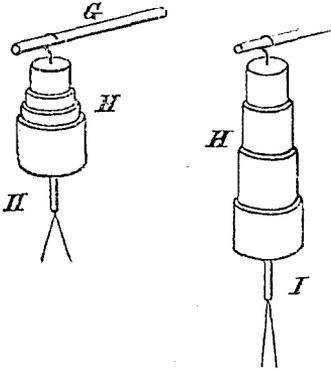
При увеличеніи поверхности одного и того-же проводника напряженіе заряда нѣкоторой опредѣленной части его замѣтно уменьшается, что замѣчается по уменьшающемуся отклоненію золотыхъ листочковъ электроскопа при послѣдовательномъ вытягиваніи помощью стекляннаго стержня G (фиг. 6) ряда входящихъ другъ въ друга металлическихъ цилиндровъ, насаженныхъ концентрически на стержнѣ электроскопа.

Благодаря основному свойству однородныхъ зарядовъ, выступающія части какаго нибудь проводника (острія) зарядятся сильнѣе прочихъ. Поэтому то острія способствуютъ скорѣйшему разряженію въ окружающія тѣла. (Гордонъ, Франклинъ).

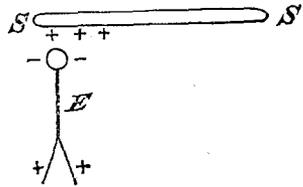
Индукція.

§ 6. Золотые листочки электроскопа E (фиг. 7) расходятся, если приблизиться въ нему съ наэлектризованнымъ стержнемъ S , не касаясь

Фиг. 6.



Фиг. 7.



самого прибора. При удаленіи стержня S золотые листочки опять опадаютъ, а это означаетъ, что зарядъ листочковъ долженъ былъ уничтожиться равнымъ, но противоположнымъ по знаку зарядомъ (другихъ частей электроскопа).

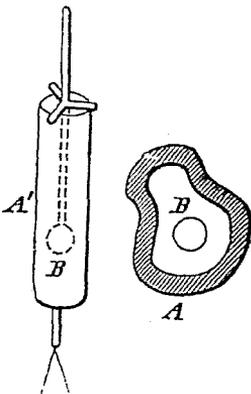
Благодаря тому, что равные, но противоположные по знаку заряды не могутъ зарядить тѣло, можно себѣ представить, что наэлектризованное тѣло обладаетъ одновременно равными противоположными зарядами, которые, на основаніи закона Дюфэ (§ 3), при приближеніи наэлектризованнаго тѣла, какъ это показано на фиг. 7, разъединяются, причемъ разноименное электричество движется на встрѣчу въ тѣлу, одноименное же удаляется. Это явленіе, замѣченное Греемъ, называется индукціей наэлектризованнаго тѣла на ненаэлектризованное.

Если ввести внутрь закрытаго со всѣхъ сторонъ (или почти со всѣхъ сторонъ) проводника A , напр. въ глубокой сосудъ A' , навинченный

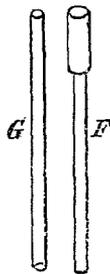
на электроскопъ (фиг. 8), заряженный (напр. + q) проводникъ В, не касаясь А, то на вѣшной сторонѣ появляется одноименное электричество, а на внутренней сторонѣ разноименное. Эти заряды равны между собою, ибо золотые листочки сходятся при удаленіи В. Величина и распредѣленіе вѣшняго заряда не зависитъ отъ положенія В внутри А: при перемѣщеніи В въ сосудѣ листочки остаются раздвинутыми на одинъ и тотъ же уголъ. Тоже самое имѣетъ мѣсто, если тѣломъ В коснуться А. Если послѣ того вынуть В (незаряженное по § 5), то отклоненіе останется всетаки безъ измѣненія. Отсюда видно, что при посредствѣ В уничтожается противоположный зарядъ внутренней поверхности сосуда, причемъ одноименный зарядъ наружной остается безъ измѣненія. Оба заряда были слѣдовательно по величинѣ равны заряду въ В (опытъ Фарадея).

Конецъ G (фиг. 9) стекляннаго стержня натирается кускомъ

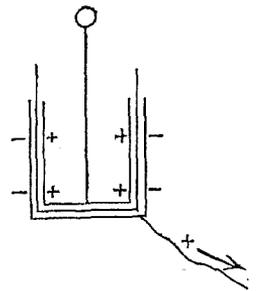
Фиг. 8.



Фиг. 9.



Фиг. 10.



амальгамированной кожи, насаженнымъ на концѣ такого же стекляннаго стержня F. Какъ G, такъ и F, введенные въ А, даютъ одинаковое отклоненіе золотыхъ листочковъ. Введенные одновременно они никакого отклоненія не производятъ. При треніи образовались слѣдовательно равныя, но противоположныя по знаку заряды (§ 3).

Лейденская банка.

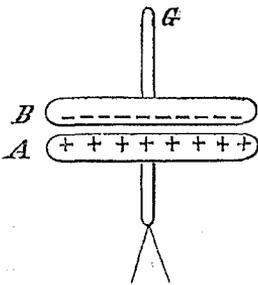
§ 7. Явленія въ лейденской банкѣ, открытой случайно при электризаціи воды въ бутылкѣ (фиг. 10) (Клейстъ, Мушенбрэкъ), были объяснены

Франклиномъ при помощи индукціи. Положительный зарядъ внутренней обкладки дѣйствуетъ черезъ вліяніе на вѣшнюю обкладку, причемъ почти равный отрицательный зарядъ притягивается, а почти равный положительный отталкивается въ землю, съ которою соединена эта обкладка. Если же соединимъ обѣ обкладки проводникомъ, то банка разряжается*).

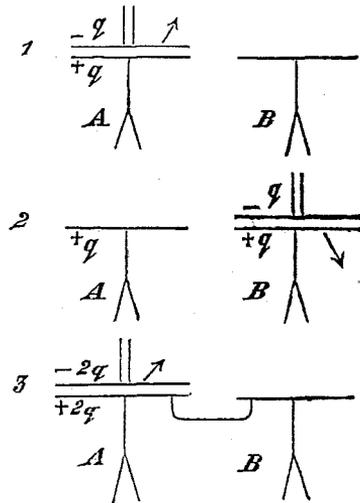
Увеличеніе заряда.

§ 8. Если на лакированную сверху пластинку А (фиг. 11) электро-скопа, заряженнаго положительно, помѣстить^{*)} пластинку В, лакированную снизу и снабженную изолирующей ручкой Г, то на эту пластинку производится индукція. Если коснуться В пальцемъ, то положительный зарядъ уходитъ, листочки сходятся и распределеніе зарядовъ будетъ такое какъ показано на фиг. 11. Снявъ пластинку В, можно удалить изъ

Фиг. 11.



Фиг. 12.



нея отрицательный зарядъ, послѣ вторичнаго прикосновенія къ А опять положительный и т. д. Такимъ образомъ однократное заряженіе А можетъ служить для полученія сколь угодно большаго положительнаго и отрицательнаго заряда изъ В. Аналогичное явленіе, хотя и болѣе сложное, имѣетъ мѣсто въ электрофорѣ Вольты.

Въ электроскопѣ (фиг. 12) А (1), имѣющемъ зарядъ $+q$, верхняя

*) Лейденская банка, обкладки которой представляютъ собою не концентрическія цилиндрическія поверхности, а параллельныя плоскости, называется Франклиновой доской.

покрывающая пластинка, соединенная съ землей, получить зарядъ — q . Если послѣднюю помѣстить на В (2), причемъ В соединяють съ землею, то В получитъ также положительный зарядъ $+q$. Если соединимъ А и В проводникомъ между собою (3), причемъ верхняя покрывающая пластинка соединена съ землею, то въ А зарядъ будетъ $+2q$, а на пластинкѣ — $2q$. Это увеличеніе или вѣрнѣе сказать удваиваніе можетъ быть повторено сколько угодно разъ (Вольта, Кавалло, Беннетъ).

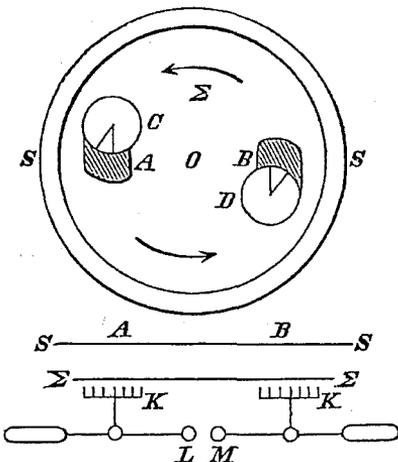
Электрическія машины.

§ 9. Для удобнаго полученія электричества въ большихъ количествахъ пользуются электрическими машинами.

Употребляющіяся еще въ настоящее время машины тренія, состоятъ изъ стекляннаго круга, вращающагося около оси и трущагося о подушку, покрытую амальгамой, отрицательное электричество которой уводится въ землю, въ то время какъ положительное круга всасывается металлическими остріями и направляется въ изолированный металлическій шаръ, называемый кондукторомъ. Можно также соединить кондукторъ съ землею, а на другомъ, соединенномъ съ подушками, накопить отрицательное электричество этихъ послѣднихъ.

Пусть въ плоскости чертежа находится стеклянный кругъ SS (фиг. 13) съ двумя бумажными обкладками А и В, отъ которыхъ бумажные же язычки

Фиг. 13.



входятъ въ круглыя вырѣзанныя въ стеклѣ отверстія С и D. Передъ кругомъ SS находится другой $\Sigma\Sigma$, вращающійся около O по направленію, указанному стрѣлками. Передъ этимъ послѣднимъ кругомъ расположены двѣ гребенки К (какъ разъ противъ бумажныхъ обкладокъ), соединенныя металлически съ шариками L и M . Если наэлектризуемъ А, напр. отрицательно и приведемъ въ соприкосновеніе шарики L и M , то В при вращеніи круга наэлектризуется положительно. Если же разъединимъ L и M , то между ними послѣдуетъ

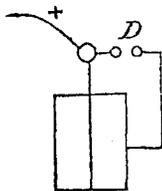
быстро рядъ искръ. При этомъ А и В дѣйствуютъ какъ пластинки двухъ наэлектризованныхъ разноименно электроскоповъ, кругъ γ , какъ покрывающая пластинка, помѣщаемая попеременно на одинъ изъ послѣднихъ (§ 8). Описанная здѣсь индуктивная машина Гольца представляетъ поэтому въ сущности ничто иное, какъ вращающійся увеличитель.

Счетная банка. Количество. Потенціалъ. Емкость.

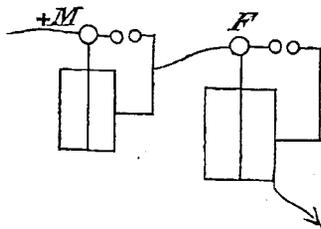
§ 10. Пусть внѣшняя и внутренняя обкладки лейденской банки (фиг. 14) соединены съ шариками, помѣщенными на опредѣленномъ разстояніи D другъ отъ друга. Если банку постепенно заряжать, то при опредѣленномъ зарядѣ она разрядится въ видѣ искры длиною D . Продолжая вращеніе электрической машины, мы по числу саморазряднѣй банки можемъ судить о *количествѣ* образованнаго электричества. Такая банка называется поэтому *счетной*.

Если на внутреннюю обкладку счетной банки M притекаетъ количество электричества $+q$, то внѣшняя обкладка получитъ $-q$ и если она изолирована, то на внутреннюю обкладку банки F (фиг. 15) прите-

Фиг. 14.



Фиг. 15.

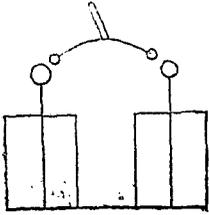


четъ количество $+q$. Если q будетъ количество электричества, потребное для саморазряднѣй банки M , то F послѣ n разряднѣй M заключаетъ количество электричества, равное nq . Счетная банка слѣдовательно даетъ намъ возможность судить о количествѣ электричества, находящагося въ банкѣ F .

Чѣмъ больше будетъ количество накопленнаго въ банкѣ F электричества, тѣмъ больше можно сдѣлать и длину перескакивающихъ разрядныхъ искръ этой банки. Электрическое состояніе внутренней обкладки измѣняется съ увеличеніемъ количества электричества аналогично тому, какъ возрастаетъ температура тѣла вслѣдствіе притока тепла. Между внутренними обкладками двухъ банокъ не происходитъ никакого обмѣна

электричества, если только онъ заряженъ одноименно и до одинаковой длины разряжающихъ искръ. Напротивъ, возможно соединеніемъ внутреннихъ обкладокъ двухъ банокъ, изъ которыхъ одна заряжена сильнѣе другой, перевести электричество въ менѣе заряженную, если только будутъ соединены также и внѣшнія обкладки (фиг. 16). Послѣ этого обѣ банки будутъ заряжены до одинаковой длины разряжающихъ искръ.

Фиг. 16.



Тепловое состояніе измѣряется температурой; аналогично этому электрическое состояніе указывается *потенціаломъ* (§ 15).

Если банки М и F снабжены разрядными шариками (фиг. 15), помѣщенными на равныхъ разстояніяхъ и если послѣ n зарядовъ электричества, перешедшихъ черезъ М, произойдетъ одинъ лишь разрядъ въ F, то послѣдняя, при одинаковой длинѣ разрядной искры (одинаковомъ потенциалѣ), вмѣщаетъ n разъ больше электричества нежели М: *емкость F въ n разъ больше емкости M.*

Диэлектрическая постоянная.

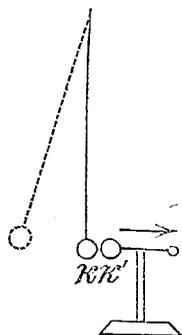
§ 11. Примѣнимъ вмѣсто банки М Франклинову доску, изоляторъ которой состоитъ изъ сѣрной пластинки. Достаточно n разряженій доски, чтобы получить одно разряженіе F. Если же удалимъ сѣрную пластинку и оставимъ между обкладками М, не мѣняя относительнаго ихъ расположенія, воздухъ, то потребуется уже m разряженій доски, чтобы получить одно разряженіе F. Емкость конденсатора съ сѣрой, слѣдовательно будетъ въ $\frac{m}{n}$ разъ (приблизительно 3 раза) больше емкости воздушнаго конденсатора одинаковыхъ размѣровъ и одного вида. Число $\frac{m}{n}$ называется *диэлектрической постоянной сѣры.*

Законъ обратной пропорціональности квадратамъ разстояній.

§ 12. Пусть маленькій легкій и проводящій шарикъ k (фиг. 17), привѣшенный бифлярно на очень длинныхъ шелковыхъ нитяхъ, касается такого же шарика k' на изолирующей подставкѣ. Если наэлектризуемъ оба шарика (одинаковымъ электричествомъ), то подвижной отойдетъ отъ неподвижнаго на длину a. Слагающая силы тяжести (приблизительно

пропорціональная а) уравнивается исходящимъ изъ k' отталкиваніемъ. Разстояніе центровъ пусть будетъ b . Если отодвинемъ k' по направленію стрѣлки, то отклоненіе k уменьшается и именно будетъ $\frac{a}{4}$, $\frac{a}{9}$. . . , если разстояніе центровъ, наблюдаемое по шкалѣ, помѣщенной за шариками, возрастаетъ до $2b$, $3b$ и т. д. (Одстрель). Отталкиваніе одинаково наэлектризованныхъ тѣлъ слѣдовательно *обратно пропорціонально квадрату ихъ разстояній*.

Фиг. 17.



Кулонъ обстоятельными опытами (съ крутильными вѣсами) доказалъ, что не только силы электрическихъ отталкиваній, но и притяженій обратно пропорціональны квадратамъ разстояній взаимодействующихъ зарядовъ. Для доказательства былъ имъ примѣненъ способъ колебаній.

Такъ какъ электрическій зарядъ располагается только по поверхности (§ 5) и на свободномъ шарѣ распределенъ совершенно равномерно, то, благодаря закону обратныхъ квадратовъ и только для него одного, индукція на внутреннюю точку = 0. При существованіи казоголибо другого закона, внутри шара должно было бы произойти разведеніе электричества и такимъ образомъ возникли бы электрическіе заряды, распределенные по концентрическимъ шаровымъ поверхностямъ. Законъ поверхностнаго распределенія не имѣлъ бы уже тогда мѣста. Опыты, описанные въ § 5, представляютъ поэтому самое убѣдительное доказательство закона Кулона.

Количество электричества.

§ 13. Если коснуться шарика k' (фиг. 17) въ то время какъ онъ отталкиваетъ k , совершенно одинаковымъ шарикомъ k'' , то k' и k'' окажутся въ отдѣльности, при томъ же разстояніи отъ k , только половину прежней отталкивательной силы. вмѣстѣ взятые они произведутъ такое же отталкиваніе, какъ прежде одинъ шарикъ k' . Если коснуться k равнымъ шарикомъ k_1 , то отталкивательная сила опять равна половинѣ. Это раздѣленіе электрической силы (при сохраненіи постоянства суммы частей) будетъ нагляднѣе, если вообразимъ себѣ неизмѣнное количество электричества, переходящее частями изъ одного тѣла въ другое (сравн. §§ 1, 4, 10). Такое представленіе можетъ быть примѣнено съ выгодой, хотя его не слѣдуетъ понимать въ буквальномъ смыслѣ.

Единицей количества электричества мы называемъ зарядъ, дѣйствующій на равный ему и находящійся на разстояніи 1 см. съ силою въ одинъ динавь. Количество электричества q поэтому дѣйствуетъ на единицу количества электричества, находящуюся на разстояніи 1 см., съ силою q динавь. Количества электричества q и q' дѣйствуютъ другъ на друга на разстояніи r (см.) съ силою $f = \frac{q q'}{r^2}$ (въ динахъ) (§ 12).

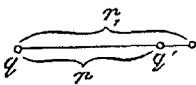
Если $q = q'$, то $f = \frac{q^2}{r^2}$ и $q = r \sqrt{f}$ въ гр. $\frac{1}{2}$ сант. $\frac{3}{2}$ сек. $^{-1}$.

Вообразимъ два небольшихъ шарика по 1 гр. вѣсомъ, подвѣшенныхъ къ нитямъ въ 981 сантиметръ длиною и касающихся между собою. Если зарядимъ каждый изъ нихъ количествомъ электричества $= 1$, то они разойдутся на 1 сант. (разстояніе между центрами).

Если вообразимъ проводникъ разрѣзаннымъ на мелкія части и станемъ приближать ихъ помощью изолированныхъ щипцовъ къ шарикъ съ единичнымъ количествомъ электричества на разстояніи 1 сант., то все количество электричества въ проводникѣ измѣрится суммой наблюдаемыхъ при этомъ въ отдѣльности силъ.

Работа электричества.

§ 14. Два одноименныхъ количества электричества q и q' , (фиг. 18), находящихся на разстояніи r , отталкиваются съ силою $\frac{q q'}{r^2}$.



Если они разойдутся на очень малую длину $(r_1 - r)$, то при этомъ совершится работа которая выражается формулой $\frac{q q'}{r r_1} (r_1 - r) = q q' \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} \right)$,

ибо силы, дѣйствующія на разстояніи $(r_1 - r)$, заключаются между весьма близкими другъ къ другу предѣлами $\frac{q q'}{r^2}$ и $\frac{q q'}{r_1^2}$. Слѣдовательно, если такимъ образомъ удалимъ q' маленькими скачками на безконечное разстояніе $\left(\frac{1}{r_1} = 0 \right)$, то совершенная при этомъ работа будетъ $\frac{q q'}{r}$. Ту же самую работу нужно затратить, если q приблизить къ q' изъ весьма большаго (безконечнаго) разстоянія до разстоянія r .

Потенціалъ. Поверхности уровня. Линіи силъ.

§ 15. Та работа, которую слѣдуетъ затратить, чтобы количество положительнаго электричества $= 1$ перенести изъ безконечности въ точку P ,

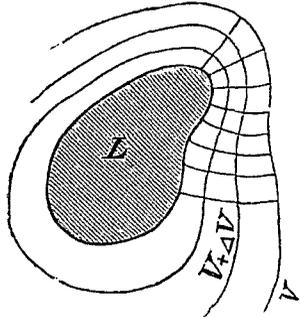
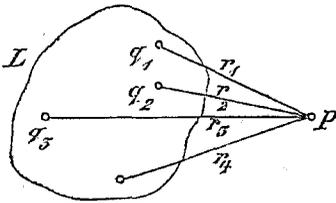
называется *потенціаломъ въ этой точкѣ*. Если точка находится на разстояніи r отъ массы q , то потенциалъ будетъ $\frac{q}{r}$. Если r_1 r_2 r_3 . . . разстоянія этой точки отъ положительныхъ зарядовъ q_1 q_2 q_3 . . . положительно наэлектризованнаго проводника или изолятора L (фиг. 19), то потенциалъ въ точкѣ P выразится черезъ

$$V = \frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} + \frac{q_3}{r_3} + \dots = \Sigma \frac{q}{r}.$$

Съ приближеніемъ P въ L величина потенциала V , вообще говоря, возрастаетъ. Если соединимъ всѣ точки, въ которыхъ потенциалъ имѣетъ одну и ту же величину, то получимъ *поверхность уровня* (обхватывающую большую часть L) (фиг. 20).

Фиг. 20.

Фиг. 19.



Если передвинемъ количество $= +1$ по поверхности уровня, то измѣненія въ работѣ (въ величинѣ потенциала) не произойдетъ, т. е. касательная къ поверхности уровня слагающая силы $= 0$, другими словами, вся сила, дѣйствующая на количество $+1$, перпендикулярна къ элементу поверхности уровня. Линіи, нормально пересѣкающія поверхности уровней и имѣющія поэтому направленіе дѣйствующихъ силъ, называются *линіями силъ*. Пространство, ограниченное рядомъ линій силъ, называется *трубкою силъ* (§ 23).

Перемѣщеніе количества $+q$ съ поверхности, соотвѣтствующей потенциалу V_1 , на поверхность меньшаго потенциала V_2 даетъ намъ работу $q(V_1 - V_2)$. При перемѣщеніи количества $+1$ на разстояніи ΔS съ поверхности уровня, соотвѣтствующей величинѣ потенциала V , до другой, соотвѣтствующей весьма близкому значенію $V + \Delta V$, по нормальному направленію требуется преодолѣть силу p и произвести работу $p \Delta S = \Delta V$. Работа была бы та же самая, если бы перемѣщеніе происходило по на-

клонной къ нормали. Отсюда получимъ для силы, дѣйствующей на количество $+1$, величину $p = \frac{\Delta v}{\Delta S}$ (равную величинѣ паденія потенціала). т. е. если проведемъ рядъ весьма близкихъ другъ къ другу поверхностей уровня, соответственныхъ величинамъ потенціаловъ которыхъ $V, V + \Delta V, V + 2 \Delta V$ и т. д., то дѣйствующія силы вездѣ будутъ обратно пропорціональны разстояніямъ сосѣднихъ поверхностей другъ отъ друга.

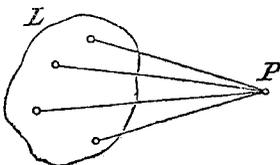
Свойство проводниковъ.

§ 16. Проводникъ только въ такомъ случаѣ будетъ въ электрическомъ равновѣсїи, если электричество (которое вполнѣ подвижно въ проводникахъ) не испытываетъ внутри его напора и слѣдовательно, если при перемѣщенїи въ проводникѣ электричества не производится работа, другими словами, если потенціалъ во *всѣхъ проводникѣхъ имѣетъ одну и ту же величину*. Изъ этого слѣдуетъ, что поверхность проводника есть поверхность уровня, соответствующая величинѣ потенціала проводника.

Если соединимъ два проводника, находящихся при различныхъ потенціалахъ, (при помощи весьма тонкой проволоки) другъ съ другомъ, то часть электричества отъ проводника съ высшимъ потенціаломъ перейдетъ на другой проводникъ. Между проводниками, находящимися *при одинаковыхъ потенціалахъ, не происходитъ обмѣна электричества* (§ 10).

Насъ не интересуетъ абсолютная величина потенціала проводника, ибо при электрическихъ явленїяхъ оказываютъ вліяніе только разности потенціаловъ тѣлъ, между которыми происходитъ электрическое взаимодействие. Поэтому потенціалъ земли произвольно принимаютъ за нулевой. При этомъ подъ потенціаломъ проводника L разумѣютъ работу, которую слѣдуетъ произвести, чтобы количество электричества $+1$ перенести отъ поверхности земли до проводника L , т. е. собственно говоря разность потенціаловъ земли и проводника.

Фиг. 21.



Пусть проводникъ (фиг. 21), заряженный общимъ количествомъ электричества $+1$, вызываетъ въ точкѣ P потенціалъ K . Если всѣ отдѣльныя количества электричества сдѣлаются въ Q разъ больше, причѣмъ относительное распредѣленіе ихъ останется тоже самое (а это возможно сдѣлать, не нарушая равновѣсїя, ибо при этомъ всѣ дѣйствующія силы только увеличатся въ Q^2 разъ), то

потенціалъ въ точкѣ Р будетъ $V = Q K$. Это разсужденіе справедливо какъ для внутреннихъ, такъ и для внѣшнихъ точекъ относительно проводника.

Емкость. Энергія.

§ 17. И такъ потенциаль и зарядъ проводника измѣняются пропорціонально другъ другу. Если положимъ $Q = CV$, то постоянная C обозначаетъ количество электричества, приходящееся на единицу потенциала. Мы называемъ ее *емкостью проводника*.

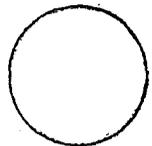
При переносѣ количества электричества $+1$ отъ поверхности земли до находящагося при потенциаль V проводника нужно произвести работу V . Слѣдовательно, при переносѣ (малой) массы q на проводникъ, нужно затратить работу $q V$. Если теперь станемъ постепенно заряжать проводникъ количествомъ электричества Q , то потенциаль его возрастетъ, начиная отъ 0, пропорціонально количеству электричества до величины V . Вся затраченная при этомъ работа будетъ $W = \frac{1}{2} Q V$. Эту же работу проводникъ будетъ въ состояніи воспроизвести при разрядѣ: она представляетъ (*потенціальную*) *электрическую энергію заряженнаго проводника*. Помощью уравненія $Q = CV$ получаютъ еще выраженія: $W = \frac{1}{2} CV^2$ и $W = \frac{1}{2} \frac{Q^{2*}}{C}$

Потенціаль и емкость шара.

§ 18. Для шара радиуса r (сант.) (фиг. 22), заряженнаго количествомъ Q (гр. $\frac{1}{2}$ сант. $\frac{3}{2}$ сек. $^{-1}$), распределеннымъ равномерно по поверхности, потенциаль въ центрѣ будетъ $\frac{Q}{r}$ (гр. $\frac{1}{2}$ сант. $\frac{1}{2}$ сек. $^{-1}$).

Такъ какъ подобный шаръ не вызываетъ во внутренней точкѣ никакой дѣйствующей силы, то при перемѣщеніи массы $+1$ на разстояніе Δr (по направленію радиуса) $p = \frac{\Delta V}{\Delta r} = 0$, т. е. $\Delta V = 0$, а поэтому $V = \frac{Q}{r}$ представитъ потенциаль для всѣхъ точекъ

Фиг. 22.



внутри шара. Емкость такого шара будетъ $\frac{Q}{V} = r$ (сант.): она измѣняется радиусомъ шара.

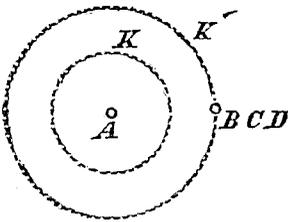
*) Представимъ себѣ цилиндрической сосудъ, въ который черезъ отверстіе въ днѣ наливается вода вѣса Q до высоты V . Тогда энергія $W = \frac{1}{2} Q V$.

Если два шара, заряженные количествами Q и q , и имѣющіе радиусы R и r , соединены длинной тонкой проволокой, то, такъ какъ ихъ потенціалы равны, будемъ имѣть: $\frac{Q}{R} = \frac{q}{r}$. Шаръ, радиусъ котораго равенъ $\frac{1}{10}$ радиуса другаго шара, содержитъ и $\frac{1}{10}$ часть заряда послѣдняго, но такъ какъ поверхность его будетъ $\frac{1}{100}$, то плотность (количество электричества на единицу поверхности) на немъ электричества будетъ въ 10 разъ болѣе. Очень маленькій шарикъ можетъ быть разсматриваемъ какъ остріе (§ 5).

Дѣйствіе шара наружу.

§ 19. Если въ электрическому заряду Q , находящемуся въ точкѣ A (фиг. 23), приблизимъ изъ безконечности одноименный зарядъ Q' до точки B , то мы при этомъ произведемъ работу $W = \frac{Q Q'}{f}$, гдѣ $f = AB$. Распре-

Фиг. 23.



дѣлимъ теперь массу Q' равномерно изъ B по поверхности шара K' , концентричнаго съ A . Такъ какъ эта поверхность будетъ поверхностью уровня относительно Q (сосредоточеннаго въ A), то при этомъ Q' произведетъ работу лишь на себя, но не относительно Q . Распредѣлимъ теперь Q равномерно по поверхности шара K

(концентричнаго съ A). При этомъ Q произведетъ также только работу на себя. Наконецъ сконцентрируемъ Q' по поверхности шара K' обратно въ B , не производя работы относительно Q .

Такимъ образомъ, затраченная для приведенія Q' въ B работа одна и та же, будетъ ли Q сконцентрировано въ A или распределено равномерно по поверхности шара, центръ котораго въ A . Такъ какъ это разсужденіе можетъ быть повторено относительно переноса Q' въ C, D, \dots , то разности въ произведенныхъ работахъ, а слѣдовательно и соответствующія имъ силы (§ 15) въ B, C, D, \dots будутъ однѣ и тѣ же. (Тумлирць). Осюда слѣдуетъ, что поверхность шара, по которой равномерно распределенъ зарядъ (масса), слѣдующій закону обратныхъ квадратовъ, дѣйствуетъ на вѣншую точку такимъ образомъ, какъ будто бы весь зарядъ былъ сгущенъ въ центръ.

Двѣ шаровыя поверхности, съ однороднымъ поверхностнымъ распределеніемъ, дѣйствуютъ другъ на друга совершенно такъ же, какъ заряды этихъ поверхностей, сгущенные въ ихъ центрахъ. Въ самомъ дѣлѣ, первая поверхность дѣйствуетъ на каждую точку другой точно такъ же, какъ если бы ея масса была сгущена въ центрѣ. Можно слѣдовательно вообразить, что первая шаровая поверх-

ность, постепенно уменьшалась, превратится въ точку, а вслѣдъ за ней и вторая. Отсюда слѣдуетъ также, что и сплошные шары, которые могутъ быть разсматриваемы, какъ состоящіе изъ концентрическихъ однородныхъ слоевъ, будутъ дѣйствовать другъ на друга, какъ массы ихъ, сосредоточенныя въ центрахъ.

Шаровая лейденская банка.

§ 20. Представимъ себѣ два концентрическихъ проводящихъ полыхъ шара (фиг. 24), радиусы которыхъ пусть будутъ r_1 и r_2 ; изъ этихъ шаровъ внѣшній соединенъ съ землей, а внутренній—съ весьма тонкой проволокой, изолированной относительно перваго и проходящей во внутрь его. Въ совокупности это представляетъ собою шарообразную лейденскую банку, изоляторомъ которой служитъ воздухъ. Если шары получаютъ заряды Q_1 и Q_2 , то (§ 18 и 19) соответствующіе потенциалы будутъ

Фиг. 24.

$$V_1 = \frac{Q_1}{r_1} + \frac{Q_2}{r_2}, \quad V_2 = \frac{Q_1}{r_2} + \frac{Q_2}{r_2} = 0$$

слѣдовательно $Q_2 = -Q_1$

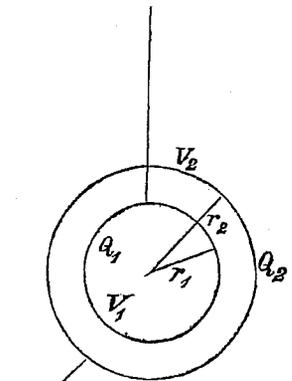
$$\text{и } V_1 = Q_1 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = Q_1 \frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2}$$

Емкость внутренняго шара будетъ

$$\frac{Q_1}{V_1} = \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1}$$

Если r_2 будетъ возрастать безпредѣльно, то емкость внутренняго шара уменьшится отъ $\frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1}$ до r_1 . Она слѣдовательно зависитъ существеннымъ образомъ отъ окружающихъ предметовъ. Фарадей вывелъ, что банка отличается отъ обыкновеннаго кондуктора машины только большею емкостью. Что касается послѣдняго, то для него весьма удаленныя сравнительно стѣны комнаты играютъ роль внѣшней обкладки. Благодаря способности банокъ и досокъ Франклина накапливать на своихъ поверхностяхъ при данной величинѣ потенциала весьма значительное количество электрическихъ массъ, ихъ называютъ *конденсаторами*.

Помощью такой шаровой банки, пользуясь ею какъ счетною, можно опредѣлить емкость любой лейденской банки (§ 10).



Франклинова доска.

§ 21. Если въ описанномъ случаѣ предположимъ радіусы весьма большими и мало разнящимися другъ отъ друга ($r_2 - r_1 = a$ и $r_2 r_1 = R^2$), то получимъ $V_1 = \frac{Q_1 a}{R^2}$. Если мы массу на единицу поверхности обозначимъ черезъ σ , то $Q_1 = 4 \pi R^2 \sigma$ и $V_1 = 4 \pi a \sigma$.

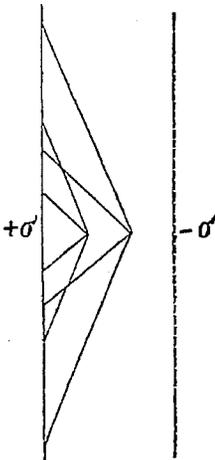
Послѣдняя формула выражаетъ величину потенциала на (безконечной) Франклиновой доскѣ, поверхностная плотность которой есть σ , въ томъ случаѣ, когда другая обкладка ея соединена съ землею. Часть f такой доски содержитъ массу $f \sigma$ и имѣетъ поэтому емкость $\frac{f \sigma}{4 \pi a \sigma} = \frac{f}{4 \pi a}$. Эти простыя формулы, благодаря сгущенію заряда на краяхъ, нельзя распространить на цѣлую ограниченную доску.

Электрометръ.

§ 22. Такъ какъ потенциалъ доски находится въ простомъ соотношеніи къ заряду ея, который въ свою очередь связанъ съ величиною взаимнаго притяженія обкладокъ, то ясно, что послѣднимъ условіемъ можно воспользоваться для опредѣленія величины потенциала.

Количество электричества $+1$ отталкивается отъ безконечной плоскости, поверхностная плотность которой $+\sigma$ (фиг. 25), на всякомъ

Фиг. 25.



разстояніи отъ нея—одною и той-же силой p . Въ самомъ дѣлѣ, если вообразимъ черезъ точку, заряженную количествомъ электричества, равнымъ $+1$, пучокъ лучей, направленіе которыхъ неизмѣнно, то длина лучей удвоится съ увеличеніемъ разстоянія отъ плоскости въ два раза въ то время, какъ отдѣляемые ими дѣйствующія части плоскости учетверятся: сила p останется одна и та-же. Если зарядъ $+1$ заключенъ между двумя безконечными параллельными плоскостями, поверхностныя плотности которыхъ $+\sigma$ и $-\sigma$, то онъ вездѣ подвергается дѣйствію одной и той-же силы $2p$ по направленію отъ положительной къ отрицательной поверхности.

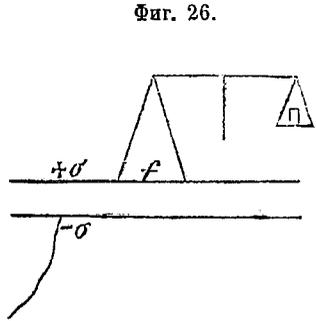
Слѣдовательно паденіе потенциала вездѣ одно и то же, а такъ какъ увеличеніе его на все разстояніе a между пластинками соотвѣтствуетъ количеству $4\pi a \sigma$, то $2p = \frac{4\pi a \sigma}{a}$ или $p = 2\pi \sigma$.

Если вообразимъ, что часть доски величиною въ f , поверхностная плотность которой $+\sigma$, подвѣшена къ вѣсамъ (фиг. 26), то она будетъ притягиваться противоположной ей доской, поверхностная плотность которой $-\sigma$, съ силою

$$P = 2 \pi \sigma \times f \sigma. \text{ Такъ какъ } \sigma = \frac{V}{4 \pi a}, \text{ то}$$

$$\text{слѣдовательно } V = a \sqrt{\frac{8 \pi P \cdot f}{f}}, \text{ причеьъ}$$

должно выразить a въ сантиметрахъ, f въ квадратныхъ сантиметрахъ и P не въ граммахъ, а въ динахъ. На этомъ основанъ абсолютный электрометръ В. Томсона, который представляетъ остроумное видоизмѣненіе электрическихъ вѣсовъ Вольты и Гарриса.



Если помощью шарообразной счетной банки емкость средней величины лейденской банки опредѣлится въ 4.000 (сант.), а помощью электрометра (при разстояніи пластинонь въ 1 сант.) потенциалъ той же банки опредѣлится въ 100 (гр.^{1/2} сант.^{1/2} сек.⁻¹), то такая банка заключаетъ въ себѣ кол. электричества въ 400.000 (гр.^{1/2} сант.^{3/2} сек.⁻¹) и энергіи 2×10^7 (гр. сант.² сек.⁻¹), т. е. $2 \cdot 10^7$ эрговъ, или приблизительно 0,2 килограммометра. Такая банка имѣетъ емкость уединеннаго и удаленнаго отъ прочихъ тѣлъ шара, радіусъ котораго равняется 40 метрамъ.

По принципу сохраненія энергіи не будетъ разницы въ работѣ, если мы опредѣленное количество электричества перенесемъ съ наружи на проводникъ или-же непосредственно воспроизведемъ то-же количество на проводникѣ. Индуктивную машину, коль скоро она начнетъ дѣйствовать, сейчасъ-же становится труднѣе вращать. Если опредѣлимъ это увеличеніе механической работы, то увидимъ, что оно дѣйствительно соотвѣтствуетъ полученной электрической энергіи (Розетти, Махъ).

(Дѣйствія разрядной искры лейденской банки. Воздушный термометръ Рисса. Накалываніе, превращеніе въ парь, сгараніе тонкихъ проволокъ. Зажиганіе горючихъ тѣлъ. Пробиваніе изоляторовъ. Въ разрядной искрѣ не обнаруживается самое электричество, но видимъ распаленный на счетъ работы разряженія воздухъ, а также пары металловъ, изъ которыхъ сдѣланы электроды).

Дополнительныя предложенія.

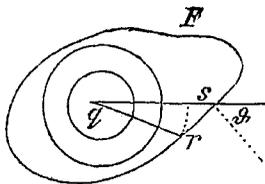
§ 23. Принимая во вниманіе свойства электрическихъ силъ и по-

тенціала, можно легко вывести еще нѣсколько теоремъ, знаніе которыхъ значительно облегчаетъ обзоръ электрическихъ явленій.

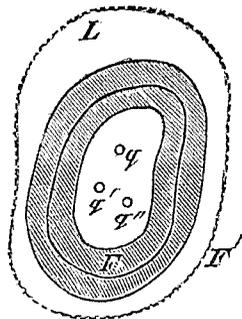
Пусть въ нѣкоторой точкѣ сосредоточено количество электричества $+q$. На поверхность шара радіуса r , описаннаго около q какъ центра и съ поверхностной плотностью $+1$, произведется давленіе $4\pi r^2 \frac{q}{r^2} = 4\pi q$, независимое слѣдовательно отъ радіуса. Если вообразимъ около q сомкнутую поверхность F съ поверхностною плотностью $+1$ (фиг. 27) и разсмотримъ элементъ ея S на разстояніи r отъ q , нормаль котораго образуетъ съ радіусомъ векторомъ, исходящимъ изъ q , уголъ ϑ , то нормально дѣйствующая сила будетъ $S \frac{q}{r^2} \cos \vartheta$. Такъ какъ она можетъ быть съ другой стороны изображена формулой $\frac{S \cdot \cos \vartheta}{r^2} q$, то на S приходится такое же давленіе, какъ на проэцію S на поверхность шара единичнаго радіуса, описаннаго около q . Сумма нормальныхъ давленій на всю поверхность F будетъ слѣдовательно $4\pi q$ и $4\pi \Sigma q$, если она заключаетъ нѣсколько точекъ, въ которыхъ сосредоточены заряды.

Пусть въ пустотѣ проводника L (фиг. 28) находятся тѣла, заря-

Фиг. 27.



Фиг. 28.



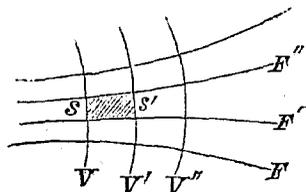
женныя массами $q + q' + q'' + \dots = \Sigma q$. Опишемъ около этихъ зарядовъ поверхность F , проходящую черезъ самую массу проводника. Такъ какъ внутри проводника, по наступленіи равновѣсія, не дѣйствуютъ электрическія силы, то нормальное давленіе, производимое на поверхность F , будетъ 0 (нуль). Но послѣднее возможно лишь въ томъ случаѣ, если сумма индуктированныхъ зарядовъ на внутренней поверхности проводника равна Σq , но съ обратнымъ знакомъ. Съ другой стороны не можетъ получиться при индукціи ни положительнаго, ни отрицательнаго избытка, изъ чего слѣдуетъ, что на внѣшней поверхности долженъ находиться зарядъ, равный, но противоположный по знаку заряду внутренней

поверхности. Общее нормальное давленіе на поверхность F' , слѣдовательно, равняется опять $4\pi \Sigma q$ (§ 6).

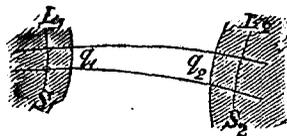
Разсмотримъ систему поверхностей уровня (V) (фиг. 29) и линій силъ (F). Если выдѣлимъ элементъ объема, ограниченный поверхностями уровня и линіями силъ (обозначенный штриховкой), то, если онъ не содержитъ заряда, нормальное давленіе на его поверхность (по направленію наружу) $= 0$. По направленію, перпендикулярному къ линіи силъ, давленія нѣтъ. Давленія, производимыя на элементы поверхностей уровня S, S' , поверхностная плотность заряда которыхъ $= +1$, будутъ Sf и $S'f'$, если f и f' обозначаютъ давленія, производимыя на единицу поверхности. Но $Sf + S'f' = 0$, слѣдовательно $f' = -\frac{S}{S'}f$, т. е. давленіе на единицу поверхности обратно пропорціонально элементу поверхности уровня (поперечному сѣченію трубки силъ), а слѣдовательно давленіе, производимое на всю площадь сѣченія трубки силъ, будетъ вездѣ одно и то же, направленное съ одной стороны нормально во внутрь, съ другой стороны нормально наружу, а стало быть всюду направленное одинаково.

Пусть трубка силъ направлена отъ поверхности проводника L_1 до поверхности другаго проводника L_2 (фиг. 30). Разсѣжемъ трубку въ

Фиг. 29.



Фиг. 30.



мѣстахъ S_1 и S_2 внутри проводниковъ. Общее нормальное давленіе на поверхность трубки, ограниченной сѣченіями S_1 и S_2 будетъ $= 0$. Поэтому и сумма зарядовъ, приходящихся на поверхности проводниковъ, вырѣзанной трубкою, будетъ $q_1 + q_2 = 0$. слѣдовательно трубка силъ, выходящая отъ части проводника, заряженнаго положительно, оканчивается на другомъ проводникѣ всегда элементомъ, заряженнымъ одинаково сильно отрицательно.

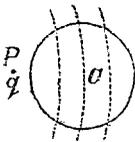
Разные случаи индукціи.

§ 24. Пусть противъ точки P (фиг. 31), заряженной массою $+q$, находится проводящій изолированный шаръ. Поверхности уровня, соответствующія заряду въ P , проникаютъ шаръ. Но въ про-

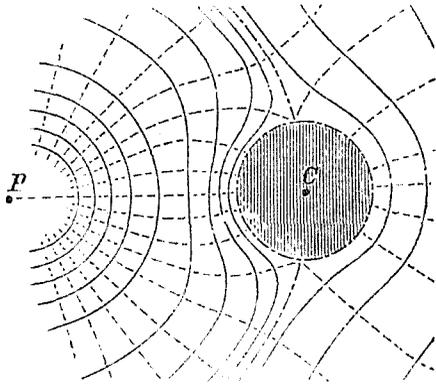
водниѣ электричество обладаетъ подвижностью; поэтому положительные заряды будутъ двигаться по направлению отъ P къ меньшимъ значеніямъ потенциала, возвышая послѣднія, отрицательные же наоборотъ, до тѣхъ поръ, пока потенциалъ въ шарѣ будетъ вездѣ одинъ и тотъ же. Внутри шара тогда нѣтъ заряда, на поверхности его весь зарядъ $q' = 0$, а слѣдовательно для центра C , $\frac{q'}{r} = 0$. Для центра шара, а слѣдовательно и для всего шара потенциалъ $V = \frac{q}{f}$, причемъ $f =$ разстоянію CP .

Поверхности уровня, соответствующія заряду въ P , претерпѣваютъ изгибы, при приближеніи проводящаго изолированного шара (фиг. 32), при чемъ

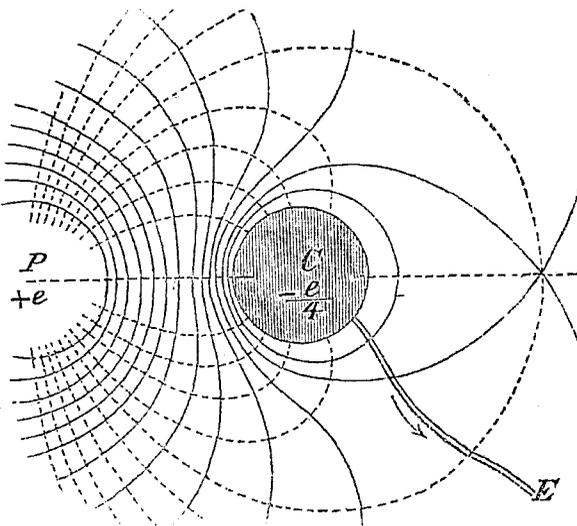
Фиг. 31.



Фиг. 32.



Фиг. 33.



поверхность, соответствующая $V = \frac{q}{f}$, какъ будто бы получаетъ утолщеніе, вмѣщающее весь шаръ.

Пусть шаръ (фиг. 33), помѣщенный противъ точки P , будетъ соединенъ съ землею. Благодаря этому, потенциалъ его будетъ $V = 0$. Для центра, а слѣдовательно и для всего проводника $\frac{q}{f} + \frac{q'}{r} = 0$, при

чемъ буквы сохраняютъ прежнія значенія. Отсюда получимъ для всего, въ данномъ случаѣ отрицательнаго, индукированного заряда $q' = -\frac{r}{f}q$.

II. Обь электрическомъ токо-состояніи.

1. Измьреніе малыхъ разностей потенціаловъ.

Слабое, но быстрое заряденіе.

§ 25. Большинство явленій природы сопровождается замѣтными электрическими дѣйствіями. Конечно электризація до такой значительной разности потенціаловъ, кабая можетъ быть достигнута треніемъ или непосредственнымъ производствомъ работы противъ электрическихъ силъ, дѣйствующихъ на разстояніи (индукція), весьма рѣдко встрѣчается. Несмотря на это, нѣкоторыя изъ описываемыхъ въ дальнѣйшемъ явленій имѣютъ важное практическое значеніе, такъ какъ они вызываютъ хотя не сильную, но за то весьма быструю электризацію. Индукціонная машина средней величины заряжаетъ батарею лейденскихъ бановъ, емкость которой 0,5 километровъ, до разности потенціаловъ въ 30 (сант. $\frac{1}{2}$ граммъ $\frac{1}{2}$ сек. $^{-1}$) приблизительно въ полъ минуты, между тѣмъ какъ съ батареей Сми (сравн. § 40) въ 15.000 элементовъ достигается то же самое почти въ неизмѣримо короткое время. Но за то одинъ элементъ Сми можетъ довести зарядъ той же батареи только до 0,002 (сант. $\frac{1}{2}$ граммъ $\frac{1}{2}$ сек. $^{-1}$).

Измьреніе слабыхъ зарядовъ.

§ 26. Электрометръ Гаррисъ-Томсона оказывается неспособнымъ измѣрять такія малыя разности потенціаловъ. При наибольшемъ сближеніи пластиновъ $a=0,1$ сант. (§ 22) и величинѣ ихъ $f=50$ сант.² и при разности потенціаловъ $V=0,006$ вѣсы испытываютъ притяженіе едва въ 0,07 (сант. гр. сек. $^{-2}$) $=0,7$ вѣса грамма, которое не можетъ быть съ точностью опредѣлено.

Электроскопъ Беренса.

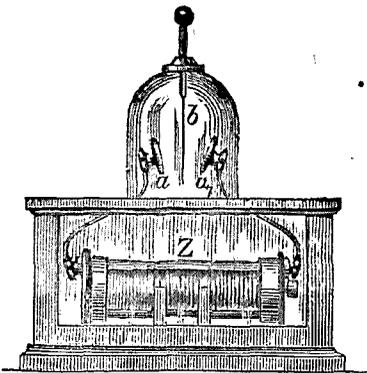
Въ данномъ случаѣ можно примѣнить съ пользою электроскопъ Беренса и Бекереля (фиг. 34), золотой листочекъ котораго b колеблется между двумя пластинками a , удерживаемыми (помощью столба Замбони Z § 41) при постоянной величинѣ разности потенціаловъ. Для малыхъ отклоненій листочка величина отклоненія будетъ прямо пропорціональна

измѣненію заряда, причѣмъ форма листочка b , а также и пластинонь a здѣсь не играютъ роли.

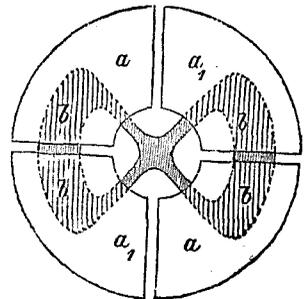
Квадрантный электрометръ.

В. Томсонъ однако измѣнилъ эту форму настолько удачно, что при помощи его прибора возможно произвести точныя и обширныя измѣренія. Листочекъ b весьма легкоподвиженъ. Онъ состоитъ изъ тонкаго, расположеннаго горизонтально бисвитообразнаго аллюминіеваго листочка (фиг. 35), подвѣшеннаго на тонкой проволочкѣ (въ 0,02 мм. діаметра) и вращающагося слѣдовательно около вертикальной центральной оси прибора. Пластины a и a_1 имѣютъ видъ секторовъ круга, чѣмъ достигается

Фиг. 34.



Фиг. 35.



возможно наибольшее расширеніе ихъ въ плоскости колебанія стрѣлки b . Такимъ образомъ и болѣе значительныя отклоненія стрѣлки (до 7°) мало измѣняютъ относительное расположеніе частей системы a и a_1, b , благодаря чему сохраняется пропорціональность между измѣненіями потенціала и измѣненіями положенія стрѣлки b до означеннаго предѣла *).

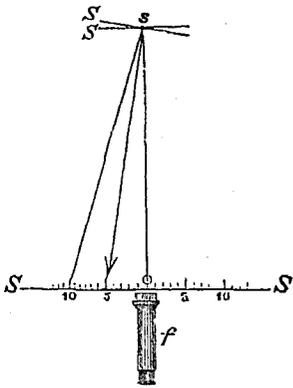
*) Измѣреніе такихъ малыхъ отклоненій дѣлается возможнымъ при помощи зеркальнаго отсчета, предложеннаго Поггендорфомъ и Гауссомъ. Съ вращающеюся стрѣлкой связано въ одно цѣлое легкое зеркальце двухъ сантиметровъ въ діаметрѣ, площадь котораго вер-

Элементъ Даніэля.

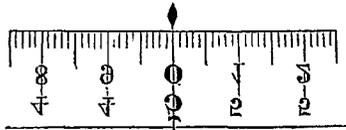
§ 27. Хотя такимъ образомъ не возможно опредѣлить абсолютную величину разности потенциаловъ (между b и a_1), но за то мы можемъ (весьма удобно и точно) сравнить упомянутую разность съ извѣстными постоянными разностями потенциаловъ (между a и a_1). Какъ такую извѣстную разность потенциаловъ принимаютъ ту, которая получается на полюсахъ *элемента Даніэля* (§ 98). Въ дальнѣйшемъ всѣ разности потенциаловъ будутъ даны въ дробныхъ частяхъ напряженія, получающагося на полюсахъ элемента Даніэля. Изъ измѣреній, сдѣланныхъ съ вѣсами Томсона (§ 22), оказывается, что 300 единицъ Даніэля = 1 (сант. $\frac{1}{2}$ гр. $\frac{1}{2}$ сек. $^{-1}$) электростатической единицѣ.

тигальна. Если оно повернется на 7° , то отраженный отъ него горизонтальный солнечный лучъ опишетъ уголъ въ 14° , или удобно измѣримый путь въ 50 сантиметровъ на стѣнѣ, находящейся на разстояніи 200 сантиметровъ. (Погендорфъ).

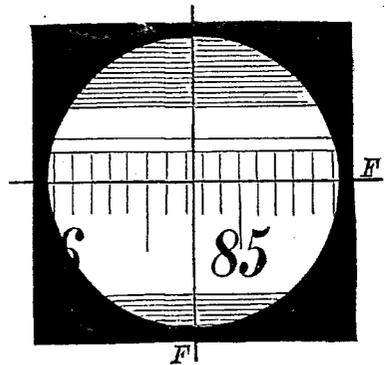
Фиг. 36.



Фиг. 37.



Фиг. 38.



Если взять за направление падающаго луча то направление fs (фиг. 36), по которому мы визируемъ въ подзорную трубу f , а вмѣсто стѣны зеркальную шкалу S (фиг. 37), то мы увидимъ въ f тѣ части S (фиг. 38), которыя освѣтилъ-бы отраженный лучъ. Такимъ образомъ, во время отклоненія стрѣлки въ полѣ зрѣнія трубы будутъ проходить послѣдовательно дѣленія шкалы и должно замѣтить то дѣленіе, которое будетъ видимо на пересѣченіи перекрестныхъ нитей (фиг. 38) въ то время, когда стрѣлка будетъ находиться въ покоѣ въ своемъ новомъ положеніи равновѣсія. Примеръ: Отсчесть при незаряженномъ электрометрѣ 49,21 сантиметровъ, при заряженномъ 85,26 сантиметровъ (фиг. 38). Шкала отсчитывъ на 200 сантиметровъ отъ зеркала. Зеркало повернулось слѣдовательно на $\frac{1}{2} \cdot \frac{85-49}{200}$ дуговыхъ единицъ, т. е. на $5^\circ 10'$.

2. О различных процессах электризации.

Наблюдения, послужившія началомъ дальнѣйшихъ изслѣдованій.

§ 28. Около конца прошлаго столѣтія замѣчены были фізіологическія явленія, основанныя, какъ вскорѣ выяснилось, на электричествѣ. *Зульцеръ* (1760) утверждаетъ, что два разнородныхъ металла (мѣдь и желѣзо), приведенные въ соприкосновеніе свободными концами къ языку, вызываютъ вкусъ, напоминающій собою вкусъ желѣзнаго купороса. *Л. Гальвани* (1789) соединяетъ упомянутые свободные концы ножкой лягушки, съ которой была содрана кожа, и замѣчаетъ содраганія, подобныя тѣмъ, которыя вызываются при разрядѣ лейденской банки. По мнѣнію Гальвани, концы мускуловъ лягушки были уже отъ природы заряжены электричествомъ и прикасающійся металлъ игралъ лишь роль соединяющаго проводника.

Животное электричество.

§ 29. Въ новѣйшее время дѣйствительно выяснилось, что концы свѣже-препарированнаго мускула, изслѣдуемаго при помощи электрометра, заряжены отрицательно, боковая же поверхность мускула—положительно (до равности потенциаловъ въ 4 Даниэля. *Дюбуа-Реймонъ* 1848). Когда мускулъ находится въ дѣйствиіи, его электровозбудительная сила немного возрастаетъ.

Нѣкоторыя породы рыбъ (электрической угорь, электрической скать, африканскій сомъ) обладаютъ особыми объемистыми крупно-клетчатными органами, расположенными на брюшной сторонѣ туловища или хвоста, при помощи которыхъ послѣдняя заряжается отрицательно, а спина положительно [до разности потенциаловъ въ 5 (сант. ^{1/2} гр. ^{1/2} сек. ⁻¹)]. Дѣйствіе описанныхъ органовъ зависитъ вполне отъ произвола рыбы.

Опытъ Вольты.

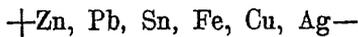
§ 30. На основаніи слабого природнаго заряда мускула можно объяснить замѣченное Гальвани содраганіе, но никакъ не опытъ Зульцера. По мнѣнію *Вольты* въ воспроизведеніи явленія, замѣченнаго Гальвани, въ цѣпи мускула принимаетъ также участіе *прикосновеніе разнородныхъ металловъ*.

Двѣ металлическія пластинки съ изолирующими ручками (лучше

всего цинкъ и платина или цинкъ и мѣдь) накладываютъ одну на другую. Пластинки, касающіяся только въ нѣсколькихъ точкахъ, заключаютъ между собою слой воздуха и образуютъ такимъ образомъ френелинову доску весьма большой емкости (около 1.000 сант.), называемую конденсаторомъ Вольты. При соприкосновеніи пластинокъ таковыя моментально заряжаются до разности потенциаловъ около 0,8 Даніэля, что можетъ быть замѣчено даже нечувствительнымъ электрометромъ. Затѣмъ раздвигаютъ пластинки, отчего ихъ емкость уменьшится (приблизительно до 5 сант.), а разность потенциаловъ возрастетъ во столько же разъ (въ 200 разъ, т. е. дойдетъ до 160 Даніэлей) и можетъ быть уже замѣчена на простомъ электроскопѣ съ золотыми листочками.

Разности потенциаловъ при соприкосновеніи металловъ.

Эти разности потенциаловъ, появляющіяся при соприкосновеніи металловъ, смотря по природѣ послѣднихъ, различны и колеблются между 0 и 1 Даніэлемъ. Вольта (1802) распредѣляетъ на этомъ основаніи наиболѣе употребительные металлы въ слѣдующій рядъ:



Каждый изъ металловъ этого ряда электризуется при соприкосновеніи съ какимъ либо изъ слѣдующихъ за нимъ положительно, и получаемая при этомъ разность потенциаловъ тѣмъ больше, чѣмъ дальше отстоятъ металлы другъ отъ друга въ ряду. Числа, данныя въ слѣдующей таблицѣ, представляютъ разности потенциаловъ, выраженные въ Даніэляхъ, при соприкосновеніи металловъ горизонтальныхъ и вертикальныхъ рядовъ:

	Zn	Pb	Sn	Fe	Cu	Pt
Zn	0					
Pb	0,2	0				
Sn	0,3	0,1	0			
Fe	0,6	0,4	0,3	0		
Cu	0,8	0,5	0,5	0,2	0	
Pt	1,0	0,8	0,7	0,4	0,2	0

Въ новѣйшее время принимаютъ, что вѣроятно при этой электризаціи не столько участвуютъ оба металла своимъ прикосновеніемъ, сколько

дѣйствіе на ихъ поверхности кислорода и водяныхъ паровъ воздуха (Де-ла-Ривъ, Фр. Экснеръ). Не смотря на то, быть можетъ при этомъ все-же имѣеть мѣсто непосредственное электрическое дѣйствіе между металлами. Есть даже опыты, заставляющіе думать, что и между пространственно раздѣленными разнородными металлами вызывается химическое напряженіе, подобное извѣстному намъ электрическому напряженію и способное вызвать электрическія явленія.

Электризація теплотой.

§ 31. Со временъ Зеебека (1822) намъ извѣстенъ родъ электризаціи, возникающей безъ сомнѣнія въ мѣстѣ прикосновенія разнородныхъ металловъ, но при этомъ съ поглощеніемъ теплоты. А именно Вольтово напряженіе при соприкосновеніи двухъ металловъ, какъ оказывается, измѣняется съ температурой мѣста прикосновенія, но не по какому либо простому закону (Авенаріусъ). Для всѣхъ случаевъ будетъ справедлива формула: $V = a + bt + ct^2$ гдѣ a обозначаетъ напряженіе при $= 0^\circ$ Ц., b и c весьма малыя положительныя или отрицательныя постоянныя. Упомянутыя величины будутъ на примѣръ слѣдующія (въ Даниэляхъ):

Для сочетанія металловъ.	a	b	c
Цинкъ—мѣдь	0.80	+0.38	+0.70
Цинкъ—сталь	0.96	-0.10	-0.23
Нейзильберъ—сталь	0.15	-0.20	+0.71

Разность потенциаловъ V сочетанія Zn—Cu возрастаетъ слѣдовательно при нагрѣваніи на 100° только на $0.38 \times 100 - 0.70 \times 100^2 = 0.005$ Даниэля. Не смотря на это, термическій источникъ электричества, благодаря удобному обращенію съ нимъ, имѣеть важное практическое значеніе (§ 43).

Электризація свѣтомъ.

§ 32. Сильное освѣщеніе заряженныхъ проводниковъ имѣеть замѣтное вліяніе на воспроизводимыя ими электрическія дѣйствія. Это освѣщеніе способствуетъ явленію разрядовъ въ видѣ искры (Г. Герцъ 1888). Выставленная на яркомъ солнечномъ свѣтѣ металлическая пластинка (напр. электроскопъ съ полированной пластинкой, выставленный на

солнце) заряжается часто даже болѣе чѣмъ до 100 Даниѣлей (Гальваксъ). Этотъ опытъ удается также при помощи электрическаго свѣта.

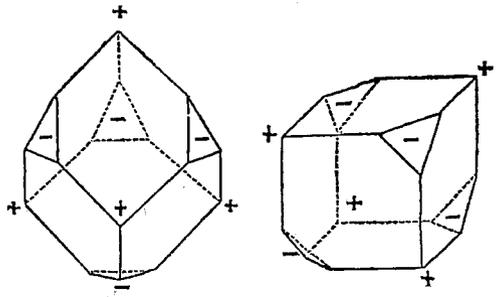
Актиноэлектризація.

Прозрачный горный хрусталь электризуется проходящими черезъ него солнечными лучами такимъ образомъ, что ребра призмы попеременно будутъ заряжены то положительно, то отрицательно и способны электризовать тѣла емкостью въ 10 сант. до 1 Даниѣля. (В. Гангель 1881). Нагрѣтый горный хрусталь, охлаждающійся лучеспусканиемъ, заряжается такъ же, но только въ обратномъ порядѣ.

Пирозлектризація.

§ 33. Кристаллы кварца или турмалина при помощи нагрѣванія вслѣдствие теплопроводности, электризуются такъ же, но противоположно тому, какъ они электризовались бы при нагрѣваніи лучистой теплотой. Если будемъ поддерживать при этомъ кристаллъ при постоянной температурѣ и устранимъ лучеспусканіе, то не будетъ и слѣдовъ заряда. При охлажденіи зарядъ появляется снова, но противоположнаго знака (Эпинусъ 1760). Отколотые куски кристалла электризуются точно такъ же. Даже въ мельчайшемъ порошокѣ его образуются при измѣненіи температуры особыя скопленія частицъ вслѣдствіе ихъ взаимнаго электрическаго притяженія.

Фиг. 39.



Опытъ удается также съ тяжелымъ шпатомъ, сѣрновислымъ баріемъ, топазомъ, сахаромъ и другими кристаллами главнымъ образомъ такими, которые представляютъ комбинацію полногранной формы съ геміэдрической. Такъ напримѣръ (фиг. 39) въ изображенномъ кристаллѣ борацита острые углы куба при повышеніи температуры оказываются наэлектризованными положительно, противолежащіе же имъ и притупленные грани тетраэдра, напротивъ, отрицательно.

(Пирозлектрическія фигуры Кундта изъ сурика и сѣрнаго порошка).

Піезоелектризація.

§ 34. Піроелектрическіе кристаллы електризуются также отъ легкаго давленія въ тѣхъ-же направленіяхъ, въ которыхъ они електризуются отъ нагрѣванія (направленіе ихъ электрическихъ осей), но только электричествомъ того знака, которое соотвѣтствуетъ случаю охлажденія. При прекращеніи давленія зарядъ исчезаетъ. Если до уменьшенія давленія предварительно разрядимъ кристаллъ, то во время уменьшенія давленія онъ зарядится противоположно тому, какъ раньше, т. е. такъ же, какъ и при нагрѣваніи.

Выдѣляющіяся при этомъ процессы количества электричества пропорціональны измѣненію давленія и зависятъ отъ направленія, по которому сдавливаютъ кристаллъ и отъ природы, но не отъ размѣровъ послѣдняго (И. и П. Кюри). Вызванныя такимъ образомъ разности потенціаловъ находятся, слѣдовательно, въ зависимости отъ емкостей проводниковъ, производящихъ давленіе. Оба конца турмалиновой палочки могутъ при измѣненіи давленія на 1 кгр. дать количества электричества въ 0,05 (сант. $\frac{3}{2}$ гр. $\frac{1}{2}$ сек. $^{-1}$), т. е. каждый изъ нихъ можетъ зарядить шаръ радіусомъ въ 15 сантиметровъ до ± 1 Даніэля.

Некристаллическія тѣла также електризуются подъ сильнымъ давленіемъ. Половинки разрѣзанной сухой пробки могутъ при сдавливаніи ихъ другъ противъ друга електризоваться разноименнымъ электричествомъ. Этотъ случай електризаціи напоминаетъ намъ електризацію треніемъ, но не можетъ быть сведенъ къ нему: металлы при *трѣннн* о клеенву електризуются положительно, *придавленныи* же къ ней, они електризуются отрицательно. Скорѣе можно смотрѣть на електризацію треніемъ, какъ на частный случай електризаціи отъ *растяженія*.

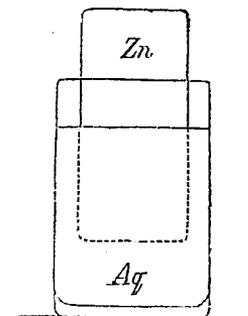
Електризація химическими дѣйствіями.

§ 35. При химическихъ реакціяхъ оба взаимодействующія вещества заряжаются противоположно и иногда до разностей потенціаловъ отъ 2-хъ до 3-хъ Даніэлей. Послѣ піезоелектризаціи этотъ родъ електризаціи наиболѣе для насъ понятный и ближе всего насъ интересующій.

Изъ двухъ взаимодействующихъ проводниковъ (кусекъ Zn фиг. 40, погруженный въ сосудъ съ водою Ag и окисляющійся при этомъ) каждый приводится во всей своей массѣ къ одинаковому потенціалу (§ 16),

но эти потенциалы будутъ различны (цинкъ наэлектризованъ, какъ оказывается, отрицательно, вода — положительно) и на поверхности прикосновенія очень быстро переходятъ другъ въ друга. Ихъ разность по истеченіи чрезвычайно короткаго времени послѣ погруженія возрастаетъ въ точности до 0,7 Даніэля, каковую величину она не превосходитъ и сохраняетъ во все время химической реакціи. Съ превращеніемъ реакціи исчезаетъ тотчасъ-же и разность потенциаловъ реагирующихъ тѣлъ, если только образованное вещество (окись цинка) не непроводникъ и слѣдовательно не изолируетъ взаимодействующихъ тѣлъ.

Фиг. 40.



Емкость взаимодействующихъ тѣлъ ни чуть не обуславливаетъ величину этихъ химическихъ разностей потенциаловъ. Величина послѣднихъ различна для различныхъ комбинацій химически взаимодействующихъ тѣлъ и въ то же время она характерна для нихъ. Въ нижеслѣдующей таблицѣ помѣщены для нѣкоторыхъ комбинацій соответствующія имъ разности потенциаловъ:

Названіе комбинаціи.	Комбинированныя тѣла.	Разность потенциаловъ.	Образующееся соединеніе.	Алгебраическая сумма тепловыхъ паевъ этихъ соединеній.
Смѣ § 40.	Zn Aq	0·7 Дан.	+ZnO—H ₂ O	28
—	Cu Aq	—0·3 »	+CuO—H ₂ O	—20
Даніэль § 98.	Zn Aq Cu	1·0 »	+ZnO—CuO	48
—	Pt Aq	0 »	0	0
Вторичн. элементъ § 95.	H O	1·3 »	H ₂ O	58
Гrove § 98.	Zn O	2·0 »	ZnO	86
—	Cu O	1·0 »	CuO	38

Большіе калорій на граммы эквивалента.

Указаніе на законъ Томсона.

Данныя этой таблицы будутъ только вполне понятны послѣ дальнѣйшаго разъясненія (§ 41, 95 и слѣд.). Но мы уже здѣсь замѣтимъ, что возникающія при взаимодействіи разности потенциаловъ будутъ тѣмъ больше, чѣмъ больше теплота образованія продукта взаимодействія.

Онѣ образуются на счетъ упомянутого тепла химической реакціи и при тщательно произведенныхъ опытахъ нерѣдко вся израсходованная химическая энергія превращается сполна въ электрическую безъ образованія тепла (сравни § 96). Последнее имѣеть именно тогда мѣсто, когда мы озаботимся о постоянномъ и возможно быстромъ разряженіи взаимодействующихъ тѣлъ, такъ чтобы разность ихъ потенциаловъ не могла достигнуть максимума (§ 45). Какъ только она достигнетъ максимума, то вся химическая энергія, расходуемая послѣ того, превращается уже въ теплоту.

Слѣдуетъ замѣтить, что въ нѣкоторыхъ сочетаніяхъ невозможно устранить выдѣленія теплоты во время образованія заряда въ то время, какъ другія комбинаціи работаютъ, охлаждаясь, такъ что образующаяся электрическая энергія превосходитъ затраченную химическую. Существуютъ даже сочетанія, которыми при сильномъ охлажденіи одновременно воспроизводятъ какъ электрическую, такъ и химическую энергію.

Продолженіе объ опытѣ Вольты.

§ 36. Въ конденсаторѣ Вольты (§ 30), одна пластинка котораго состоитъ изъ платины, разность потенциаловъ будетъ тѣмъ больше, чѣмъ легче будетъ окисляться другая пластинка (Де-Ла-Ривъ), при чемъ полученныя разности (измѣренныя немедленно по очисткѣ поверхностей пластинокъ, Браунъ 1888 г.) вполне согласуются съ числами предыдущей таблицы. Очень вѣроятно, что контактное электричество Вольты имѣеть началомъ химическія взаимодействія (Фр. Эвснеръ 1879). Тонкій слой сгущенныхъ водяныхъ паровъ, покрывающій, какъ можно догадать, всѣ металлическія поверхности, заряжается, дѣйствуя химически на металлъ, положительно, послѣдній-же, а слѣдовательно и соединенная съ нимъ платиновая пластинка, заряжается отрицательно. Послѣ снятія пластинокъ мы найдемъ, что влажная поверхность окисленнаго металла наэлектризована сильно положительно и, благодаря этому, намъ можетъ показаться, что наэлектризованъ самъ металлъ.

Зарядъ пламени.

§ 37. При процессахъ горѣнія также происходитъ обильное образованіе электричества. Наружная оболочка пламени оказывается заря-

женной отрицательно (что обнаруживается помощью платиновой проволоки, введенной въ пламя и соединенной съ электрометромъ), а внутренній конусъ положительно. Глѣбющая монашенка, помѣщенная на пластинку электроскопа съ золотыми листочками, заряжаетъ его сильно положительно, поднимающійся же дымъ оказывается заряженнымъ отрицательно.

Атмосферное электричество.

§ 38. Воздухъ въ солнечный день находится въ сильно наэлектризованномъ состояніи. Если сначала разрядимъ проводящій шарикъ, соединенный изолированной проволокой съ электрометромъ, соединяя его съ наружной обкладкой послѣдняго, а затѣмъ поднимемъ его на нѣкоторую высоту въ воздухѣ, то золотой листочекъ зарядится положительно и тѣмъ сильнѣе, чѣмъ выше мы поднимемъ упомянутый шарикъ (на 150 Даніэлей на 1 метръ поднятія. Лемонье 1752). Въмѣсто шарика для опыта лучше взять проволочную метелочку или-же маленькое пламя.

Отсюда слѣдуетъ, что въ ясный день и подъ открытымъ небомъ мы находимся въ сильномъ электрическомъ полѣ, въ которомъ паденіе потенциала, считая снизу вверхъ, равно— $0,24$ (сант. $^{1/2}$ гр. $^{1/2}$ сек. $^{-1}$) *). Если примемъ потенциалъ на большомъ разстояніи отъ земли за нулевой, то потенциалъ послѣдней опредѣлится въ— $2.500.000$ (сант. $^{1/2}$ гр. $^{1/2}$ сек. $^{-1}$), что по нашимъ понятіямъ величина колоссальная.

Описанный опытъ удастся произвести только подъ открытымъ небомъ или у открытаго окна. Въ комнатѣ, окруженной проводящими стѣнами, зарядъ внѣшнихъ стѣнъ зданія и прилегающей къ нему земной поверхности не производитъ дѣйствія (§ 5). По той-же причинѣ опыты вовсе не удаются или весьма плохо въ пасмурный день (подъ проводящими облаками). Усиливающаяся влажность даже при яркомъ небѣ уже уменьшаетъ величину паденія потенциала у земной поверхности (Фр. Экснеръ). Гроза есть ни что иное, какъ нарушение нормальнаго распредѣленія потенциала атмосферы быстро движущимися тучами.

*) Одинаковое численное значеніе имѣетъ также электрическая сила притяженія земли, заряженной массою Q , на электрическую единичную массу. Эта сила выражается черезъ $\frac{Q}{R^2}$ (§ 19), гдѣ R означаетъ радіусъ земли, равный $64 \cdot 10^7$ сантиметр. $\frac{Q}{R}$ есть потенциалъ земли.

$$\frac{Q}{R^2} = -0.004 \text{ (сант. } ^{-1/2} \text{ гр. } ^{1/2} \text{ сек. } ^{-1}) ; \frac{Q}{R} = -2.500.000 \text{ (сант. } ^{1/2} \text{ гр. } ^{1/2} \text{ сек. } ^{-1}).$$

3. Сложение разностей потенциаловъ.

При электрическихъ явленіяхъ играютъ роль разности потенциаловъ, но не абсолютныя потенциалы.

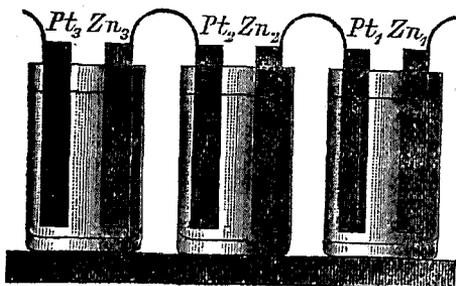
§ 39. При разнаго рода электризаціяхъ возбуждаются по различнымъ законамъ опредѣленныя разности потенциаловъ, но не опредѣленныя абсолютныя величины потенциаловъ.

Между кускомъ цинка и водою всегда устанавливается разность потенциаловъ въ 0·7 Даніэля. Если соединить цинкъ съ водопроводными трубами дома, потенциалъ которыхъ нуль, то вода оказывается при потенциалѣ +0·7 Даніэля. Если же, напротивъ, соединить съ трубами воду (при помощи погруженной въ нее платиновой проволоки), то цинкъ окажется при потенциалѣ —0·7 Даніэля. Если цинкъ и воду послѣ соединенія каждаго изъ нихъ съ землею изолировать и затѣмъ прикоснуться ими другъ къ другу, то первый принимаетъ потенциалъ —0·35 Дан., а вторая +0·35 Дан. Если удерживать потенциалъ цинка при $\left\{ \begin{array}{l} +100 \\ -100 \end{array} \right.$ Дан., то вода окажется при потенциалѣ $\left\{ \begin{array}{l} +100\cdot7 \\ -99\cdot3 \end{array} \right.$ Дан.

Послѣдовательное соединеніе.

§ 40. Указанное только что обстоятельство даетъ возможность послѣдовательнымъ соединеніемъ большаго числа электровозбудительныхъ комбинацій наращивать малыя электровозбудительныя дѣйствія до высокой разности потенциаловъ. Фиг. 41 представляетъ такое соединеніе (ба-

Фиг. 41.



тарей Сми). Пусть цинкъ Zn_1 имѣетъ потенциалъ P , тогда вода Aq_1 , а слѣдовательно Pt_1 и Zn_2 примутъ потенциалъ $P+0\cdot7$ Дан., Aq_2 и Zn_3 потенциалъ $P+1\cdot4$ Д., Aq_3 и Pt_3 потенциалъ $P+2\cdot1$ Дан. Разность потенциаловъ на концахъ (полюсахъ) батареи Zn_1 и Pt_3 , слѣдовательно, втрое больше, чѣмъ на полюсахъ од-

ного элемента.

Соединеніе другъ противъ друга.

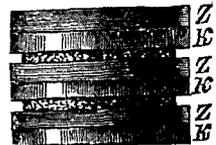
§ 41. Сочетаніе желѣзо-вода даетъ электровозбудительную силу (разность потенціаловъ на полюсахъ) только въ 0·2 Дан. Если включить таковой элементъ, но съ обратнымъ расположеніемъ полюсовъ ($Zn/Aq + Aq/Fe$), противъ элемента Сми, то полюсы Zn и Fe такого сочетанія примуть потенціаль 0·5 Дан., при чемъ цинкъ оказывается отрицательнымъ по отношенію къ желѣзу.

Противъ трехъ элементовъ Сми нужно включить пять элементовъ олово-вода ($Sn_1/Aq + Sn_2/Aq + \dots + Aq/Zn_3$), чтобы разность потенціаловъ полюсовъ Sn_1 и Zn_3 оказалась равной нулю; слѣдовательно, каждый элементъ Sn/Aq имѣетъ электровозбудительную силу въ 0·42 Дан. (Компенсационный способъ сравненія электровозбудительныхъ силъ Поггендорфа).

Способъ сложенія электровозбудительныхъ силъ, описанный въ § 40, придумалъ Вольта (1795 г.). Его элементы сильнѣе элементовъ Сми, если только цѣпь замыкается ненадолго; вмѣсто платины они содержатъ мѣдь; электровозбудительная сила ихъ, слѣдовательно, около 1·0 Дан. ($Zn/Aq - Cu/Aq = 0·7 + 0·3$ Дан. ср. таблицу § 35).

Вольта придаль своей батарее удобное и для многихъ цѣлей очень выгодное устройство. Тонкіе кружки изъ цинка, мѣди и влажнаго суена накладываются одинъ на другой въ видѣ столба (фиг. 42). Этотъ столбъ уступаетъ однако бумажному столбу Замбони, въ которомъ золотой и серебряный кружки оклеиваются съ одной стороны бумагой и накладываются оклеенными сторонами другъ къ другу; нѣсколько тысячъ такихъ паръ накладываются одна на другую въ одной и той-же послѣдовательности. Полюсы такого столба (фиг. 34) на каждый дециметръ длины его имѣютъ разность потенціаловъ около 1000 Дан. Эти удобные и хорошо дѣйствующіе источники употребляются еще и теперь для полученія постоянныхъ и высшихъ потенціаловъ.

Фиг. 42.

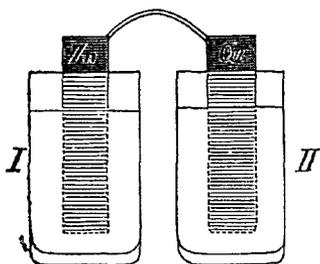


Еще объ опытѣ Вольты.

§ 42. Конденсаторъ Вольты Zn/Cu представляетъ (по Эвснеру и Брауну) ни что иное, какъ его-же элементъ въ обратномъ видѣ, какъ это изображено на фиг. 43. Тонкіе слои воды, покрывающіе пластинки конденсатора, принимаютъ ту же разность потенціаловъ, какъ и вода въ

сосудах I и II (фиг. 43), при чемъ разность эта, какъ легко усмотрѣть, равна разности потенциаловъ элемента Вольты съ противоположнымъ знакомъ. Вода, покрывающая цинкъ, заряжается положительно, а покрывающая мѣдь—отрицательно. Сами же металлы имѣютъ нѣкоторый общій средній потенциалъ. Такимъ образомъ кажется, будто поверхности металлическихъ пластинокъ въ конденсаторѣ Вольты имѣютъ зарядъ противоположнаго знака, чѣмъ въ элементѣ Вольты, между тѣмъ, какъ это относится, собственно говоря, только къ

Фиг. 43.



внѣшнимъ поверхностямъ слоевъ воды, покрывающей пластинки конденсатора.

Законъ Вольты.

По закону Вольты разность потенциаловъ конденсаторовъ изъ металловъ M_1 и M_2 равна суммѣ разностей потенциаловъ конденсаторовъ изъ металловъ M_1/M_2 и M_2/M_3 , гдѣ M_3 обозначаетъ произвольный третій металлъ (ср. таблицу § 30). Если принять во вниманіе описанное въ §§ 36 и 42 дѣйствіе водяныхъ слоевъ, покрывающихъ металлы, то разность потенциаловъ M_1/M_2 нужно представить въ видѣ суммы $Aq/M_1 + M_2/Aq$. Тоже самое слѣдуетъ сказать и о прочихъ сочетаніяхъ. И такъ должно имѣть мѣсто $M_1/M_2 + M_2/M_3 = M_1/M_3$ точнѣе $(Aq/M_1 + M_2/Aq) + (Aq/M_2 + M_3/Aq) = (Aq/M_1 + M_3/Aq)$. Последнее уравненіе представляетъ тождество. Поэтому, согласно такому взгляду, законъ Вольты долженъ бы являться самъ собою понятнымъ.

Термо-электрическіе элементы.

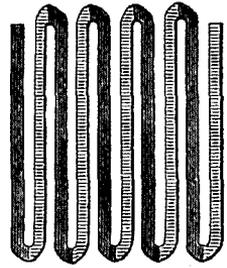
§ 43. Изъ другихъ, кромѣ химическихъ, источниковъ электричества до сихъ поръ пользовались съ выгодой только термоэлектрическими батареями (§ 31). Онѣ состоятъ изъ пластинокъ висмута и сурьмы, спаянныхъ въ видѣ зигзага; четныя мѣста спаевъ нагрѣваются, а нечетныя (съ противодѣйствующей электровозбудительной силой) охлаждаются льдомъ (фиг. 44).

Нейтральная точка.

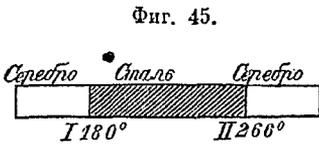
Дѣйствіе термо-элемента (фиг. 45) опредѣляется не разностью температуръ его спаевъ, а абсолютною величиною этихъ температуръ. Это слѣ-

дуетъ изъ того, что въ уравненіи Авенаріуса имѣется членъ второй степени (§ 31). Напр. электровозбудительная сила V сочетанія серебро—сталь достигаетъ своей максимальной величины (0.5 Дан.) при 223°C . (срав. графическое изображеніе фиг. 46) и имѣетъ одинаковую величину для температуръ равно отстоящимъ отъ этой точки (напр. 180° и 266°). Если при этихъ температурахъ удерживать

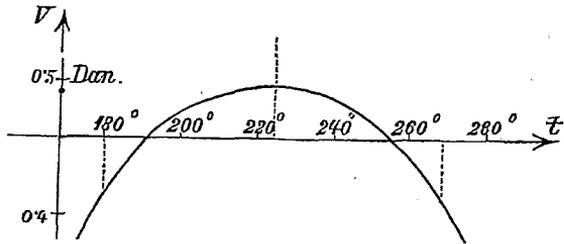
Фиг. 44.



Фиг. 46.



Фиг. 45.



спаи элемента фиг. 45, то, не смотря на большую разность ихъ, въ элементѣ не обнаруживается никакой электровозбудительной силы. Температуру 223° называютъ нейтральною точкою сочетанія серебро-сталь-серебро. Для сочетанія серебро-сталь при этой температурѣ бываетъ максимумъ дѣйствія.

Термо-электрическія батареи.

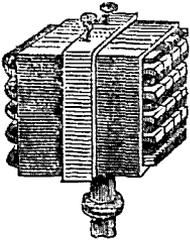
Термо-батареямъ (фиг. 44) придаютъ очень удобный видъ, соединяя ихъ въ цилиндръ, у одного изъ оснований котораго находятся четныя спаи (подлежащія нагрѣванію), у другого нечетныя (подлежащія охлажденію). Такой термо-столбъ (фиг. 47) заключаетъ иногда до сотни элементовъ. При приближеніи теплой руки къ одному изъ концовъ такого столба уже на разстояніе одного метра, на полюсахъ возбуждается замѣтная разность потенциаловъ, которую легко обнаружить при помощи чувствительнаго прибора (гальванометръ § 142). Такія батареи съ пользою употребляются для измѣренія напряженія свѣтовыхъ и тепловыхъ лучей (Меллони 1841).

Параллельное соединеніе.

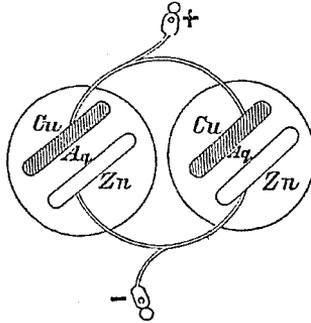
§ 44. Чтобы сдѣлать источникъ электричества обильнымъ и быстро-дѣйствующимъ, слѣдуетъ увеличить его электровозбудительныя поверх-

ности. Соединяя параллельно (фиг. 48 и 49) два (термо- или вольта-) элемента, мы не получаемъ, правда, болѣе высокой разности потенціа-

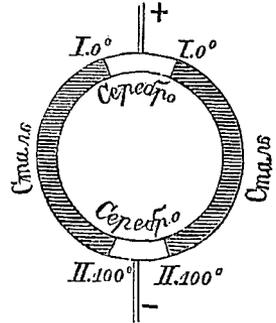
Фиг. 47.



Фиг. 48.



Фиг. 49.



ловъ, чѣмъ при одномъ элементѣ, но данный зарядъ можемъ въ два раза быстрѣ доставить, или такъ-же быстро, какъ въ случаѣ одного элемента съ удвоенными электровозбудительными поверхностями.

Искра при приближеніи электродовъ.

При приближеніи концовъ полюсныхъ проволокъ столба Замбони происходитъ разрядъ въ видѣ маленькой искры (§ 1, 22). Чтобы получилась новая искра, полюсы должны получить первоначальную разность потенціаловъ, для чего требуется нѣкоторое время, такъ какъ кружки въ этихъ столбахъ малы, а бумага представляетъ очень дурной проводникъ.

Потокъ искръ.

При приближеніи концовъ полюсныхъ проволокъ термо-или вольта-батареи получается рядъ искръ, быстро слѣдующихъ другъ за другомъ. Чѣмъ болѣе элементовъ соединено послѣдовательно, тѣмъ выше разность потенціаловъ и тѣмъ длиннѣе искры. Чѣмъ больше поверхности пластинокъ или чѣмъ больше элементовъ соединено параллельно, тѣмъ быстрѣ можно заставить искры слѣдовать другъ за другомъ.

4. Установившееся токо-состояніе. Теплота, развиваемая въ проводникъ, находящемся въ электрическомъ токо-состояніи.

Замыканіе цѣпи.

§ 45. При уменьшеніи разстоянія между концами полюсныхъ проволокъ разрядъ батареи происходитъ ранѣе, чѣмъ напряженіе на полюсахъ достигнетъ максимальной величины; при этомъ ни одна изъ

искръ не разряжаетъ батарею вполнѣ, такъ какъ скорость заряженія равна скорости разряженія. Отсюда слѣдуетъ:

1) Амплитуда и періодъ колебанія напряженія на полюсахъ уменьшаются вмѣстѣ съ уменьшеніемъ разстоянія между полюсами и наконецъ совершенно ускользаютъ отъ наблюденія.

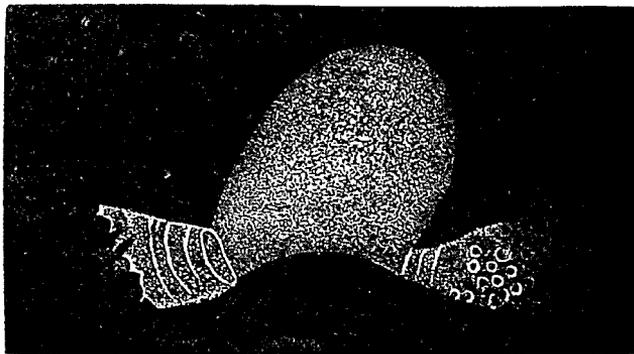
2) Получающееся при этомъ окончателное значеніе электровозбудительной силы батареи бываетъ меньше чѣмъ до разряда, но больше нуля.

Описанный процессъ называется *замыканіемъ цѣпи*.

Вольтова дуга.

§ 46. Пространство, въ которомъ перескакиваютъ искры, нагрѣвается до бѣлаго каленія и вслѣдствіе этого настолько способствуетъ образованію искръ, что послѣ замыканія цѣпи разстояніе между электродами можно постепенно увеличивать безъ того, чтобы разряженіе сдѣлалось опять замѣтно періодическимъ. При этомъ получается (особенно при употребленіи угольныхъ электродовъ) блестящая бѣлая дуга, изогнутая по линіямъ силъ (фиг. 50). Батарея въ 50 элементовъ Даніэля средней

Фиг. 50.



величины даетъ красивую свѣтовую дугу длиною въ 2 мм. и силою въ 1000 нормальныхъ свѣчей.

**Энергія проводника, находящагося въ электрическомъ токо-
состояніи.**

§ 47. Все время пока разряды идутъ съ замѣтными перерывами и дуга шипитъ, можно еще говорить о послѣдовательныхъ заряженіяхъ

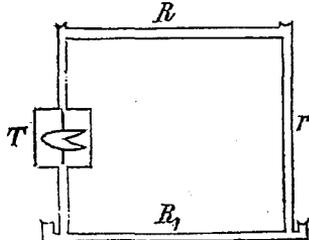
и разряженіяхъ полюсныхъ проволокъ. Химическая энергія, расходуемая у реагирующихъ (цинкъ/вода) поверхностей батареи, превращается сначала въ энергію заряда (электростатическую энергію) полюсныхъ проволокъ, а потомъ въ тепловую и лучистую энергію дуги. Но когда дуга горитъ спокойно, тогда не происходитъ никакого измѣненія въ зарядѣ полюсныхъ проволокъ. Все же химическая энергія реагирующихъ поверхностей не превращается у этихъ поверхностей въ теплоту, но всецѣло въ лучистую энергію дуги. Неизвѣстный еще процессъ, обуславливающий переносъ химической энергіи по полюснымъ проволокамъ отъ батареи къ дугѣ, называется *электрическимъ токо-процессомъ*, а та форма, въ которой эта энергія передается по проволокамъ (а можетъ быть и возлѣ нихъ), называется *электрической токо-энергіей*.

Установившееся токо-состояніе.

§ 48. Эта энергія, исходя изъ соединительныхъ проволокъ, можетъ превратиться разнообразными другими способами въ другія формы энергіи внутри или внѣ этихъ проволокъ; другими словами: соединительныя проволоки находятся въ нѣкоторомъ особенномъ состояніи,—въ *установившемся (стаціонарномъ) токо-состояніи*. Стаціонарнымъ (установившимся) называютъ это состояніе потому, что электростатическія свойства цѣпи не измѣняются, чего нельзя сказать о другихъ свойствахъ ея: въ одномъ мѣстѣ происходятъ химическія измѣненія, въ другомъ выдѣленіе свѣта и теплоты.

Представимъ себѣ двѣ водопроводныя трубы R и R_1 (фиг. 51) на высотѣ H и H_1 . При помощи турбины T вода изъ R_1 поднимается въ R и стекаетъ

Фиг. 51.



внизъ черезъ трубку g съ шероховатыми волнистыми стѣнками, при чемъ треніе воды о трубку и количество выдѣляемой вслѣдствіе этого теплоты таково, что вода достигаетъ до низу, не измѣнивъ скорости своего движенія. Работу турбины можно сравнить съ расходомъ энергіи въ элементѣ, а превращеніе энергіи въ g съ

таковымъ же въ свѣтовой дугѣ. Трубы R и R_1 переносятъ потенциальную энергію, которая заключается въ поднятой водѣ. Эту энергію можно сравнить съ токо-энергіей.

Теплота, развиваемая въ проводникѣ, находящемся въ электрическомъ токо-состояніи.

§ 49. Чѣмъ меньше разстояніе между электродами, тѣмъ менѣе въ дугѣ количество развиваемой въ секунду энергіи и тѣмъ яснѣе становится, что *превращеніе токо-энергіи въ теплоту происходитъ* не исключительно въ дугѣ, но, хотя и въ меньшей степени, *во всей цѣпи*.

Въ этомъ можно убѣдиться просто, ощупывая проводникъ, находящійся въ сильной степени токо-состояніи. При надлежащемъ расположеніи (§ 63) нѣкоторыя части цѣпи накаляются. Для слабыхъ степеней токо-состояніи это можно доказать при помощи металлическаго термометра.

Паденіе потенціала.

При этомъ уменьшеніи разстоянія концы дуги не сохраняютъ прежней разности потенціаловъ, а таковая разность распределяется и по проводящимъ проволокамъ, такъ что по всей цѣпи происходитъ болѣе или менѣе равномерное неизмѣнное *паденіе потенціала*, а на реагирующихъ поверхностяхъ элементовъ сохраняются скачки въ противоположномъ направленіи.

Электрометръ показываетъ, что въ заменутой цѣпи 10 метровъ длиною одного большого элемента Грове значеніе потенціала не вездѣ одинаково, что было бы, если бы цѣпь находилась не въ токо-состояніи, а въ состояніи электростатическаго заряда (§ 16). Соединяя различныя точки цѣпи съ электрометромъ, получимъ:

Разстояніе отъ цинковаго полюса.	0.	2 м.	5 м.	8 м.	10 м.
Значеніе потенціала . .	—1·0	—0·6	0	+0·6	+1·0 Даніэля.

Во всей цѣпи происходитъ поэтому паденіе потенціала въ $+ \frac{2\cdot0}{10}$ Дан. на метръ = $+ 0\text{,}66$ (сан.— $^{1/2}$ гр. $^{1/2}$ сек.— 1) (считая по «положительному тово-направленію», отъ положительнаго полюса къ отрицательному), а у реагирующей поверхности скачекъ въ $-2\cdot0$ Дан. Срав. графич. изображеніе фиг. 52 и 53.

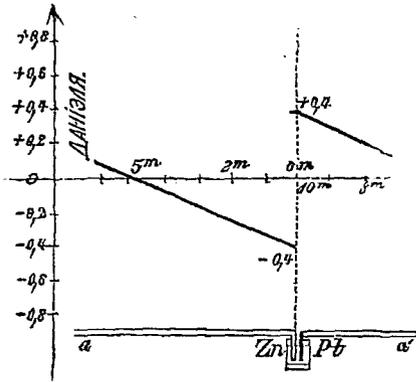
Аналогію § 48 можно распространить и на только что разсмотрѣнный общій случай. Представимъ себѣ, что трубы R и R₁ такъ узки, что выдѣленіе тепла вслѣдствіе тренія становится замѣтнымъ и предположимъ опять, что скорость воды вездѣ одинакова. Тогда трубамъ нужно дать таковой наклонъ, чтобы выдѣленіе тепла покрывалось работою паде-

нія воды. Фиг. 54 соответствует фиг. 52 и 53. Точки *a* и *a'* слѣдуетъ разсматривать, какъ совпадающія.

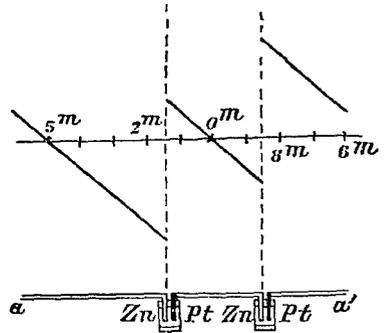
Чѣмъ шероховатѣе и волнистѣе стѣнки трубки въ части *bb'* (фиг. 55), чѣмъ болѣе, слѣдовательно, выдѣляется въ этой части тепла, тѣмъ

Фиг. 52.

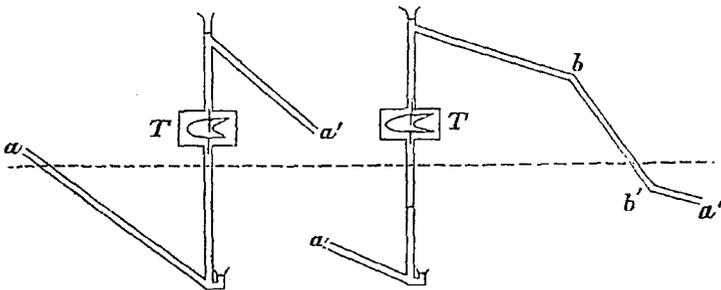
Фиг. 53.



Фиг. 54.



Фиг. 55.



болѣе долженъ быть приданъ наклонъ трубкѣ въ этомъ мѣстѣ, т. е. тѣмъ болѣе должно быть здѣсь паденіе воды.

Законъ Джауля.

§ 50. Такъ же неравномѣрно распредѣляется и паденіе потенціала вдоль не вполне однородной цѣпи.

Положеніе 1. Оно наибольше тамъ, гдѣ происходитъ наибольшее выдѣленіе тепла, при чемъ количество теплоты, выдѣляемое какою нибудь частью цѣпи въ 1 сек. на 1 сант. длины, пропорціонально квадрату паденія потенціала въ этой части (Джауль 1841).

Положеніе 2. Количество теплоты, выдѣляемое даннымъ кускомъ проволоки, остается постояннымъ въ какую бы цѣпь мы его ни включили,

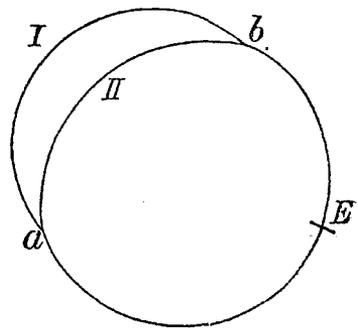
лишь бы паденіе потенціала на этомъ кускѣ оставалось постояннымъ. Количество теплоты не зависитъ поэтому отъ лежащихъ внѣ проводника частей цѣпи, но только отъ состоянія самого проводника: разности потенціаловъ на его концахъ, формы его, вещества, температуры и т. д.

Вскорѣ можно будетъ привести подробную формулировку закона Джауля.

Распредѣленіе электрическаго токо-состоянія между двумя проволоками, включенными параллельно.

§ 51. Если между двумя точками цѣпи *a* и *b* (фиг. 56) включить вмѣсто одного проводника два I и II, то оба они прійдутъ въ токо-состояніе и количество выдѣляемой въ нихъ теплоты будетъ соответствовать паденію потенціала между этими точками такъ, какъ и въ простой цѣпи (Полож. 2). Если проволоки I и II совершенно одинаковы, то для всякой разности потенціаловъ точекъ развѣтвленія *a* и *b*, количество выдѣляемаго въ каждомъ изъ обоихъ проводниковъ тепла будетъ совершенно одинаково. Если проводники I и II замѣнить однимъ, то онъ будетъ имѣть вдвое большую площадь поперечнаго сѣченія.

Фиг. 56.



Положеніе 3. Поэтому не слѣдуетъ удивляться, что количество выдѣляемаго *тепла*, при прочихъ равныхъ обстоятельствахъ, пропорціо-
нально площади поперечнаго сѣченія проводника.

Положеніе 4. Это количество зависитъ отъ вещества проводника, отъ величины (но не отъ формы) площади поперечнаго сѣченія и не зависитъ отъ того, какъ изогнуть самъ проводникъ.

Формулировка закона Джауля.

§ 52. И такъ законъ Джауля можетъ быть выраженъ уравненіемъ:

$$\frac{W}{L} = k q G^2 \dots 1a)$$

въ которомъ *W* означаетъ полное количество теплоты, выдѣляемое въ 1 секунду, *L*—длину проводника, *q*—поперечное сѣченіе, *k*—постоянную,

зависящую от материала проводника (такъ называемая *удѣльная проводимость* материала) и наконецъ G —паденіе потенциала.

Пользуясь соотношеніемъ $G = \frac{E}{L}$, гдѣ E разность потенциаловъ на концахъ проводника (*напряжение у борновъ*), предыдущему уравненію можно дать видъ:

$$W = \frac{E^2}{w} \dots 1), \text{ гдѣ } w = k \frac{L}{q} \dots 2)$$

Сопротивленіе проводника.

Постоянная w , зависящая отъ природы и формы проводника, обыкновенно называется *сопротивленіемъ проводника*. Постоянная k^{-1} (обратная удѣльной проводимости) называется *удѣльнымъ сопротивленіемъ* материала. Названія эти выбраны во вниманіе къ аналогіямъ § 48 и 49 и помимо этого не имѣютъ никакого значенія.

Количество теплоты, выдѣляемое въ 1 секунду проводникомъ, находящимся въ установившемся токо-состояніи, пропорціонально квадрату разности потенциаловъ на концахъ проводника и обратно пропорціонально сопротивленію его (Законъ Дюсауля).

Удѣльное сопротивленіе.

§ 53. Если проводимость серебра (наибольшую между всеѣми) обозначить черезъ 100, то проводимости другихъ металловъ будутъ имѣть слѣдующія значенія:

	Серебро.	Мѣдь.	Золото.	Цинкъ.	Желѣзо.	Платина.	Ртуть.
к. . .	100	77,4	55,9	27,4	14,4	10,5	1,6

Сопротивленіе химически чистыхъ металловъ довольно сильно мѣняется съ температурой и въ довольно широкихъ предѣлахъ возрастаетъ пропорціонально ихъ абсолютной температурѣ, т. е. по уравненію

$$w_{t^0} = w_{0^0} \left(1 + \frac{t^0}{273} \right).$$

Поэтому при 273° оно вдвое больше чѣмъ при 0°. (Клаузиусъ, Лоренцъ 1881 г.).

Теплопроводность и показатель преломленія металловъ измѣняются съ природою и температурою послѣднихъ точно такъ же, какъ и ихъ электрическая проводимость (Форбсъ 1831, Кундтъ 1888 г.).

Въ сравненіи съ другими жидкостями ртуть имѣтъ громадную проводимость. Если ее положить равною 100 (а проводимость серебра слѣдовательно = 6300), то проводимости другихъ жидкостей будутъ слѣдующія:

Ртуть.	Азотная кислота.	Растворъ поваренной соли.	Растворъ мѣднаго купороса.	Чистая вода.
100	0,007	0,002	0,0004	изолируетъ

Проводимость химически сложныхъ жидкостей возрастаетъ вмѣстѣ съ температурою. Обратный коэффициентъ тренія и скорость диссоціаціи этихъ жидкостей извняются съ природою и температурою послѣднихъ такъ же, какъ и ихъ электрическая проводимость (Гитторъ).

Абсолютная единица мѣры для сопротивленія.

§ 54. Абсолютное значеніе постоянной k [ур. 1) и 2)] зависитъ отъ системы единицъ, въ которыхъ измѣрены W и E . При помощи непосредственныхъ потенциальныхъ и калориметрическихъ измѣреній возможно получить значеніе сопротивленія въ абсолютныхъ механическихъ единицахъ. Для подобныхъ измѣреній имѣются однако другія гораздо болѣе удобные и точные методы (§ 68).

Каково измѣреніе сопротивленія въ абсолютныхъ механическихъ единицахъ? Измѣреніе E — (сан. $\frac{1}{2}$ гр. $\frac{1}{2}$ сек. $^{-1}$), W имѣетъ такое же измѣреніе, какъ и работа въ 1 секунду (сан. $\frac{1}{2}$ гр. сек. $^{-3}$), слѣдовательно измѣреніе $w =$ (сан. $^{-1}$ сек.).

Столбъ чистой ртути въ 1 м. длины и 1 $\frac{м^2}{м}$ поперечнаго сѣченія, при разности потенциаловъ на концахъ въ 1 даніель = 0,003 (сан. $\frac{1}{2}$ гр. $\frac{1}{2}$ сек. $^{-1}$), выдѣляетъ въ 1 секунду около 0,23 граммакалорій, что по Р. Майеру составляетъ 10^7 (сан. $\frac{1}{2}$ гр. сек. $^{-2}$) теплоты (Джауль). Поэтому его сопротивленіе въ абсолютныхъ единицахъ по ур. 1) равно 0,112 (сан. $^{-1}$ сек.).

Единица Сименса.

При измѣреніяхъ это сопротивление принимаютъ (по предложенію В. Сименса) за практическую произвольно выбранную единицу подъ названіемъ единицы Сименса (обозначается Е. С.)

1. Е. С. = $0,1112$ (сан. $^{-1}$ сек.) абсолютныхъ един.

Сколько теплоты выдѣляетъ такой столбъ ртути при разности потенциаловъ на концахъ въ 10 даніелей? Въ сто разъ больше (23 гр. кал. въ 1 сек.). А такихъ же размѣровъ серебрянная проволока при 1 дан.? Въ 63 раза больше. Сколько тепла выдѣляетъ золотая проволока въ 2 м., $5 \frac{м^2}{м}$ при разности потенциаловъ въ 10^{-5} С. Г. С.? 7 гр. калорій въ 1 секунду.

Распределеніе потенциаловъ въ неоднородной цѣпи.

§ 55. Теперь остается вывести законъ, по которому происходитъ выдѣленіе тепла, а слѣдовательно и распределеніе паденія потенциала въ неоднородной цѣпи.

Положеніе 5. Если нѣкоторую часть цѣпи замѣнить какимъ-нибудь другимъ проводникомъ *одинаковаго* сопротивления, то выдѣленіе тепла останется то-же самое (*Законъ Ома*). Отъ этой замѣны не произошло потому никакого измѣненія въ разности потенциаловъ на концахъ, а слѣдовательно и въ распределеніи потенциала въ цѣпи.

Теплота, выдѣленная проводникомъ, находящимся въ установившемся тово-состояніи, при прочихъ равныхъ обстоятельствахъ, пропорціональна длинѣ проводника. Въ двухъ равной длины частяхъ одного и того же проводника (нѣтъ необходимости, чтобы части эти непременно соприкасались) выдѣляются потому одинаковыя количества теплоты. Если представить себѣ, что части эти замѣнены другими проводниками одинаковаго съ ними сопротивления, то легко усмотрѣть:

Положеніе 6. Части равнаго сопротивления, находящіяся гдѣ бы то ни было въ одной и той же цѣпи, выдѣляютъ равныя количества теплоты.

Части неодинаковой длины одной и той же цѣпи выдѣляютъ количества теплоты пропорціональныя ихъ длинамъ, а слѣдовательно и сопротивленіямъ. Отсюда слѣдуетъ, какъ и прежде:

Положеніе 7. *Проводники разнаго сопротивленія, включенныя гдѣ угодно въ одну и ту же цѣпь, выдѣляютъ количества тепла пропорціональныя ихъ сопротивленіямъ.*

Частное $\frac{W}{w}$ отъ дѣленія количества выдѣленной теплоты W на сопротивление w имѣеть, слѣдовательно, постоянную величину для всѣхъ частей цѣпи. Но такъ какъ мы имѣемъ (ср. ур. 1):

$$\frac{W}{w} = \frac{E^2}{w^2}$$

Законъ Ома.

§ 56. То стало бытъ и частное отъ дѣленія разности потенциаловъ на концахъ E на сопротивление w имѣеть постоянную величину для всѣхъ частей цѣпи (Законъ Ома 1827 г.).

Токо-напряжение.

Это частное называютъ силою, или напряженіемъ токо-состоянія или сокращенно токо-напряженіемъ J .

$$\frac{E}{w} = J = \text{Const. (Законъ Ома). . . . 3).}$$

Пользуясь этимъ выраженіемъ, закону Джауля можно дать видъ:

$$W = J^2 w 4) \quad W = JE 5).$$

Нужно обратить вниманіе на то, что по уравненію 3) токо-напряженіе J , какъ и разность потенциаловъ E , имѣеть направленіе и знакъ. Въ проводникѣ, въ которомъ значенія потенциаловъ въ положительномъ направленіи уменьшаются ; токо-напряженіе имѣеть положительное увеличиваются ; отрицательное направленіе.

Не слѣдуетъ думать, что паденіе потенциала и токо-напряженіе представляютъ различныя свойства проводника, которыя существуютъ одновременно и обусловливаютъ другъ друга. Это только двѣ формы, въ которыхъ, смотря по надобности, разсматривается одно и то же явленіе. Если въ дальнѣйшемъ будетъ сказано: въ проводникѣ имѣется нѣкоторое токо-напряженіе, то во всѣхъ случаяхъ это будетъ означать только то, что въ проводникѣ происходитъ нѣкоторое паденіе потенциала и что онъ находится, слѣдовательно, въ другомъ состояніи, чѣмъ въ состояніи электростатическаго заряда.

Историческая замѣтка.

Г. С. Омъ (род. въ 1789 г., умеръ въ 1854 г.) вывелъ свой законъ задолго до Джауля при помощи непосредственныхъ электроскопическихъ наблюденій. Эти наблюденія были повторены потомъ въ 1853 г. Кольраушемъ съ болѣе точными приборами. Къ предположе-

Общая проводимость равна суммѣ проводимостей обѣихъ проводниковъ, общее же сопротивление для $w_1 \geq w_2$ получается по болѣе сложному урав. 6 б).

Первая теорема Кирхгофа.

§ 60. Токонпряжение J во вѣѣ лежащей части цѣпи такая же, какъ и въ части ab , а именно $\frac{E}{w}$. Но по ур. 6 б) имѣемъ:

$$\frac{E}{w} = \frac{E}{w_1} + \frac{E}{w_2} \dots \dots \dots 6 \text{ а)}$$

$\frac{E}{w_1} = J_1$ есть токонпряжение въ I , а $\frac{E}{w_2} = J_2$ есть токонпряжение во II .

Отсюда получаемъ теорему:

$$J = J_1 + J_2 \dots \dots \dots 6 \text{ б)}$$

Токонпряжение въ неразвѣтвленной части цѣпи равно суммѣ токонпряжений въ развѣтвленіи (ab).

Алгебраическая сумма токонпряжений всѣхъ вѣтвей, сходящихся въ одной точкѣ, равна нулю. (Первый законъ Кирхгофа 1851 г.). При этомъ паденіе потенциаловъ во всѣхъ вѣтвяхъ, начиная отъ точки сѣченія, нужно считать положительнымъ.

Плотность токонпряженія.

Можно поэтому предположить, что всѣ продольныя волокна проводнива принимаютъ участіе въ токосостояніи, сумма напряженій которыхъ равна полному токонпряженію. Токонпряжение J , отнесенное къ единицѣ площади поперечнаго сѣченія, называется плотностью токонпряженія D . Для проволоки съ поперечнымъ сѣченіемъ q будетъ имѣть

$$J = Dq \text{ или } D = \frac{J}{q} = kG \text{ (ср. § 52).}$$

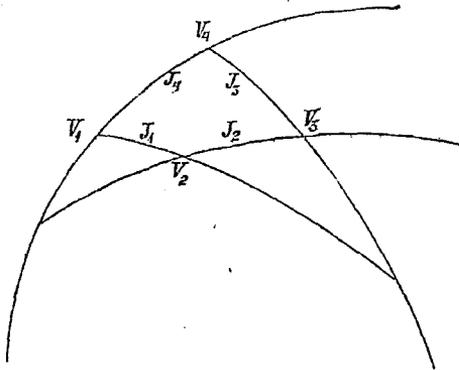
Вторая теорема Кирхгофа.

§ 61. Если въ замкнутомъ контурѣ V_1, V_2, V_3, V_4 произвольно развѣтвленной цѣпи (фиг. 57) нѣтъ дѣйствующихъ электровозбудительныхъ силъ, то сумма разностей потенциаловъ $E_1 = (V_1 - V_2), E_2 = (V_2 - V_3), \dots$, считая ихъ въ одномъ опредѣленномъ направленіи, равна нулю: $(V_1 - V_2) + (V_2 - V_3) + (V_3 - V_4) + (V_4 - V_1) = 0$. Это очевидно. Теперь, если J_1 обозначаетъ токонпряжение въ V_1, V_2 , то $E_1 = J_1 w_1$. Поэтому $J_1 w_1 + J_2 w_2 + J_3 w_3 + J_4 w_4 = 0$.

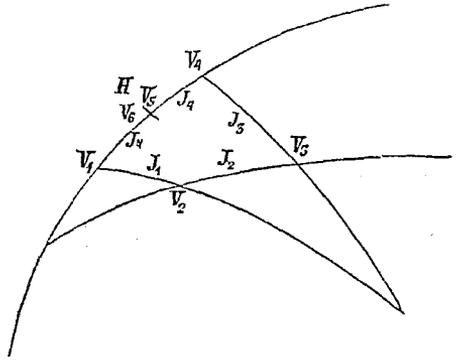
Словомъ $\Sigma Jw = 0$

Если же въ контурѣ въ мѣстѣ V_6/V_7 (фиг. 58) находится электро-
 возбуждательная поверхность съ разностью потенциалов $[V_6 - V_7] = H$,
 то $E_1 + E_2 + E_3 + E_4 = H$, (предоставляется сосчитать это читателю),
 слѣдовательно: $\sum Jw = H \dots \dots 7)$

Фиг. 57.



Фиг. 58.



Въ замкнутомъ контурѣ произвольно развѣтвленнаго проводника алгебраическая сумма произведений изъ токонапряженія на сопротивление отдѣльныхъ частей контура равна суммѣ дѣйствующихъ въ этомъ контурѣ электровозбудительныхъ силъ. (Второй законъ Кирхгофа).

Электровозбудительныя силы и токонапряженія нужно считать въ одномъ и томъ же, хотя и произвольномъ направленіи. Второй законъ Кирхгофа выражаетъ собою не что другое, какъ только то, что каждая точка цѣпи находится при нѣкоторомъ опредѣленномъ, имѣющемъ единственное значеніе потенциалѣ.

Наложеніе электровозбудительныхъ дѣйствій.

Такъ же легко, какъ и это предложеніе, при помощи простаго сосчитыванія, можетъ быть выведено предложеніе о наложеніи электровозбудительныхъ дѣйствій: установившіеся потенциалы (а стало быть и токонапряженія) въ произвольно сложной системѣ проводниковъ, въ которой дѣйствуетъ нѣсколько электровозбудительныхъ поверхностей, равны алгебраической суммѣ потенциаловъ (токонапряженій), которые породила бы каждая изъ электровозбудительныхъ поверхностей, дѣйствуя отдѣльно, въ такой же системѣ проводниковъ.

5. Примѣненіе законовъ Ома, Кирхгофа и Дюжюлля.

Сопротивленіе проводниковъ, введенныхъ послѣдовательно.

§ 62. Уравненій 3) 6) 7) вполне достаточно для опредѣленія установившагося распредѣленія потенциаловъ въ произвольно сложной системѣ проводниковъ. Попытаемся сдѣлать это для случая нѣкоторыхъ простыхъ задачъ.

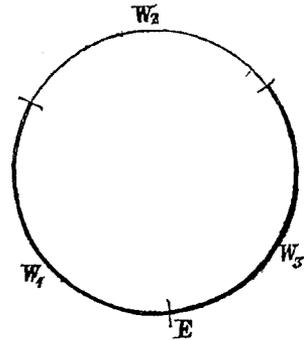
Какъ велико полное сопротивленіе w неоднородной цѣпи? Пусть она состоитъ изъ сопротивленій w_1, w_2, w_3 (фиг. 59). Въ E пусть дѣйствуетъ электровозбудительная сила E

Фиг. 59.

$$\text{имѣемъ: } 3) J_1=J_2=J_3=J=\frac{E}{w}$$

$$\text{и } 7) (w_1+w_2+w_3) J=E$$

$$\text{и такъ } w_1+w_2+w_3=w.$$



Этотъ результатъ можно было непосредственно усмотрѣть на основаніи разсужденій въ родѣ примѣненія къ усненію положеній 6) и 7) (§ 55).

Полезное и вредное сопротивленія.

§ 63. Какъ слѣдуетъ поступать, чтобы часть цѣпи w_2 выдѣляла возможно больше теплоты?

По положенію 7) она должна имѣть по возможности большее сопротивленіе сравнительно съ w_1 и w_3 .

По закону Джауля вся цѣпь должна имѣть по возможности малое сопротивленіе.

Если (w_1+w_3) не можетъ быть сдѣлано меньше чѣмъ w и въ w производится количество теплоты Q_1 , а въ w_2 количество теплоты Q_2 , то имѣемъ:

$$\text{по положенію 7) (ур. 3): } \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{w}{w_2}; \text{ (Джауль) } Q_1+Q_2 = \frac{E^2}{w+w_2}$$

отсюда слѣдуетъ: $Q_2 = \frac{w_2}{w+w_2} \cdot E^2$. Если выбрать $w_2 = w + \Delta$, то получимъ, выполнивъ

дѣленіе, $Q_2 = \frac{E^2}{4w} \left(1 - \frac{\Delta^2}{4w^2} \right)$. Никакое другое значеніе, кромѣ $\Delta=0$, не можетъ сдѣлать

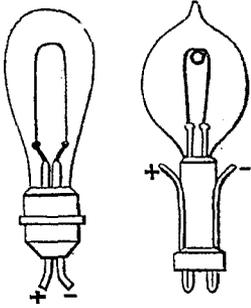
Q_2 болѣе чѣмъ $Q_2 = \frac{E^2}{4w}$.

Поэтому наибольшее развитіе теплоты, а слѣдовательно и наибольшее токонапряженіе (ур. 4), достигается тогда, когда полезное сопротивленіе w_2 сдѣлано по возможности равнымъ неизбежному вредному сопротивленію w [сопротивленіе соединительныхъ проводовъ, жидкостей въ батареѣ (внутреннее сопротивленіе батареи)].

Электрическая лампа накаливанія.

§ 64. Если замѣнить часть проводника w_2 (тонкой, короткой) проволокой, теплопроводность и лучеиспусканіе которой незначительны, то она уже при слабомъ токонапряженіи сильно накаливается на счетъ выдѣляемой

Фиг. 60.



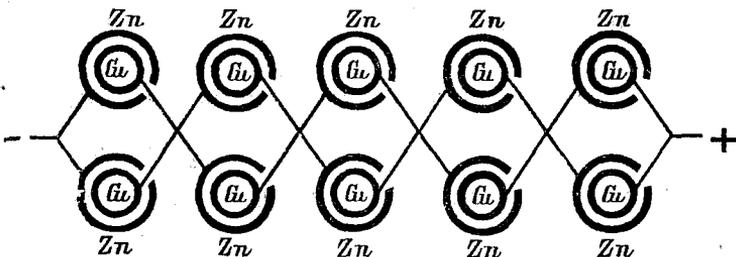
проводникомъ теплоты. Тонкое обугленное конопляное волокно, сопротивленіе котораго велико (100 Е. С.) и которое для защиты отъ сгорания заключается въ стеклянный шарикъ (фиг. 60), изъ котораго удаленъ воздухъ, при дѣйствіи разности потенциаловъ въ 5 Даніелей даетъ сильный источникъ свѣта. (Лампа накаливанія Эдисона).

Какъ нужно расположить 10 лампъ накаливанія (каждая въ 100 Е. С.), чтобы батарея въ 10 элементовъ Даніеля (каждый въ 1 Е. С. внутреннего сопротивленія) была достаточна для успѣшнаго ихъ дѣйствія? Введемъ лампы параллельно ($w_2 = \frac{1}{10} \times 100$ Е. С.), элементы послѣдовательно ($w = 10 \times 1$ Е. С.). Каждая лампа получаетъ тогда разность потенциаловъ въ 5 Даніелей, остальное паденіе потенциала въ 5 Дан. приходится на батарею. Токъ-напряжение въ ней: $(0,5 \frac{\text{Дан.}}{\text{Е. С.}})$, въ каждой лампѣ слѣдовательно десятая часть его $(0,05 \frac{\text{Дан.}}{\text{Е. С.}})$. Каждая изъ нихъ производитъ энергію въ $5 \text{ Дан.} \times 0,05 \frac{\text{Дан.}}{\text{Е. С.}} = 25$ граммъ-метровъ въ секунду.

Составленіе батареи.

§ 65. Какъ нужно расположить 10 элементовъ Даніеля (каждый 0,5 Е. С. внутреннего сопротивленія), чтобы въ замкнутой цѣпи, сопротивленіе которой 1,3 Е. С., получить по возможности высокое токовнапряжение? Соединимъ ихъ послѣдовательно въ h группъ, изъ которыхъ каждая содержитъ n элементовъ, введенныхъ параллельно (расположеніе $n+n+n+\dots h$ разъ). Полное сопротивленіе этой батареи равно $\frac{h}{n} \times 0,5 \text{ Е. С.}$ Изъ уравненій $\frac{h}{n} 0,5 \text{ Е. С.} = 1,3 \text{ Е. С.}$ и $h \cdot n = 10$ (числу элементовъ) получаемъ значеніе $h=5,1$ и $n=1,9$. Поэтому батарею нужно составить по схемѣ $2+2+2+2+2$ (фиг. 61).

Фиг. 61.



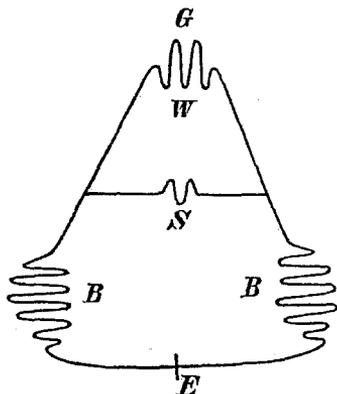
Балласть и шунтъ.

§ 66. Въ главной цѣпи E (фиг. 62) элемента, электровозбудительная сила котораго есть E , нужно получить токонапряжение J , въ отвѣтвленіи G (сопротивленія W) токонапряжение i . Введемъ рядомъ съ E балластное сопротивление B и передъ отвѣтвленіемъ G включимъ шунтъ S . Тогда имѣемъ:

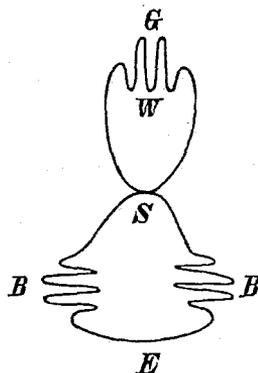
$$J. B + iW = E; iW - (J - i) S = 0.$$

отсюда слѣдуетъ: $S = \frac{i}{J-i} W; B = \frac{E-iW}{J}$

Фиг. 62.



Фиг. 63.

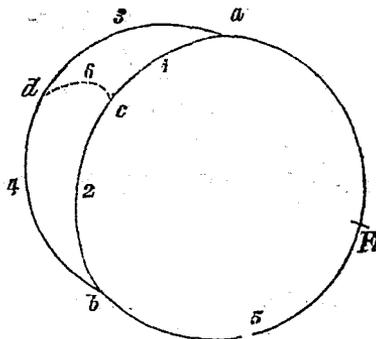


Чѣмъ меньше сдѣлаемъ S , тѣмъ слабѣе становится токонапряжение i въ G ; оно исчезаетъ однако только для случая $S=0$ (фиг. 63).

Вѣтвление проводника и мостъ.

§ 67. Но и въ системѣ проводниковъ, всѣ вѣтви которой имѣютъ конечныя сопротивления, можно получить вѣтвь, которая не будетъ находиться въ токо-состояніи, т. е. безъ разности потенціаловъ на концахъ. Стоитъ только концы ея приложить къ такимъ двумъ различнымъ точкамъ цѣпи, потенціалы которыхъ равны. Мѣста съ такими точками легко получить при помощи развѣтвленія проводника (фиг. 64).

Фиг. 64.



Концы c и d моста b имѣютъ одинаковые потенціалы, значеніе которыхъ заключается между значеніями

потенціаловъ точекъ развѣтвленія а и b, если только сопротивленіе 1 такъ относится къ сопротивленію 2, какъ сопротивленіе 3—къ сопротивленію 4 (на основаніи закона Ома).

Вывести это можно такъ же при помощи 1-го закона Кирхгофа для точекъ развѣтвленія с и d и второго закона для контуровъ 1,3,6 и 2,4,6.

Телеграфная встрѣчная передача.

Въ послѣднее время воспользовались такимъ расположеніемъ для телеграфной встрѣчной передачи. Токосостояніе, которое возбуждается въ проводникѣ передающимъ аппаратомъ станціи I, передается и приѣмному аппарату станціи II. Но на приѣмный аппаратъ станціи I токосостояніе не распространяется, хотя аппаратъ этотъ соединенъ системою проволоки съ линіей и можетъ быть вызванъ передающимъ аппаратомъ станціи II. Такимъ образомъ по одной и той же телеграфной проволоки могутъ быть передаваемы одновременно двѣ депеши въ противоположныхъ направленіяхъ, не мѣшая другъ другу.

Мостъ Уитстона.

§ 68. Схема фигуры 64-й была придумана Уитстономъ (1851 г.) съ цѣлью дать удобный способъ сравненія сопротивленій. Вѣтвь 1,2 представляетъ собою натянутую платиновую проволоку, имѣющую по всей длинѣ одинаковый діаметръ и вдоль которой расположена шкала съ дѣленіями. Точка развѣтвленія с есть подвижной контактъ. Поэтому сопротивленія w_1 и w_2 относятся такъ, какъ легко отсчитываемыя длины ас: вс. Затѣмъ 3 представляетъ собою извѣстное, 4—измѣряемое сопротивленіе. Передвигаютъ подвижной контактъ с до тѣхъ поръ, пока въ мостовой вѣтви 6 не прекратится токосостояніе. Тогда $w_4 = \frac{bc}{ac} w_3$.

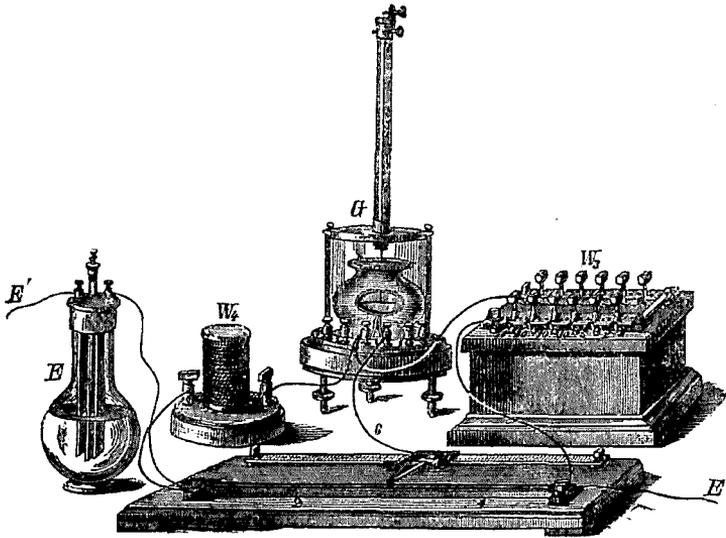
Нейзильберный эталонъ.

По этому способу легко сравнить два сопротивленія w_3 и w_4 , скопировать данное сопротивление и приготовить точную единицу Сименса изъ проволоки какого угодно металла, лучше всего изъ нейзильбера (сплавы не слѣдуютъ закону Клаузиуса и съ измѣненіемъ температуры чрезвычайно мало измѣняютъ сопротивление).

Измѣреніе сопротивленій.

Фиг. 65 представляетъ вѣншній видъ и соединеніе приборовъ при подобныхъ измѣреніяхъ сопротивленій. 1,2 изображаетъ платиновую проволоку со шкалою (мостъ Уитстона),

Фиг. 65.



W_3 есть ящикъ сопротивленій, съ которыми сравниваютъ измѣряемыя сопротивленія (штепсельный реостатъ Сименса), W_4 есть измѣряемое сопротивленіе, E элементъ въ вѣтви 5 (фиг. 64), наконецъ G гальванометръ въ вѣтви 6, показывающій прекращеніе токосостоянія моста 6. Для обнаруженія того, что проводникъ находится въ токосостояніи, выгодно воспользоваться магнитными свойствами такого проводника, чѣмъ тепловыми; поэтому то и слѣдуетъ употребить вмѣсто калориметра гальванометръ (§ 142) или телефонъ (§ 186).

Предлагается внимательно разсмотрѣть на подобной установкѣ приборовъ, какъ приводятся въ электрическое соединеніе различныя части цѣпи и какъ онѣ изолируются снаружи: проволоки—изолирующей оболочкой, точки развѣтвленія деревомъ или роговымъ каучукомъ, мѣста спаекъ, ртутные контакты, сжимы, подвижной контактъ, штепселя въ ящикѣ Сименса и какъ изолируется въ немъ проволока, а также способъ двойной намотки ея на катушки.

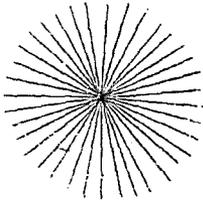
Распределеніе токосостоянія въ проводникахъ о трехъ измѣреніяхъ. Первый законъ Кирхгофа.

§ 69. Выведенные до сихъ поръ законы относятся къ распределенію токосостоянія (или паденія потенциала) въ линейныхъ проводникахъ (провокообразныхъ), однако съ ихъ помощію можно отгадать законы распределенія потенциала въ проводникахъ о трехъ измѣреніяхъ, находящихся въ установившемся токосостояніи.

Если въ точкѣ развѣтвленія сходится произвольное число линейныхъ проводниковъ (фиг. 66), то по первому закону Кирхгофа алгебраическая сумма стекающихся въ этой точкѣ паденій потенциала равна нулю.

Тотъ же законъ примѣнимъ ко всякой точкѣ внутри массивнаго

Фиг. 66.



проводника, при чемъ слѣдуетъ представить себѣ, что проволоки въ пучкѣ (фиг. 66) распределены густо и равномерно, а потенціалы вокругъ рассматриваемой точки непрерывно переходятъ другъ въ друга.

Этотъ законъ справедливъ также для каждой точки свободного электрическаго поля, удаленнаго отъ центровъ притяженій, а именно, если бы средняя величина стекающихся въ этой точкѣ паденій потенціаловъ не равнялась нулю, то точка, противно предположенію, была бы центромъ притяженія.

Составляющія токонапряженій.

Приведенный законъ даетъ возможность опредѣлить распределеніе потенціаловъ внутри проводника, находящагося въ установившемся токосостояніи, если только извѣстно распределеніе потенціаловъ на поверхности этого проводника. Установившіеся потенціалы внутри такого проводника распределѣются точно также, какъ и статическіе потенціалы внутри непроводника одинаковой формы и одинаковаго распределенія потенціаловъ на поверхности. Составляющія плотности токонапряженія (§ 60) имѣютъ тогда вездѣ одно и то же значеніе, какъ и составляющія паденія потенціала G (электрическаго дѣйствія на разстояніе) въ непроводникѣ и по принципу параллелограмма слагаются въ полныя плотности токонапряженія.

Линіи токонапряженій.

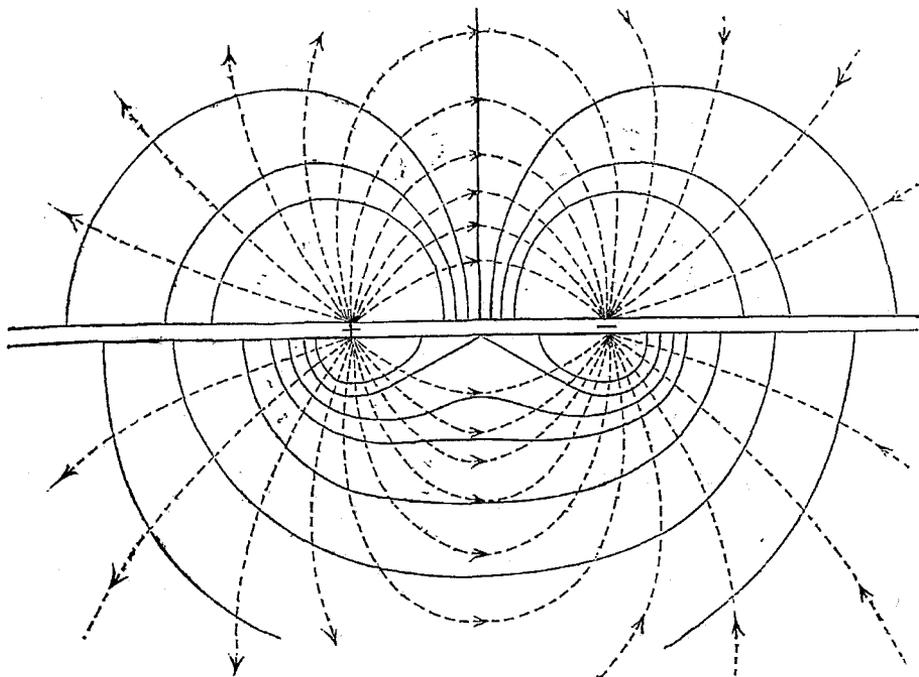
Направленія этихъ полныхъ плотностей вездѣ указываются линіями токонапряженій, соответствующими электростатическимъ линіямъ силъ (§ 15). Линіи токонапряженій пересѣкаютъ поверхности равныхъ потенціаловъ (поверхности уровня) нормально.

Поверхности равной плотности токонапряженія.

§ 70. Поверхности равнаго паденія потенціала въ электростатическомъ распределеніи потенціала не имѣютъ практическаго интереса. Нельзя сказать того же о соответствующихъ поверхностяхъ равной плотности токонапряженія въ проводникѣ. Плотность токонапряженія (паденіе потенціала) опредѣляетъ количество теплоты, выдѣлаемой единицею объема проводника (§ 52 урав. 1 а); поверхности одинаковой плотности токонапряженія суть такимъ образомъ поверхности одинаковаго выдѣленія теплоты, вообще одинаковаго проявленія токосостоянія.

Фиг. 67 представляет (сплошныя) линіи уровня потенциала въ тонкой металлической пластинкѣ (вѣрнѣе въ компактной металлической массѣ), находящейся въ установившемся

Фиг. 67.



Фиг. 68.

токоостояніи и къ которой подходят линейные проводники у точек $+$ и $-$. Пунктирные линіи фигуръ 67 и 68 представляют линіи токонапряженій, сплошныя лемнискаты фигуры 68 представляют линіи равной плотности токонапряженія, а слѣдовательно и равнаго выдѣленія теплоты. По Маху эти линіи можно сдѣлать непосредственно видимыми, покрывъ пластинку тонкимъ слоемъ воска и наблюдая плавленіе послѣдняго.

Распредѣленіе потенциала на поверхности.

§ 71. Распредѣленіе потенциала на поверхности проводника опредѣляется изъ условія, что составляющая токонапряженія по нормали должна равняться нулю. Это легко понять, если представить себѣ, что половина пучка фиг. 66 обладает дурней проводимостью. Поэтому поверхности уровня должны пересѣкать поверхность тѣла нормально, а линіи токонапряженій, встрѣчающія послѣднюю, не должны сходить съ нея. Поверхность проводника покрыта такимъ образомъ снопомъ линій токонапряженій, идущихъ другъ подлѣ друга.

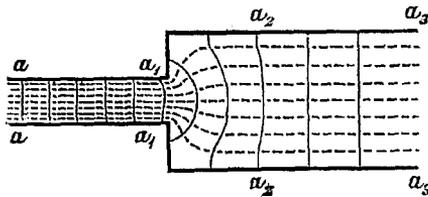
Трубки токонапряженій.

Законъ Ома относится къ каждой трубкѣ токонапряженія, т. е. къ каждому продольному волокну проводника, окруженному линіями токонапряженій.

Сопротивленіе расширенія.

Законы, выведенные въ § 55 и слѣдующихъ для линейныхъ проводниковъ, справедливы и для проволокообразныхъ проводниковъ большаго поперечнаго сѣченія, если только въ нихъ трубки токонапряженія (циркулярныя на фиг. 69) параллельны продольной оси проводника, а поверхности уровня (сплошныя на фиг. 69) перпендикулярны къ ней. Это справедливо для большей части длины такой проволоки, за исключеніемъ мѣстъ въ родѣ $a_1 a_2$ (фиг. 69),

Фиг. 69.



въ которыхъ она мѣняетъ поперечное сѣченіе. Сопротивленіе этой части проводника (сопротивленіе расширенія) вѣсколько больше вычисленнаго по ур. 2) и § 62.

*6. Сравненіе работы, производимой въ проводникъ, находящемся въ токо-
состояніи, съ электростатической работой.*

Разрядъ лейденской банки при помощи токопроцесса.

§ 72. Лейденская банка, разряжаясь черезъ замыкающій проводникъ, производитъ количество теплоты, пропорціональное квадрату ея первоначальной разности потенціаловъ (Риссъ 1835 г.). Такъ какъ этотъ разрядъ есть ни что иное, какъ токопроцессъ въ замыкающемъ проводникѣ, то по Джаулю нужно ожидать, что количество теплоты, развиваемое въ единицу времени, въ каждый данный моментъ пропорціонально *наличной* разности потенціаловъ. Оба закона согласуются только тогда, когда время, въ теченіи котораго разряжается банка, не зависитъ отъ величины заряда. Последнее дѣйствительно подтверждается опытами Федерсена и объяснено Кирхгофомъ (срав. § 172).

Разрядъ лейденской банки движеніемъ.

§ 73. Лейденская банка можетъ быть разряжена еще и иначе, чѣмъ при помощи токопроцесса въ замыкающемъ проводникѣ. Представимъ себѣ, что металлическая частица, находящаяся на поверхности одной изъ обла-
докъ, сдѣлалась свободною. Она будетъ оттолкнута въ такомъ случаѣ, перене-

сена въ другой обѣладѣѣ и пусть она пристанетъ къ послѣдней *не разряжаясь*. Пусть вслѣдствіе тренія она превратитъ на этомъ пути всю свою скорость въ теплоту. Повторяя это явленіе, можно вполнѣ смѣшать противоположныя заряды обѣихъ обѣладокъ. Въ этомъ случаѣ банка превратитъ весь свой электрическій запасъ работы сначала въ энергію движенія, потомъ въ теплоту, причемъ не будетъ имѣть мѣста никакой токопроцессъ.

Замѣна обоихъ процессовъ разряженія лейденской банки другъ другомъ.

§ 74. Этотъ процессъ переноса представляетъ нѣчто другое, чѣмъ токопроцессъ въ замыкающемъ проводникѣ (§ 72). Однако же *начальное* и *конечное* состояніе банки въ обоихъ случаяхъ одно и то-же. Если дѣло идетъ только о начальномъ и конечномъ состояніи проводника, то можно токопроцессъ § 72 замѣнить вполнѣ или въ произвольной ваѣ во времени, такъ и въ пространствѣ части его процессомъ переноса § 73.

Результаты превращенія энергіи въ обоихъ случаяхъ должны происходить по однимъ и тѣмъ же законамъ. Возможность замѣны обоихъ процессовъ позволяетъ такимъ образомъ свести законы токопроцесса, (§ 50 и слѣд.) къ законамъ электростатическаго производства работы.

Электрическій токъ.

§ 75. Замѣнимъ замыкающій проводникъ, находящійся въ токосостояніи, струей заряженной металлической пыли, которая перебрасывается съ одной обѣладки на другую, развивая треніе и теплоту. Такая струя, которую хотя и нельзя воспроизвести, но можно себѣ представить, будетъ называться въ слѣдующихъ параграфахъ *электрическимъ токомъ*.

Направленіе тока.

Если представимъ себѣ, что вся металлическая пыль отдѣлилась отъ положительной обѣладки и движется къ отрицательной, то получимъ такъ называемый положительный токъ. Такое же дѣйствіе имѣлъ бы отрицательный токъ противоположнаго направленія. Обыкновенно предполагаютъ оба направленія тока существующими заразъ и одинаковой силы.

Законъ Рисса.

§ 76 Работа W , которую можетъ произвести часть металлической пыли, заряженная количествомъ Q , при переходѣ отъ одной обкладки на другую, равна (по опредѣленію разности потенціаловъ обкладокъ § 15)

$$W=Q \cdot E \dots \dots \dots 8).$$

Такъ какъ полный зарядъ Q банки самъ пропорціоналенъ разности потенціаловъ, то при этомъ процессѣ переноса, а стало быть и при дѣйствительномъ токопроцессѣ банка произведетъ количество теплоты W , которое будетъ пропорціонально квадрату разности потенціаловъ обкладокъ банки. Это и есть законъ Рисса (§ 72).

Установившійся токъ.

§ 77. Каковъ долженъ быть *электрический токъ*, чтобы онъ производилъ такое же количество теплоты, какъ и проводникъ, находящійся въ установившемся токосостояніи? По ур. 5) количество теплоты, развиваемой проводникомъ въ секунду, равно

$$W=J \cdot E \dots \dots \dots 5).$$

E —есть разность потенціаловъ на концахъ разсматриваемаго проводника.

Количество электричества Q , какое переноситъ *электрический токъ* въ секунду съ одной концевой поверхности къ другой, по ур. 5 и 8 должно быть сдѣлано равнымъ *токонапряженію* въ этомъ проводникѣ.

Получаемыя такимъ образомъ количества электричества выражаются чрезвычайно большими числами. Токонпряженіе, получаемое отъ одного элемента Даниеля въ 1 $E. C.$ сопротивления, выражается въ абсолютныхъ единицахъ (§ 58) громаднымъ числомъ: $3 \cdot 10^9$ (сек. $\frac{3}{2}$ гр. $\frac{1}{2}$ сек. —2). Такой же громадный зарядъ долженъ пройти черезъ соединительную проволоку въ видѣ электрическаго тока въ одну секунду, чтобы при очень незначительной разности потенціаловъ въ 1 Даниэль = $0,003$ (сек. $\frac{1}{2}$ гр. $\frac{1}{2}$ сек. —1) быть въ состояніи произвести электростатическую работу, соответствующую работѣ токосостоянія (0,1 килограмметра въ секунду). Количество электричества, какое получится въ этомъ случаѣ въ пятнадцать секундъ, было бы въ состояніи зарядить до 1 Даниэля шаръ радіуса равнаго радіусу земной орбиты вокругъ солнца.

Законъ Кирхгофа.

§ 78. Простое соотношеніе между *количествомъ заряда Q* , которое несетъ токъ и *токопряженіемъ J* , даетъ закону Кирхгофа, а стало быть и

закону Ома непосредственную наглядность. Въ мѣстѣ развѣтвленія *a* (фиг. 56) установившагося тока притекающія и утекающія количества электричества въ секунду должны имѣть одинаковыя значенія. Въ противномъ случаѣ навопляющійся зарядъ въ точкѣ развѣтвленія, а слѣдовательно и потенциалъ этой точки долженъ постоянно мѣняться, что противорѣчитъ предположенію объ установившемся состояніи. Алгебраическая сумма стекающихся зарядовъ, а слѣдовательно и сходящихся здѣсь токоапряженій должна поэтому равняться нулю (Кирхгофъ). Въ проводникѣ, не имѣющемъ отвѣтвленій, заряды, протекающіе черезъ различныя поперечныя сѣченія въ секунду, а слѣдовательно и токоапряженія въ различныхъ мѣстахъ проводника должны имѣть одинаковыя значенія (Омъ).

Установившееся движеніе.

§ 79. Подъ дѣйствіемъ постоянной силы и въ средѣ большого сопротивленія тѣло движется ускоренно (напримѣръ поднимающійся пузырекъ углекислоты въ стаканѣ пива) пока сопротивление движенію съ возрастаніемъ скорости не увеличится на столько, что уравновѣшиваетъ силу, производящую ускореніе. Начиная съ этого момента, тѣло движется съ установившеюся неизмѣнною скоростью. Скорость эта пропорціональна ускоряющей силѣ и зависитъ отъ природы среды. При дальнѣйшемъ ходѣ движенія вся работа ускоряющей силы тотчасъ же превращается въ теплоту.

Сопротивленіе.

Поэтому заряженныя металлическія частицы электрическаго тока принимаютъ установившуюся скорость $v = k \cdot E \cdot l^{-1}$, гдѣ k^{-1} зависитъ отъ природы среды (ея *удѣльное сопротивленіе*), а $E \cdot l^{-1}$ паденіе потенциала есть ускоряющая сила, подъ дѣйствіемъ которой находятся частицы, если предположить, что каждая изъ нихъ имѣетъ зарядъ = 1.

Зарядъ, протекающій въ секунду черезъ поперечное сѣченіе (токоапряженіе *J*), пропорціоналенъ тогда величинѣ *q* этого сѣченія, скорости частицъ *v* и числу ихъ *n* въ единицѣ объема.

$$J = q \cdot v \cdot n.$$

Если мы примемъ *n* постояннымъ, т. е. если мы будемъ примѣнять лишь токи, отличающіеся только скоростью движенія ихъ заряженныхъ частицъ, тогда получимъ:

$$J = k \frac{q}{l} E.$$

Формула эта выражаетъ собою законъ Ома въ подробномъ видѣ.

§ 80. И такъ этимъ доказано, что возможно воспроизвести дѣйствительный токопроцессъ такимъ процессомъ переноса. Нѣкоторые произвольныя предположенія, которыя были допущены при выводѣ въ § 79, дѣ-

даютъ возможными дальнѣйшія надлежащіа измѣненія и вмѣстѣ съ тѣмъ дальнѣйшее соотвѣтствіе обоихъ процессовъ.

Питали даже надежду, что при помощи движущихся заряженныхъ металлическихъ тѣлецъ легко будетъ воспроизвести всѣ дѣйствія проводника, находящагося въ токосостояніи и утверждали, что будто бы наблюдали, какъ быстро кружащійся заряженный шаръ производитъ всѣ магнитныя дѣйствія круговаго проводника, находящагося въ означенномъ состояніи (Раулендъ, 1875 г.)

7. Обратимость явленій электризаціи.

Обратимость явленій природы.

§ 81. Простыя фѣзическія явленія во многихъ случаяхъ обратимы. Если явленіе $+A$ влечетъ за собою явленіе $+B$, то очень часто и наоборотъ явленіемъ $-B$ вызывается явленіе $-A$.

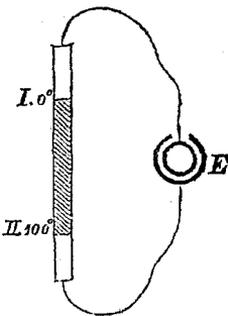
Притокъ теплоты ($+A$) раасширяетъ газъ ($+B$); сжатіе газа ($-B$) вызываетъ выдѣленіе теплоты ($-A$). Падающій грузъ ($+A$) растягиваетъ пружину ($+B$), сжимающаяся пружина ($-B$) поднимаетъ грузъ ($-A$). Паръ натрія превращаетъ теплоту ($+A$) въ лучистый желтый свѣтъ ($+B$), падающій желтый свѣтъ ($-B$) поглощается и выдѣляетъ теплоту ($-A$).

Явленія электризаціи оказались тоже обратимыми.

Опытъ Пельтье.

§ 82. Когда термоэлементъ фиг. 70 приводитъ замыкающій его проводникъ въ токосостояніе, то въ мѣстахъ спая элемента I и II про-

Фиг. 70.



исходитъ эквивалентное превращеніе теплоты, вслѣдствіе чего уравниваніе температуръ спаевъ происходитъ быстро, чѣмъ это могло бы быть вслѣдствіе одной только теплопроводности. Если ввести въ цѣпь (вольта- или термо-) элементъ E равной, но противоположной электровозбудительной силы, то токо-процессъ исчезаетъ, и уравниваніе температуръ спаевъ происходитъ исключительно вслѣдствіе теплопроводности. Если введенный по противоположному направленію элементъ E имѣетъ большую электровозбуди-

тельную силу, то онъ замедляетъ теченіе теплоты въ термоэлементѣ и можетъ сдѣлать это теченіе даже обратнымъ, такъ что разность температуръ спаевъ будетъ постоянно возрастать (Пельтье 1834 г.).

Электрическая деформация.

§ 83. Многие кристаллы при изменении формы вследствие растяжения и сжатия заряжаются по направлению пьезоэлектрических осей. Если же зарядить их таким же образом искусственно, то они претерпевают изменение формы, в противоположном направлении, причем гораздо большее, чем это можно было бы приписать действию на расстояние сил, обусловленных зарядом.

И некристаллические непроводники при сильном заряде их поверхности заметно изменяют свою форму (Квинке, электр. растяжение).

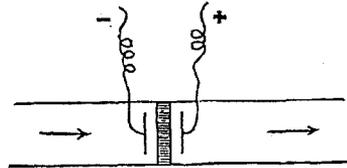
Токи сквозь диафрагму. Перенос масс вдоль проводника.

§ 84. Если пропускать воду через стеклянную трубку, то места, находящиеся при различном гидродинамическом давлении, окажутся при заметной разности потенциалов. В проволокѣ фиг. 71, концы которой погружаются по обѣимъ сторонамъ пористой перегородки въ воду, движущуюся по направлению стрѣлокъ, оказываетъ (очень слабый) токъ, положительное направление котораго въ перегородкѣ совпадаетъ съ направлениемъ движенія воды.

Если наполнить трубку водой, неподверженной никакому давлению и ввести въ дѣль батарею, то вода начинаетъ дифундировать черезъ перегородку по положительному направлению тока (Г. Видеманъ). Опытъ удается и безъ перегородки.

Несравненно обильнѣе происходитъ переносъ массъ внутри свѣтовой дуги. Положительный полюсъ ея быстро уменьшается въ вѣсъ во время разряда и образуетъ кратерообразную выемку. Отрицательный электродъ нерѣдко увеличивается въ вѣсъ и на немъ появляются вновь образовавшіеся и крѣпко сидящіе угольные наросты (фиг. 50). И такъ происходитъ дѣятельный переносъ угольной пыли, паровъ угля или углекислоты по положительному направлению тока.

Фиг. 71.



Электролизъ.

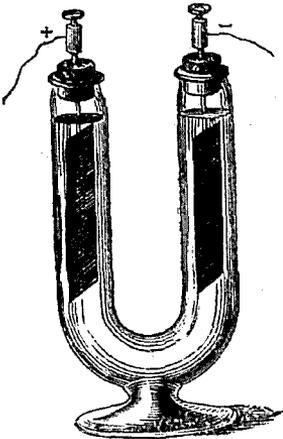
§ 85. Происходящія въ элементѣ явленія химическихъ соединенийъ вызываютъ въ замыкающемъ проводникѣ токо-состояніе и наоборотъ: введенная въ дѣль проводящая жидкость *разлагается* медленно въ теченіи всего времени пока она находится въ токо-состояніи (Карлейль 1800 г.). Разложившіеся массы расходятся по противоположнымъ направлениямъ, а именно металлическій (основной) продуктъ разложенія по положительному направлению тока, неметаллическій (кислотный) по отрицательному направлению, такъ что поверхности электродовъ покрываются постепенно утолщающимся слоемъ продуктовъ разложенія (электролизъ).

Явленіе въ обыкновенномъ элементѣ не представляетъ собою въ точности обратнаго процесса электролизу, но гораздо сложнѣе, вследствие реакціи химически дѣятельныхъ электродовъ (полюсныхъ пластинокъ) на продукты разложенія жидкости. Однако известны элементы съ химически недѣятельными полюсными пластинками (вторичные элементы § 95).

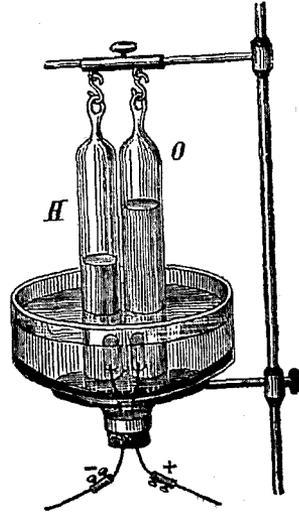
Описание электролитических процессовъ.

§ 86. Если погрузить полюсныя пластинки батареи въ сосудъ съ водою, имѣющій лучше всего форму, изображенную на фиг. 72 или 73,

Фиг. 72.



Фиг. 73.



то тотчасъ же появляются продукты разложенія воды въ видѣ пузырьковъ, быстро поднимающихся съ поверхностей электродовъ. На положительномъ электродѣ (анодѣ) выдѣляется чистый кислородъ, на отрицательномъ электродѣ (катодѣ) чистый водородъ. То, что такимъ образомъ становится видимымъ изъ продуктовъ разложенія, есть только навопляющійся избытокъ ихъ. Когда продукты разложенія движутся, какъ составныя части жидкой воды и когда они въ чистомъ состоянїи прилипаютъ еще въ поверхностямъ электродовъ въ видѣ тонкихъ слоевъ, они ускользаютъ отъ прямого наблюденія.

Расплавленная окись калия разлагается при дѣйствїи погруженныхъ электродовъ на металлъ калий (Деви 1808), который выдѣляется въ видѣ блестящихъ шариковъ на катодѣ и кислородъ, выдѣляющійся пузырьками на анодѣ. Расплавленное хлористое олово разлагается на хлоръ (на анодѣ) и олово (на катодѣ).

Электролизъ смѣсей.

Въ смѣсяхъ, состоящихъ изъ нѣсколькихъ жидкостей, при употребленїи слабой батареи разлагается та изъ нихъ, которая и при другихъ

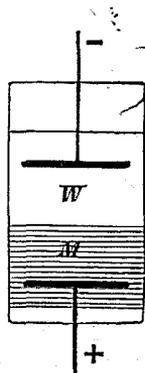
условіяхъ наиболѣе способна къ быстрому разложенію. При употребленіи болѣе сильной батареи въ электролизѣ принимаютъ нѣкоторое участіе и другія примѣшанныя жидкости. Растворъ мѣднаго купороса въ водѣ выдѣляетъ въ видѣ катиона металлическую мѣдь, а въ видѣ аниона остатокъ сѣрной кислоты. Вода разлагается только при очень значительной плотности токонапряженія.

Поверхности раздѣла. Опытъ Фарадея.

§ 87. Выдѣленіе продуктовъ разложенія происходитъ на предѣльныхъ поверхностяхъ разлагаемой жидкости, при чемъ природа примыкающихъ къ жидкости проводниковъ не имѣетъ вліянія. Ионы не оставляютъ поверхностей своего электролита, если даже примыкающіе проводники — жидкости.

Фарадей наливалъ въ стаканъ (фиг. 74) слой воды на растворъ соли магнія. Въ время прохожденія тока кислотный остатокъ соли выдѣляется на анодѣ, лежащемъ на днѣ сосуда, водородъ воды на катодѣ, лежащемъ подъ свободной поверхностью воды. Магній и кислородъ воды появляются на поверхности соприкосновенія обѣихъ жидкостей и соединяются здѣсь въ окись магнія, которая покрываетъ эту поверхность, бывшую до того блестящей, бѣлымъ покровомъ.

Фиг. 74.



Законы Фарадея.

§ 88. Два прибора для разложенія съ одною и тою же электролитическою жидкостью, введенные въ одну и ту же цѣпь, производятъ одинаковыя количества продуктовъ разложенія, все равно какихъ бы размѣровъ ни были электроды и каковы бы ни были количества разлагаемыхъ жидкостей: количество электролита, разлагаемое въ секунду, опредѣляется слѣдовательно только его природою и токо-напряженіемъ (М. Фарадей 1833 г.).

1-ый законъ Фарадея.

§ 89. Электролиты различнаго рода, введенныя въ одну и ту же цѣпь, выдѣляютъ количества продуктовъ разложенія, пропорціональныя ихъ химическимъ эквивалентамъ (Фарадей 1834).

Если въ приборѣ для разложенія воды на катодѣ выдѣляется 1 гр. водорода, то на анодѣ развивается одновременно 8 гр. кислорода. Изъ произвольнаго количества расплавленной окиси калия, введенной въ ту же цѣпь выдѣляется въ то же время 40 гр. калия и 8 гр. кислорода. Изъ раствора сѣрнокислой мѣди въ той же цѣпи и въ то же время выдѣляются 32 гр. мѣди и 48 гр. кислотнаго остатка. Такое же количество его (48 гр.) требуется при соединеніи съ 1 гр. водорода въ сѣрную кислоту и съ 40 гр. калия для образованія сѣрнокислаго калия. 32 гр. мѣди требуютъ какъ разъ 8 гр. кислорода при сгораніи въ окись мѣди.

И такъ разнообразнѣйшія составныя части произвольныхъ разлагаемыхъ въ одной и той же цѣпи электролитовъ выдѣляются какъ разъ въ такихъ количественныхъ отношеніяхъ, въ какихъ онѣ могутъ соединяться во всевозможныя извѣстныя намъ химическія соединенія: количества произвольныхъ веществъ, выдѣляемыхъ въ одной и той же цѣпи, относятся какъ химическіе эквиваленты этихъ веществъ.

2-й законъ Фарадея.

§ 90. Количества веществъ, выдѣляемыя въ секунду изъ электролита, пропорціональны току-напряженію (Фарадей 1833 г.).

При токонапряженіи въ 1 Даніэль на 1 Е. С. выдѣляется въ секунду въ приборѣ для разложенія воды (вольтметръ фиг. 73) 0,1 гр. водорода и 0,8 гр. кислорода, слѣдовательно 0,174 сан.³ гремячаго газа (Ф. Кольраушъ).

При такомъ же токонапряженіи выдѣляется въ серебряномъ вольтметрѣ (серебряные электроды въ слабомъ растврѣ азотнокислаго серебра) на катодѣ $0,1 \times 108 = 0,0108$ граммовъ серебра. 108 есть эквивалентъ серебра.

Сколько мѣди выдѣлится при этомъ токонапряженіи въ мѣдномъ вольтметрѣ (мѣдные электроды въ растврѣ какой-либо соли мѣди)? Эквивалентъ мѣди есть 33.—Сколько золота (эквивалентъ 70) выдѣлится при токонапряженіи въ 0,5 Даніэля на 1 Е. С. изъ раствора соли золота? Зависать-ли это отъ рода соли?—Сколько хлора (эквивалентъ 36) выдѣлится при токонапряженіи въ 5 Даніэлей на 1 Е. С. изъ расплавленнаго хлористаго металла?

Химическая единица токонапряженія.

§ 91. Законы Фарадея даютъ возможность измѣрять токонапряженіе его электролитическими дѣйствіями и приведенные вольтметры очень пригодны для такихъ измѣреній. Показанія ихъ безъ труда можно перевести на абсолютныя единицы. Токонпряженіе въ 1 Даніэль на 1 Е. С. равно (по § 58) $3 \cdot 10^9 \left(\text{сан.} \frac{3}{2} \text{ гр.} \frac{1}{2} \text{ сек.}^{-2} \right)$ въ абсолютныхъ

единицахъ. Слѣдовательно при токонапряженіи въ 1 $\left(\text{сан.}^{\frac{3}{2}} \text{ гр.}^{\frac{1}{2}} \right)$ абсолютныхъ единицъ выдѣляется въ секунду $0.174/3 \cdot 10^9$ сант.³ гремучаго газа или 0.36 ₁₂ гр. серебра.

Единица Якоби.

Якоби предложилъ принять за единицу токонапряженія такое, при которомъ выдѣляется въ 1 минуту 1 сант.³ гремучаго газа (химическая единица токонапряженія).

Токонапряженіе 1 (въ химич. един.) = $29 \cdot 10^7$ $\left(\text{сан.}^{\frac{3}{2}} \text{ гр.}^{\frac{1}{2}} \right)$ сек.⁻² абс. един.

Химическія дѣйствія разряда лейденской банки.

§ 92. Во время разряда лейденской банки токо-состояніе замыкающаго проводника мѣняется весьма быстро. Среднее токонапряженіе этого проводника должно быть равно (по ур. 8 и 5 § 76) частному отъ дѣленія заряда банки на время ея разряженія.

Хотя въ замыкающемъ проводникѣ банки тепловыя дѣйствія и значительны, но химическія дѣйствія чрезвычайно слабы: первое дѣйствіе пропорціонально произведенію изъ средняго токонапряженія на время разряда и на среднюю разность потенціаловъ банки, т. е. пропорціонально произведенію изъ небольшого заряда на половину начальнаго высоваго потенціала ея; химическія же дѣйствія пропорціональны только небольшому заряду.

Разрядъ батареи въ 500 м. емкостью и при 50 $\left(\text{сан.}^{\frac{1}{2}} \text{ гр.}^{\frac{1}{2}} \text{ сек.}^{-1} \right)$ разности потенціаловъ доставляетъ въ видѣ теплоты или въ видѣ другой произвольной формы энергій 15 миллиграмм. калорій; въ вольтметрѣ онъ выдѣляетъ однако не болѣе 0.15 сант.³ гремучаго газа. Энергія, затрачиваемая при образованіи этого количества гремучаго газа, не доходитъ до 0.003 миллигр. калорій.

Опыты Фарадея.

§ 93. Что химическое дѣйствіе такого разряда дѣйствительно пропорціонально заряду батареи, т. е. произведенію изъ емкости на разность потенціаловъ ея и совершенно не зависитъ отъ тепловаго дѣйствія,

которое производится этимъ же разрядомъ въ произвольныхъ мѣстахъ въ видѣ одиночныхъ искръ или пучка искръ—это непосредственно добавляется опытами Фарадея съ батареями различной величины, заряженными до различной разности потенциаловъ.

Контръ-электровозбудительная сила электролитовъ.

§ 94. Химическая работа, произведенная въ вольтметрѣ, а слѣдовательно и количество разложеннаго вещества равно произведенію изъ паденія потенциала въ вольтметрѣ на зарядъ батареи.

Такъ какъ количество разложеннаго вещества, а слѣдовательно и работа разложенія, по Фарадею, сами по себѣ пропорціональны заряду, то паденіе потенциала въ вольтметрѣ безконечно-малой длины должно имѣть постоянное опредѣленное значеніе для каждаго электролита. Паденіе это называютъ контръ-электровозбудительною силою вольтметра.

Паденіе потенциала и контръ-электровозбудительная сила.

Паденіе потенциала въ вольтметрѣ конечной длины, находящемся въ установившемся токо-состояніи, состоитъ изъ двухъ слагаемыхъ: одно изъ нихъ, зависящее по извѣстнымъ правиламъ отъ формы вольтметра, представляетъ собою паденіе потенциала, опредѣляемое токо-напряженіемъ и сопротивленіемъ вольтметра; къ этому присоединяется еще постоянная независящая отъ формы вольтметра и токо-напряженія потеря потенциала E , — контръ-электровозбудительная сила вольтметра, одинаково направленная съ токо-напряженіемъ и противоположно направленная съ электровозбудительною силою батареи.

Поляризаціонный токъ и обращеніе электролиза.

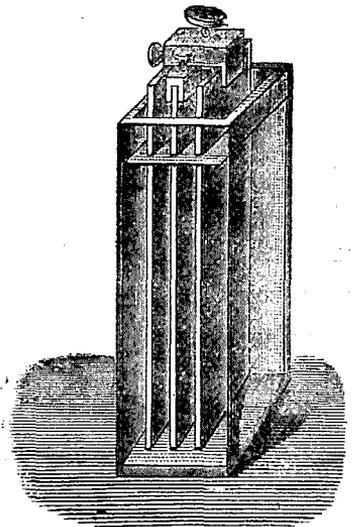
§ 95. Если прервемъ токо-процессъ, то всѣ паденія потенциала исчезнутъ, кромѣ этой контръ-электровозбудительной силы. Она поддерживаетъ и послѣ перерыва токо-процесса электроды постоянно при разности потенциаловъ E . Если выключить батарею изъ цѣпи и соединить электроды вольтметра непосредственно проволокою, то контръ-электровозбудительная сила E вольтметра возбудитъ въ проволоке токо-процессъ (поляризаціонный токъ), направленіе котораго въ вольтметрѣ противоположно направленію прежняго токо-процесса (такъ называемый заряжающій токъ).

Энергія поляризаціоннаго тока доставляется стремленіемъ продуктовъ разложенія, накопленныхъ заряжающимъ токомъ на электродахъ вольтметра, къ соединенію (Фр. Экснеръ). Съ постепеннымъ соединеніемъ вновь этихъ продуктовъ постепенно прекращается и означенное обратное электролизу явленіе (поляризаціонный токъ), а вмѣстѣ съ тѣмъ и электровозбудительная сила вольтметра.

Аккумуляторы.

Элементы съ химически недѣйственными электродными пластинками, электровозбудительная сила которыхъ доставляется прошедшимъ черезъ нихъ заряжающимъ токомъ, находятъ практическое примѣненіе, въ цѣляхъ накопленія тово-энергіи, подъ именемъ аккумуляторовъ (вторичныхъ элементовъ) фиг. 75. Аккумуляторъ Планте имѣеть электродами свернутыя свинцовыя пластинки большой поверхности погруженныя въ подкисленную воду.

Фиг. 75.



Законъ Гельмгольца.

§ 96. Можно вычислить контръ-электровозбудительную силу E электролита (Гельмгольцъ). Она равна работѣ разложенія W , произведенной единицею токо-напряженія заряжающаго тока J въ 1 секунду (по урав. 5): $W = E \cdot J$. Единицею токо-напряженія (въ абс. един.) разлагается $0,305$ мгр. воды. При образованіи 18 мгр. воды развивается 69 грамм-калорій $= 10^8 \cdot 29$ (сант. 2 гр. сек. $^{-2}$) теплоты. Для разложенія $0,305$ мгр. воды требуется слѣдовательно $0,0049$ (сант. 2 гр. сек. $^{-2}$) теплоты. Такой же величины $0,0049$ (сант. $^{1/2}$ гр. $^{1/2}$ сек. $^{-1}$) $= 1,47$ Даниеля должна быть контръ-электровозбудительная сила водянаго вольтметра. (сравн. таблицу § 35).

Постоянные элементы.

§ 97. Электролитическое расщепленіе продуктовъ разложенія происходитъ не только въ вольтметрахъ съ химически-недѣйственными элек-

тродными пластинками, но и во всякомъ элементѣ. Оно возбуждается здѣсь стремленіемъ къ соединенію металла электрода съ продуктами разложенія. Въ элементѣ Сми кислородъ воды соединяется съ цинкомъ, освобождающійся же водородъ выдѣляется однако не на цингѣ, но на поверхности платинового электрода, а слѣдовательно переносится и здѣсь по положительному направленію тока черезъ жидкость.

Стремленіе жидкости воспрепятствовать этому явленію возбуждаетъ, какъ и въ вольтметрѣ, контръ-электровозбудительную силу, величина которой зависитъ отъ природы жидкости, а не отъ природы полосныхъ пластинокъ и которая ослабляетъ дѣйствіе элемента. Кромѣ того окись цинка и выдѣляющійся на поверхности платины водородъ увеличиваютъ сопротивленіе элемента.

Подкисленіе воды.

Эти неблагопріятныя обстояельства можно устранить, удаляя пристающіе къ пластинкамъ продукты разложенія. Для этого прибавляютъ къ водѣ немного сѣрной кислоты. Она растворяетъ окись цинка на цинковомъ полюсѣ, увеличиваетъ быстроту реакціи цинка на воду и улучшаетъ проводимость послѣдней.

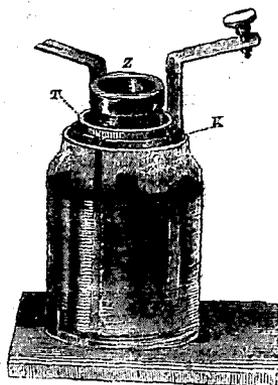
Платиновый полюсъ покрываютъ губчатой платиновой чернью (измельченной платиной), которая отчасти поглощаетъ водородъ, отчасти собираетъ его въ большіе быстро поднимающіеся пузырьки.

Элементъ Даніэля.

§ 98. Даніэль замѣняетъ платиновый полюсъ, погружаемый въ воду, мѣднымъ, погруженнымъ въ растворъ мѣднаго купороса. Такой элементъ (фиг. 76) составляется слѣдовательно по слѣдующей схемѣ:

Цингъ Z | подкисленная вода | глиняная перегородка T | мѣдный купоросъ | мѣдь K.

Фиг. 76



Съ цѣлью уменьшенія сопротивленія элемента выбираютъ для электродовъ близко отстоящіе другъ отъ друга цилиндры большой поверхности.

На цинковой пластинкѣ элемента Даніэля образуется окись цинка. Кислота воды растворяетъ ее. Въ глиняной перегородкѣ выдѣляется кислотный остатокъ мѣдной соли и водородъ воды, которые соединяются въ сѣрную кислоту. На мѣдномъ полюсѣ выдѣляется только чистая

мѣдь; этотъ элементъ доставляетъ поэтому очень постоянныя токонатраженія.

Другіе постоянные элементы имѣютъ то преимущество, что въ нихъ избѣгается электровозбудительная сила разложенія воды, которая противоположна электровозбудительной силѣ $Zn | 0$. На положительной полюсной пластинкѣ находится сильно окисляющее вещество, которое способно отдавать кислородъ, не требуя значительнаго количества тепла, и которое превращаетъ въ воду выдѣленный электролитически водородъ. Эти элементы имѣютъ высокую электровозбудительную силу.

Элементы Бунзена и Грове.

Элементы Бунзена и Грове имѣютъ слѣдующій составъ: амальгмированный цинкъ, подкисленная вода, глиняная перегородка, вѣршкая азотная кислота, уголь или платина. Эти превосходные элементы обладают электровозбудительной силой въ 1·8 Даніэля и внутреннимъ сопротивленіемъ при средней величинѣ въ 0·2 Е. С.

Элементъ Лекланше.

Элементъ Лекланше имѣетъ слѣдующій составъ: амальгмированная цинковая палочка, подкисленная вода, влажный порошокъ перекиси марганца и угольный порошокъ, уголь. Электровозбудительная сила этого элемента равняется 1·5 Даніэля, внутреннее сопротивление однако обыкновенно доходитъ до 10 Е. С. При большомъ вѣншемъ сопротивленіи элементъ этотъ можетъ быть примѣненъ съ пользою и удобенъ въ обращеніи съ нимъ.

III. О магнитномъ дѣйствіи на разстояніе.

1. Магнетизмъ стали.

Уголъ склоненія.

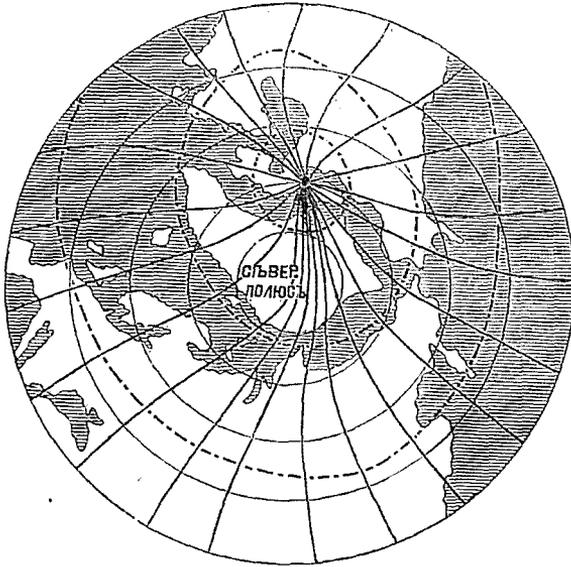
§ 99. Магнитныя стрѣлки указываютъ не точно на астрономическій сѣверъ; въ нашихъ странахъ онѣ отклоняются нѣсколько (15°) къ западу. Направленіе магнитной стрѣлки называется магнитнымъ меридіаномъ даннаго мѣста, а уголь, который она образуетъ съ астрономическимъ (географическимъ) меридіаномъ, называется угломъ склоненія.

Магнитные меридіаны.

Уголъ склоненія мѣняется съ каждымъ мѣстомъ земной поверхности и уже въ южныхъ широтахъ онъ колеблется въ предѣлахъ между 30° въ

востоку и 30° къ западу отъ географическаго меридіана. Во время своего перваго путешествія Колумбъ не безъ страха замѣтилъ это измѣненіе, опасаясь лишиться возможности руководствоваться стрѣлкою при продолженіи путешествія. На картѣ фиг. 77 показаны направленія маг-

Фиг. 77.



нитныхъ меридіановъ на одномъ полушаріи. Если съ различныхъ точекъ земли идти постоянно по направленію магнитной стрѣлки, то придемъ къ двумъ точкамъ, расположеннымъ одна на 70° сѣвер. широты и 80° вост. долготы и другая 80° южной широты и 20° восточной долготы,—къ сѣверному и южному магнитному полюсу, въ которыхъ пересекаются всѣ магнитные меридіаны.

Пара силъ, приложенная къ горизонтальному магниту.

§ 100. Если магнитную стрѣлку, вращающуюся около вертикальной оси, вывести изъ положенія равновѣсія, то она стремится снова занять его. Можно убѣдиться опытомъ, что магнитный стержень, положенный на плавающую пробковую пластинку и, слѣдовательно, совершенно подвижной въ горизонтальной плоскости, тоже повернется по направленію меридіана, но не перемѣстится поступательно ни въ какомъ направленіи. Движеніе магнита производится поэтому лишь двумя *противоположно-направленными равными* силами—парою силъ.

Направляющій моментъ горизонтальнаго магнита.

Моментъ этихъ силъ довольно значителенъ: хорошій магнитный стержень вѣсомъ въ 1 кил., подпертый въ серединѣ на остриѣ и приведенный въ горизонтальное положеніе, сопротивляется горизонтальному тяженію груза въ 1 гр., приложеннаго на разстояніи 6 сантиметровъ отъ оси вращенія въ случаѣ, если направленіе магнита перпендикулярно къ меридіану; слѣдовательно моментъ магнитной пары въ этомъ положеніи, называющійся *направляющимъ моментомъ* магнита, равенъ 6 (граммовѣсь, сантим.) или 6000 (сан.² гр. сек.⁻²) въ абсолютной системѣ единицъ.

Законъ синусовъ.

Во всякомъ другомъ положеніи моментъ магнитной пары меньше. Онъ измѣняется пропорціонально синусу угла между магнитомъ и меридіаномъ и совершенно исчезаетъ въ положеніи равновѣсія.

Полюсы магнитнаго стержня.

Магнитная пара составлена поэтому изъ силъ, имѣющихъ постоянную величину, постоянное направленіе и постоянныя *точки приложенія*, такъ называемые полюсы магнита, аналогично напр. тому, какъ сила тяжести, дѣйствующая на маятникъ, постоянна по величинѣ и направленію (вертикальна) и приложена къ центру тяжести маятника.

Качаніе магнитнаго стержня.

§ 101. Движеніе магнитной стрѣлки поэтому совершенно одинаково съ движеніемъ маятника. Если стрѣлку вывести изъ положенія покоя, то она возвращается въ положеніе равновѣсія съ возрастающею скоростью и убывающимъ (какъ синусъ угла отклоненія) ускореніемъ (пропорціональнымъ моменту вращенія), переходитъ магнитный меридіанъ, послѣ чего скорость ея начинаетъ убывать, а обратное ускореніе увеличивается, наконецъ направленіе движенія перемѣняется и начинается обратное колебаніе.

Время колебанія.

Время одного колебанія T опредѣляется, какъ и при маятникѣ, по уравненію

$$T = \pi \sqrt{\frac{K}{D}} \quad (\text{для небольшихъ отклоненій}),$$

гдѣ K обозначаетъ моментъ инерціи стального стержня, а D направляющій магнитный моментъ его.

Методъ колебаній Гаусса.

Направляющій моментъ магнитнаго стержня можно опредѣлить очень точно, наблюдая время колебанія этого стержня, подвѣсивъ его горизонтально на нити (фиг. 78). (Методъ колебаній Гаусса). Моментъ инерціи стержня долженъ быть опредѣленъ при этомъ по вѣсу и размерамъ послѣдняго.

Балистическое качаніе.

Если магнитной стрѣлкѣ сообщить ударомъ количество движенія Ω , то она отклонится на уголъ α , который можно опредѣлить, какъ и въ случаѣ балистическаго маятника, по уравненію:

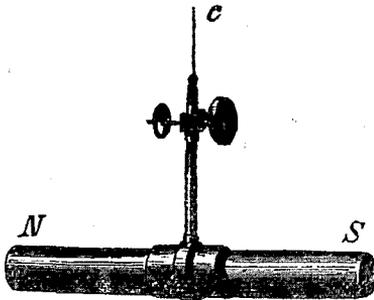
$$\Omega = \frac{\tau}{\pi} D \alpha ,$$

Гдѣ τ обозначаетъ время одного колебанія, D направляющій моментъ для амплитуды $\alpha=90^\circ$, какъ въ случаѣ магнитной стрѣлки, такъ и въ случаѣ маятника.

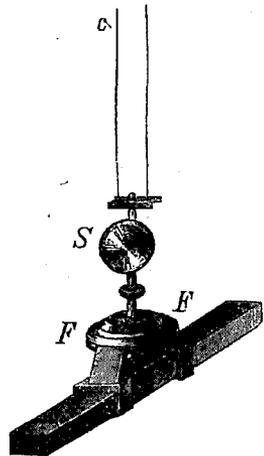
Статическій методъ.

Направляющій моментъ магнита можно опредѣлить также взвѣшиваніемъ: по отклоненію, которое онъ сообщаетъ оправѣ F (фиг. 79), бифилярно подвѣшенной въ плоскости магнитнаго меридіана.

Фиг. 78.



Фиг. 79.



При отклоненіи бифилярно подвѣшеннаго груза вертикальная проеція нитей подвѣса укорачивается; грузъ, вращаясь, поднимается. Онъ

стремится опуститься, развернуться и порождает при этомъ моментъ вращенія, пропорціональный углу отклоненія, точнѣе—пропорціональный синусу этого угла.

Дѣйствіе магнитовъ на разстояніе.

§ 102. Магнитный стержень, помѣщенный вблизи магнитной стрѣлки, дѣйствуетъ на нее такъ, какъ будто разноименные концы (сѣверный и южный) притягивались, а одноименные отталкивались. Взаимодѣйствіе концовъ тѣмъ сильнѣе, чѣмъ они ближе другъ къ другу. Моментъ вращенія взаимодѣйствія бываетъ иногда гораздо болѣе направляющихъ моментовъ магнитовъ и можетъ быть измѣренъ, какъ и послѣдніе, при помощи крутильныхъ двунитныхъ вѣсовъ. Для обыкновенныхъ магнитныхъ стержней законъ взаимодѣйствія далеко не простъ.

Дѣйствіе полюсовъ. Поясъ безразличія.

Если вблизи такого обыкновеннаго магнитнаго стержня перемѣщать маленькую магнитную стрѣлку, то оказывается: середина не обнаруживаетъ никакого дѣйствія, наибольшее же дѣйствіе не на концахъ, а на разстояніи отъ нихъ около $\frac{1}{10}$ длины стержня.

Въ этихъ то именно точкахъ наибольшаго дѣйствія и слѣдуетъ искать точекъ приложенія естественной магнитной пары силъ (полюсы магнита).

Линейные магниты.

§ 103. Чѣмъ тоньше магнитный стержень, тѣмъ ближе къ концамъ лежатъ его полюсы и тѣмъ больше поясъ безразличія. Въ очень тонкихъ, хорошо намагниченныхъ (равномѣрнымъ натираниемъ) стальныхъ проволокахъ (линейные магниты) дѣйствіе исходитъ исключительно изъ концовъ, вся остальная часть не обнаруживаетъ никакого дѣйствія.

Законъ Ампера.

Маленькія оконечныя площадки, оконечныя точки (полюсы) очень длинныхъ линейныхъ магнитовъ сообщаютъ другъ другу ускоренія обратно пропорціональныя квадрату ихъ разстоянія. Остальныя части линейнаго магнита, какъ сказано, не обнаруживаютъ никакого дѣйствія. Знакъ ускоренія полюсовъ (притяженіе или отталкиваніе) зависитъ, какъ и въ

случаѣ обыкновенныхъ магнитовъ (§ 102), отъ одно—или разноименности этихъ полюсовъ.

Количество магнетизма.

Взаимодѣйствіе двухъ полюсовъ линейныхъ магнитовъ зависитъ кромѣ того отъ нѣкоторыхъ постоянныхъ величинъ характерныхъ для каждаго магнита, которыя зависятъ отъ силы намагничиванія и пропорциональны естественной направляющей парѣ магнита. Эти постоянныя величины называютъ *количествами магнетизма* полюсовъ. Сила f , съ которою два полюса дѣйствуютъ другъ на друга, опредѣляется поэтому формулою:

$$f = \frac{m_1 m_2}{r^2} \dots \dots \dots 1)$$

гдѣ m_1 характерная постоянная одного полюса, m_2 —другого (количества магнетизма полюсовъ), а r —разстояніе между полюсами. Ускореніе магнита опредѣлится, какъ частное отъ дѣленія магнитной силы f на механическую массу магнита или отъ дѣленія магнитнаго момента вращенія на моментъ инерціи магнита.

Равенство количествъ магнетизма обоихъ полюсовъ одного и того же магнита.

Дѣйствіе южнаго полюса линейнаго магнита, а слѣдовательно и его количество магнетизма равно и прямо противоположно количеству магнетизма сѣвернаго полюса и поэтому должно быть взято съ противоположнымъ знакомъ. Тогда по ур. 1) и § 102 отрицательное значеніе силы соотвѣтствуетъ притяженію (разноименныхъ количествъ), а положительное отталкиванію.

Абсолютная единица количества магнетизма.

По ур. 1) средняя геометрическая количество магнетизма двухъ полюсовъ равна 1, если на разстояніи 1 (сант.) полюсы дѣйствуютъ другъ на друга съ силою 1 (сан. гр. сек.⁻² = 0.001 граммовѣса).

Стальная проволока въ 1 мм.² поперечнаго сѣченія можетъ быть намагничена до того, что концы ея будутъ заключать 8 (сан. ^{3/2} гр ^{1/2} сек.⁻¹) количества магнетизма. На разстояніи 1 сан. концы такихъ стерженьковъ дѣйствуютъ съ силою 0.064 граммовѣса.

Измѣреніе единицы количества магнетизма.

Вслѣдствіе сходства формулъ Ампера и Кулона (§ 13) измѣреніе единицы количества магнетизма будетъ такое же, какъ и единицы количества электричества (сан. ^{3/2} гр. ^{1/2} сек.⁻¹).

Магнитное поле и его напряженіе.

§ 104. Равнодѣйствующая сила, приложенная къ полюсу линейнаго магнита, находящагося вблизи другихъ произвольныхъ магнитовъ (въ *магнитномъ полѣ*) по ур. 1) пропорціональна количеству магнетизма, заключающагося въ этомъ полюсѣ. Сила, дѣйствующая на единицу количества магнетизма въ какой-нибудь точкѣ поля, называется *напряженіемъ поля въ этой точкѣ*. Если напряженіе задано по величинѣ и направленію для всѣхъ точекъ магнитнаго поля, то послѣднее этимъ вполне опредѣляется и можно будетъ напередъ указать всѣ движенія, которыя будутъ совершать магнитныя тѣла въ этомъ полѣ.

Магнитная работа.

Работу магнитныхъ силъ и магнитный потенциалъ можно опредѣлить съ помощью тѣхъ же разсужденій, какія приведены были въ §§ 14 и 15 для случая дѣйствія на разстояніе количества электричества.

Магнитный потенциалъ.

Магнитный потенциалъ въ какой нибудь точкѣ магнитнаго поля есть, слѣдовательно, та работа, которую нужно затратить чтобы привести единицу положительнаго (сѣвернаго) количества магнетизма изъ безконечности въ эту точку.

Потенциалъ V количествъ магнетизма $m_1 m_2 m_3 \dots$, въ какой нибудь точкѣ поля a , отъ которой они находятся на разстояніяхъ $r_1 r_2 r_3 \dots$, равенъ суммѣ отдельныхъ потенциаловъ каждой изъ этихъ массъ въ точкѣ a .

$$V = \frac{m_1}{r_1} + \frac{m_2}{r_2} + \frac{m_3}{r_3} + \dots = \Sigma \frac{m}{r}$$

Ср. § 15. При этомъ суммированіи нужно принимать во вниманіе всѣ имѣющіяся магнитныя массы, за исключеніемъ тѣхъ, движеніе которыхъ хотять опредѣлить.

Магнитныя поверхности уровня и линіи силъ.

§105. Фиг. 67 на стр. 57 представляетъ магнитныя поверхности уровня (поверхности одинаковаго значенія магнитнаго потенциала) вблизи одного линейнаго магнита. При перемѣщеніи количества магнетизма изъ безконечности до какой угодно точки одной и той же поверхности уровня производится всегда одно и тоже количество работы. Слѣдовательно, при перемѣщеніи магнитной массы вдоль поверхности уровня не производится никакой работы: магнитныя силы не даютъ слагающихъ вдоль поверхности уровня,

они вездѣ нормальны къ ней. Пунктирныя кривыя фиг. 67 пересекаютъ всѣ поверхности уровня нормально, поэтому вездѣ показываютъ напряженіе силы (магнитныя линіи силъ). Вдоль этихъ линій перемѣщается магнитный полюсъ, если его помѣстить въ полѣ линейнаго магнита.

Чѣмъ короче путь, на которомъ можетъ быть произведена нѣкоторая опредѣленная работа вдоль таковой линіи силъ, чѣмъ быстрее, слѣдовательно, измѣняется потенциалъ вдоль нея, тѣмъ болѣе напряженіе магнитнаго поля въ этомъ мѣстѣ. Сила, дѣйствующая на единицу количества магнетизма вдоль любой линіи, равна паденію потенциала (измѣненію потенциала на единицу длины) вдоль той же линіи.

Равномѣрное магнитное поле.

§ 106. Если во всѣхъ мѣстахъ магнитнаго поля напряженіе имѣетъ одну и ту же величину (одна и та же магнитная стрѣлка испытываетъ вездѣ одинаковое дѣйствіе), то поле называется однороднымъ или равномѣрнымъ. Поверхности уровня въ такомъ полѣ представляются параллельными плоскостями, а линіи силъ—перпендикулярными къ нимъ прямыми.

Магнитный моментъ.

§ 107. Движеніе магнита подъ вліяніемъ равномѣрнаго поля бываетъ только вращательнымъ и никогда не бываетъ поступательнымъ. Силы, дѣйствующія въ такомъ полѣ на равныя и противоположныя количества магнетизма (§ 103) концовъ магнита, должны быть равны и противоположно направлены, т. е. должны образовать пару силъ. Моментъ вращенія магнита подъ вліяніемъ поля, напряженіе котораго 1 , называется магнитнымъ моментомъ магнита (обозначается буквою M). Въ полѣ, напряженіе котораго H , моментъ вращенія будетъ поэтому MH . На каждый изъ полюсовъ магнита (количество магнетизма которыхъ $+m$) будетъ дѣйствовать въ такомъ полѣ сила $+mH$, слѣдовательно моментъ вращенія будетъ $m.H.l$ (гдѣ l обозначаетъ длину магнита, точнѣе разстояніе между полюсами). Поэтому имѣемъ $M=ml$. *И такъ магнитный моментъ линейнаго магнита равенъ произведенію изъ его длины на количество магнетизма въ одномъ изъ его полюсовъ.*

Магнитное поле земли.

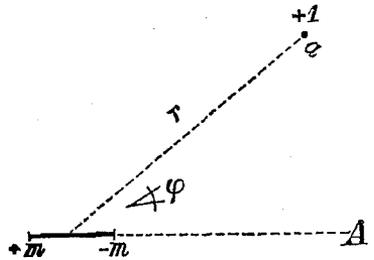
Естественные моменты вращенія магнитныхъ стержней въ земномъ полѣ пропорциональны (по § 103) тѣмъ моментамъ вращенія, которые они получаютъ въ искусственномъ

равноѣрномъ полѣ. Мы живемъ въ обширномъ равноѣрномъ полѣ, напряженіе котораго по направленію совпадаетъ съ направленіемъ магнитныхъ меридіановъ, а по характеру совершенно одинаково съ напряженіемъ, порождаемымъ магнитными стержнями.

Потенціалъ элементарнаго магнита.

§ 108. Опредѣлимъ теперь по закону Ампера ур. 1) дѣйствіе очень короткаго линейнаго магнита (элементарнаго магнита), длина котораго Δ и количество магнетизма на полюсѣ m . Потенціалъ такого магнита на $l-y$ количества магнетизма въ произвольной точкѣ a (фиг. 80), равенъ работѣ, которую нужно затратить, чтобы привести это количество изъ ∞ въ точку a , или, что тоже самое, равенъ работѣ, которая приобрѣтается, если магнитъ Δ подѣйствіемъ неподвижной единицы количества магнетизма въ точкѣ a будетъ оттолкнутъ въ ∞ . Эта работа будетъ равна также работѣ, которую нужно затратить чтобы количество магнетизма $+m$ привести въ совпаденіе съ количествомъ магнетизма $-m$ (работая при этомъ только по отношенію къ силѣ взаимодѣйствія между a и $+m$), такъ какъ послѣ этого равныя и противоположныя массы $\pm m$, находясь въ одной точкѣ, не могутъ подвергнуться дѣйствію силы при дальнѣйшемъ ихъ движеніи въ безконечность, т. е. не могутъ доставить работы. Масса $+1$ дѣйствуетъ на $+m$ по направленію A съ силою, которая по Амперу $= \frac{m}{r^2} \cos \varphi$; поэтому работа совмѣщенія полюсовъ на разстояніи Δ равна $\frac{\Delta m}{r^2} \cos \varphi$. Такую же величину имѣетъ и потенциалъ V элементарнаго магнита, моментъ котораго Δm , въ произвольной точкѣ a поля, полярныя координаты которой (r, φ) :

Фиг. 80.



$$V = \frac{\Delta m}{r^2} \cos \varphi$$

Напряженіе вдоль оси элементарнаго магнита.

Въ двухъ сосѣднихъ точкахъ оси A элементарнаго магнита ($\varphi = 0$), разстояніе между которыми δ , а разстояніе до магнита r , потенциалъ имѣетъ значенія:

$$V_1 = \frac{\Delta m}{r^2} \text{ и } V_2 = \frac{\Delta m}{(r+\delta)^2} = \frac{\Delta m}{r^2} \left(1 - \frac{2\delta}{r}\right)$$

Поэтому имѣемъ:
$$\frac{V_1 - V_2}{\delta} = 2 \frac{\Delta m}{r^3}$$

$\frac{V_1 - V_2}{\delta}$ есть изменение потенциала при изменении расстояния на δ т. е. падение потенциала вдоль оси, а следовательно и напряжение T вдоль оси.

$$T = 2 \frac{\Delta m}{r^3} \dots \dots \dots 2)$$

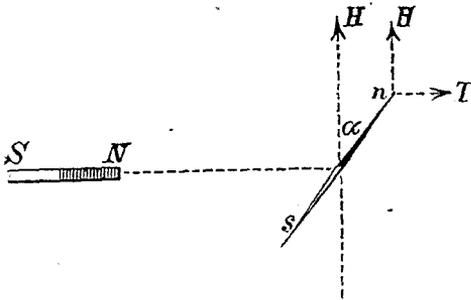
Поэтому действие элементарного магнита вдоль оси прямо пропорционально его моменту Δm и обратно пропорционально кубу расстояния r .

Сравнение напряженія магнитнаго поля земли съ напряженіемъ поля, порожденнаго стальнымъ магнитомъ.

§ 109. Напряжение въ полѣ конечнаго магнита распредѣляется приблизительно такимъ же образомъ, какъ и въ полѣ элементарнаго магнита; различія замѣтны вообще только на очень близкихъ расстояніяхъ отъ магнита. Напряжение поля таковаго магнита мы теперь можемъ прямо сравнить съ напряженіемъ земнаго поля.

Пусть стрѣлка буссоли (ns фиг. 81) отклоняется отъ меридіана N

Фиг. 81.



на уголъ α подѣ дѣйствіемъ магнита NS , находящагося отъ нея на расстояніи r и расположеннаго такъ, что около ns его дѣйствие перпендикулярно къ меридіану. Пусть H —напряжение земнаго поля, T —напряжение поля, порожденнаго магнитомъ, $\pm m$ —количества магнитизма полюсовъ стрѣлки ns , $\pm M$ —тѣ же количества въ магнитѣ NS , l —длина ns , L —длина NS .

Тогда моментъ вращенія отъ дѣйствія земнаго поля H на ns будетъ $mHls \sin \alpha$, моментъ вращенія отъ дѣйствія магнита LS будетъ $mTl \cos \alpha$.

Для равновѣсія должно быть $mHl \sin \alpha = mTl \cos \alpha$.

$$T = H \operatorname{tg} \alpha \dots \dots \dots 3 \text{ а)}$$

По урав. 2) $T = 2 \frac{ML}{r^3}$ поэтому $\frac{ML}{H} = \frac{r^3}{2} \operatorname{tg} \alpha \dots \dots \dots 3)$

Если при помощи метода колебаній мы опредѣлимъ естественный направляющій моментъ магнита NS

$$D = MLH \dots \dots \dots 4)$$

то по ур. 3) и 4), изъ которыхъ второе даетъ произведеніе LMN, а первое частное $\frac{ML}{H}$, можно будетъ опредѣлить въ абсолютныхъ единицахъ какъ моментъ ML стержня, такъ и напряженіе земнаго поля H.

Измѣренія эти аналогичны съ измѣреніями электрическихъ зарядовъ въ абсолютныхъ единицахъ: дѣйствіе въ отдѣльности каждаго изъ двухъ различно заряженныхъ проводниковъ на третій проводникъ пропорціонально ихъ зарядамъ; дѣйствіе же другъ на друга пропорціонально произведенію зарядовъ.

Покажемъ на численномъ примѣрѣ примѣненіе изложеннаго въ этомъ параграфѣ способа:

Пусть моментъ инерціи K магнита NS (фиг. 78) равенъ 10^4 (гр. сан. ²) и пусть магнитъ дѣлаетъ 496 колебаній въ часъ, слѣдовательно время одного колебанія его $t=7\cdot255$ (сек.). Тогда по § 101 произведеніе $MLN = D = \pi^2 K t^{-2} = 1860$ (сан. ² гр. сек. ⁻²).

Расположимъ этотъ магнитъ въ плоскости меридіана на разстояніи $r = 126$ сан. отъ магнитной стрѣлки и наклонимъ его относительно стрѣлки такъ, чтобы его дѣйствіе на нее было перпендикулярно къ дѣйствію земнаго магнетизма. Стрѣлка отклонится на уголъ $\alpha = 2^\circ 45'$. На шкалѣ, помѣщенной на разстояніи 300 сант., это дастъ отклоненіе въ 28·86 сант. Поэтому частное $\frac{ML}{H} = \frac{1}{2} r^3 \operatorname{tg} \alpha = 48100$ (сан³). Моментъ стержня ML будетъ слѣдовательно $ML = \sqrt{1860 \cdot 48100} = 9450$ (сан. ^{5/2} гр. ^{1/2} сек. ⁻¹).

Горизонтальная слагающая земнаго напряженія.

§ 110. Выѣстъ съ этимъ опредѣляется и напряженіе H горизонтально дѣйствующей силы земнаго магнетизма.

$$H = \sqrt{\frac{1860}{48100}} = 0\cdot1965 \text{ (сан.}^{-\frac{1}{2}} \text{ гр.}^{\frac{1}{2}} \text{ сек.}^{-1}\text{)}.$$

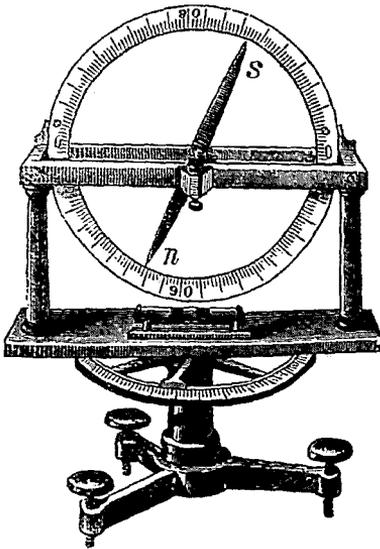
Полная земная магнитная сила и уголъ наклоненія.

Но это не представляетъ собою полной земной магнитной силы. Мы работали до сихъ поръ только съ горизонтально колеблющимися стрѣлками. Если предоставить магниту полную свободу движенія, подвѣсивъ его за центръ тяжести, то сѣверный конецъ его сильно наклоняется вѣзду.

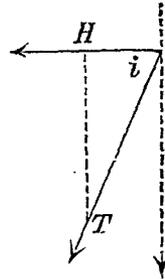
Въ этомъ положеніи онъ показываетъ направленіе полной магнитной силы земли (направленіе наклоненія). Уголь этого направленія съ горизонтальной плоскостью (уголь наклоненія) составляетъ въ нашихъ широтахъ около 65° . И такъ магнитныя линіи силъ земли идутъ въ наблюдаемомъ нами пространствѣ по направленію дождевыхъ капель, которое эти послѣднія приняли бы отъ дѣйствія слабаго южнаго вѣтра, отклоняющаго ихъ отъ вертикали на 35° въ сѣверу.

На фиг. 82 изображенъ приборъ, служащій для измѣренія угловъ на-

Фиг. 82.



Фиг. 83.



клоненія. Вертикальный кругъ съ дѣленіями долженъ быть установленъ въ плоскости магнитнаго меридіана.

Полное напряженіе магнитнаго поля земли.

По горизонтальной слагающей $H = 0 \cdot 2$ (сан. $\frac{1}{2}$ гр. $\frac{1}{2}$ сев. $^{-1}$)

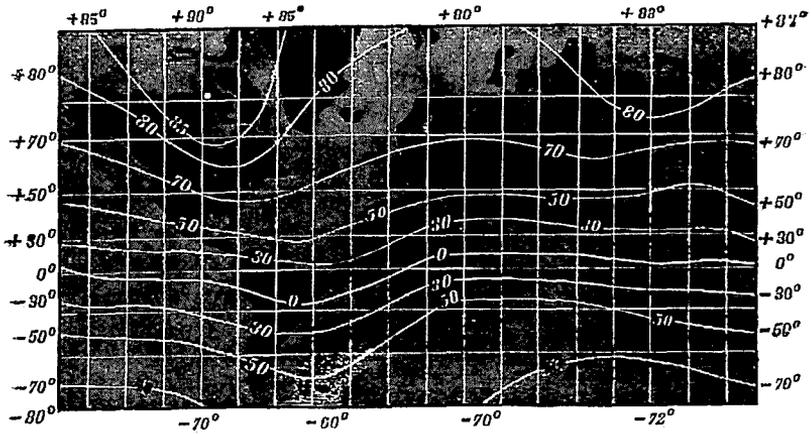
и углу наклоненія $i = 65^\circ$ опредѣляется полное напряженіе T магнитной силы земли $T = H \text{ csc } i$ (ср. фиг. 83):

$$T = 0 \cdot 47 \text{ (сан. } \frac{1}{2} \text{ гр. } \frac{1}{2} \text{ сев. } ^{-1} \text{)}.$$

Карта угловъ наклоненія.

По картамъ фиг. 84 и фиг. 85 можно видѣть, какъ значительно мѣняется уголь наклоненія и полное напряженіе вдоль земной по-

Фиг. 84.



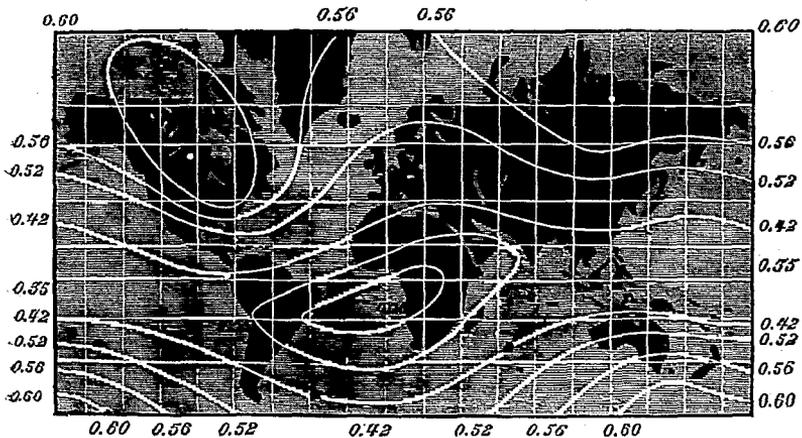
Линія равныхъ угловъ наклоненій (въ градусахъ).

верхности. Въ магнитныхъ полюсахъ земли (§ 99) уголъ наклоненія равенъ $+ 90^\circ$. Стрѣлка наклоненія стоитъ тамъ вертикально. Сѣверный магнитный полюсъ земли былъ посѣщенъ во время одного путешествія въ Гренландію, при чемъ наблюдали такое положеніе стрѣлки. Вблизи экватора стрѣлка стоитъ горизонтально ($i = 0$) Въ южномъ полушаріи наклоненіе отрицательно, сѣверный полюсъ поднимается тамъ вверху.

Карта полныхъ напряженій.

Вблизи магнитнаго полюса напряженіе максимальное и именно равно 0.65 (сан. $^{-1/2}$ гр. $^{1/2}$ сек. $^{-1}$), на экваторѣ оно гораздо меньше (0.35 сан. $^{-1/2}$ гр. $^{1/2}$ сек. $^{-1}$), самое меньшее въ южной части Атлантическаго океана (0.28 сан. $^{-1/2}$ гр. $^{1/2}$ сек. $^{-1}$) ср. фиг. 85.

Фиг. 85.



Линія равнаго полного напряженія.

(въ сан. $\frac{1}{2}$ гр. $\frac{1}{2}$ сек. $^{-1}$)

Магнитный потенциалъ земли.

Если на магнитныхъ полюсахъ зарыть въ землю на глубину 600 виллом. двѣ колоссальныя разноименныя магнитныя массы въ $7 \cdot 10^{16}$ (сант. $^{3/2}$ гр. $^{1/2}$ сек. $^{-1}$), то они замѣнили бы въ грубыхъ чертахъ дѣйствіе земного магнетизма. А именно магнитныя линіи уровня потенциала идутъ по земной поверхности такъ же, какъ географическіе параллельныя круги и окружаютъ магнитные полюсы; магнитныя же линіи силы земли (магнитные меридіаны § 99) сходятся въ магнитныхъ полюсахъ. Вся земля должна была бы при этомъ быть изъ хорошей стали, чтобы быть въ состояніи обладать указаннымъ магнитнымъ моментомъ въ $9 \cdot 10^{28}$ (сант. $^{5/2}$ гр. $^{1/2}$ сек. $^{-1}$).

Измѣненія земнаго магнетизма.

Распредѣленіе магнитной силы по землѣ подвержено постояннымъ, но очень незначительнымъ перемѣнамъ, къ изученію которыхъ должно обратиться, чтобы разгадать происхожденіе этихъ силъ.

Сложеніе линейныхъ магнитовъ.

§ 111. Дѣйствіе на разстояніе двухъ линейныхъ магнитовъ, сложенныхъ разноименными полюсами, (n и n' фиг. 86) приблизительно соотвѣтствуетъ (при дѣйствіи на большое раз-

Фиг. 86.



стояніе въ равномерномъ полѣ) суммѣ ихъ моментовъ. Если количества магнетизма обоихъ магнитныхъ стержней равны, то внѣшнее дѣйствіе равныхъ и противоположныхъ количествъ магнетизма соприкасающихся полюсовъ (sn') равно нулю. Поэтому окажутся намагниченными только свободныя концевыя поверхности, причѣмъ количества магнетизма въ нихъ будутъ такія же, какъ и до сложенія.

Поэтому окажутся намагниченными только свободныя концевыя поверхности, причѣмъ количества магнетизма въ нихъ будутъ такія же, какъ и до сложенія.

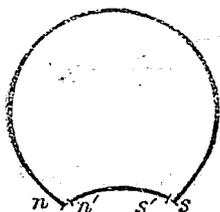
Строеніе магнитовъ.

Этотъ опытъ можно сдѣлать и въ обратномъ порядкѣ: если разломить магнитный стержень ns' на двѣ части, то на поверхностяхъ разлома (s и n'), которыя лежали до этого въ нейтральной полосѣ, окажется магнетизмъ, такъ что оба куска будутъ представлять полные магниты. Количества магнетизма на концахъ (n и s') остаются отъ этого безъ измѣненія. Магнитный стержень можно разломить на произвольное число кусковъ и убѣдиться, что каждый изъ нихъ представляетъ полный магнитъ съ тѣми же количествами магнетизма на полюсахъ, какія первоначально были на концахъ стержня. Эти новыя полюсныя поверхности расположены внутри неразломаннаго первоначальнаго магнита такъ, что дѣйствія ихъ взаимно уравниваются и внѣшнее дѣйствіе производятъ только поверхности концовъ.

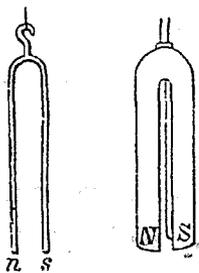
Форма линейныхъ магнитовъ.

При опредѣленіи дѣйствія линейнаго магнита слѣдуетъ принимать во вниманіе только положеніе и количество магнетизма его полюсовъ но не способъ распредѣленія въ немъ стали. Два одинаково сильно намагниченные (одинаковыхъ полюсныхъ зарядовъ) линейные магнита ns и $n's'$ фиг. 87, положеніе полюсовъ которыхъ одинаково, но длина

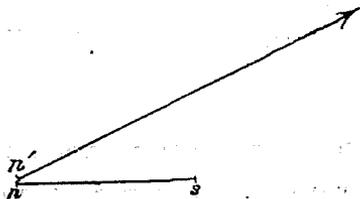
Фиг. 87.



Фиг. 88.



Фиг. 89.



и форма различны, оказываютъ одинаковое внѣшнее дѣйствіе и имѣютъ одинъ и тотъ же направляющій моментъ.

Подково-и колокольчикообразные магниты.

При сгибаніи магнита количества магнетизма на полюсахъ не мѣняются, но мѣняется полюсное разстояніе, а слѣдовательно и магнитный моментъ. Поэтому подковообразные магниты никогда нельзя намагни-

титъ до высокаго момента. Тѣмъ не менѣе во многихъ случаяхъ магнитныя стрѣлки въ формѣ воловьчика или шпильки (фиг. 88), благодаря незначительному моменту инерціи, предпочтительнѣе прямолинейныхъ.

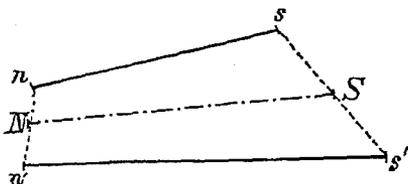
Безконечно длинныя линейныя магниты.

Такое же дѣйствіе, какъ и полюсъ n линейнаго магнита ns (фиг. 89) оказываетъ равный полюсъ n' бесконечно длиннаго линейнаго магнита, идущаго отъ точки n по произвольному направленію. Обыкновенный линейный магнитъ вводитъ въ магнитное поле всегда два полюса, бесконечно же длинный магнитъ—только одинъ. На основаніи этого можно будетъ говорить объ отдѣльныхъ количествахъ магнетизма (объ отдѣльныхъ магнитныхъ полюсахъ). Дѣйствіе отдѣльныхъ полюсовъ Амперъ измѣрилъ при помощи очень длинныхъ линейныхъ магнитовъ (§ 103).

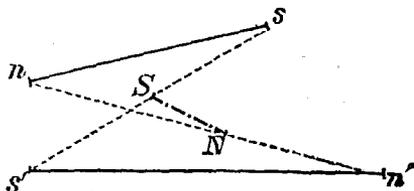
Сложеніе линейныхъ магнитовъ, произвольно направленныхъ.

§ 112. Два линейныя магнита, неизмѣнно ссѣрпленные другъ съ другомъ въ произвольномъ положеніи ns и $n's'$ (фиг. 90 и 91) имѣютъ

Фиг. 90.



Фиг. 91.



въ *равноѣрномъ* магнитномъ полѣ такой же моментъ, какъ и линейный магнитъ NS , полюсы котораго заключаютъ сумму количествъ магнетизма обоихъ одноименныхъ полюсовъ и располагаются между послѣдними, какъ центръ тяжести между двумя соответствующими массами. Это слѣдуетъ изъ закона дѣйствія параллельныхъ силъ, приложенныхъ къ твердому тѣлу.

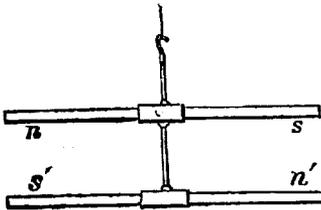
Равнодѣйствующій магнитъ NS имѣетъ въ *равноѣрномъ* полѣ тотъ-же самый направляющій моментъ, но вовсе не тоже самое (на очень малыхъ разстояніяхъ) виѣшнее дѣйствіе, какъ совокупность магнитовъ ns и $n's'$ (фиг. 90). Магнитъ произвольной формы и силы можно замѣнить однимъ

линейнымъ магнитомъ, имѣющимъ тотъ же направляющій моментъ и одинаковое опредѣленное положеніе полюсовъ; относительно же его дѣйствія на очень малыхъ разстояніяхъ его однако можно замѣнить только сложною системою линейныхъ магнитовъ.

Астатическая стрѣлка.

Можно уничтожить дѣйствіе земнаго магнетизма на двѣ равныя стрѣлки, соединяя ихъ антипараллельно (фиг. 92). Длина, а слѣд. и мо-

Фиг. 92.



Фиг. 93.



ментъ равнодѣйствующаго магнита NS будутъ въ этомъ случаѣ равны нулю. Однако въ *неравномерномъ* полѣ такая пара стрѣлокъ можетъ подвергаться очень сильнымъ дѣйствіямъ.

Сложеніе линейныхъ магнитовъ, одинаково направленныхъ.

§ 113. Всѣ дѣйствія одинаково направленныхъ равныхъ линейныхъ магнитовъ, лежащихъ очень близко другъ отъ друга (ns и $n's'$ фиг. 93), просто слагаются, такъ что оконечныя плоскости связки n линейныхъ магнитовъ имѣютъ въ n разъ больше магнетизма чѣмъ одинъ стерженець.

Удельный магнитный моментъ (магнитный моментъ на единицу массы).

Соотвѣтственно этому магнитный моментъ стального стержня равенъ не только съ длиною, но и съ площадью поперечнаго сѣченія, слѣдовательно и съ массою стержня. Частное отъ дѣленія магнитнаго момента на массу называютъ *удельнымъ магнитнымъ моментомъ* стержня и величина этого числа даетъ мѣру силы намагничиванія стержня. Удельный магнитный моментъ продолговатыхъ стержней (приближающихся по формѣ къ линейнымъ магнитамъ), приготовленныхъ изъ наилучшихъ

сортовъ стали можно довести отъ 30 до 40 (сан. $\frac{5}{12}$ гр. $-\frac{1}{2}$ сек. $^{-1}$). Вязаль-
ныя спицы можно иногда намагнитить до 100 (сан. $\frac{5}{12}$ гр. $-\frac{1}{2}$ сек. $^{-1}$).

Магнитная плотность (магнитный моментъ на единицу объема).

Количество магнетизма, которое можно сообщить поверхности по-
люса, пропорціонально величинѣ этой поверхности и не зависитъ отъ
длины магнита. Количество магнетизма, приходящееся на единицу по-
верхности полюса, называютъ *магнитною плотностью* полюса. По этой
величинѣ тоже можно судить о качествѣ магнита.

На полюсныхъ поверхностяхъ сильно намагниченныхъ стержней
изъ твердой стали магнитная плотность бываетъ отъ 240 до 320
(сан. $-\frac{1}{2}$ гр. $\frac{1}{2}$ сек. $^{-1}$).

Сила намагничиванія (магнитный моментъ на единицу попе- речнаго сѣченія).

Произведеніе изъ магнитной плотности полюса на длину магнита,
т. е. магнитный моментъ на единицу площади поперечнаго сѣченія,
обыкновенно называютъ *силою намагничиванія* стержня.

Магнитные слои.

§ 114. Подобно тому, какъ найдены законы дѣйствія бесконечно
тонкихъ магнитовъ конечной длины (линейныхъ магнитовъ), пришли къ
мысли отыскать и простыя законы дѣйствія бесконечно-короткихъ магни-
товъ конечнаго сѣченія,—съ конечными полюсными поверхностями (такъ
называемыя двойныя магнитныя поверхности или *магнитные слои*),
чтобы воспользоваться ими въ геометрически трудныхъ случаяхъ рас-
предѣленія магнитной силы.

Магнитный слой состоитъ изъ двухъ противоположно намагничен-
ныхъ поверхностей одинаковой формы, одинаковой магнитной плотности
 d и находящихся на очень маломъ разстояніи Δ другъ отъ друга.
Чѣмъ менѣе сверхъ того поверхность f такого слоя, тѣмъ точнѣе пред-
ставляетъ онъ *элементарный* магнитъ, ось котораго нормальна къ слою,
длина котораго Δ , количества магнетизма на полюсахъ $\pm f d$ и магнит-
ный моментъ слѣдовательно $\Delta d f$.

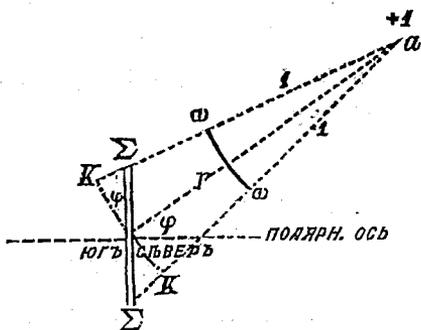
Потенціалъ элемента слоя.

Потенціалъ V такого *элементарнаго* магнита на (§ 108), а слѣдовательно и малаго магнитнаго слоя $\Sigma \Sigma$ (фиг. 94) того же момента $\Delta f d$, равенъ въ произвольной точкѣ поля a (полярныя координаты r, φ):

Фиг. 94.

$$V = \frac{\Delta d f}{r^2} \cos \varphi$$

$f \cos \varphi$ равно съ большимъ приближеніемъ части KK поверхности шара радиуса r и центра a , которая видна изъ a подъ тѣмъ же угломъ, какъ и слой $\Sigma\Sigma$. Выраженіе $\frac{f \cos \varphi}{r^2}$ пред-



ставляетъ слѣдовательно часть поверхности $\omega\omega$, которую вырѣзываютъ изъ поверхности шара радиуса $r=1$ лучи, проведенные изъ a къ контуру $\Sigma\Sigma$. Эту часть поверхности $\omega\omega$ называютъ тѣлеснымъ угломъ ω , подъ которымъ $\Sigma\Sigma$ видна изъ a .

Слѣдовательно потенциалъ V элементарнаго магнитнаго слоя въ произвольной точкѣ его поля a равенъ произведенію изъ силы намагничиванія $\Delta d = \psi$ на тѣлесный уголъ ω , подъ которымъ этотъ элементарный слой видѣнъ изъ a .

$$V = \psi \cdot \omega \dots \dots \dots 5)$$

Потенціалъ магнитнаго слоя.

Потенціалъ V слоя съ конечною поверхностью равенъ суммѣ потенциаловъ элементарныхъ слоевъ, на которые этотъ слой можетъ быть разложенъ.

Такъ какъ сумма тѣлесныхъ угловъ, подъ которыми видны элементы слоя, равна тѣлесному углу Ω , подъ которымъ видѣнъ очеркъ слоя, то

$$V = \psi \cdot \Omega \dots \dots \dots 6).$$

т. е. потенциалъ магнитнаго слоя въ какой угодно точкѣ его поля равенъ произведенію изъ силы намагничиванія на тѣлесный уголъ, подъ которымъ видѣнъ очеркъ слоя изъ этой точки.

Два слоя $\Sigma M \Sigma$ и $\Sigma M' \Sigma$ (фиг. 95) произвольной формы, но одинаковаго ограничивающаго ихъ контура Σ и одинаковой силы намагни-

чиванія имѣють, слѣдовательно, одинаковый потенциалъ во всѣхъ точкахъ, лежащихъ внѣ ограничиваемаго ими пространства.

Потенціалъ плоскаго магнитнаго слоя.

§ 115. Тѣлесный уголъ, подъ которымъ видна безконечная плоскость, равенъ вездѣ полушару радиуса 1, т. е. 2π .

Поэтому безконечный плоскій магнитный слой, (сила намагничиванія котораго Δd , возбуждаетъ во всемъ своемъ полѣ одинаковый потенциалъ:

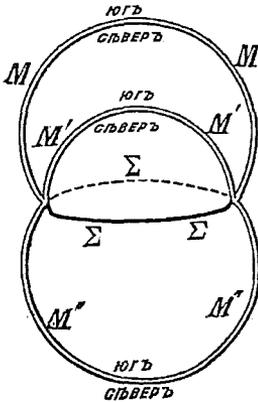
$$V = 2\pi \cdot \Delta d.$$

Въ такомъ полѣ нѣтъ магнитныхъ силъ.

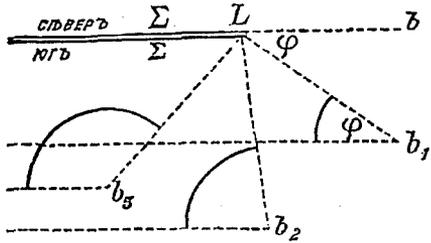
Потенціалъ половины плоскаго магнитнаго слоя.

§ 116. Пусть безконечная плоскость, перпендикулярная въ плоскости чертежа (фиг. 96), ограничена съ одной стороны прямою L , по всѣмъ же другимъ направлѣніямъ распространяется безгранично.

Фиг. 95.



Фиг. 96.



Изъ какой нибудь точки b_1 контуръ этой плоскости видѣнъ по направлѣніямъ, которыя всѣ лежатъ въ двухъ плоскостяхъ b_1L и $b_1\infty$. Обѣ эти плоскости образуютъ другъ съ другомъ уголъ φ , который равенъ также полярному углу b_1Lb (начало L , полярная ось Lb) и вырѣзываютъ изъ шара, радиусъ котораго 1 и центръ въ b_1 , поверхность 2φ .

Поэтому потенциалъ половины плоскостнаго слоя въ точкѣ, полярный уголъ которой φ , а радиусъ векторъ произволенъ, будетъ:

$$V = 2\varphi \cdot \Delta d.$$

Уравненіе поверхностей уровня будетъ $V = \text{Const}$, т. е. $\varphi = \text{Const}$;

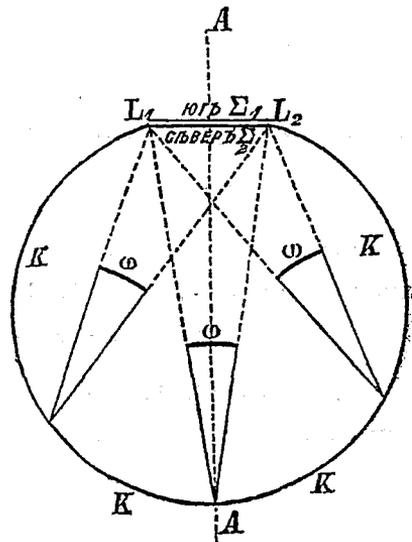
они представляют, слѣдовательно, плоскости, пересѣкающіяся по L . Линіи силъ будутъ представлять круги, центръ которыхъ находится на L , а плоскость, въ которой лежатъ эти круги,—перпендикулярна въ Σ . Магнитное напряженіе тѣмъ болѣе, чѣмъ быстрѣе паденіе потенциала, чѣмъ менѣе размѣръ или радіусъ этихъ круговыхъ линій силъ. Слѣдовательно для всѣхъ точекъ поля магнитная сила обратно пропорціональна кратчайшему разстоянію до L и перпендикулярна въ нему и къ L .

Считая отъ полуплоскости Lb , потенциалъ которой пусть будетъ нуль, на сѣверной сторонѣ слоя потенциалъ достигаетъ значенія $+2\pi \Delta d$, а на южной— $2\pi \Delta d$.

Линейный магнитный слой.

§ 117. Тѣлесный уголъ ω , подъ которымъ видны края L_1 и L_2 длинной двойной полоски $\Sigma_1 \Sigma_2$ (на фиг. 97 перпендикулярной въ плоскости черт.), имѣетъ одно и тоже значеніе для всѣхъ точекъ цилиндра $L_1 K K L_2$, такъ какъ въ кругѣ KK вписанные углы ω , опирающіеся на одну и ту же дугу $L_1 L_2$, равны между собою.

Фиг. 97.



Поверхности уровня и линіи силъ линейнаго магнитнаго слоя.

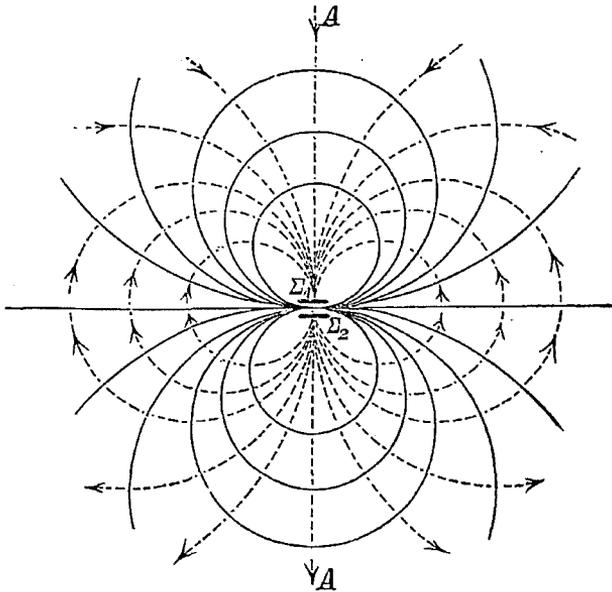
Поверхности уровня такой двойной полоски $\Sigma_1 \Sigma_2$ представляютъ пучекъ круговыхъ цилиндровъ, сѣченія которыхъ съ плоскостью чертежа (фиг. 98) показаны сплошными линіями.

Линіи силъ пересѣкаютъ каждый кругъ уровня два раза нормально (одинъ разъ внутри полоски и другой разъ снаружи); они должны быть поэтому тоже кругами. На фиг. 98 линіи эти показаны въ видѣ пучка пунктирныхъ круговъ, повернутыхъ около пучка линій уровня на 90° .

Потенціалъ линейнаго магнитнаго слоя.

Если положить равнымъ m количество магнетизма [на единицу длины одной изъ полосокъ Σ_1 или Σ_2 , то потенциалъ, который получится

Фиг. 98.



отъ обѣихъ полосокъ, въ точкѣ A (фиг. 97), а слѣдовательно и въ уровенномъ цилиндрѣ радіуса r , будетъ

$$V = \Delta \cdot d \cdot \omega = \frac{\Delta m}{r}; \quad r = \frac{\Delta m}{V}$$

Уравненіе круга КК въ полярныхъ координатахъ (ρ, φ) относительно полярной оси AA имѣеть видъ:

$$\rho = 2r \cos \varphi; \quad \rho = 2 \cdot \frac{\Delta m}{V} \cos \varphi.$$

Отсюда слѣдуетъ, что потенциалъ, возбуждаемый линейнымъ слоемъ въ произвольной точкѣ a , полярныя координаты которой ρ и φ , равенъ

$$V = 2 \frac{\Delta m}{\rho} \cos \varphi.$$

Силовое дѣйствіе одной заряженной линіи.

§ 118. Потенціалъ этотъ равенъ запасу работы, которымъ обладаетъ магнитная система $\Sigma_1 \Sigma_2$ и точка a , полярныя координаты которой (ρ, φ) и въ которой находится $+1$ количества магнетизма. Этотъ запасъ работы израсходуется, если, не прекращая вліянія силы f , приложенной къ магнитной линіи Σ_1 вслѣдствіе дѣйствія на нее точки a *), линію

*) Сила, приложенная къ точкѣ a вслѣдствіе дѣйствія на нее магнитной линіи Σ_1 , равна и противоположна f .

эту перемѣстимъ на Δ и совмѣстимъ съ противоположно заряженной линіей Σ_2 (ср. § 108). По направленію AA дѣйствуетъ слагающая $f \cos \varphi$ силы взаимодѣйствія между Σ_1 и a . Поэтому имѣемъ:

$$f \cos \varphi \cdot \Delta = V.$$

Работа силы взаимодѣйствія = запасу работы;

Отсюда слѣдуетъ:

$$f = \frac{2m}{\rho}$$

Т. е. прямая, по которой равномерно распределенъ магнетизмъ, дѣйствуетъ съ силою, которая обратно пропорціональна первой степени разстоянія.

Силовое дѣйствіе одной заряженной плоскости.

Такимъ же образомъ изъ потенциала

$$V_1 = 2\pi \cdot \Delta \cdot d,$$

возбуждаемаго плоскимъ слоемъ въ произвольной точкѣ поля a , можно опредѣлить дѣйствіе одной только равномерно заряженной плоскости на $+1$ количества магнетизма, находящагося въ a .

Имѣемъ:

$$f \cdot \Delta = V$$

Работа совмѣщенія = запасу работы,

а отсюда слѣдуетъ

$$f = 2\pi d$$

т. е. во всякой точкѣ поля, порожденнаго плоскостью, намагниченною равномерно до плотности d , магнитное напряженіе равняется $2\pi d$.

Благодаря аналогіи между законами Ампера и Кулона, можно распространить положенія о дѣйствіи равномерно намагниченныхъ прямыхъ и плоскостей на дѣйствія равномерно наэлектризованныхъ проволокъ и пластинокъ. (Ср. § 22).

Распространеніе силового дѣйствія.

§ 119. Силовое дѣйствіе, исходящее изъ точки, прямой или плоскости, обратно пропорціонально (шаровой, цилиндрической, плоской) поверхности, на которую оно распространилось. Дѣйствіе это уменьшается, слѣдовательно, съ удаленіемъ отъ источниковъ силы по тѣмъ же

законамъ, по которымъ уменьшается напряженіе свѣта свѣтящихся точки, линіи и плоскости съ удаленіемъ отъ свѣтовыхъ источниковъ.

3. Магнитизмъ токовъ.

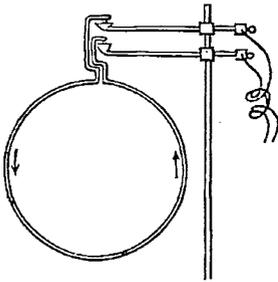
Открытие Эрштедта.

§ 120. Лишь только въ началѣ нашего столѣтія узнали о свойствахъ и тепловыхъ дѣйствіяхъ проводника, находящагося въ токосостояніи, какъ уже были открыты и явленія, указывавшія на своеобразную связь между состояніемъ магнитнымъ и электрическимъ токосостояніемъ. Эрштедтъ (1819) впервые замѣтилъ, что находящаяся въ сильномъ токосостояніи, накаливая мѣдная проволока проявляла магнитныя дѣйствія на стрѣлку помѣщенной вблизи бусоли. Болѣе подробныя изслѣдованія показали однако, что токи менѣе сильныя, далеко не накаливавшіе проволоку, производили замѣтное магнитное дѣйствіе и что слѣдовательно причина этого явленія обусловливается токосостояніемъ проводника, т. е. паденіемъ внутри его потенциала, а никакъ не кроется въ выдѣляемой имъ теплотѣ.

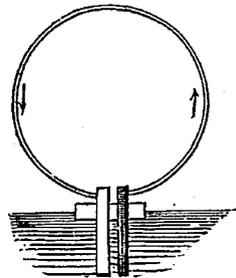
Сила магнитнаго дѣйствія тока.

Если, наоборотъ, закрѣпимъ стрѣлку, а проводникъ сдѣлаемъ подвижнымъ (фиг. 99 и 100), то послѣдній будетъ перемѣщаться подѣ

Фиг. 99.



Фиг. 100.



дѣйствіемъ силъ, исходящихъ изъ стрѣлки. Наконецъ, если какъ стрѣлка, такъ и проводникъ будутъ въ состояніи свободно двигаться, то они обнаружатъ равныя дѣйствія и противодѣйствія и установятся поѣтому согласно распредѣленію ихъ массъ и законамъ центра тяжести и площадей. Силу, приложенную къ магнитному полюсу вслѣдствіе дѣйствія на него тока, будемъ называть въ дальѣйшемъ *силой магнитнаго дѣйствія тока*.

Знакъ силы магнитнаго дѣйствія тока.

§ 121. Два разноименныхъ и равныхъ магнитныхъ полюса, помѣщенныхъ въ одной точкѣ (концы линейныхъ магнитовъ), не производятъ и на токъ вѣдшихъ дѣйствій. Также и наоборотъ, токъ не производитъ никакихъ дѣйствій на подобные полюсы. Слѣдовательно силы магнитнаго дѣйствія тока на разноименные полюсы при прочихъ равныхъ обстоятельствахъ равны и противоположны.

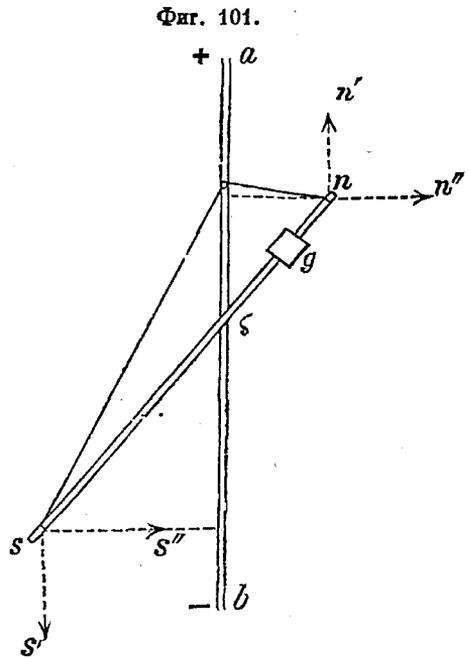
Безразличное равновѣсiе стрѣлки.

§ 122. Пусть линейный магнитъ ps (фиг. 101) имѣетъ возможность свободно вращаться около точки s длиннаго прямолинейнаго проводника ab . Освободимъ его далѣе помощью передвижнаго грузика g отъ дѣйствія силы тяжести и направляющимъ магнитомъ отъ силы земнаго магнетизма. Этотъ магнитъ находится въ любомъ положеніи въ безразличномъ равновѣсiи. На положеніе его не вліяетъ ни замыканіе, ни размыканіе, ни перемѣна направленіи тока въ ab . Отсюда слѣдуетъ, что магнитное дѣйствіе тока на полюсъ n всегда уничтожаетъ дѣйствіе на полюсъ s .

Въ справедливости сазаннаго можно также убѣдиться, передвигая длинный проводникъ въ любомъ направленіи, но возможно близко къ оси вращенія магнитной стрѣлки. Описанный опытъ служитъ доказательствомъ нижеслѣдующему въ томъ лишь случаѣ, если ось вращенія стрѣлки не находится на серединѣ между ея полюсами.

Направленіе силы магнитнаго дѣйствія прямолинейнаго тока.

Отсюда слѣдуетъ во первыхъ, что силы магнитнаго дѣйствія прямолинейнаго тока не имѣютъ составляющихъ pn' и ss' параллельныхъ провод-



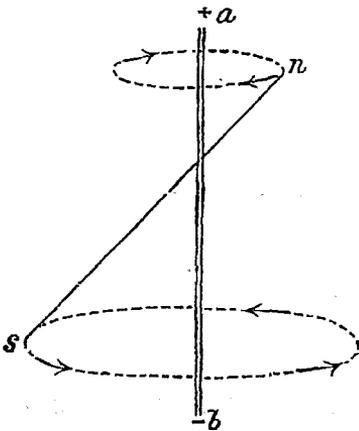
нику ab . Въ противномъ случаѣ эти составляющія, имѣя противоположныя направленія (§ 121), образовали бы пару силъ, дѣйствіе которой немогло бы ускользнуть отъ наблюденія. На томъ же основаніи эти удивительныя силы не могутъ быть во вторыхъ направлены по линіямъ, соединяющимъ магнитныя полюсы съ проводникомъ (pn'' и $s''s$). Силы, дѣйствующія въ такомъ направленіи, могли бы уравновѣситься лишь при извѣстномъ отношеніи къ плечамъ, а послѣднія всецѣло зависятъ отъ мѣста произвольно выбранной точки вращенія σ .

Изъ всего этого слѣдуетъ, что равнодѣйствующая сила, получающаяся вслѣдствіе дѣйствія прямолинейнаго тока на магнитный полюсъ, должна быть перпендикулярна къ линіи кратчайшаго разстоянія между послѣдними, а также и къ направленію тока.

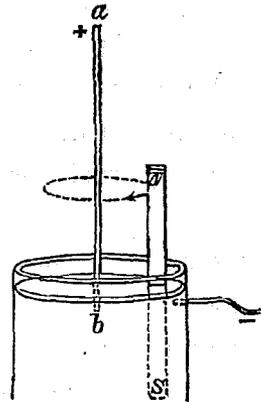
Линіи силъ магнитнаго дѣйствія прямолинейнаго тока.

§ 123. Если будемъ идти непрерывно по направленію упомянутыхъ силъ, то опишемъ (фиг. 102) вокругъ проводника замкнутый кругъ.

Фиг. 102.



Фиг. 103.



Магнитныя линіи силъ проводника, находящагося въ токосостояніи, не исходятъ отъ поверхности проводника и не теряются въ безконечности, какъ это обыкновенно имѣетъ мѣсто въ случаѣ тѣлъ (тяготѣющихъ, наэлектризованныхъ и намагниченныхъ), дѣйствующихъ на разстояніе. Линіи силъ не касаются проводника, онѣ соменуты и окружаютъ послѣдній, чего никогда не бываетъ въ случаѣ прочихъ дѣйствующихъ на разстояніе тѣлъ.

Униполярное вращение.

Фарадей придумал прибор (фиг. 103), помощью которого представляется возможным наглядно демонстрировать круговое движение магнитного полюса n около тока ab . Магнит плавает в этом приборе во ртути перпендикулярно к поверхности последней. Вследствие этого устраняется почти совершенно действие тока на полюс s , в то время, как оно на полюс n обнаруживается полностью.

Правило Ампера.

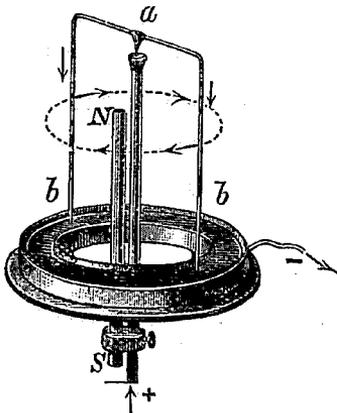
§ 124. Если смотреть на этот магнит по направлению тока, то, в случае северного полюса, последний будет вращаться по направлению часовой стрелки, в случае же южного полюса, таковой вращается в обратном направлении. Если переменить направление тока, то изменится и направление вращения магнита.

Если закрепить магнит неподвижно, а проводник ab сделать подвижным около a (фиг. 104), то последний будет вращаться вокруг магнита, при чем направление этого вращения может быть определено на основании закона противодействия.

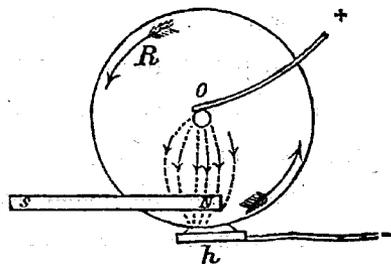
Барлово колесо.

Несколько иному вращению подвергается токопроводящее колесо Барлова (фиг. 105). В этом случае ток проходит по медному ко-

Фиг. 104.



Фиг. 105.



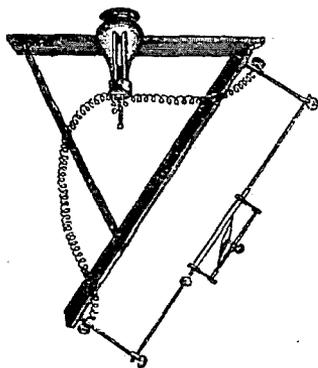
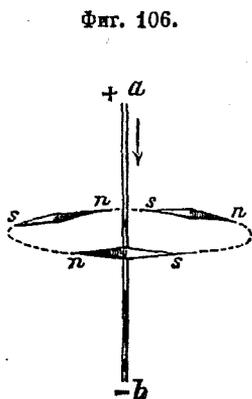
лесу R в направлении радиуса (oh). Колесико это может вращаться вокруг оси o и погружено в сосуд с ртутью h . Ток подводится

въ колесиву при помощи скользящаго контакта. Если смотрѣть по положительному направленію тока (oh), то магнитный полюсъ N будетъ толкаемъ влѣво, а стало быть колесико вправо; поэтому оно будетъ вращаться, если смотрѣть спереди, въ отрицательномъ направленіи (въ направленіи оперенной стрѣлки). Линіи тока постоянно будутъ идти по направленію oh . Самое вращеніе совершается необыкновенно быстро.

Направленіе, въ которомъ устанавливается магнитная стрѣлка подѣ дѣйствиємъ прямолинейнаго тока.

Магнитная стрѣлка, свободно вращающаяся вокругъ точки, лежащей виѣ проводника ab (фиг. 106), установится, по правилу Ампера

Фиг. 107.



(§ 124), въ направленіи линіи силъ и при томъ таеъ, что, если смотрѣть по положительному направленію тока и представить себѣ стрѣлку перемѣщающейся вдоль линіи силъ по направленію часовой стрѣлки, то перемѣщеніе это будетъ совершаться сѣвернымъ полюсомъ напередъ.

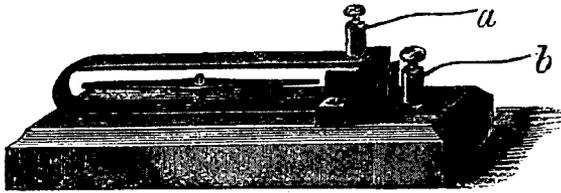
Если стрѣлка подвержена при этомъ и магнитному дѣйствию земли, то она не будетъ въ состояніи принять указанное направленіе вполнѣ, но будетъ замѣтно приближаться къ нему въ случаѣ сильныхъ токовъ. Это совокупное дѣйствіе разнородныхъ магнитныхъ силъ очень удобно наблюдается, если прямолинейный токъ установить въ направленіи наклоненія (§ 110). (Махъ, фиг. 107).

Гальваноскопъ.

§ 125. Если измѣнить направленіе тока, то магнитныя стрѣлки фиг. 106 повернутся на 180° . Такимъ образомъ, можно по отклоненію

стрѣлки, точка вращенія которой находится внѣ проводника, опредѣлить направленіе тока, т. е. знавъ паденія потенціала внутри этого проводника, для каковаго опредѣленія мы имѣли въ распоряженіи до сихъ поръ лишь электроскопическія и вольтметрическія измѣренія. Основанный на этомъ началѣ приборъ для опредѣленія направленія тока (гальваноскопъ) изображенъ на фиг. 108. Полоса, по которой проходитъ

Фиг. 108.



токъ, должна быть установлена въ плоскости магнитнаго меридіана и включена въ испытуемую цѣпь. Если сѣверный полюсъ стрѣлки отклоняется изъ плоскости чертежа впередъ, то потенціалъ точки *a* выше потенціала точки *b*, въ обратномъ случаѣ—положительное направленіе тока есть *ba*.

Законъ дѣйствія прямолинейнаго тока на разстояніе.

§ 126. Моментъ вращенія, приводящій стрѣлку въ ея новое положеніе равновѣсія, уменьшается по мѣрѣ приближенія точки вращенія стрѣлки къ проводнику и совершенно исчезаетъ, если ось вращенія стрѣлки совпадаетъ съ прямолинейнымъ токомъ *ab* (фиг. 101).

Въ этомъ положеніи сила, дѣйствующая на южный полюсъ, уничтожаетъ противоположную (§ 121) силу, дѣйствующую на сѣверный полюсъ (Максуэлль).

Пусть $+m$ и $-m$ обозначаютъ количества магнетизма полюсовъ, T_1 и T_2 —напряженія силы магнитнаго дѣйствія тока соотвѣтственно въ точкахъ *n* и *s* (Фиг. 101). Такъ какъ моментъ вращенія $+mT_1r_1$ равенъ и противоположенъ моменту $-mT_2r_2$, то

$$T_1 r_1 = T_2 r_2 = C_1 \dots \dots \dots 1)$$

т. е. въ магнитномъ полѣ прямолинейнаго тока произведеніе изъ разстоянія произвольной точки отъ этого тока на напряженіе T силы магнитнаго дѣйствія его въ разсматриваемой точкѣ есть величина постоянная C_1 .

Вліяніе паденія потенціала въ проводникѣ. Величина направляющей силы магнитнаго дѣйствія прямолинейнаго тока.

§ 127. Значеніе C_1 этого произведенія зависитъ отъ интенсивности токо-процесса въ проводникѣ, а стало-быть отъ величины паденія потенціала въ немъ.

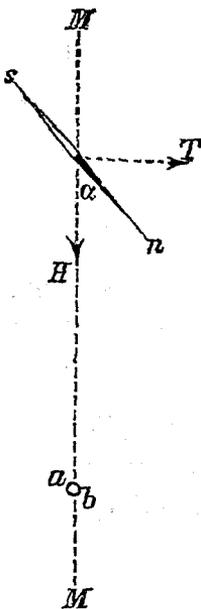
Пусть имѣется напр. входящійся въ токо-состояніи прямолинейный вертикальный мѣдный проводникъ въ 1 мм.² сѣченіемъ. Онъ устанавливаетъ короткую стрѣлку, магнитный моментъ которой 1, по направленію линіи силы радіуса r съ силою $T = \frac{C_1}{r}$. При паденіи потенціала въ 0.1 Даниеля на 1 метръ эта направляющая сила будетъ:

$$\frac{C_1}{r} = \frac{1.00}{r} \left(\text{сн.}^{-1/2} \text{ гр.}^{1/2} \text{ сек.}^{-1} \right); C_1 = 1.00 \left(\text{сн.}^{1/2} \text{ гр.}^{1/2} \text{ сек.}^{-1} \right)$$

Сравненіе силы магнитнаго дѣйствія тока съ горизонтальной слагающей земнаго магнетизма.

Такимъ образомъ, въ этомъ примѣрѣ стрѣлка, для $r=5$ сн., подвергается отъ тока такой же направляющей силѣ ($0,2$ сн.^{-1/2} гр.^{1/2} сек.⁻¹),

Фиг. 109.



какъ и отъ земнаго магнетизма (§ 110). Если стрѣлка помѣщена такъ, что r совпадаетъ съ магнитнымъ меридіаномъ M (фиг. 109), то направленіе ея составитъ съ r уголъ ровно въ 45° . При помощи тангенса угла α , образуемаго стрѣлкой въ такомъ положеніи равновѣсія съ меридіаномъ, можно удобно сравнить силу магнитнаго дѣйствія тока T съ горизонтальной слагающей H земнаго магнетизма. (Обѣ эти силы взаимно перпендикулярны).

$$T = H. \operatorname{tg} \alpha \dots \dots \dots 2)$$

Магнитный моментъ стрѣлки не входитъ въ это уравненіе, подобно тому, какъ и въ соответственное уравненіе 3 а) § 109-го.

Законъ пропорціональности.

§ 128. Для $r=10$ сн., $T = \frac{C_1}{r} = 0.1$ (сн.^{-1/2} гр.^{1/2} сек.⁻¹) и

стрѣлка отклоняется токомъ на уголъ $\alpha = 30^\circ$ ($\operatorname{tg} 30^\circ = \frac{0.1}{0.2} = \frac{T}{H}$). Если усилить паденіе потенциала въ прямолинейномъ проводникѣ въ два раза (0.2 Даніэля на 1 метръ), то стрѣлка отклонится на 45° . Тогда для $g = 10$ сн. $T = H$, т. е. $T = 0.2$, $C_1 = 2.00$ и стало быть въ два раза больше, чѣмъ при прежнемъ паденіи потенциала, т. е.:

Сила магнитнаго дѣйствія тока при прочихъ равныхъ обстоятельствахъ пропорціональна электрическому паденію потенциала въ проводникѣ.

Электромагнитная единица мѣры для токонпряженія.

Это паденіе потенциала опредѣлялось при только что описанныхъ опытахъ или помощью электрометрическихъ наблюденій (§ 49), или посредствомъ калориметрическихъ измѣреній въ связи съ закономъ Джауля, или же наконецъ при помощи вольтметра и закона Фарадея.

На ряду съ этими тремя методами измѣреній является возможнымъ, на основаніи указанной пропорціональности, измѣрять токосостояніе по новому независимому отъ нихъ и согласующемуся съ ними методу, основанному на измѣреніи магнитныхъ дѣйствій тока. Эти магнитныя измѣренія всецѣло механическаго свойства; поэтому электромагнитная система единицъ ставится на ряду съ электростатическою системою и предпочитается калориметрической и химической системамъ.

Вліяніе поперечнаго сѣченія.

§ 129. Два кратно прилегающіе другъ къ другу одинаковыя проводника съ равнымъ паденіемъ потенциала оказываютъ въ два раза большее магнитное дѣйствіе, чѣмъ каждый изъ нихъ въ отдѣльности. Поэтому не слѣдуетъ удивляться, если сила T , а стало быть и произведеніе $Tg = C_1$, при данномъ паденіи потенциала $\frac{E}{l}$, пропорціональны поперечному сѣченію q проводника

$$Tg = \text{Const. } q \cdot \frac{E}{l}$$

Вліяніе проводимости.

Паденіе потенциала въ непроводникѣ, хотя и можетъ быть доведено до большаго значенія, не проявляетъ въ магнитномъ отношеніи никакого дѣйствія. Магнитное дѣйствіе тока должно поэтому, при прочихъ ра-

ныхъ обстоятельствахъ, увеличиваться съ увеличеніемъ проводимости проводника. Оно оказалось пропорціональнымъ этой проводимости k .

$$\text{Tr} = \text{Const. } k \cdot q \cdot \frac{E}{l}.$$

Зависимость отъ токонапряженія.

Если принять во вниманіе опредѣленіе § 56-го:

$$k \cdot q \cdot \frac{E}{l} = J,$$

то для токонапряженія J проводника получимъ слѣдующую зависимость:

$$\text{Tr} = \text{Const. } J \dots \dots \dots 3)$$

которая можетъ быть удобнѣе всего провѣрена вольтаметрическими измѣреніями (химическія дѣйствія тока тоже пропорціональны токонапряженію) и справедливость которой была подтверждена неоднократно.

Электромагнитная единица токонапряженія.

§ 130. Въ ур. 3) Const. для электростатической и электромагнитной системъ единицъ имѣетъ различное значеніе, потому что для послѣдней системы значеніе это еще до сихъ поръ произвольно. Мы прийдемъ, что

$$\text{Tr} = 2 \text{ i (элевр. маг. ед.)} \dots \dots \dots 4)$$

этимъ мы опредѣлили электромагнитную единицу токонапряженій i просто, но иначе, чѣмъ электростатическую единицу токонапряженія. А именно:

Въ прямолинейномъ проводникѣ токонапряженіе равняется единицѣ (въ С. Г. С. электромагнитныхъ единицахъ), если проводникъ этотъ толкаетъ въ сторону $1-u$ количества магнетизма, находящуюся на 1 разстояніи, съ силою $T = 2$ (сан. $^{-1/2}$ гр. $^{1/2}$ сек. $^{-1}$) = 0.002 (граммовѣса на единицу количества магнетизма).

Этотъ токъ имѣетъ напряженіе = 10 Даниелей на Е. С. = $3 \cdot 10^{10}$ (сан. $^{3/2}$ гр. $^{1/2}$ сек. $^{-2}$) электростатическихъ единицъ. Данныя эти получены электрометрическимъ измѣреніемъ 1-го Даниеля = $\frac{1}{300}$ (сан. $^{1/2}$ гр. $^{1/2}$ сек. $^{-1}$) электростатическихъ единицъ (§ 27) и на калориметри-

числомъ измѣреніи 1-ой Е. С. = 0₁₁ 12 (сан. ⁻¹ сек.) абсолютныхъ единицъ (§ 54).

Токъ въ 20 Даниелей на Е. С. дѣйствуетъ на количество магнитизма = 1 при $r = 1$ съ силою $T = 4$ (сан. ^{-1/2} гр. ^{1/2} сек. ⁻¹).

Измѣреніе электромагнитной единицы токонапряженія.

По уравненію 4) токонапряженіе i въ электромагнитныхъ единицахъ имѣетъ измѣреніе $T. r = \text{сан.}^{1/2} \text{ гр.}^{1/2} \text{ сек.}^{-1}$, такъ какъ сила магнитнаго дѣйствія тока T имѣетъ измѣреніе $\frac{\text{сила}}{\text{колич. маг.}} = \frac{\text{сан. гр. сек.}^{-2}}{\text{сан.}^{3/2} \text{ гр.}^{1/2} \text{ сек.}^{-1}}$
 $= \text{сан.}^{-1/2} \text{ гр.}^{1/2} \text{ сек.}^{-1}$.

Гальванометръ.

§ 131. Приспособленія въ родѣ изображенныхъ на фиг. 108 примѣняются подъ названіемъ гальванометровъ для удобнаго магнитнаго измѣренія токонапряженій. Во всѣхъ такихъ приборахъ ось стрѣлки имѣетъ неизмѣнное положеніе по отношенію къ проводнику и оба они такое же положеніе по отношенію къ магнитному меридіану (r и направленіе магнитнаго меридіана неизмѣнены).

По уравненіямъ 2) и 4), для токонапряженія i (въ элек. маг. ед.) отклонившаго стрѣлку отъ меридіана на уголъ α , имѣемъ:

$$i = \frac{1}{2} rH. \text{tg } \alpha; \quad i = C. \text{tg } \alpha$$

Переводный множитель.

Зависящая только отъ конструкціи гальванометра и отъ горизонтальной слагающей H земнаго магнитизма постоянная $C = \frac{1}{2} rH$, которая выражаетъ собою токонапряженіе, обусловливающее отклоненіе $\alpha = 45^\circ$ ($\text{tg } 45^\circ = 1$), называется переводнымъ множителемъ гальванометра.

Дѣйствіе мгновеннаго тока.

§ 132. Если проводникъ не находится въ установившемся токоостояніи, но черезъ него проходитъ разрядъ лейденской банки, то количество движенія Ω , которое приобрѣтаетъ магнитная стрѣлка, вслѣд-

ствіе полученнаго ею при этомъ магнитнаго толчка, пропорціонально заряду банки.

Доказательство: Ω соотвѣтствуетъ импульсу средней силы магнитнаго дѣйствія тока T , приложенной въ магнитной стрѣлкѣ момента M въ теченіи всего времени разряда t .

$$\Omega = MT. t.$$

Если принять во вниманіе уравненія

$$Tg = 2i. 4) \text{ и } i t = Q \text{ (§ 77),}$$

гдѣ i есть среднее токонатяженіе во время разряда, а Q —зарядъ банки то будемъ имѣть:

$$\Omega \equiv M. \frac{2}{g}. Q.$$

Но количество движенія Ω производитъ по § 101 отклоненіе стрѣлки α , опредѣляемое изъ уравненія:

$$\Omega = \frac{\tau}{\pi}. MN. \alpha,$$

гдѣ MN —направляющій моментъ стрѣлки, а τ —время одного ея колебанія.

Поэтому окончательно получимъ:

$$it = Q = \frac{g}{2} N. \frac{\tau}{\pi} \alpha = \text{Const. } \alpha \text{ (элект. маг. ед.)} 5)$$

Сравненіе электромагнитной системы съ электростатической системой единицъ.

И такъ отклоненіе стрѣлки гальванометра α пропорціонально заряду банки Q . Магнитная стрѣлка, для которой $\tau=3$ сек., помѣщенная внутри гальванометрической рамы съ переводнымъ множителемъ $C=0.8$ (элек. маг. ед.), получитъ отъ разряда батареи, [емкость которой $=5 \cdot 10^4$ сан., а разность потенциаловъ обкладокъ $=50$ (сан.^{1/2} гр.^{1/2} сек.⁻¹), а стало быть зарядъ которой $Q=25 \cdot 10^5$ (сан.^{3/2} гр.^{1/2} сек.⁻¹)] отклоненіе $\alpha=0.1$ дуговыхъ единицъ. Зарядъ Q будетъ тогда въ электромагнитныхъ единицахъ равняться $0.8 \cdot \frac{3}{\pi} \cdot 0.1 = 0.8$ (сан.^{1/2} гр.^{1/2}) элек. маг. ед. $= 25 \cdot 10^5$ (сан.^{3/2} гр.^{1/2} сек.⁻¹) элек. стат. ед.

И такъ электромагнитная единица количества электричества Q , а стало быть и токонапряженія i ($it=Q$) въ $3 \cdot 10^{10}$ разъ больше электростатической единицы. Такимъ образомъ по способу непосредственныхъ электростатическихъ и магнитныхъ измѣреній гораздо удобнѣе было найдено отношеніе между обѣими системами единицъ, чѣмъ по способу калориметрическаго измѣренія (§ 126). Какимъ образомъ можно устроить гальванометры съ такимъ небольшимъ переводнымъ множителемъ ($C=0,8$) будетъ объяснено въ § 142. И такъ:

$$J \text{ (элек. стат. ед.)} = 3 \cdot 10^{10} i \text{ (элек. маг. ед.)}$$

Практическая единица токонапряженія.

§ 133. Электростатическая единица токонапряженія для практическихъ цѣлей въ высшей степени мала, электромагнитная же единица имѣетъ довольно подходящее значеніе. Десятую часть послѣдней приняли за практическую единицу и дали ей названіе амперъ (въ воспоминаніе объ А. М. Амперѣ).

$$1 \text{ амперъ} = 0,1 \text{ (сан. } ^{1/2} \text{ гр. } ^{1/2} \text{ сек.}^{-1}) \text{ элек. маг. ед.}$$

$$1 \text{ амперъ} = 3 \cdot 10^9 \text{ (сан. } ^{3/2} \text{ гр. } ^{1/2} \text{ сек.}^{-2}) \text{ элек. стат. ед.}$$

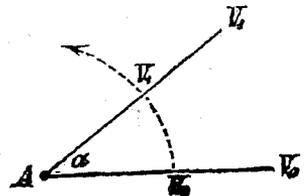
Магнитное поле прямолинейнаго тока.

§ 134. Магнитныя линіи силъ прямолинейнаго тока A (фиг. 110) представляютъ собою круги, центры которыхъ лежатъ на этой прямой.

Такъ какъ поверхности уровня должны пересѣкать эти круги ортогонально, то онѣ будутъ плоскости, пересѣкающіяся по прямой тока. Но вдоль круговой линіи силъ радиуса r существуетъ постоянная сила магнитнаго дѣйствія тока $T = \frac{2i}{r}$; поэтому паденіе потенціала есть величина постоянная. Если назовемъ потенціалъ въ какой-нибудь точкѣ черезъ V_0 , то для разстоянія α вдоль линіи силъ разность потенціаловъ должна быть $(V_1 - V_0) = \alpha \cdot T$, или

$$V_1 - V_0 = 2\alpha i \dots \dots \dots (6)$$

Фиг. 110.



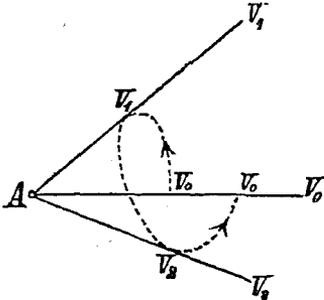
Уравненіемъ 6) дается распределеніе потенціала во всемъ полѣ

прямолинейнаго тока (α есть полярный уголъ, отсчитываемый отъ поверхности уровня V_0).

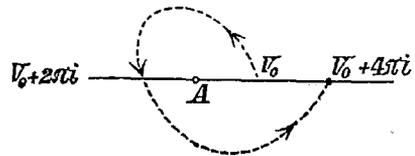
Многозначность распредѣленія потенциала.

Если будемъ перемѣщать количество магнитизма=1 по произвольной линіи, которая однако не должна обрѣзать тока A (Фиг. 111), на-

Фиг. 111.



Фиг. 112.



чиная отъ поверхности уровня V_0 и придемъ опять въ той же поверхности V_0 , то полярный уголъ α при перемѣщеніи отъ V_0 до V_1 растеть (ур. 6) (на этомъ пути расходуется работа), затѣмъ при обратномъ движеніи отъ V_1 до V_2 сначала убываетъ, потомъ становится отрицательнымъ (на этомъ пути производится работа), наконецъ при движеніи отъ V_2 до V_0 снова растеть, пока при достиженіи V_0 не сдѣлается равнымъ нулю. Въ этомъ случаѣ полная произведенная работа равняется нулю.

Если же перемѣщать количество магнитизма=1 отъ поверхности уровня V_0 вдоль любой линіи вокругъ тока A вплоть до той же поверхности уровня V_0 (фиг. 112) все время противъ силы магнитнаго дѣйствія тока, то при этомъ будетъ произведена работа уже не нуль, а по уравненію 6) равная $4\pi i$. (Уголъ α растеть отъ 0 до 2π).

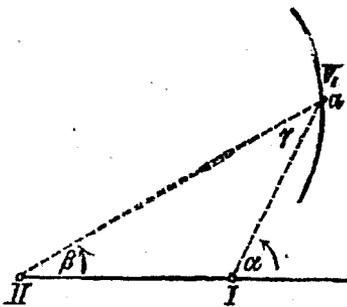
Работа, которая должна быть произведена, чтобы перемѣстить количество магнитизма=1 изъ плоскости V_0 въ плоскость V_1 (фиг. 110) въ случаѣ непосредственнаго пути $=(V_1 - V_0)$; въ случаѣ пути, одинъ разъ огибающаго проводникъ противъ силы магнитнаго дѣйствія тока, $=(V_1 - V_0) + 4\pi i$; въ случаѣ пути, одинъ разъ огибающаго проводникъ по направленію силы магнитнаго дѣйствія тока, $=(V_1 - V_0) - 4\pi i$ и наконецъ въ случаѣ пути, два раза огибающаго проводникъ, $=(V_1 - V_0) \pm 8\pi i$.

И такъ эта работа, а стало быть и потенциалъ различныхъ точекъ не имѣетъ постояннаго значенія, какъ это бываетъ для всѣхъ другихъ полей, порожденныхъ дѣйствіемъ силы на разстояніе, но принимаетъ для каждой точки различныя значенія (отличающіяся другъ отъ друга на цѣлое число разъ $4\pi i$), смотря потому огибаетъ ли путь, по которому происходило перемѣщеніе магнитной массы, одинъ или нѣсколько разъ проводникъ, или вовсе его не огибаетъ.

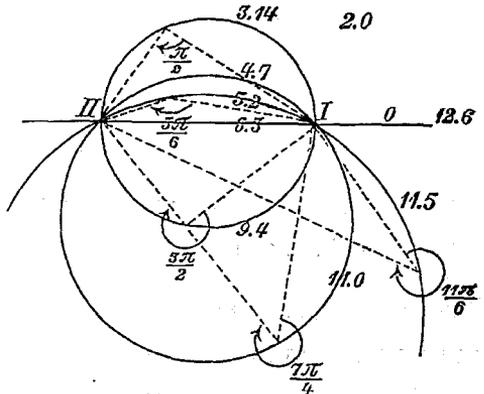
Магнитное поле антипараллельныхъ прямолинейныхъ токовъ.

§ 135. Два параллельныхъ проводника (I и II фиг. 113), находя-

Фиг. 113.



Фиг. 114.



щіеся въ токосостояніи, напряженія котораго і въ обоихъ проводникахъ равны и прямо противоположны, возбуждаютъ каждый порознь въ точкѣ α потенциалы $+2i\alpha$ и $-2i\beta$, а вмѣстѣ—потенціалъ

$$V_1 = 2i(\alpha - \beta) = 2i\gamma \dots \dots \dots 7)$$

при чемъ потенциалъ плоскости I II принять равнымъ нулю.

Для цилиндрической поверхности, на которой потенциалъ V_1 имѣетъ постоянное значеніе, уголъ γ долженъ = Const. Сѣченія этихъ цилиндровъ съ плоскостью чертежа должны быть круги, которые всѣ проходятъ черезъ I и II, такъ какъ для всѣхъ точекъ окружности вкруговъ уголъ γ , опирающийся на дугу I II, имѣетъ постоянное значеніе.

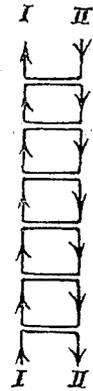
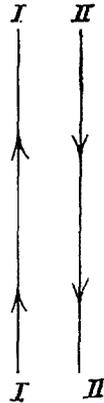
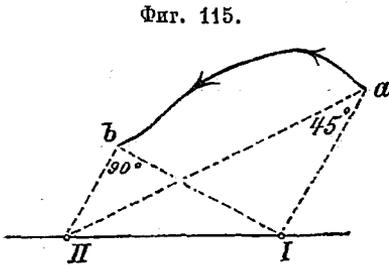
На фиг. 114 начерчены четыре такія уровенные окружности, для которыхъ $\gamma = 0$ и $\pi; \frac{\pi}{2}$ и $\frac{3\pi}{2}; \frac{3\pi}{4}$ и $\frac{\pi}{4}; \frac{5\pi}{6}$ и $\frac{11\pi}{6}$, и которыя для $i = 1$

соотвѣтствуютъ значеніямъ магнитныхъ потенциаловъ 0, 3·14, 4·70, 5·20, 6·28, 9·42, 10·99, 11·51, 12·56 (сн. $\frac{1}{2}$ гр. $\frac{1}{2}$ сек. $^{-1}$).

Предлагается рѣшить читателю, какъ велика должна быть работа, чтобы перемѣстить количество магнетизма $=1$ изъ a въ b (фиг. 115), а

Фиг. 116.

Фиг. 117.



также, чтобы перемѣстить по тому же пути количество магнетизма $=2$, если токонапряженія $=\pm 10$ (элект. маг. ед.).

Сравненіе магнитнаго дѣйствія двухъ прямолинейныхъ антипараллельныхъ проводниковъ, находящихся въ токосостояніи, съ дѣйствіемъ магнитнаго слоя.

Магнитный слой, ограниченный такими проводниками, сила намагничиванія котораго ψ , возбудилъ бы въ полѣ этихъ проводниковъ по § 114 потенциалы

$$V = \psi \cdot 2\gamma.$$

Такимъ образомъ магнитное поле одной пары антипараллельныхъ прямолинейныхъ токовъ напряженія $\pm i$ равняется полю магнитнаго слоя, ограниченнаго этими токами и сила намагничиванія котораго ψ равна токонапряженію i .

§ 136. Вертикальные прямолинейные токи I и II Фиг. 116 могутъ быть замѣнены, по отношенію къ дѣйствию ихъ на разстояніе, системою замѣнутыхъ цѣпей (фиг. 117) и при томъ тѣмъ точнѣе, чѣмъ болѣе сближены другъ къ другу горизонтальныя поперечныя вѣтви послѣднихъ, обладающія прямо противоположными токонаправленіями и дѣйствіе которыхъ на разстояніе взаимно уничтожается.

По отношенію къ дѣйствию на какую либо вѣдущую точку поля, каждая изъ этихъ замкнутыхъ цѣпей можетъ быть замѣнена магнитнымъ слоемъ, для котораго $\phi=i$, и который ее вполне долженъ перекрывать. Еслибы слой этотъ былъ ограниченъ другимъ контуромъ, то это должно было бы имѣть мѣсто и для прочихъ цѣпей, такъ что система, представленная на фиг. 117, была бы эквивалентна другой магнитной комбинаціи, чѣмъ система прямолинейныхъ токовъ I и II, а между тѣмъ системы эти проявляютъ вѣдъ одинаковыя магнитныя дѣйствія.

Распредѣленіе магнитнаго потенціала въ полѣ сомкнутого тока.

А потому магнитный потенціалъ V сомкнутого проводника произвольной формы и находящагося въ токосостояніи во всякой точкѣ a его поля равенъ произведенію изъ токонпряженія проводника i (элек. маг. ед.) на величину тѣлеснаго угла ω , подъ которымъ проводникъ видѣнъ изъ a

$$V = i \omega' 8)$$

при чемъ ω считается положительнымъ, если положительное токонпряженіе, рассматриваемое изъ a , совпадаетъ съ направлениемъ движенія часовой стрѣлки.

4. Примѣненія магнитнаго дѣйствія круговыхъ токовъ.

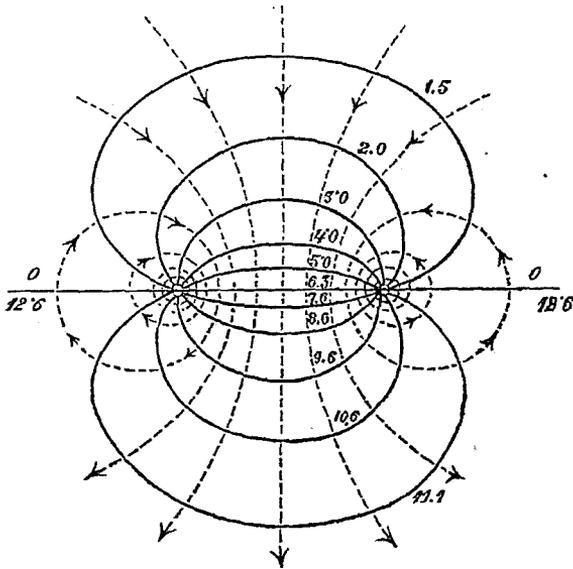
Магнитное поле круговаго тока.

§ 137. На фиг. 118 изображены линіи уровня (сплошныя) въ полѣ круговаго тока, плоскость котораго перпендикулярна къ плоскости чертежа и который пересѣкаетъ эту плоскость въ точкахъ a и b . При перемѣщеніи вдоль такой линіи уровня, съ каждой ея точки круговой токъ видѣнъ подъ однимъ и тѣмъ же тѣлеснымъ угломъ. Если же перемѣщаться вдоль (пунктирныхъ) линій силъ, то по мѣрѣ приближенія къ круговому току онъ видѣнъ подъ быстро возрастающимъ тѣлеснымъ угломъ. При вращеніи всей фигуры вокругъ оси круговаго тока, линіи уровня опишутъ чечевицеобразныя поверхности уровня, а линіи силъ—ольцеобразныя поверхности силъ этого тока.

Распредѣленіе магнитной силы вдоль оси круговаго тока.

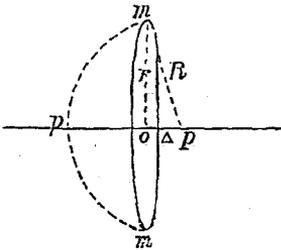
§ 138. Для того, чтобы опредѣлить силу магнитнаго дѣйствія круговаго тока въ любой точкѣ его поля по любому направленію, нужно знать

Фиг. 118.



съ какою скоростью мѣняется V , а стало быть и ω , при перемѣщеніи по этому направленію вблизи этой точки. Попробуемъ сдѣлать это для оси круговаго тока, которая представляет собою линію силъ съ незначительнымъ паденіемъ потенціала.

Фиг. 119.



Тѣлесный уголъ, подъ которымъ изъ точки P видѣнъ круговой токъ mt (фиг. 119), соотвѣтствуетъ шаровому сегменту mrt , отнесенному къ радиусу $= 1$. Если предположить $OP = \Delta$ очень малымъ, то этотъ шаровой сегментъ почти равняется полушару, т. е. 2π ; точно будемъ имѣть:

$$\omega = 2\pi - 2\pi \frac{\Delta}{R}.$$

Такимъ образомъ потенціалы будутъ:

$$V_2 \text{ въ точкѣ } P \dots V_2 = 2\pi - 2\pi \frac{\Delta}{R}$$

$$V_1 \text{ въ точкѣ } O \dots V_1 = 2\pi$$

$$\text{откуда слѣдуетъ: } \frac{V_1 - V_2}{\Delta} = \frac{2\pi}{R};$$

Въ почти равняется радиусу круга r . Поэтому паденіе потенціала, а стало

быть и магнитное напряженіе T въ центрѣ круговаго тока радіуса r будетъ

$$T = \frac{2\pi i}{r} \dots \dots \dots 9)$$

Равнымъ образомъ не представитъ труда вычислить такимъ же способомъ измѣненіе ω , а стало быть и V , въ точкѣ оси, отстоящей отъ окружности круга на длину R . Для магнитнаго напряженія въ этой точкѣ получимъ:

$$T = 2i \frac{\pi r^2}{R^3} = 2 \frac{if}{R^3} \dots \dots \dots 10)$$

гдѣ $f = \pi r^2$ означаетъ площадь круговаго тока.

Магнитный моментъ круговаго тока.

Произведеніе if называется магнитнымъ моментомъ круговаго тока. Непосредственными измѣреніями было доказано, что круговые токи дѣйствуютъ на большія разстоянія R (и сами подвергаются дѣйствию равномернаго поля) совершенно подобно элементарнымъ магнитамъ одинаковаго съ ними магнитнаго момента, находящимся въ томъ же самомъ что и они мѣстѣ и имѣющимъ одинаковое съ ними направленіе осей. (Ср. § 108, ур. 2).

Гальванометръ съ круговымъ токомъ.

§ 139. Во всѣхъ употребляющихся на практикѣ гальванометрахъ примѣняются круговые проводники тока, которые устанавливаются вдали отъ испытуемой системы токовъ, съ каковою они сообщаются соединительными проводниками; эти послѣдніе должны идти такъ близко другъ возлѣ друга, чтобы ихъ внѣшнія дѣйствія взаимно уничтожались.

Тангенсъ-бусоль Вебера.

Въ тангенсъ-бусоли Вебера магнитная стрѣлка помѣщена въ центрѣ круговаго тока. Плоскость послѣдняго устанавливается въ магнитномъ меридіанѣ. Отклоненіе стрѣлки α соответствуетъ напряженію магнитнаго дѣйствія тока T

$$T = H \operatorname{tg} \alpha \text{ (Ср. ур. 2) § 127),}$$

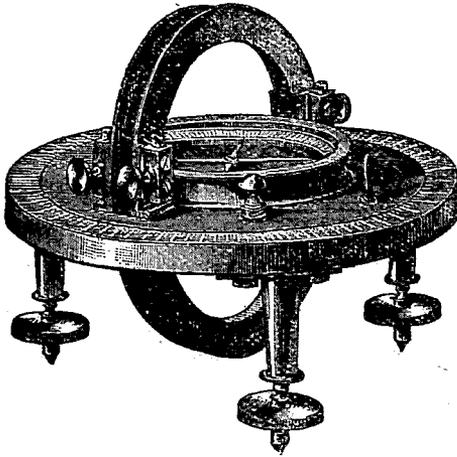
а стало быть токонапряженію

$$i = \frac{rH}{2\pi} \operatorname{tg} \alpha = C \cdot \operatorname{tg} \alpha \text{ (ср. ур. 9)}$$

Переводный множитель C этого гальванометра имѣетъ еще значительную величину, а стало быть приборъ обладаетъ малою чувствительностью. Токъ въ 0.64 сн. $^{1/2}$ гр. $^{1/2}$ сек. $^{-1}$ (элек. маг. ед.) $= 6.4$ ампера отклоняетъ стрѣлку бусоли, у которой $r = 20$ сн. ($C = 0.64$), на 45° . Токъ въ 0.32 ампера даетъ отклоненіе въ 0.1 дуговыхъ единицъ.

На фиг. 120 изображенъ такой гальванометръ, который кромѣ того

Фиг. 120.



снабженъ приспособленіемъ, позволяющимъ плоскость круговаго тока вращать вслѣдъ за отклоненной стрѣлкой и слѣдовательно подвергать послѣднюю всегда максимальному дѣйствию тока. Такимъ образомъ можно стрѣлкѣ сообщать большія отклоненія, такъ что уже синусъ угла отклоненія α будетъ пропорціоналенъ току-напряженію

§ 140. Стрѣлка гальванометра должна имѣть меньшіе размѣры, чѣмъ то пространство

магнитнаго поля тока, въ которомъ всюду имѣется приблизительно одно и то же напряженіе.

Пространство вокругъ центра круговаго тока ($r = 20$ сн.), напряженіе котораго вездѣ одинаково съ точностью до $0,1\%$, простирается не болѣе, какъ на 8 мм.² Поэтому стрѣлка буссоли Вебера не должна быть длиннѣе 8 мм.

Гальванометръ Гельмгольца.

Равномѣрное магнитное поле тока протяженіемъ въ нѣсколько сантиметровъ можетъ быть получено на срединѣ между двумя равными и параллельными круговыми токами, отстоящими другъ отъ друга на длину ихъ радіуса.

Стрѣлка снабженнаго такими круговыми проводниками гальванометра Гельмгольца (см. также фиг. 121, изображающую гальванометръ Гогэна) можетъ поэтому быть въ нѣсколько сантиметровъ длиною и можетъ быть неравномѣрно намагничена, а всетаки гальванометромъ этимъ могутъ

быть произведены точныя измѣренія. Поле такого гальванометра въ 1·6 разъ сильнѣе поля Веберовскаго гальванометра.

Дифференціальный гальванометръ Беккереля.

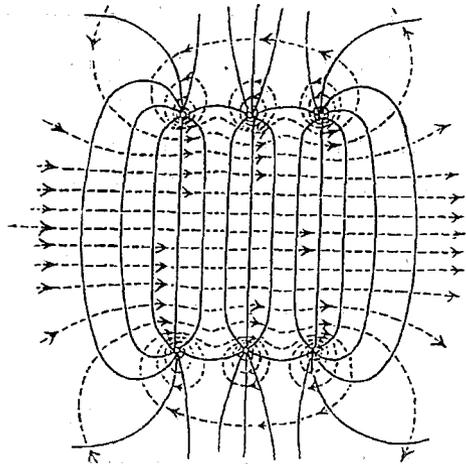
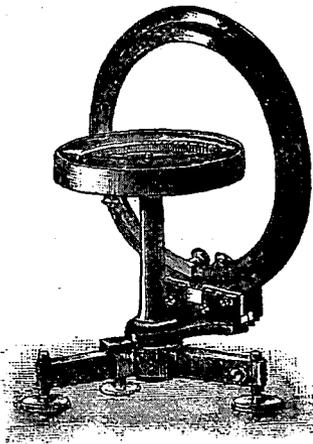
Если пропустить черезъ оба круга равныя токи, но въ противоположныхъ направленихъ, то дѣйствія на стрѣлку взаимно уничтожатся. Если приборъ примѣняется такимъ образомъ, то его называютъ тогда дифференціальнымъ гальванометромъ (Беккерель), и въ качествѣ такового онъ можетъ служить для обнаруженія равенства двухъ токовъ при выравниваніи напр. сопротивленій во включенныхъ параллельно вѣтвяхъ.

Соленоидъ.

§ 141. Можно сколько угодно усилить магнитное поле гальванометра, увеличивая число круговыхъ токовъ его. На фиг. 122 изображено

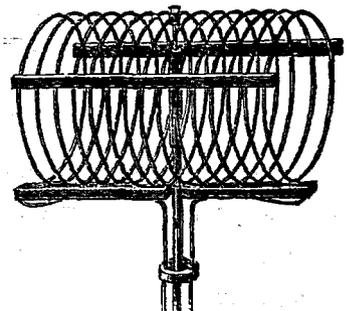
Фиг. 121.

Фиг. 122.



Фиг. 123.

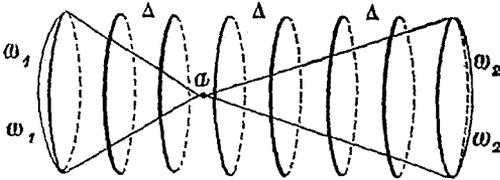
магнитное поле катушки въ три оборота, которые согласно фиг. 123 включены параллельно. Такая проволочная спираль (соленоидъ) заключаетъ почти во всемъ пространствѣ внутри себя равномерное поле, т. е. поле съ параллельными прямолинейными линіями силъ и съ одинаковымъ напряженіемъ.



Распределение магнитной силы вдоль оси соленоида.

Работа перемещения соленоида на одинъ ходъ витка Δ противъ произвольныхъ силъ равна работѣ перемещения одного витка на всю длину соленоида (Тумлирць). Сила f , съ которою единица количества магнетизма, находящаяся въ точкѣ a (фиг. 124) на оси спирали, стремится

Фиг. 124.



перемѣстить спираль по направлению оси, опредѣляется уравненіемъ $f\Delta = i(\omega_1 - \omega_2) \dots 11$, гдѣ ω_1 и ω_2 суть тѣлесные углы, подъ которыми видны изъ a первый и послѣдній обороты; $i\omega_1$ есть слѣдовательно потенциалъ перваго оборота въ a , т. е. потенціальная энергія этого оборота и единицы магнетизма въ a . Поэтому $i(\omega_1 - \omega_2)$ есть измѣненіе энергіи при перемѣщеніи одного оборота съ одного конца спирали къ другому, или работа $f\Delta$, которая должна быть при этомъ произведена.

Если r радіусъ и n число оборотовъ спирали, то выраженіе 11) можно примѣнять въ слѣдующей формѣ:

Если r радіусъ и n число оборотовъ спирали, то выраженіе 11) можно примѣнять въ слѣдующей формѣ:

$$f = 2in \frac{\pi r^2}{R^3} \dots \dots \dots 12)$$

Это уравненіе вполнѣ точно только при дѣйстви на большое разстояніе R .

Мультипликаторъ.

§ 142. Уравненіе гальванометра, проводникъ котораго въ n ($=100$) оборотовъ свернуть въ видѣ катушки радіуса r ($=20$ сан.), имѣетъ видъ по ур. 12).

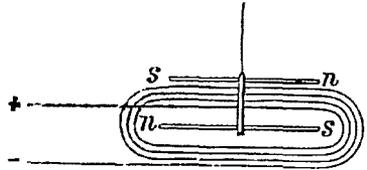
$$i = \frac{r}{2\pi n} H \operatorname{tg} \alpha = 0 \cdot 0064 \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

Градуированіе мультипликатора.

Очень чувствительные гальванометры (мультипликаторы) содержатъ многія тысячи оборотовъ, которыя плотною массою окружаютъ стрѣлку, (могущую вдобавокъ быть астатической) фиг. 125. Переводный множитель такого мультипликатора не можетъ быть опредѣленъ съ надлежащею точностію изъ его размѣровъ.

Его опредѣляютъ, сравнивая показаніе мультипликатора съ показаніемъ абсолютнаго гальванометра или же вольтметра, включеннаго въ ту же цѣпь. Передъ мультипликаторомъ включается при этомъ небольшое шунтовое сопротивление (§ 66), которое отводитъ отъ мультипликатора большую и могущую быть вычисленной часть тока, проходящаго черезъ служащій для сравненія гальванометръ, и препятствуетъ слѣдовательно показаніямъ мультипликатора выйти изъ предѣловъ возможности отсчитыванія. Мультипликаторы этого рода употребляются при измѣреніяхъ упомянутыхъ въ § 132.

Фиг. 125.



Выборъ переводнаго множителя.

§ 143. Для данной цѣли далеко не всегда выбираютъ наиболѣе чувствительный гальванометръ, такъ какъ отклоненіе для зеркальной шкалы не должно превосходить 0,2 дуговой единицы, для непосредственнаго же отчета 60°. Но если даже и стремятся въ большой чувствительности, то и тогда, особенно при небольшихъ электровозбудительныхъ силахъ, не употребляютъ гальванометры съ большимъ числомъ оборотовъ, т. е. съ большимъ сопротивленіемъ. Выгодно выбирать сопротивленіе гальванометра равнымъ внѣшнему сопротивленію.

Въ мостъ Уитстона (§ 68), который всегда находится при незначительной разности потенціаловъ, вводятъ поэтому мультипликаторъ съ астатической системой стрѣлокъ (G фиг. 65 и фиг. 125) и съ небольшимъ числомъ оборотовъ толстой проволоки; чувствительность же мультипликатора достигается не усиленіемъ магнитнаго дѣйствія тока, но ослабленіемъ направляющей силы земнаго магнетизма.

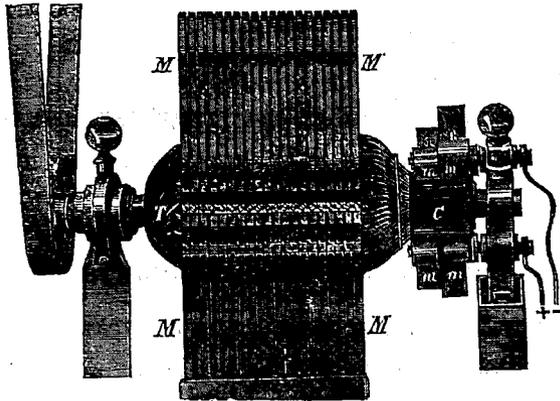
Электродвигатели. Выборъ числа оборотовъ проволоки въ ихъ катушкахъ.

§ 144. Эти замѣчанія относятся также и къ тому случаю, когда магнитной силою катушки желаютъ съ выгодною воспользоваться въ двигателяхъ для приведенія въ дѣйствіе механизмовъ. Чѣмъ большею разностью потенціаловъ располагаютъ, тѣмъ въ большее число разъ можетъ быть удлиненъ и свернутъ дѣйствующій на разстояніе проводникъ.

Электродвигатель Гефнерь-Альтенека.

Такимъ образомъ получаютъ электродвигатели, въ родѣ представленнаго на фиг. 126 электродвигателя Гефнерь-Альтенека.

Фиг. 126.



Проводникъ, свернутый въ нѣсколько сотъ оборотовъ, представляетъ собою продолговатый впадинъ Т; *m* представляютъ скользящіе контакты, въ вторымъ примыкають соединительные проводники; *M*—большое число неподвижныхъ магнитовъ, дѣйствіе которыхъ на проводники направлено по касательной къ послѣднимъ, идущимъ параллельно оси катушки; движеніе катушки передается дальше при помощи шлеива и безконечнаго ремня.

Катушка состоитъ не изъ одного цѣльнаго куска проволоки, но изъ многихъ изолированныхъ другъ отъ друга и радіально расположенныхъ секторовъ. Контакты *m* снабжаютъ постоянно надлежащими токами обороты только двухъ секторовъ варазъ, причеь это происходитъ во время прохожденія секторовъ непосредственно вблизи магнитныхъ полюсовъ, т. е. когда они испытываютъ сильное внѣшнее дѣйствіе. Во все же время пребыванія секторовъ въ бездѣйствующей части магнитнаго поля ихъ вредное сопротивленіе остается исключеннымъ изъ круга дѣйствія тока.

Моментъ вращенія, развиваемый подобной катушкой, не великъ (приблизительно въ $4 \cdot 10^7$ сн.² гр. сек.⁻² = $0 \cdot 4$ вгр. метр.). Ее по этой причинѣ слабо нагружаютъ, такъ что она, получая большую скорость вращенія, можетъ произвести значительную работу.

5. Электродинамическое дѣйствіе на разстояніе.

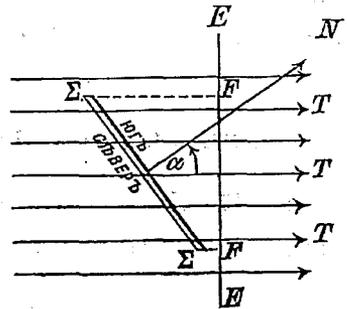
Равновѣсіе подъ вліяніемъ магнитныхъ силъ.

§ 145. Магнитная система приходитъ въ устойчивое равновѣсіе, если проявляемыя ею силы взаимодѣйствія произвели такую работу, какую допускаютъ имѣющіяся на лицо силы, сопротивляющіяся движению системы; она находится въ неустойчивомъ равновѣсіи, если противъ проявляемыхъ системою силъ была произведена наибольшая возможная работа. Во всѣхъ прочихъ сочетаніяхъ составныхъ частей системы, послѣднія тотчасъ же приходятъ въ движеніе.

Величина потенциала магнитнаго слоя въ равномерномъ полѣ.

Пусть магнитный слой съ плоскимъ ограничивающимъ контуромъ Σ (фиг. 127), площадью F , толщиной Δ , плотностью намагничиванія d , а стало быть съ силою намагничиванія $\phi = \Delta d$, находится въ равномерномъ полѣ, напряженіе котораго T составляетъ съ нормалью N къ слою уголъ α .

Фиг. 127.



Работа A , которую нужно затратить, чтобы слой привести въ данное положеніе, будетъ получена обратно, если, находясь подъ дѣйствіемъ силы T , сѣверная поверхность слоя будетъ передвинута въ направленіи N на длину Δ до совпаденія съ южной поверхностью слоя (ср. § 108). При этомъ будетъ передвинуто: количество магнетизма $F \cdot d$ силою $T \cdot \cos \alpha$ на разстояніе Δ . Поэтому работа совпаденія $A = d \Delta T \cdot F \cdot \cos \alpha$.

$$A = \phi T F \cos \alpha = \phi T \Phi \dots \dots \dots 13)$$

Работа A , произведенная противъ силы T , имѣетъ наибольшее значеніе ($\phi T F$) при $\alpha = 0$. Въ этомъ положеніи магнитный слой находится въ неустойчивомъ равновѣсіи. Наименьшее значеніе ($-\phi T F$) работа эта получаетъ при $\alpha = 180^\circ$. Въ этомъ положеніи слой находится въ устойчивомъ равновѣсіи, какъ это также можно усмотрѣть, замѣнивъ слой

элементарнымъ магнитомъ, имѣющимъ одинаковое со слоемъ направлѣніе намагничиванія.

$\Phi = F \cos \alpha$ выражаетъ собою въ ур. 13) проекцію линіями силъ T поверхности F на какую-нибудь плоскость уровня E .

Напряженіе трубки силъ.

§ 146. Произведеніе $T\Phi$ есть то давленіе, которое испытывало бы поперечное сѣченіе трубки силъ вслѣдствіе напряженія T , если это сѣченіе зарядить до плотности $= 1$. Это давленіе $T\Phi$ одинаково для всѣхъ сѣченій рассматриваемой трубки силъ, если послѣдняя даже и криволинейна (§ 23, фиг. 29) и называется напряженіемъ S ея.

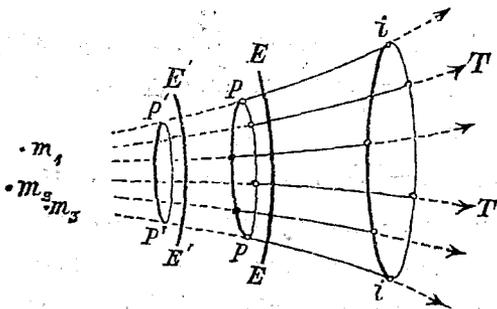
Работа A , которая нужна, чтобы ввести магнитный слой проводникъ въ любое магнитное поле, равна произведенію изъ силы намагничиванія тока напряженія ψ на сумму напряженій S трубокъ силъ, которыя проходятъ при этомъ черезъ ихъ поверхность. $A = -\psi \Sigma T\Phi$.

При этомъ тѣ части поверхности Φ считаются положительными, которыя, если смотрѣть со стороны \perp направленія силъ, огибаются токомъ по направленію часовой стрѣлки.

Величина потенциала тока въ неравнобѣрномъ полѣ.

§ 147. Пусть магнитныя массы m_1, m_2, m_3, \dots производятъ нѣкоторое магнитное поле, нѣсколько линій силъ котораго представлены

Фиг. 128.



на фиг. 128 пунктиромъ. Будемъ проектировать съ помощью линій силъ контуръ проводника i на какую-нибудь поверхность уровня E или E' . Проекція p или p' вырѣжетъ изъ нихъ площадку Φ или Φ' . Если поверхность уровня была выбрана такъ, что внутри

проекціи среднее напряженіе $T = 1$, то работа перенесенія тока изъ ∞ въ это положеніе просто равна $A = i\Phi$.

Потенціалъ тока на одинъ магнитный полюсъ.

Для одной только магнитной массы $m = +1$ (фиг. 129) поверхность уровня E , въ которой среднее напряжение $T=1$, есть шаровая поверхность радиуса $=1$. Проекція p проводника i на эту шаровую поверхность, полученная при помощи линий силъ массы $+1$, вырѣзываетъ площадку ω , которая равна тѣлесному углу, подъ которымъ виденъ i изъ $+1$. И такъ будемъ имѣть, какъ намъ впрочемъ уже извѣстно (§ 118),

$$A = \pm i \omega.$$

А есть работа перенесенія полюса $+1$ и тока i изъ ∞ въ положеніе фиг. 129, т. е. равно магнитному потенциалу, который i возбуждетъ въ точкѣ $+1$.

Для магнитной массы $+m$ поверхность уровня въ случаѣ $T=1$ есть шаровая поверхность радиуса $r = \sqrt{m}$; проекція p вырѣзываетъ изъ нея площадку $\Phi = \omega r^2 = \omega m$. Въ этомъ случаѣ имѣемъ:

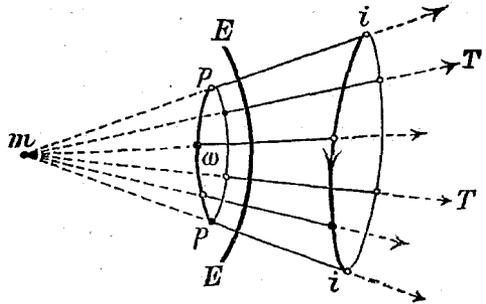
$$A = m \cdot i \cdot \omega.$$

А есть работа перемѣщенія m и i въ ихъ взаимное положеніе. Эту работу называютъ потенциаломъ m и i другъ на друга. Потенціалъ другъ на друга двухъ дѣйствующихъ на разстояніе тѣлъ такого же измѣренія какъ и работа (св. ² гр. сек. ⁻²). Значенія потенциала въ полѣ дѣйствующаго тѣла имѣютъ измѣренія работы на единицу количества магнетизма (св. ^{1/2} гр. ^{1/2} сек. ⁻¹).

Знакъ работы при передвиженіи тока въ магнитномъ полѣ.

§ 148. Если токонапряжение i сохраняетъ постоянное значеніе, то проводникъ можно по произволу передвигать по поверхности трубки не производя магнитной работы, ибо проекція p (§ 128) при этомъ не измѣняется. Можно даже проводникъ перемѣщать совершенно по про-

Фиг. 129.



изволу, не производя при этомъ работы, если только величина проекціи p , точнѣе сумма напряженій въ этой проеяціи, не измѣняется при этомъ перемѣщеніи.

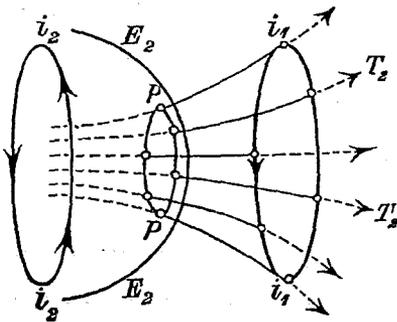
Если же поперечный разрѣзъ трубки силь, которая обнимаетъ проводникъ, увеличивается, то этимъ получается работа, если $+$ направленіе тока, наблюдаемое съ $+$ направленія магнитныхъ силь, происходитъ по направленію движенія часовой стрѣлки. Въ противномъ случаѣ перемѣщеніе происходило противъ электромагнитныхъ силь.

Электродинамическое дѣйствіе и потенціалъ двухъ токовъ другъ на друга.

§ 149. Какъ въ полѣ магнитовъ, такъ и въ магнитномъ полѣ тока проводникъ, находящійся въ токосостояніи, приобретаетъ энергію. Магнитныя взаимодействія двухъ токовъ (электродинамическія дѣйствія) были открыты Амперомъ вскорѣ послѣ опубликованія опытовъ Эрштедта. (§ 120).

Пусть даны два тока i_1 и i_2 (фиг. 130). Спроектируемъ при помощи линій силь тока i_2 проводникъ i_1 на какуюнибудь поверхность уровня E_2 тока i_2 и опредѣлимъ сумму напряженій $\Sigma S = \Sigma T_2 \Phi$ внутри проекціи p (T_2 означаетъ магнитное напряженіе тока i_2 въ площадкахъ Φ проекціи p); тогда полная работа A переноса тока изъ бесконечности въ это положеніе (потенціалъ токовъ другъ на друга) равна

Фиг. 130.



и опредѣлимъ сумму напряженій $\Sigma S = \Sigma T_2 \Phi$ внутри проекціи p (T_2 означаетъ магнитное напряженіе тока i_2 въ площадкахъ Φ проекціи p); тогда полная работа A переноса тока изъ бесконечности въ это положеніе (потенціалъ токовъ другъ на друга) равна

$$A = - i_1 \Sigma T_2 \Phi$$

Отрицательный знакъ правильно подобранъ по § 148 для избраннаго на фиг. 130 направленія тока. Напряженія T_2 проводника i_2 пропорціональны его токовому напряженію; значить $T_2 = i_2 t_2$, при чемъ t_2 означаетъ силы, съ которыми дѣйствоваль бы проводникъ i_2 при $i_2 = 1$ на магнитную массу $+1$ въ площадкахъ Φ проекціи p . И такъ

$$A = - i_1 i_2 \Sigma t_2 \Phi = - i_1 i_2 Q \dots \dots \dots 14)$$

здѣсь передъ i_1 и i_2 надо поставить одинаковые знаки, если ихъ положительныя направленія, наблюдаемыя по направленію какойнибудь линіи

силъ T_2 , идутъ въ одну сторону, если нѣтъ—знаки обратныя. Въ послѣднемъ случаѣ, при приближеніи токовъ, работа будетъ положительная, т. е. *токи различныхъ направленій отталкиваются, одного направленія притягиваются.*

Коэффициентъ индукціи.

§ 150. Потенціалъ A двухъ токовъ другъ на друга пропорціоналенъ произведенію ихъ напряженій. Коэффициентъ Q (потенціалъ двухъ токовъ другъ на друга при напряженіи ихъ $= 1$, коэффициентъ индукціи) зависитъ только отъ формы и взаимнаго положенія проводниковъ. Q имѣетъ очень простое измѣреніе. $A = работѣ = \text{сан.}^2 \text{ гр. сек.}^{-2}$

i (въ электромагнитной системѣ § 126) $= \text{сан.}^{1/2} \text{ гр.}^{1/2} \text{ сек.}^{-1}$,

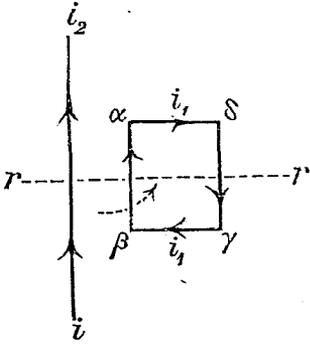
поэтому $Q = \frac{\text{сан.}^2 \text{ гр. сек.}^{-2}}{\text{сан. гр. сек.}^{-2}} = \text{сан.}$, т. е. коэффициентъ индукціи Q имѣетъ измѣреніе длины. Онъ растетъ вмѣстѣ съ длиной обоихъ проводниковъ и съ уменьшеніемъ разстоянія между ними. Вычисленіе его ($Q = \Sigma t, \Phi$; ур. 14) даже въ простѣйшихъ случаяхъ представляетъ значительныя геометрическія трудности.

Взаимодѣйствіе двухъ прямолинейныхъ токовъ.

§ 151. Знакъ дѣйствія между замкнутыми параллельными токами былъ найденъ уже въ концѣ § 149. Если оба тока параллельны и одинаково направлены (фиг. 130), и если выводить токъ i_1 изъ этого положенія, вращая его вокругъ оси, лежащей въ его плоскости, то его проакція уменьшается и слѣдовательно при этомъ должна производиться работа. Вращеніе это тотчасъ становится обратнымъ подъ взаимодѣйствіемъ токовъ, какъ только отпустятъ токъ i_1 ; слѣдовательно замкнутые токи, лежащіе въ наклоненныхъ другъ къ другу плоскостяхъ, стремятся по возможности стать параллельными и одинаково направленными. Убѣдиться въ этомъ можно на подвижныхъ проводникахъ Ампера.

Пусть i_2 будетъ прямолинейный токъ (фиг. 131). При вращеніи i_1 вокругъ i_2 какъ оси, контуръ i_1 вездѣ двигается по линіямъ силъ тока i_2 , которые кругообразно огибаютъ прямолинейный токъ i_2 . Слѣдовательно при этомъ работа не производится (§ 148), i_1 такъ же мало приходитъ въ

Фиг. 131.



движеніе, какъ магнитъ, вращающійся около i_2 , какъ около оси (§ 122).

Если приближать i_1 къ i_2 , то стороною $\alpha\beta$ обнимаются все новыя трубки силъ, въ то время, какъ другія выходятъ изъ ребра $\gamma\delta$. Но въ первыхъ господствуетъ большее напряженіе T , вслѣдствіе большей близости ихъ къ i_2 . Положительный токъ въ i_1 , наблюдаемый съ положительнаго направленія линий силъ (пунктирной стрѣлки на фиг. 131), идетъ по направленію

часовой стрѣлки. При приближеніи слѣдовательно $\alpha\beta$ къ i_2 , пріобрѣтается работа, (§ 148): токи притягиваются. Если вообразить i_1 весьма растянутымъ, такъ чтобы полуэвругъ $\alpha\delta\gamma\beta$ находился въ большомъ отдаленіи, то система наша превратится въ два прямолинейные параллельные тока. Таковыя, слѣдовательно, притягиваются или отталкиваются, смотря по тому имѣютъ ли они одинаковыя или различныя направленія.

Если токъ i_1 , вращая около оси g , вывести изъ плоскости чертежа, то поперечный разрѣзъ кольцеобразной трубки силъ, окруженной i_1 , становится все меньше. Слѣдовательно при этомъ нужно произвести работу. Скрещивающіеся прямолинейныя токи стремятся встать параллельно и идти въ одну сторону. Испытать это можно на приборѣ Ампера.

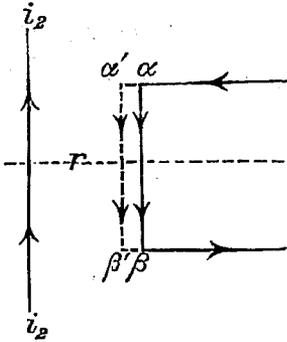
Величина электродинамическаго отталкиванія двухъ прямолинейныхъ токовъ.

§ 152. Дѣйствіе T_2 тока i_1 на разстояніи r опредѣляется по ур. 1) $T_2 = \frac{2i_1 i_2}{r}$. Работа перенесенія части $\alpha\beta$ (ф. 132) тока длиной въ l на разстояніе Δ до положенія $\alpha'\beta'$ равна $i_1 F T_2 = i_1 \Delta l \frac{2i_2}{r}$, гдѣ $F = \Delta l$ есть площадь $\alpha\alpha'\beta'\beta$.

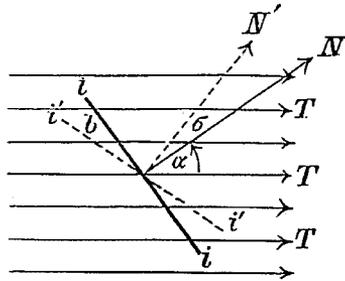
Сила f , противъ которой производится работа на пути Δ , равна поэтому $f = 2i_1 i_2 \frac{l}{r}$. Съ этой силой и отталкиваются токи.

Дѣйствіе на разстояніе двухъ параллельныхъ частей тока длиной въ 10 сантиметровъ, расположенныхъ на разстояніи 1 сантиметра,

Фиг. 132.



Фиг. 133.



составляет для $i_1 = i_2 = 1$ амперу ≈ 0.1 (с. г. с электромагнитн. единиц), не болѣе 0.2 (с. г. с) ≈ 0.2 граммовѣса.

Моментъ вращенія сомкнутого тока въ равномерномъ полѣ.

§ 153. Сомнутый токъ въ равномерномъ полѣ подобно магниту не испытываетъ никакого параллельнаго перемѣщенія, но подвергается вращенію (§ 100), такъ какъ вслѣдствіе параллельнаго перемѣщенія не мѣняется проэція тока на поверхность уровня поля, а поэтому и не производится никакой работы.

Для перемѣщенія сомкнутого тока (ф. 133) площади F въ равномерное поле съ напряженіемъ T такимъ образомъ, чтобы ось N составляла съ T уголъ α , нужно по ур. 13) произвести работу

$$A = i T \cdot F \cdot \cos \alpha.$$

При дальнѣйшемъ вращеніи на малый уголъ σ слѣдовательно

$$A^1 = i T \cdot F \cdot \cos (\alpha + \sigma) = i T F (\cos \alpha - \sigma \sin \alpha).$$

Здѣсь положено $\cos \sigma = 1$ и $\sin \sigma = \sigma$, что можетъ быть допущено для малыхъ угловъ α . $A^1 - A$ есть работа, произведенная при вращеніи на уголъ σ ,

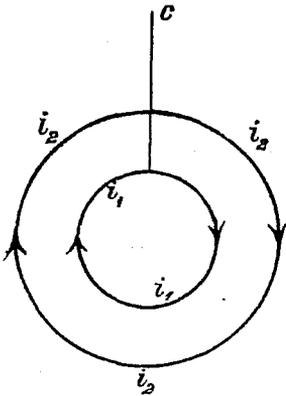
$$A^1 - A = i T F \sin \alpha \cdot \sigma.$$

И такъ $i T F \sin \alpha = D$ есть моментъ вращенія, который првпяляетъ магнитная сила поля на токъ, находящійся въ положеніи α ; далѣе $i T F$ есть направляющій моментъ, приложенный къ току для $\alpha = 90^\circ$. Токъ стремится встать такъ, чтобы его плоскость пересѣкала перпендикулярно линіи силъ T , и чтобы \pm направленіе его, наблюдаемое въ \pm направленіи линіи силъ, совпадало съ направленіемъ движенія часовой стрѣлки.

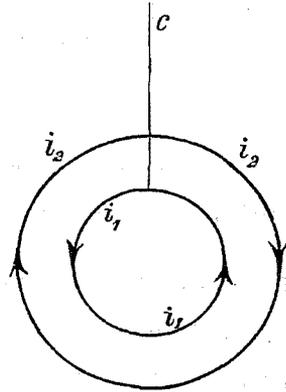
Коэффициент индукции concentрических круговых токовъ.

§ 154. Круговой токъ i_2 (ф. 134) радиуса r_2 возбуждаетъ въ своемъ центрѣ почти однородное магнитное поле напряженія $T = \frac{2\pi i_2}{r_2}$ (§ 138).

Фиг. 134.



Фиг. 135.



Второй токъ i_1 (малаго) радиуса r_1 , подвѣшенный на шелковинкѣ c , стремится прийти въ плоскость i_2 (какъ на фиг. 134), такъ чтобы ихъ направленія совпадали. Выведенный изъ этого положенія на уголь α , онъ опять стремится вернуться къ нему и именно по § 153 съ моментомъ вращенія

$$D = i_1 T \cdot \pi r_1^2 \cdot \sin \alpha = i_1 i_2 \cdot \frac{2\pi^2 r_1^2}{r_2} \cdot \sin \alpha \dots 15 \text{ а)}$$

Работа A , требуемая для приведенія тока i_1 въ это положеніе, опредѣляется по ур.

$$A = i_1 T \cdot \pi r_1^2 \cdot \cos \alpha = i_1 i_2 \cdot \frac{2\pi^2 r_1^2}{r_2} \cdot \cos \alpha \dots 15)$$

Работа A , необходимая для поворота тока i_1 изъ положенія неустойчиваго равновѣсія (фиг. 135) на уголь α , равна

$$A = - i_1 i_2 \cdot \frac{2\pi^2 r_1^2}{r_2} \cdot \cos \alpha$$

$\pi r_1^2 \cos \alpha$ есть эллиптическое сѣченіе трубки силъ, заключающей i_1 ;

$T \cdot \pi r_1^2 \cdot \cos \alpha = i_2 \cdot \frac{2\pi r_1^2}{r_2} \cdot \cos \alpha$ есть полное напряженіе (§ 146) въ

этой трубкѣ силъ. Слѣдовательно $Q = 2\pi^2 \frac{r_1^2}{r_2} \cdot \cos \alpha$ есть коэффициентъ

индукции (§ 150) обоихъ круговыхъ токовъ, если ихъ плоскости срещиваются подь угломъ α .

Коэффициентъ индукціи коаксіальныхъ катушекъ.

Взаимодѣйствіе токовъ увеличивается въ $n_1 n_2$ разъ, если вмѣсто i_1 взять катушку въ n_1 , а вмѣсто i_2 —катушку въ n_2 оборотовъ.

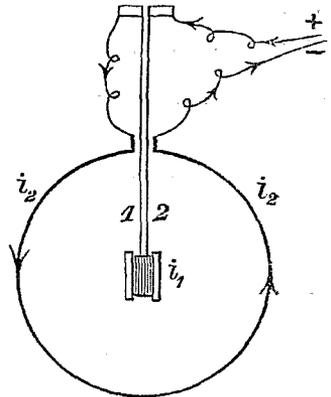
Коэффициентъ индукціи такихъ коаксіальныхъ катушекъ

$$Q = 2\pi^2 n_1 n_2 \frac{r_1^2}{r_2}$$

Динамометръ Вебера.

§ 155. Можно расположить обѣ катушки послѣдовательно въ одной и той же цѣпи. Тогда $i_1 = i_2$ и абсолютное измѣреніе токонапряженія i одинаковаго для обѣихъ катушекъ достигается по ур. 15 а) однимъ наблюдениемъ ихъ дѣйствія на разстояніе. Подобный простой случай абсолютнаго электрическаго измѣренія есть опредѣленіе заряда двухъ кондукторовъ, доведенныхъ, передъ наблюдениемъ ихъ взаимодѣйствія, помощью прикосновенія къ равнымъ электрическимъ потенціаламъ. Во всѣхъ другихъ случаяхъ при абсолютныхъ электрическихъ или магнитныхъ измѣреніяхъ необходимы три наблюденія дѣйствія на разстояніе. Ср. § 109.

Фиг. 136.



Катушку i_1 подвѣшиваютъ бифилярно къ ея соединительнымъ проволокамъ 1 и 2 (фиг. 136) такимъ образомъ, чтобы оси обѣихъ катушекъ образовали уголъ $\alpha = 90^\circ$ (электродинамометръ Вебера). Моментъ вращенія D , который тогда испытываетъ i_1 , равенъ

$$D = i^2 Q = i^2 \cdot 2\pi^2 n_1 n_2 \frac{r_1^2}{r_2}$$

Направленіе отклоненія катушки зависитъ отъ способа ея включенія и не зависитъ отъ направленія тока.

Для $n_1 = n_2 = 100$; $r_1 = 2$ см.; $r_2 = 20$ см. $D = 39000 i_1$.

Токъ въ $0,1$ (сн. $^{1/2}$ гр. $^{1/2}$ сек. $^{-1}$ электромагн. ед.) $= \frac{1}{1000}$ ампера проявляетъ тогда моментъ вращенія въ $0,4$ (сн. 2 гр. сек. $^{-2}$), который можетъ повернуть катушку, подвѣшенную бифилярно на проволокахъ въ 20 см. длины и 0,5 см. взаимнаго разстоянія, на 0,1 дуговыхъ единицъ.

IV. О явленіяхъ индукціи.

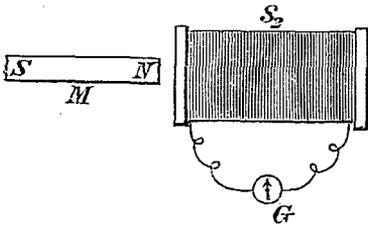
1. Индукція токосостоянія.

Дѣйствія на разстояніе не механическаго свойства.

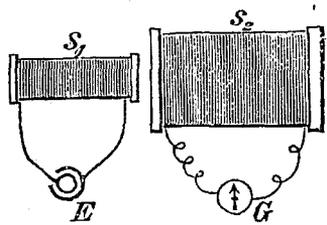
§ 156. Электрическія и магнитныя дѣйствія на разстояніе не суть исключительно механическія. Наэлектризованное тѣло приводитъ расположенный вблизи его совершенно ненаэлектризованный проводникъ не только въ движеніе но и въ электрическое состояніе (электризація черезъ вліяніе § 6). Магнитъ сообщаетъ магнитныя свойства совершенно немагнитченному желѣзному стержню, пока тотъ находится вблизи его (намагничиваніе черезъ вліяніе § 174). Поэтому можно было надѣяться, что одного близкаго присутствія проводника, находящагося въ установленномъ токосостояніи, будетъ достаточно, чтобы привести другой проводникъ въ то же состояніе.

Однако сильный магнитъ M (фиг. 137) или катушка S_1 , приведенная въ сильную степень токосостоянія элементомъ E (фиг. 138), могутъ

Фиг. 137.



Фиг. 138.



находиться вблизи или даже внутри катушки S_2 , безъ того, чтобы гальванометръ G , включенный въ цѣпь послѣдней, обнаруживалъ присутствіе тока въ этой цѣпи.

Такимъ образомъ въ электромагнитныхъ системахъ, находящихся въ покоѣ, исключена возможность возникновенія продолжительныхъ токовъ, индуцированныхъ дѣйствіемъ на разстояніе. Однако токи такіе могутъ быть получены и Мих. Фарадей (1791—1867) былъ первый, который достигъ этого результата.

Индукція движеніемъ.

§ 157. Если перемѣщать катушку S_2 относительно магнита M или катушки S_1 , то стрѣлка гальванометра тотчасъ указываетъ на присутствіе тока, продолжающагося однако только во время относительнаго движенія индуктирующихъ тѣлъ S_1 или M по отношенію къ катушкѣ S_2 . Только пока происходитъ измѣненіе магнитнаго поля появляется токъ, а по прекращеніи измѣненія онъ тоже прекращается. При измѣненіи направленія движенія, токъ также мѣняетъ свое направленіе на обратное (Фарадей 1831).

Направленіе индуктированнаго тока.

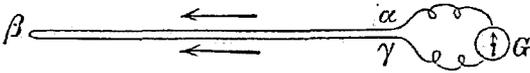
1-е Положеніе. Если во время этого движенія, внутри части трубки силь, обхватываемой катушкой S_2 , ^{увеличивается} ^{уменьшается} напряженіе магнитной силы, исходящее отъ индуктора S_1 (первичнаго проводника) или отъ магнита M , то во вторичномъ проводникѣ S_2 происходитъ паденіе потенциала, токонапряженіе, положительное направленіе котораго, наблюдаемое по положительному направленію магнитной силы, кажется ^{не по} ^{по} направленію движенія часовой стрѣлки.

Поэтому если магнитъ M приближать къ катушкѣ S_2 его ^{сѣвернымъ} ^{южнымъ} концомъ, то индуктированный токъ, разсматриваемый со стороны магнита, идетъ ^{противъ} ^{по} направленію часовой стрѣлки. Если ^{приближаютъ} ^{удаляютъ} катушки S_1 и S_2 , то въ послѣдней появляется индуктированный токъ ^{противопол.} ^{одинаков.} направленія, съ установившимся токомъ въ S_1 .

Одинаковое отношеніе къ индукціи всѣхъ веществъ.

§ 158. 2-е положеніе. Паденіе потенциала, индуктированное въ S_2 , не зависитъ отъ матеріала проводника S_2 и его поперечнаго сѣченія. Поэтому токонапряженіе индуктированнаго тока обратно пропорціонально при прочихъ равныхъ обстоятельствахъ сопротивленію проводника. Доказать это можно такъ: двѣ проволоки $\alpha\beta$ и $\beta\gamma$ изъ различнаго матеріала и различнаго поперечнаго сѣченія влючаются послѣдовательно въ цѣпь гальванометра G , какъ на фиг. 139, и располагаются вплотную другъ возлѣ друга. Если въ $\alpha\beta$ и $\gamma\beta$ индуктируются токи одного направленія (по направленію стрѣлокъ фиг. 139), то они въ обмоткѣ

Фиг. 139.



гальванометра будутъ имѣть различныя направленія и должны уничтожаться. Можно произвольно согнуть двойную проволоку

α β или намотать на ее катушку (двойная обмотка) и затѣмъ подвергнуть сильнымъ индуктивнымъ дѣйствіямъ и всетаки никогда нельзя будетъ обнаружить разности потенциаловъ на концахъ α и γ двойной катушки. И такъ индукція въ проволокахъ изъ различныхъ матеріаловъ, но одинаковой формы совершенно одинакова и одинаково направлена.

Поэтому несомнѣнно, что при всякомъ измѣненіи магнитнаго поля и въ дурныхъ проводникахъ и въ непроводникахъ (воздухъ) индуктируется паденіе потенциала той же величины и направленія, какъ если бы они были хорошими проводниками. Работа при передвиженіи электрической точки въ перемѣнномъ магнитномъ полѣ (§ 80) не зависитъ слѣдовательно отъ природы среды, предполагая конечно, что она непроводникъ и въ магнитномъ отношеніи индифферентна.

Вліяніе проводимости.

Индуктированныя электрическія паденія потенциала обладаютъ тѣми же дѣйствіями, какъ и электрическія паденія потенциала, получаемыя другими способами: они обуславливаютъ производство тепловыхъ и химическихъ дѣйствій, обладаютъ магнитными дѣйствіями на разстояніи, въ случаѣ ихъ измѣненія, сами производятъ индукцію. Но всѣ эти дѣйствія, какъ и дѣйствія электрическаго паденія потенциала въ установившемся тогѣ, зависятъ отъ проводимости проводника. Поэтому индукціонныя дѣйствія на непроводники мы замѣчаемъ не такъ легко, какъ на проводники.

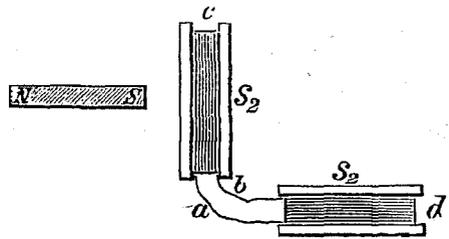
Законъ Ома имѣетъ силу и въ случаѣ индуктированныхъ токовъ.

§ 159. Индуктированное электрическое распределеніе потенциала во всѣмъ полѣ тѣлъ, дѣйствующихъ магнитно на разстояніи, опредѣляется движеніемъ этихъ тѣлъ. Если гдѣ-нибудь въ этомъ полѣ находится замкнутый или незамкнутый проводникъ, то онъ принимаетъ тѣ индуктированныя электрическія потенциалы, которые были бы въ этомъ мѣстѣ, если бы его тамъ и не было. И такъ, индуктированное этимъ

способомъ электрическое распредѣленіе потенциаловъ въ системѣ прово-
ловъ опредѣляется совершенно другими обстоятельствами, чѣмъ распе-
дѣленіе электрическихъ потенциаловъ въ системѣ проволокъ, находящихся
въ установившемся токосостояніи (§ 62). Это состояніе однако не про-
должительно. Въ неизмѣримо короткій промежутокъ времени внутри про-
водника устанавливается распредѣленіе потенциаловъ, соответствующее
законамъ Ома и Кирхгофа, такъ что присутствіе проводника нарушаетъ
индуктированное электрическое распредѣленіе потенциаловъ такъ же,
какъ и присутствіе проводника нарушаетъ распредѣленіе потенциаловъ
въ статическомъ электрическомъ полѣ. Это уравниваніе индуктирован-
ныхъ токонапряженій внутри системы проволокъ аналогично уравниванію
температуры внутри проводника теплоты и уравниванію потенциала
внутри электрическаго проводника.

Если только одна часть acb (фиг. 140) замкнутого проводника
испытываетъ замѣтное инду-
кціонное дѣйствіе, а другая bda
нѣтъ, то токонапряжение i ин-
дуктированного тока опредѣ-
ляется какъ частное изъ инду-
ктированной разности потенціа-
ловъ e концовъ a и b вторич-
наго проводника и сопротивле-
нія w всей цѣпи, $acbdba$,

Фиг. 140.



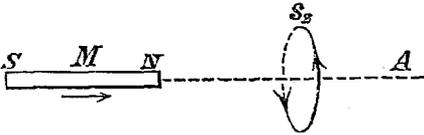
$i = \frac{e}{w}$. Индуктированныя разности потенциаловъ (электровозбудительныя
силы) опредѣляютъ слѣдовательно общее токонапряжение внутри цѣпи по
тому же закону, какъ и электровозбудительныя силы другихъ родовъ (обу-
словленная химическими дѣйствіями разность потенциаловъ въ Вольтовыхъ
элементахъ и др.).

Многозначность индуктированного распредѣленія потенціа- ловъ.

Индуктированное электрическое распредѣленіе потенциаловъ (какъ
и магнитное распредѣленіе потенциаловъ въ полѣ тока § 134) можетъ
быть также многозначнымъ, что невозможно для электрическаго распе-
дѣленія потенциаловъ, получаемаго другимъ путемъ.

Если вдоль оси круговаго замкнутого проводника (ф. 141) перемѣщать магнитъ, то въ окружности проводника появляются опредѣленные

Фиг. 141.



одинаково направленныя паденія потенціала; отсюда слѣдуетъ, что если магнитъ перемѣщать вдоль его оси, то индуцируемые имъ электрическіе потенціалы въ его полѣ распределяются вокругъ оси такъ же, какъ

магнитные потенціалы въ полѣ прямолинейнаго тока.

Индукція измѣненіемъ токонапряженія.

§ 160. 3-е положеніе. Индуцирующее дѣйствіе измѣненія магнитнаго напряженія внутри трубки силъ, обхватываемой вторичнымъ проводникомъ S_2 (ф. 138), не зависитъ отъ причины этого измѣненія. Поэтому индуцированный токъ имѣетъ такое же направленіе и величину, когда первичный токъ приближаютъ или удаляютъ, какъ и тогда, когда послѣдній, соотвѣтственно, усиливаютъ или уменьшаютъ.

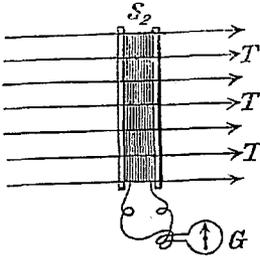
И такъ, при ослабленіи или усиленіи тока въ первичномъ проводникѣ, возникаетъ во вторичномъ проводникѣ, соотвѣтственно, одинаково или противоположно направленный индуцированный токъ. Если внезапно прервать или замкнуть первичный токъ, то это имѣетъ такое же большое дѣйствіе, какъ если бы его внезапно совершенно удалили или приблизили изъ безконечности.

Индукція измѣненіемъ поперечнаго сѣченія трубки силъ.

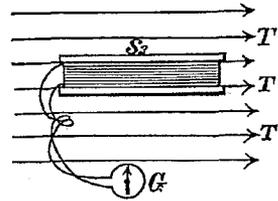
§ 161. 4-е положеніе. Увеличеніе поперечнаго сѣченія огибаемой S_2 магнитной трубки силъ имѣетъ то же индуктивное дѣйствіе, какъ увеличеніе магнитнаго напряженія внутри этой трубки. Пусть катушка S_2 (ф. 142) находится въ равномерномъ магнитномъ полѣ постояннаго напряженія T , направленіе котораго совпадаетъ съ ея осью. Въ то время, какъ ее выводятъ изъ этого положенія, вращая по какому-нибудь направленію, въ ней возникаетъ индуцированный токъ, который циркулируетъ въ катушкѣ по направленію часовой стрѣлки (если смотрѣть по положительному направленію магнитныхъ силъ); то же произошло бы при ослабленіи силы T (§ 160). При этомъ вращеніи уменьшается поперечное сѣченіе трубки силъ, огибаемой S_2 .

Если вращать катушку изъ положенія S_2 (ф. 143) въ какомъ-ни-

Фиг. 142.



Фиг. 143.



будь направлені, то въ ней возникаетъ индуцированный токъ, идущій по ней противъ часовой стрѣлки (если смотрѣть по положительному направлению магнитныхъ силъ). Увеличеніе поперечнаго сѣченія трубки силъ, обнимаемой S_2 , дѣйствуетъ слѣдовательно, какъ увеличеніе магнитной силы T внутри ея.

Зависимость индукціоннаго дѣйствія отъ измѣненія магнитнаго напряженія.

Отсюда видно, что индукціонныя дѣйствія опредѣляются измѣненіемъ произведенія магнитнаго напряженія T на площадь Φ поперечнаго сѣченія трубки силъ, т. е. измѣненіемъ магнитнаго напряженія $S = \Phi T$ (§ 146) внутри магнитной трубки силъ, огибаемой S_2 .

Законъ пропорціональности.

§ 162. 5-е положеніе. Токонпряженіе, индуцированное во вторичномъ проводникѣ, пропорціонально при прочихъ равныхъ условіяхъ скорости измѣненія напряженія S внутри огибаемой имъ трубки силъ.

Это слѣдуетъ изъ того, что отклоненіе стрѣлки гальванометра G (Фиг. 143) зависитъ отъ величины, но не отъ скорости этого измѣненія. Здѣсь имѣетъ мѣсто только кажущееся противорѣчіе (Ф. Нейманъ). Если напряженіе S во время t измѣняется на величину σ , слѣдовательно со скоростью $\frac{\sigma}{t}$, то по 5-му положенію

$$i = \text{Const.} \frac{\sigma}{t}.$$

Но для отклоненія α , испытываемаго стрѣлкой отъ мгновеннаго индуцированнаго тока, имѣемъ (§ 132 ур. 5)

$$\alpha = \text{Const.} \cdot i t$$

откуда слѣдуетъ $\alpha = \text{Const.} \cdot \sigma$.

Отклонение α следовательно должно зависеть от величины σ , но не от времени t (во всякомъ случаѣ короткаго), въ которое совершается это измѣненіе, какъ это на самомъ дѣлѣ и наблюдается. Равнымъ образомъ отклоненіе стрѣлки гальванометра G (ф. 138) зависитъ только отъ измѣненія положенія M или S_1 , а время, въ которое происходитъ это измѣненіе, остается безъ вліянія (пока оно меньше, чѣмъ, продолжительность отклоненія стрѣлки). Подобное же имѣетъ мѣсто для измѣненія токонапряженія въ S_1 . Убѣдиться въ этомъ можно опытомъ.

Уравненіе индукціи.

§ 163. Напряженіе S внутри трубки силь, замкнутой S_2 , можетъ быть также представлено произведеніемъ

$$J_1 Q = S$$

(ср. урав. 14), гдѣ Q представляетъ коэффициентъ индукціи катушекъ другъ на друга, а J_1 токонапряженіе первичнаго тока.

Измѣненіе S равно σ , соответствующее измѣненію Q равному q и одновременному измѣненію J_1 равному i , опредѣляется изъ уравненія:

$$(S + \sigma) = (J_1 + i) (Q + q).$$

При предположеніи, что всѣ эти измѣненія очень малы, выходитъ послѣ перемноженія и сокращенія:

$$\sigma = Qi + J_1 q.$$

Если эти измѣненія происходятъ во время t , то гальванометръ G (по положенію 5) обнаруживаетъ индуцированное токонапряженіе, или свободные концы ab катушки S_2 обнаруживаютъ индуцированную электрическую разность потенциаловъ V , пропорціональную скорости измѣненія $\frac{\sigma}{t}$.

$$V = \text{Const.} \left(Q \frac{i}{t} + J_1 \frac{q}{t} \right) \dots \dots \dots 16).$$

Если проводники S_1 и S_2 имѣютъ неизмѣнное положеніе по отношенію другъ къ другу ($Q = \text{Const.}, q = 0$), то изъ ур. 16) слѣдуетъ:

$$V = \text{Const.} Q \frac{i}{t} \dots \dots \dots 17).$$

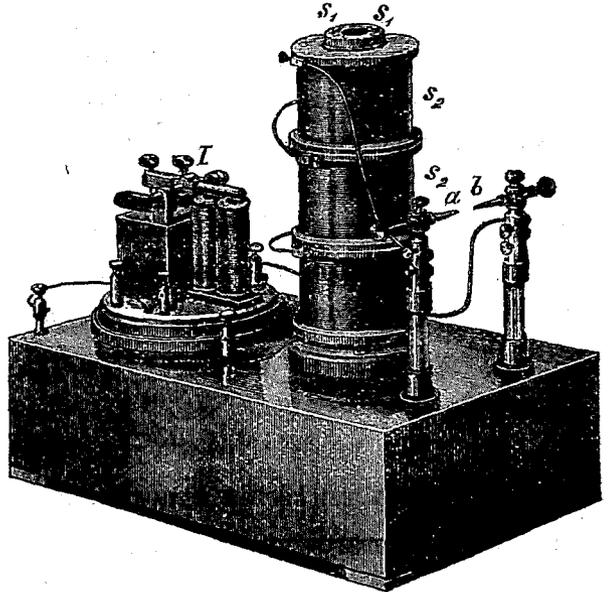
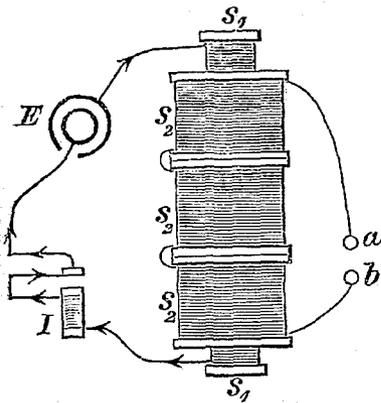
Спираль Румкорфа.

§ 164. Если хотять получить возможно полное индукціонное дѣйствіе, то по ур. 17) выбираютъ катушки со многими оборотами (высокаго коэффициента индукціи § 154) и въ первичной катушкѣ устанавливаютъ

сильное токонaпряженіе J_1 , которое внезапно прерываютъ и вновь устанавливаютъ. Тогда $i=J_1$. Если электровозбудительная сила E батареи, дающей первичный токъ, ограничена, то увеличеніе числа оборотовъ (также и сопротивленія) катушки S_1 не можетъ идти очень далеко, ибо тогда, выигрывая въ величинѣ Q , теряютъ въ величинѣ $i=J_1$. По этимъ даннымъ построенъ индукціонный снарядъ Румкорфа (ф. 144 и 145). Вторичная

Фиг. 145.

Фиг. 144.



катушка S_2 во много тысячъ оборотовъ тонкой проволоки плотно обхватываетъ первичную катушку S_1 , состоящую самое большее изъ 100 оборотовъ толстой проволоки. Быстрое прерываніе и замыканіе тока производитъ автоматическій молотокъ Нефа I (§ 184).

Теорія Неймана.

§ 165. Если во вторичномъ проводникѣ S_2 , сопротивленіе котораго очень мало, имѣется установившееся токонaпряженіе J_2 и индуктируется разность потенциаловъ V , то тогда J_2 производитъ въ каждую секунду на $J_2 V$ больше теплоты, чѣмъ безъ этого (§ 56 ур. 5). Работа, произведенная электродинамическимъ дѣйствіемъ на разстояніе между S_1 и S_2 во время процесса индукціи, соотвѣтствуетъ одновременному измѣненію ихъ потенциала другъ на друга, т. е. измѣненію выраженія $J_2 J_1 Q$ (§ 149).

J_2 —постоянно, если не принимать во вниманіе слабыхъ индуктированныхъ токовъ въ S_2 . И такъ работа, произведенная въ одну секунду, выразится черезъ $J_2 (J_1 q + Qi)$ и должна равняться произведенной при этомъ теплотѣ $J_2 V$, откуда вытекаетъ выраженіе (ур. 16) для индуктированной разности потенциаловъ. Законъ индукціи (ур. 16 полож. 5) есть поѣтому слѣдствіе принципа сохраненія энергіи (Ф. Нейманъ. 1840).

Нѣкоторыя количественныя данныя.

§ 166. Первые абсолютныя измѣренія индукціонныхъ дѣйствій произведены Кирхгофомъ и Веберомъ. Своеобразныя трудности этихъ измѣреній заключаются въ томъ, что индуктированныя разности потенциаловъ трудно доступны прямымъ измѣреніямъ.

Веберъ исходитъ изъ измѣреній § 162-го. Они даютъ $it = 0,11 \cdot 106 \sigma$. При этомъ сопротивление w катушки S_2 и гальванометра G составляетъ 100 Е. С. Если i означаетъ среднее индуктированное токонатраженіе, V —среднюю индуктированную при этомъ разность потенциаловъ, то

$$0,11 \cdot 106 \cdot \frac{\sigma}{t} = i = \frac{V}{w} \text{ или } V = w \cdot 0,11 \cdot 106 \frac{\sigma}{t}$$

$$w \cdot 0,11 \cdot 106 = \text{Const.} = 0, \cdot 106$$

$\frac{\sigma}{t}$ есть скорость измѣненія напряженія въ трубкѣ силъ, обхватываемой S_2 ; Const, слѣдовательно, есть постоянная уравненія индукціи 16):

$$V = 0, \cdot 106 \left(Q \frac{i}{t} + J_1 \frac{q}{t} \right)$$

Значеніе $0, \cdot 106$ относится къ токонатраженіямъ i , выраженнымъ въ магнитныхъ единицахъ, и къ сопротивленіямъ w , выраженнымъ въ единицахъ Сименса.

Магнитная единица электрическаго потенциала.

§ 167. Выраженію 16) можно придать болѣе простую форму, а именно:

$$V = Q \frac{i}{t} + J_1 \frac{q}{t} \text{ (въ магнитныхъ единицахъ),}$$

полагая слѣдовательно постоянную закона индукціи (ур. 16) равною единицѣ, а ея измѣреніе равнымъ нулю. Однако этимъ владется въ основаніе измѣренія индуктированной разности потенциаловъ новая единица (магнитная единица мѣры разности потенциаловъ). Эту магнитную еди-

ницу разности потенциалов принимают концы вторичной катушки S_2 , если коэффициент индукции другъ на друга Q катушекъ S_1 и S_2 равенъ 1 сан. и скорость измѣненія $\frac{i}{t}$ первичнаго тока напряженія равна 1 (сан. $^{1/2}$ гр. $^{1/2}$ сек. $^{-2}$ магн. ед.) т. е., если оно въ каждую секунду уменьшается равномерно на 10 амперовъ.

Единица сопротивленія въ этой системѣ есть то сопротивленіе, въ которомъ опредѣленная такимъ образомъ единица разности потенциаловъ производитъ единицу тока напряженія (въ магнит. ед.)

По уравненію 18) эта магнитная единица сопротивленія равна $0,106$ единицъ Сименса $= 0,11$ сан. $^{-1}$ сек. (электростат. единицъ).

Магнитная единица тока напряженія $= 3 \cdot 10^{10}$ сан. $^{3/2}$ гр. $^{1/2}$ сек. $^{-1}$ (электростат. ед.) (§ 132). Отсюда для магнитной единицы разности потенциаловъ слѣдуетъ значеніе $0,1033$ сан. $^{1/2}$ гр. $^{1/2}$ сек. $^{-1}$ (электростат. единицъ).

Измѣреніе магнитныхъ единицъ потенциала и сопротивленія.

Измѣреніе разности потенциаловъ въ магнитныхъ единицахъ равняется измѣренію произведенія $Q \cdot \frac{i}{t}$ (гдѣ $Q =$ сан., а $i =$ сан. $^{1/2}$ гр. $^{1/2}$ сек. $^{-1}$), т. е. сан. $^{3/2}$ гр. $^{1/2}$ сек. $^{-2}$

Измѣреніе сопротивленія въ магнитныхъ единицахъ, равное слѣдовательно сан. сек. $^{-1}$, получилось случайно очень простымъ.

Практическія единицы потенциала и сопротивленія.

Эти новыя магнитныя единицы слишкомъ малы для практики. Практическая единица потенциала носить названіе вольта и опредѣляется:

$$1 \text{ вольтъ} = 10^8 \text{ (сан. } ^{3/2} \text{ гр. } ^{1/2} \text{ сек. } ^{-2} \text{ магн. ед.)}$$

Практическая единица сопротивленія носить названіе омъ и опредѣляется:

$$1 \text{ омъ} = 10^9 \text{ (сан. сек. } ^{-1} \text{ магн. ед.)}$$

такъ что

$$\frac{1 \text{ вольтъ}}{1 \text{ омъ}} = 1 \text{ амперу.}$$

$$1 \text{ вольтъ} = \frac{1}{300} \text{ (сан. } ^{1/2} \text{ гр. } ^{1/2} \text{ сек. } ^{-1} \text{ электростат. ед.)} = 1,01 \text{ Даніэля,}$$

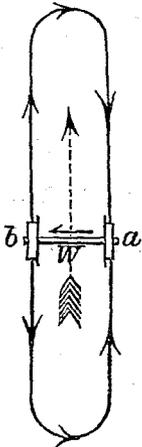
$$1 \text{ омъ} = 1,06 \text{ единицъ Сименса.}$$

И такъ практическія единицы вольтъ и омъ къ счастью очень близко по величинѣ случайно подходятъ къ произвольнымъ единицамъ даніэлю и сименсу.

Поясненіе закона индукціи.

§ 168. Полная сила земнаго магнетизма дѣйствуетъ почти отвѣсно сверху внизъ. Если телѣжка W (ф. 146) катится съ юга на сѣверъ по проводящимъ рельсамъ, то въ ней возбуждается паденіе потенціала, направленное съ востока на западъ, которое приводитъ тогда по § 159 всю систему проводниковъ въ токосостояніе. Предлагается вывести это читателю изъ положенія 4-го § 161.

Фиг. 146



Въ подвижной скользящей части $a b$ прежде покоящагося проводника появляется индукціонный токъ, направленіе котораго перпендикулярно къ направленію линій силъ и къ направленію движенія.

Величина V разности потенціаловъ, индуктированной въ $a b$, опредѣляется по полож. 5).

$$V = T l v \text{ (въ магн. ед.) } \dots \dots \dots 17)$$

гдѣ T есть магнитное напряженіе поля, l —длина скользящей части $a b$, v скорость, съ которою она двигается перпендикулярно къ направленію l и T .

Токонпряженія, индутированныя во всей системѣ проводниковъ, распредѣляются такъ, какъ будто они поддерживаются элементомъ съ электровозбудительной силой V , который включенъ въ вѣтвь $a b$.

Для $T = 0.5$ (сан. $^{1/2}$ гр. $^{1/2}$ сек. $^{-1}$ ср. § 110), $l = 200$ сан., $v = 30$ м/сек., по наблюденіямъ Кирхгофа и Вебера $V = 0.003$ даніэля. Магнитная единица потенціала, вольтъ, равна разности потенціаловъ, индуктируемой въ скользящей части W (фиг. 146), длиною въ 1000 сантиметровъ, въ полѣ напряженія $T = 1000$ (сан. $^{1/2}$ гр. $^{1/2}$ сек. $^{-1}$). 1 вольтъ = 1.01 даніэля. 1 омъ есть то сопротивленіе, въ которомъ разность потенціаловъ у борновъ въ 1 вольтъ производитъ токонпряженіе въ 1 амперъ 1 омъ = 1.06 единицы Сименса.

Машины для получения тока.

§ 169. Если вращать колесо Барлова (фиг. 105) по направлению движения часовой стрѣлки, то въ цѣпи его возбуждается индуктированный токъ, напряженіе котораго пропорціонально скорости вращенія и слѣдовательно можетъ быть поддерживаемо при постоянномъ значеніи. Токъ этотъ направленъ по радіусу колеса сверху внизъ. Направленія: движенія, магнитныхъ силъ и тока перпендикулярны другъ къ другу подобно тому, какъ сѣверное, зенитное и восточное направленія. Если наоборотъ черезъ колесо пропустить токъ отъ элемента по этому направленію, то оно подъ вліяніемъ электромагнитнаго дѣйствія на разстояніе, исходящаго отъ магнита, будетъ вращаться по направленію противоположному движенію часовой стрѣлки.

Несравненно значительнѣе получается индуктивный токъ, доставляемый двигателемъ Сименса (§ 144), если его катушка приведена въ быстрое вращательное движеніе посредствомъ паровой машины. Такимъ образомъ получаютъ индуктированные токи постоянного токонапряженія до 10 амперовъ. Разности потенциаловъ, которыя можетъ доставить такая машина, достигаютъ 40 вольтъ и опредѣляются числомъ оборотовъ катушки, скоростью вращенія и силой магнитовъ.

Электрическая передача силы на разстояніе.

Токъ, полученный отъ такой машины можно употребить на то, чтобы привести въ движеніе по § 144 второй двигатель Сименса. Это даетъ возможность передавать работу черезъ проводникъ на большія разстоянія.

Происхожденіе энергіи индуктированного тока.

170. 6-ое положеніе. *Магнитное дѣйствіе на разстояніе индуктированного тока сопротивляется индуктирующему относительному движенію.* Положеніе это слѣдуетъ изъ правила Асипера § 124 и положенія 1) § 157 и можетъ замѣнить послѣднее. Во время индуктирующаго движенія должна слѣдовательно во что бы то ни стало производиться работа и эта работа доставляетъ энергію индуктированного тока, которая можетъ вновь обнаружиться въ дѣйствіяхъ на разстояніе, тепловыхъ дѣйствіяхъ или химическихъ реакціяхъ.

Качающаяся магнитная стрѣлка можетъ быть задержана въ своемъ движеніи дѣйствіемъ на разстояніе токовъ, которые индуктируются ею въ близъ лежащихъ мѣдныхъ пластинкахъ. На этомъ основаны мѣдные успокоители Фуко для аперіодическаго движенія магнитной стрѣлки.

Экстра-токъ.

7-е Положеніе. Индуктирующее дѣйствіе индуктированнаго тока на первичный токъ усиливаетъ каждое измѣненіе послѣдняго. При ослабленіи у иленіи тока въ S_1 (фиг. 133) по полож. 3 § 160 возбуждается въ S_2 индуктированный токъ ^{однаковаго} _{противополож.} направленія, наростаніе котораго производитъ въ S_1 дальнѣйшій индуктированный токъ ^{противоположнаго} _{опять противоп.} направленія (экстра-токъ), который ускоряетъ ^{ослабленіе} _{усиленіе} тока въ S_1 .

Самоиндукція.

§ 171. Во время прираченія i токо-напряженія J въ проволоку, каждое продольное волокно ея оказываетъ на сосѣднія волокна индуктирующія дѣйствія, какъ и каждая проволока въ связкѣ близко другъ къ другу лежащихъ проволокъ индуктирующе дѣйствуетъ на сосѣднія проволоки.

Обозначимъ черезъ t время, въ теченіи котораго токо-напряженіе J куска проволоки измѣнится на величину i . Тогда разность потенциаловъ, индуктируемая въ этомъ кускѣ, $V = P \frac{i}{t}$. Ср. ур. 17. Постоянная P (коэффициентъ самоиндукціи куска проволоки) пропорціональна длинѣ куска и сложнымъ образомъ зависитъ отъ формы поперечнаго сѣченія его. Она уменьшается съ возрастаніемъ поперечнаго сѣченія, ибо при этомъ токонапряженіе распредѣляется на далѣе отстоящія другъ отъ друга волокна проволоки.

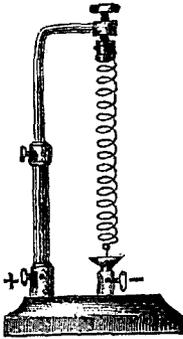
Электрическое колебаніе.

§ 172. Скорость, съ которой измѣняется разность потенциаловъ V концовъ C_1 , C_2 проволоки P (фиг. 148), обладающей коэффициентомъ самоиндукціи P , соотвѣтствуетъ поэтому скорости, съ которой измѣняется i , т. е. ускоренію, съ которымъ измѣняется J .

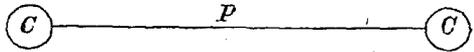
(Скорость измѣненія V) = $P \times$ (ускореніе измѣненія J).

При этомъ предполагается, что P имѣетъ весьма малое сопротив-

Фиг. 147.



Фиг. 148.



Автоматическій токопрерыватель для доказательства дѣйствія на разстояніе тока самого на себя.

леніе, такъ что никогда не бываетъ большой разности потенціаловъ на концахъ C_1 и C_2 . Тогда разность потенціаловъ — V , соответствующая неравному заряду C_1 и C_2 должна быть равна и прямо противоположна индуцируемой разности потенціаловъ V .

Если C означаетъ емкость окончныхъ шариковъ C_1 и C_2 то для каждаго времени будемъ имѣть:

$$- J = C \times (\text{скорость измѣненія } V),$$

ибо произведеніе, стоящее въ правой части этого равенства означаетъ электрической зарядъ, протекающій въ 1 секунду отъ C_1 въ C_2 (§§ 77, 17).

Отсюда выходитъ

$$- J = P \cdot C \times (\text{ускореніе въ измѣненія } J).$$

Съ этимъ можно сравнить отношеніе, существующее между ускореніемъ и пройденнымъ пространствомъ X тѣла, двигающагося подобно маятнику —

$$- X = \frac{1}{f} \times (\text{ускореніе въ измѣненія } X).$$

гдѣ f означаетъ ускореніе для $X = 1$. Измѣненіе съ теченіемъ времени токонапряженія J въ смыкающей проволоки P разряжающейся лейденской банки, обкладки которой имѣютъ емкость C будетъ соответствовать измѣненію положенія маятника. Періодъ этого измѣненія, т. е. время колебанія T , опредѣляется изъ уравненія $T = \pi \sqrt{P C}$ совершенно такъ же, какъ время качанія маятника дается формулой $T = \pi \sqrt{\frac{1}{f}}$ (Г. Кирхгофъ).

Опыты Фелддерсена.

Пусть банка заряжена до разности потенціаловъ V . Къ концу времени $\frac{T}{2}$ послѣ того, какъ приложенъ разрядникъ P , эта разность по-

тенціаловъ упадетъ до 0, но токонапряжение J въ P все возрастало. Во время своего исчезновенія это токонапряжение индуцируетъ разность потенціаловъ $+V$ и заряжаетъ при этомъ банку во время T до той же разности потенціаловъ, но съ обратнымъ знакомъ ($-V$), какъ и при началѣ процесса разряженія. Это колебаніе продолжается до тѣхъ поръ, пока вся энергія заряда банки не затратится на производство теплоты въ томъ пространствѣ, гдѣ перескакиваютъ искры. Феддерсенъ счумѣлъ наблюсти эту быструю перемѣну заряда лейденскихъ банокъ и показалъ, что искра лейденской банки, рассматриваемая во вращающемся зеркалѣ, можетъ быть разложена на рядъ искръ попеременнаго направленія, которыя слѣдуютъ другъ за другомъ въ интервалахъ $T=0,1$ сек. приблизительно *).

Распространеніе электрическихъ колебаній.

§ 173. Магнитныя и электрическія силы исходятъ изъ тѣлъ, дѣйствующихъ на разстояніе, съ конечною скоростью (по всей вѣроятности со скоростью, равною скорости распространенія свѣта). Электрическое состояніе проволоки, пробѣгаемой колеблющимся разрядомъ лейденской банки, распространяется, исходя изъ этой проволоки, на подобіе лучей свѣта. Происходящіе такимъ образомъ лучи съ пространственно и временно періодическими электрическими свойствами испытываютъ, подобно лучамъ свѣта, у проводящихъ поверхностей отраженіе, у поверхности раздѣла двухъ непроводниковъ—преломленіе, металлами поглощаются, деревомъ пропускаются и могутъ быть собраны металлическими вогнутыми зеркалами въ пучки, сильное индуцирующее дѣйствіе которыхъ замѣтно еще и на большихъ разстояніяхъ. Падающій и отраженный отъ проводящей поверхности лучи комбинируются тамъ, гдѣ они налагаются другъ на друга, такъ же, какъ и интерферированный свѣтъ. Длина волны

*) Чтобы быть въ состояніи вычислить это по Кирхгофу, нужно сначала выразить емкость банки C въ магнитныхъ единицахъ. Такъ какъ въ магнитной системѣ единица количества электричества въ $3 \cdot 10^{10}$ разъ больше (§ 132), а единица разности потенціаловъ въ $3 \cdot 10^{10}$ разъ меньше (§ 167), то единица емкости будетъ въ $9 \cdot 10^{20}$ разъ больше, чѣмъ въ электростатическоі системѣ единицъ. Поэтому батарея въ 600 (м. элек. стат. сист.) единицъ емкости имѣетъ

$$\text{Емкость} \frac{60000}{9 \cdot 10^{20}} = 0,16 \cdot 67 \text{ (сан.—}^1 \text{ сек.—}^2 \text{ магн. ед.)}$$

При помощи смыкающей проволоки съ коэффициентомъ самоиндукціи $P=10^3$ (сан. магн. сист.) батарея эта разряжается поэтому съ временемъ колебанія

$$T = \pi \sqrt{0,16 \cdot 67} = 0,25 \text{ секундъ.}$$

лучей, испускаемых самыми быстрыми электрическими колебаніями, которыя могли быть до сихъ поръ достигнуты, все еще составляетъ нѣсколько дециметровъ (Г. Герцъ 1888). Съ высказанными фактами находится въ связи электромагнитная теорія свѣта (Максуэлль).

2. Индукція магнитнаго состоянія.

Временное (индуктированное) намагничиваніе.

§ 174. Ненамагниченный кусокъ мягкаго желѣза (и нѣкоторыхъ другихъ веществъ) во все время нахождения въ магнитномъ полѣ проявляетъ магнитныя дѣйствія. Это явленіе имѣетъ большое сходство съ индукціей токовъ въ магнитномъ полѣ и находится въ полнѣйшей аналогіи съ электризаціей проводниковъ черезъ вліяніе, находящихся въ электрическомъ полѣ. Для доказательства существованія такого явленія можно произвести опыты съ кусочками желѣза и опилками въ полѣ стальныхъ магнитовъ и токовъ.

Направленіе временнаго намагничиванія.

Направленіе временнаго намагничиванія, получаемаго въ кускѣ мягкаго желѣза E (фиг. 149) въ магнитномъ полѣ, совпадаетъ съ направленіемъ силъ поля.

Благодаря этому мягкое желѣзо притягивается обоими полюсами магнита.

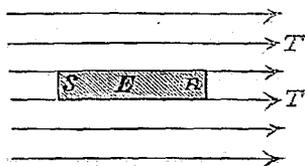
Сила и коэффициентъ временнаго намагничиванія.

Сила временнаго намагничиванія въ широкихъ предѣлахъ пропорціональна напряженію поля. Магнитная плотность D , появляющаяся на концахъ стержня E (фиг. 149), опредѣляется формулой

$$D = \mu T \dots \dots \dots 18)$$

гдѣ T — напряженіе поля, μ — постоянная величина, зависящая отъ природы стержня E и называемая его коэффициентомъ намагничиванія. Магнитный моментъ M , получаемый стержнемъ, выразится слѣдовательно черезъ $M = \mu VT$ (гдѣ V обозначаетъ объемъ стержня; сравн. § 113). Эта формула остается также спра-

Фиг. 149.



ведливой для стержней E неправильной формы. Временный магнитный момент M стержня E опредѣляется по методу колебаній § 101. Такимъ способомъ мы получаемъ изъ уравненія 18 величины для коэффициента намагничиванія μ , собранныя въ слѣдующей таблицѣ:

Желѣзо	32.00	Ртуть	— 0,03
Магнитный желѣзнякъ	8.00	Висмутъ	— 0,15
Желѣзный колчеданъ .	0.15	Вода	— 0,10
Оксидъ марганца . . .	0.05	Углекислота	— 0,40

Электризація черезъ вліяніе.

§ 175. Если проводникъ L заполняетъ, какъ показано на фиг. 150, трубку силъ электрическаго поля, напряженіе котораго T, то одна концевая поверхность его заряжается отрицательно, а другая положительно. Направленіе этой индукированной электризаціи совпадаетъ съ положительнымъ направленіемъ линій силъ поля. Электрическая плотность D, проявляющаяся на концевыхъ поверхностяхъ, опредѣляется по § 23 формулой:

$$D = \epsilon T 19)$$

$$\text{гдѣ } \epsilon = \frac{1}{4\pi} .$$

Коэффициентъ электризаціи.

Это явленіе слѣдовательно сходно съ индукціей магнетизма. Коэффициентъ электризаціи ϵ проводника ($\frac{1}{4\pi} = 0,08$) гораздо меньше коэффициента намагничиванія μ для мягкаго желѣза. Кусокъ мягкаго желѣза, помѣщенный въ магнитное поле, измѣняетъ послѣднее такъ же, но въ 400 разъ сильнѣе, чѣмъ одинаковой формы проводникъ, помѣщенный въ подобное электрическое поле (§ 24).

Коэффициентъ электризаціи дурныхъ проводниковъ.

Коэффициентъ электризаціи ϵ будетъ меньше для дурныхъ проводниковъ и непроводниковъ, нежели для проводниковъ. Электризація черезъ вліяніе происходитъ и безъ содѣйствія проводимости; однако процессы, обусловленные проводимостью, (токопроцессы) постепенно усиливаютъ дѣйствіе черезъ вліяніе и въ полупроводникахъ. Въ слѣдующей

таблицѣ помѣщены величины ϵ для различныхъ веществъ (по измѣреніямъ Больцмана).

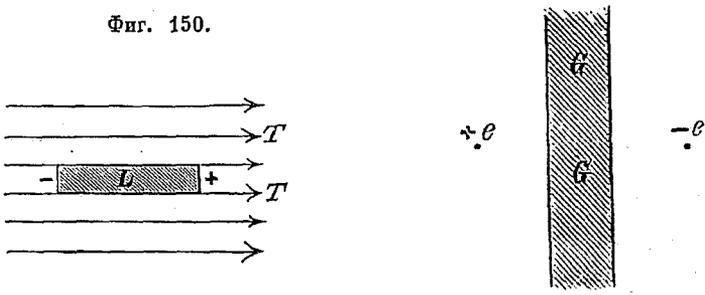
Вода.	$\left. \begin{array}{l} \frac{1}{4\pi} 0.985 \end{array} \right\}$	Маслородный газъ.	$\left. \begin{array}{l} \frac{1}{4\pi} 0.0005 \end{array} \right\}$
Полупроводящій газъ	$\left. \begin{array}{l} \frac{1}{4\pi} 0.85 \end{array} \right\}$	Углекислота.	$\left. \begin{array}{l} \frac{1}{4\pi} 0.002 \end{array} \right\}$
Сѣра	$\left. \begin{array}{l} \frac{1}{4\pi} 0.75 \end{array} \right\}$	Воздухъ	$\left. \begin{array}{l} 0 \end{array} \right\}$
Керосинъ	$\left. \begin{array}{l} \frac{1}{4\pi} 0.45 \end{array} \right\}$	Водородъ.	$\left. \begin{array}{l} \frac{1}{4\pi} (-0.0002) \end{array} \right\}$
		Пустота	$\left. \begin{array}{l} \frac{1}{4\pi} (-0.0003) \end{array} \right\}$

Электрическая сила внутри тѣла, наэлектризованнаго черезъ вліяніе.

§ 176. Внутри тѣла L (фиг. 150), коэффициентъ электризаціи котораго больше соотвѣтствующаго коэффициента для воздуха, дѣйствующія силы, паденіе электрическаго потенциала, будутъ слабѣе, нежели внѣ его, такъ какъ въ послѣднемъ случаѣ дѣйствіе на разстояніе вызванныхъ черезъ вліяніе зарядовъ усиливаетъ, въ первомъ, напротивъ, ослабляетъ электрическія силы поля. Внутри *проводника* электрическая сила даже равна нулю (§ 5).

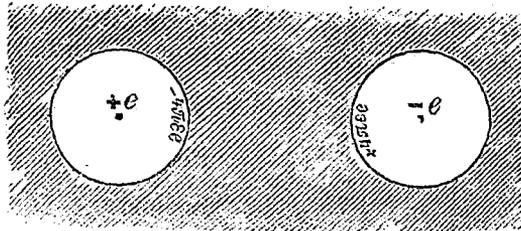
Помѣщенная между двумя электрическими точками $+e$ и $-e$ стеклянная пластинка ослабляетъ слѣдовательно ихъ взаимодействіе (фиг. 151).

Фиг. 151.



Если вообразимъ, что эти точки окружены воздушными шарами радіуса r (фиг. 152), остальное-же поле выполненнымъ веществомъ, коэффициентъ электризаціи котораго ϵ , то, благодаря индуктирующему дѣйствію $+e$, на поверхности шара I появится электрическая масса — D. $4\pi r^2 = -\epsilon T. 4\pi r^2 = -\epsilon \frac{+e}{r^2}. 4\pi r^2 = -4\pi \epsilon e$

Фиг. 152.



Діелектрическая и діамангнитная постоянныя.

Вслѣдствіе этого совокупное внѣшнее дѣйствіе $+e$ и противоположной шаровой поверхности будетъ лишь такое, какъ дѣйствіе электрической массы $+e(1-4\pi\epsilon)$. Дѣйствіе на разстояніи, паденіе потенціала, вызываемое ^{электрическими} ^{магнитными} массами, въ средѣ ^{діелектрической} ^{діамангнитной}, коэффициентъ ^{электризаціи} ^{намагничиванія} которой ϵ , будетъ меньше соотвѣтствующаго дѣйствія въ воздухѣ въ отношеніи $\frac{1-4\pi\epsilon}{1}$ (Гельмгольцъ). Постоянное количество

$\frac{1}{1-4\pi\epsilon} = (1+4\pi\epsilon) = \eta$ называется ^{діелектрической} ^{діамангнитной} постоянной среды.

§ 177. Чтобы зарядить до заданной разности потенціаловъ пластинки доски Франклина, діелектрикъ которой обладаетъ коэффициентомъ электризаціи ϵ (діелектрическая постоянная η), потребуется количество электричества въ $\frac{1}{1-4\pi\epsilon}$ большее (η разъ большее), чѣмъ при прочихъ равныхъ обстоятельствахъ въ воздухѣ. Емкость конденсатора пропорциональна діелектрической постоянной $\eta = \frac{1}{1-4\pi\epsilon}$ его діелектрика. Измѣреніемъ емкостей (§ 11) можно весьма точно опредѣлить постоянныя η и ϵ (Фарадей 1840).

Отталкиваніе тѣлъ, наэлектризованныхъ или намагниченныхъ черезъ вліяніе.

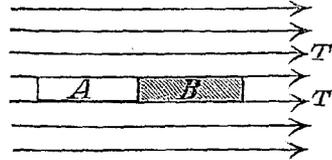
§ 178. Тѣла съ отрицательнымъ коэффициентомъ ^{электризаціи} ^{намагничиванія}, находясь въ воздухѣ въ положеніи L (фиг. 150), ^{заряжаются} ^{намагничиваются} обратно тому, какъ ^{проводники} ^{жельзо}. Такія тѣла отталкиваются отъ центровъ силъ вслѣдствіе

каго знака. Струя водорода отталкивается въ воздухѣ отъ тѣлъ электрическихъ, струя углекислаго газа напротивъ притягивается. Рѣзкія тѣла такихъ струй могутъ быть сдѣланы видимыми. Висмутъ, кварцъ, вода отталкиваются отъ каждаго изъ полюсовъ сильнаго магнита (тѣла діаманитныя). Соли желѣза, кобальтъ, никкель напротивъ притягиваются (тѣла парамагнитныя).

Относительный діаманитизмъ.

§ 179. Плотность ^{заряда} _{намагничиванія} на плоскости, раздѣляющей два тѣла А и В (фиг. 153), коэффициенты которыхъ ϵ_1 и ϵ_0 , будетъ $\epsilon_1 T - \epsilon_0 T = (\epsilon_1 - \epsilon_0) T$. Тѣло, коэффициентъ ^{электризаціи} _{намагничиванія} котораго ϵ_1 , относится въ средѣ съ соотвѣтствующимъ коэфф-циентомъ ϵ_0 такъ же, какъ тѣло, коэффициентъ котораго въ воздухѣ $= (\epsilon_1 - \epsilon_0)$.

Фиг. 153.



Если $\epsilon_0 > \epsilon_1$, т. е. коэффициентъ среды больше, то тѣло заряжается черезъ вліяніе противоположное направленію силы T и отталкивается въ этой средѣ отъ центровъ силъ. Тѣла діаманитныя (ртуть, висмутъ, вода) суть такія, способность къ намагничиванію которыхъ того же рода, какъ и воздуха, но слабѣе. Тѣла, оказывающіяся и въ пустотѣ діаманитными, имѣютъ болѣе слабую магнитную способность нежели сама пустота.

Остаточный зарядъ.

§ 180. Если удалимъ индуцируемыя тѣла изъ поля, то всякій слѣдъ ихъ магнитнаго или электрическаго момента исчезаетъ. Не то будетъ, если мы имѣемъ дѣло съ полупроводниками. Если ввести такое тѣло въ пространство съ паденіемъ потенціала, то рядомъ съ индукціей является, хотя и слабый, токопроцессъ, заряжающій оконечныя поверхности тѣла на подобіе того, какъ токопроцессъ можетъ въ иныхъ случаяхъ разряжать поверхности съ различными потенціалами (§ 72). Присоединяющіяся такимъ образомъ заряды исчезаютъ весьма медленно (при помощи токопроцесса) съ удаленіемъ тѣла изъ поля.

Остаточный магнетизмъ.

Аналогичное явленіе остающагося заряда мы имѣемъ въ случаѣ стали въ отношеніи ея къ магнитнымъ силамъ. Магнитный моментъ, вызываемый въ стальномъ брускѣ, помѣщенномъ въ магнитномъ полѣ, хотя и уменьшается опять внѣ послѣдняго, но всетаки совершенно не исчезаетъ. Остающійся (реманентный) моментъ тѣмъ больше, чѣмъ закаленнѣе сталь и чѣмъ больше временно индуктированный моментъ, т. е. чѣмъ больше была дѣйствующая сила поля, но не превосходитъ предѣла 50 (сант. $\frac{5}{2}$ гр. $\frac{1}{2}$ сек. -1 на каждый граммъ вѣса стали). Остающійся моментъ въ первыя недѣли послѣ намагничиванія испытываетъ незначительное паденіе, но послѣ этого остается постояннымъ. Мы изучали магнитное дѣйствіе на разстояніе въ § 99 и слѣд. именно на такихъ стержняхъ съ реманентнымъ магнетизмомъ.

Вліяніе сотрясенія на намагничиваніе.

§ 181. Сотрясенія стального стержня, находящагося въ магнитномъ полѣ, усиливаютъ реманентное намагничиваніе; напротивъ, сотрясенія внѣ намагничивающаго поля ослабляютъ его. Сюда относятся: намагничиваніе по способу натиранія; приготовленіе первыхъ магнитныхъ стержней помощью магнитнаго желѣзняга, встрѣчаемаго въ природѣ; намагничиваніе дѣйствіемъ земнаго магнетизма и магнитнымъ дѣйствіемъ катушки, по которой пробѣгаетъ токъ.

Вліяніе температуры на намагничиваніе.

Повышеніе температуры ослабляетъ реманентный моментъ и именно на 0.001 его величины на 1° Ц. для закаленной стали, для худшихъ же сортовъ стали на гораздо болѣе значительную величину. Пониженіе температуры повышаетъ реманентный моментъ на равную величину.

Сравненіе намагничиванія черезъ вліяніе съ индукціей токовъ.

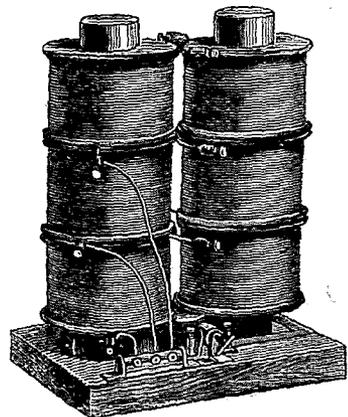
§ 182. Временное намагничиваніе имѣетъ нѣкоторое сходство съ индукціей токовъ Фарадея. Если приблизимъ проводникъ къ магниту, то появится индуктированный токъ, превращающійся конечно тотчасъ же въ теплоту; но этотъ токъ длился бы, подобно индуктированному

магнетизму, долгое время, если-бы сопротивление проводника было безконечно малое. Проводникъ производилъ-бы тогда магнитныя дѣйствія во все время нахождения въ магнитномъ полѣ. Въ виду этого сходства, слѣдуетъ обратить особенное вниманіе на то, что магнитныя дѣйствія индукированныхъ токовъ имѣютъ обратное направленіе съ магнитнымъ дѣйствіемъ индукированныхъ парамагнитовъ: первые препятствуютъ, вторые, напротивъ, способствуютъ приближенію индукируемаго тѣла къ магниту.

Электромагниты.

§ 183. Внутри спирали радиуса въ 2 сант. изъ 30 оборотовъ появляется (по § 141) при токонпряженіи въ 1 амперъ сила магнитнаго дѣйствія тока въ 10 (сант. $^{-1/2}$ гр. $^{1/2}$ сек. $^{-1}$). Поэтому стержень изъ мягкаго желѣза внутри такой спирали получаетъ на полюсахъ магнитную плотность (§ 113) $\mu 10 = 320$ сант. $^{-1/2}$ гр. $^{1/2}$ сек. $^{-1}$ ($\mu = 32$ § 174), т. е. онъ весьма сильно намагничивается. Тотчасъ по прекращеніи тока въ спирали временное магнитное состояніе стержня прекращается (Араго 1824). Сильныя дѣйствія такихъ электромагнитовъ (фиг. 154), которые мы можемъ, смотря по надобности, воспроизвести замыканіемъ тока, имѣютъ важныя научныя и техническія примѣненія.

Фиг. 154.

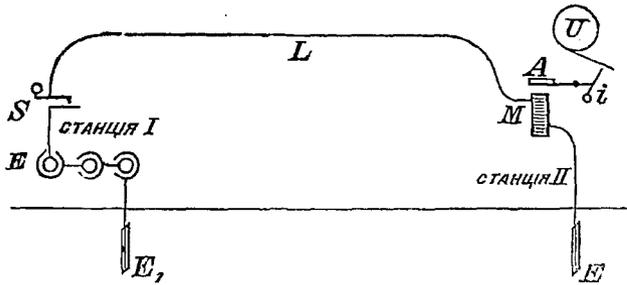


Телеграфія.

§ 184. Включая проводникъ I между двумя весьма отдаленными пунктами (станціями) I и II (фиг. 155) и присоединяя его въ II къ электромагниту M, а въ I смыкая и размыкая помощью ключа S токъ, мы имѣемъ возможность посылать сигналы и письменныя знаки изъ I въ II.

Электромагнитъ M при замыканіи тока протягиваетъ кусокъ желѣза A (якорь), который въ свою очередь приводитъ въ движеніе

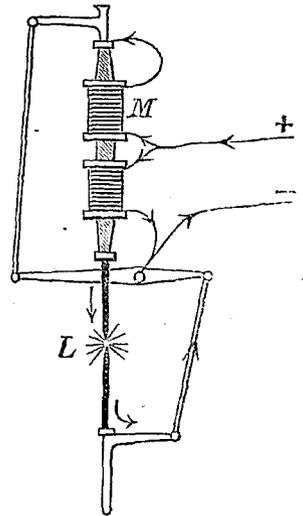
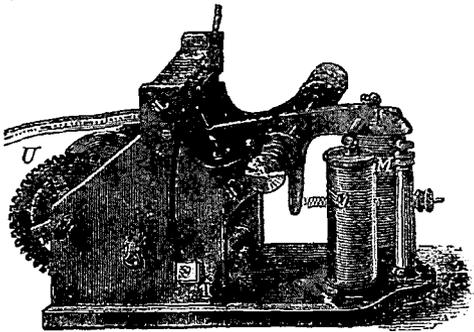
Фиг. 155.



молоточек i въ боловольчику (акустическіе сигналы на желѣзныхъ дорогахъ) или же прижимаетъ пишущій штифтнень i къ бумажной лентѣ (телеграфія; Земмерлингъ 1825, Гауссъ и Веберъ 1833). Эта бумажная лента протягивается равномерно помощью часоваго механизма U надъ штифтомъ i , при чемъ получаются на ней, смотря по длинѣ промежутка

Фиг. 157.

Фиг. 156.



замѣнута тока въ I , знаки въ видѣ точекъ и тире, о значеніи которыхъ напередъ условливаются (Телеграфъ Морзе) (фиг. 156).

Земля какъ обратный проводъ.

Для соединенія двухъ станцій между собою достаточно одного телеграфнаго провода. Концы его E_1 и E_2 погружаются въ землю (земляныя пластины), удѣльное сопротивление которой хотя велико, но по-

перечный разръвъ за то весьма большой. Сопротивленіе землянаго сообщенія неизмѣримо мало. (Штейнгейль 1838).

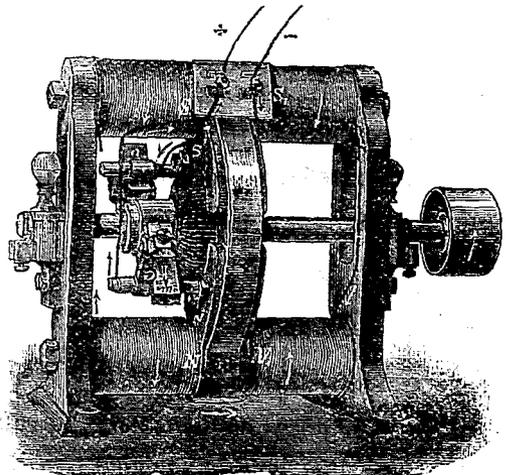
Другіе электро-магнитные приборы.

Сюда относятся: электромагнитная передача колебанія маятника часовъ; электрическіе часы; самодѣйствующіе токопрерыватели въ индуктивныхъ аппаратахъ; электрическіе звонки; камертоны, приводящіеся въ колебаніе электромагнитизмомъ (Мельде); регуляторы для вольтовой дуги § 46. Дѣйствіе послѣдняго прибора основано на слѣдующемъ: сила электромагнита М (фиг. 157), удерживающаго угли на нѣкоторомъ разстояніи другъ отъ друга и включеннаго съ ними въ одну и ту же цѣпь, уменьшается по мѣрѣ сгоранія послѣднихъ, чѣмъ достигается уменьшеніе длины самой вольтовой дуги.

Машины Вильде и динамомашинны.

§ 185. Въмѣсто постоянныхъ магнитовъ въ нѣкоторыхъ случаяхъ пользуются при машинахъ для полученія тока (§ 169) электромагнитами, по катушкамъ которыхъ проходитъ токъ отъ отдѣльной небольшой машины. (Вильде 1866). Въ большинствѣ случаевъ слѣдуетъ стараться воспользоваться токомъ самой машины, который пропускаютъ по катушкамъ электромагнитовъ (Сименсъ 1867). Въ этихъ машинахъ, наз. динамо-

Фиг. 158.



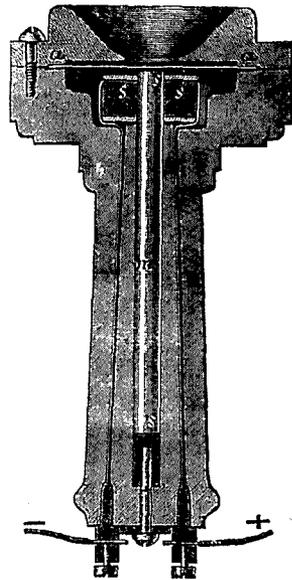
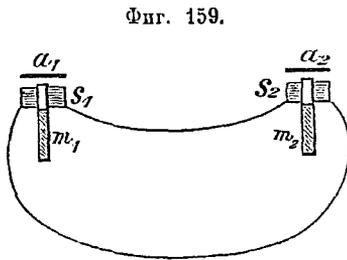
машинами (фиг. 158), появляется токъ въ силу незначительнаго остаточнаго магнитизма въ стержняхъ изъ мягкаго желѣза или же вслѣдствіе магнитизма, индуцированнаго земнымъ магнитизмомъ. Появляющійся такимъ образомъ сначала слабый токъ усиливаетъ магнитизмъ желѣзныхъ стержней и, благодаря этому, усиливается также постепенно и дѣй-

ствіе машины до тѣхъ поръ, пока желѣзо не будетъ намагничено до насыщениа. Степень временнаго намагничиванія желѣза гораздо выше, чѣмъ степень ремагнитнаго намагничиванія стали, вслѣдствіе чего описанныя въ § 169 машины обладаютъ, по сравненію съ динамомашинами, лишь незначительной силой.

Телефонъ.

§ 186. На концахъ двухъ сильныхъ постоянныхъ магнитовъ m_1 и m_2 (фиг. 159) находятся двѣ катушки s_1 и s_2 съ большимъ числомъ

Фиг. 160.



оборотовъ; обѣ катушки соединены между собою телефоннымъ проводомъ. Если говорить противъ пластинки a_1 , помѣщенной у конца магнита m_1 , то колебанія ея вызываютъ индуктивные токи въ катушкѣ s_1 , которые передаются и катушкѣ s_2 и она уже въ свою очередь приводитъ въ колебаніе пластинку a_2 , находящуюся противъ магнита m_2 (телефонъ Беля) (фиг. 160).

Электрооптическія явленія.

§ 187. Вся среда, наполняющая магнитное или электрическое поле, находится въ особомъ, напоминающемъ упругое натяженіе, состояніи, которое обуславливаетъ электрическое и магнитное дѣйствія на разстояніе. Су-

ществованіе такого состоянія среды дѣлается замѣтнымъ съ помощью принимаемыхъ ею при этомъ оптическихъ свойствъ, которыя приближаются къ оптическимъ свойствамъ кристалловъ и находящихся въ упругомъ натяженіи тѣлъ.

Въ самомъ дѣлѣ: какъ въ упруго измѣненномъ тѣлѣ, такъ и въ электрическомъ полѣ, лучъ, перпендикулярный къ направленію силъ, имѣетъ различную скорость движенія (показатель преломленія), смотря по тому будетъ ли онъ поляризованъ по направленію силъ или же перпендикулярно къ нимъ. (Керръ 1875). Равнымъ образомъ плоскость поляризаціи луча, направленнаго по силамъ магнитнаго поля напр. во флинтъ-гласѣ, вращается (Фарадей 1840) на протяженіи 1 см. вдоль линіи силы, напряженіе которой 100 (см. $-\frac{1}{2}$ гр. $\frac{1}{2}$ сек. -1), на 2 градуса и совершенно такъ же, какъ плоскость поляризаціи луча, направленнаго по оси кварцеваго кристалла. Гораздо большее магнитное вращеніе плоскости поляризаціи получается въ мягкомъ желѣзѣ. [Отраженіе поляризованнаго свѣта отъ магнитныхъ поверхностей (Керръ). Прохожденіе поляризованнаго свѣта сквозь тонкія желѣзныя пластинки (Кундтъ).]

К О Н Е Ц Ъ.



О Г Л А В Л Е Н И Е.

	Стран.
Предисловіе	—
Введеніе	—

I. Обь электричествъ.

Электрическое состояніе	1
Электроскопъ	2
Два рода электричества	—
Проводники и непроводники	3
Заряженіе съ поверхности	4
Индукція	5
Лейденская банка	6
Увеличеніе заряда	7
Электрическія машины	8
Счетная банка. Количество. Потенціалъ. Емкость	9
Діэлектрическая постоянная	10
Законъ обратной пропорціональности квадратамъ разстояній	—
Количество электричества	11
Работа электричества	12
Потенціалъ. Поверхности уровня. Линіи силъ	—
Свойство проводниковъ	14
Емкость. Энергія	15
Потенціалъ и емкость шара	—
Дѣйствіе шара наружу	16
Шаровая лейденская банка	17
Франклинова доска	18
Электрометръ	—
Дополнительныя предложенія	19
Разныя случаи индукціи	21

II. Обь электрическомъ токо-состояніи.

1. Измѣреніе малыхъ разностей потенціаловъ.

Слабое, но быстрое заряженіе	23
Измѣреніе слабыхъ зарядовъ	—
Электроскопъ Беренса	—
Квадратный электрометръ	24
Элементъ Даніэля	25

2. О различных процессах электризации.

Наблюдения, послужившія началомъ дальнѣйшихъ изслѣдованій. Животное электричество. Опытъ Вольты	26
Разности потенциаловъ при сопротивленіи металловъ	27
Электризация теплотой. Электризация свѣтомъ	28
Активнoэлектризация. Пирoeлектризация	29
Пьезоэлектризация. Электризация химическими дѣйствіями	30
Указаніе на законъ Томсона	31
Продолженіе объ опытѣ Вольты.—Зарядъ пламени	32
Атмосферное электричество	33

3. Сложеніе разностей потенциаловъ.

При электрическихъ явленіяхъ играютъ роль разности потенциаловъ, но не абсолютные потенциалы. Послѣдовательное соединеніе	34
Соединеніе другъ противъ друга. Еще объ опытѣ Вольты	35
Законъ Вольты. Термо-электрическіе элементы. Нейтральная точка	36
Термо-электрическія батареи. Параллельное соединеніе	37
Искра при приближеніи электродовъ. Потокъ искръ	—

4. Установившееся токо-состояніе. Теплота развиваемая въ проводникѣ, находящемся въ электрическомъ токо-состояніи	38
Замыканіе цѣпи	—
Вольтова дуга. Энергія проводника, находящагося въ электрическомъ токо-состояніи	39
Установившееся токо-состояніе	40
Теплота, развиваемая въ проводникѣ, находящемся въ электрическомъ токо-состояніи. Паденіе потенциала	41
Законъ Джауля	42
Распределеніе электрическаго токо-состоянія между двумя проволоками, включенными параллельно.—Формулировка закона Джауля	43
Сопротивленіе проводника. Удѣльное сопротивленіе	44
Абсолютная единица мѣры для сопротивленія	45
Единица Сименса.—Распределеніе потенциаловъ въ неоднородной цѣпи	46
Законъ Ома. Токо-напряженіе.—Историческая замѣтка	47
Дѣйствія проводника, находящагося въ электрическомъ токо-состояніи. Абсолютная единица токо-напряженія. Общее сопротивленіе параллельнаго развѣтвленія	48
Первая теорема Кирхгофа. Плотность токонапряженія. Вторая теорема Кирхгофа	49
Наложеніе электрообудительныхъ дѣйствій	50

5. Примененіе законовъ Ома, Кирхгофа и Джауля.

Сопротивленіе проводниковъ, введенныхъ послѣдовательно	50
Полезное и вредное сопротивленіе. Электрическая лампа накаливанія	51
Составленіе батарей	52
Балластъ и шунтъ. Вѣтвленіе проводника и мостъ	53
Телеграфная встрѣчная передача. Мостъ Уитстона. Нейзальберный эталонъ. Измѣненіе сопротивленій	54

Распределение токосостояния въ проводникахъ о трехъ измѣреніяхъ. Первый законъ Кирхгофа	55
Составляющія токонапряженія. Линіи токонапряженій. Поверхности равной плотности токонапряженія	56
Распределение потенциала на поверхности. Трубки токонапряженій	57
Сопротивленіе расширенія	58

6. Сравненіе работы, производимой въ проводникъ, находящемся въ токосостояніи съ электрической работой.

Разрядъ лейденской банки при помощи токо-процесса. Разрядъ лейденской банки движеніемъ	—
Замѣна обоихъ процессовъ разряженія лейденской банки другъ другомъ. Электрическій токъ. Направленіе тока. Законъ Рисса. Установившійся токъ. Законъ Кирхгофа	60
Установившееся движеніе. Сопротивленіе	61

7. Обратимость явленій электризаціи.

Обратимость явленій природы. Опытъ Пельтье	62
Электрическая деформація. Топки сквозь діафрагму. Переносъ массъ вдоль проводника. Электролизъ	63
Описаніе электролитическихъ процессовъ. Электролизъ смѣсей	64
Поверхности раздѣла. Опытъ Фарадея. Законы Фарадея. 1-й законъ Фарадея. 2-й законъ Фарадея. Химическая единица токонапряженія	65
Единица Якоби. Химическія дѣйствія разряда лейденской банки. Опытъ Фарадея	67
Контръ-электровозбудительная сила электролитовъ. Паденіе потенциала и контръ-электровозбудительная сила. Поляризаціонный токъ и обращеніе электролиза	68
Аккумуляторы. Законъ Гельмгольца. Постоянные элементы	69
Поднесеніе воды. Элементъ Давіэля	70
Элементы Бунзена и Грове, Элементъ Лекланше	71

III. О магнитномъ дѣйствіи на разстояніе.

1. Магнетизмъ стали.

Уголъ склоненія. Магнитные меридіаны	71
Пара силъ, приложенная къ горизонтальному магниту	72
Направляющій моментъ горизонтальнаго магнита. Законъ синусовъ. Полюсы магнитнаго стержня. Качаніе магнитнаго стержня. Время колебанія	73
Методъ колебаній Гаусса. Валитическое качаніе. Статистическій методъ	74
Дѣйствіе магнитовъ на разстояніе. Дѣйствіе полюсовъ. Поясъ безразличія. Линейные магниты. Законъ Ампера	75
Количество магнетизма. Равенство количествъ магнетизма обоихъ полюсовъ одного и того же магнита. Абсолютная единица количества магнетизма. Измѣреніе единицы количества магнетизма	76
Магнитное поле и его напряженіе. Магнитная работа. Магнитный потенциалъ. Магнитныя поверхности уровнй и линіи силъ	77

Равноѣрное магнитное поле. Магнитный моментъ. Магнитное поле земли . . .	78
Потенціалъ элементарнаго магнита. Напряженіе вдоль оси элементарнаго магнита . . .	79
Сравненіе напряженія магнитнаго поля земли съ напряженіемъ поля, порожденнаго стальнымъ магнитомъ	80
Горизонтальная слагающая земнаго напряженія. Полная земная магнитная сила и уголъ наклоненія	81
Полное напряженіе магнитнаго поля земли. Карта уголъ наклоненія	82
Карта полныхъ напряженій	83
Магнитный потенціалъ земли. Измѣненіе земнаго магнетизма. Сложеніе линейныхъ магнитовъ	84
Строеніе магнитовъ. Форма линейныхъ магнитовъ. Подково и колокольчикообразные магниты	85
Безконечно-длинные линейные магниты. Сложеніе линейныхъ магнитовъ, произвольно направленныхъ	86
Астатическая стрѣлка. Сложеніе линейныхъ магнитовъ, одинаково направленныхъ. Удельный магнитный моментъ (магнитный моментъ на единицу массы)	87
Магнитная плотность (магнитный моментъ на единицу поперечнаго сѣченія). Магнитные слои	88
Потенціалъ элемента слоя. Потенціалъ магнитнаго слоя	89
Потенціалъ плоскаго магнитнаго слоя. Потенціалъ половины плоскаго магнитнаго слоя	90
Линейный магнитный слой. Поверхности уровня и линіи силы линейнаго магнитнаго слоя. Потенціалъ линейнаго магнитнаго слоя	91
Силовое дѣйствіе одной заряженной линіи	92
Силовое дѣйствіе одной заряженной плоскости. Распространеніе силового дѣйствія	93

3. Магнетизмъ токовъ.

Открытіе Эрштедта. Сила магнитнаго дѣйствія тока	94
Знакъ силы магнитнаго дѣйствія тока. Безразличное равновѣсіе стрѣлки. Направленіе силы магнитнаго дѣйствія прямолинейнаго тока	95
Линіи силы магнитнаго дѣйствія прямолинейнаго тока	96
Униполярное вращеніе. Правило Ампера. Барлово колесо	97
Направленіе, въ которомъ устанавливается магнитная стрѣлка подѣ дѣйствіемъ прямолинейнаго тока. Гальваноскопъ	98
Законъ дѣйствія прямолинейнаго тока на разстояніе	99
Вліяніе паденія потенціала въ проводникѣ. Величина направляющей силы магнитнаго дѣйствія прямолинейнаго тока. Сравненіе силы магнитнаго дѣйствія тока съ горизонтальной слагающей земнаго магнетизма. Законъ пропорціональности	100
Электромагнитная единица мѣры для токонапряженія. Вліяніе поперечнаго сѣченія. Вліяніе проводимости	101
Зависимость отъ токонапряженія. Электромагнитная единица токонапряженія	102
Измѣреніе электромагнитной единицы токонапряженія	103
Гальванометръ. Переводный множитель. Дѣйствіе мгновеннаго тока	—
Сравненіе электромагнитной системы съ электростатической системой единицъ	104
Практическая единица токонапряженія. Магнитное поле прямолинейнаго тока	105
Многозначительность распредѣленія потенціала	106
Магнитное поле антипараллельныхъ прямолинейныхъ токовъ	107

Сравненіе магнитнаго дѣйствія двухъ прямолинейныхъ антипараллельныхъ проводниковъ, находящихся въ токосостояніи, съ дѣйствіемъ магнитнаго слоя	108
Распредѣленіе магнитнаго потенциала въ полѣ сомянутого тока	109

4. *Примѣненія магнитнаго дѣйствія круговыхъ токовъ.*

Магнитное поле круговаго тока. Распредѣленіе магнитной силы вдоль оси круговаго тока	109
Магнитный моментъ круговаго тока. Гальванометръ съ круговымъ токомъ. Тангенсъ-бусоль Вебера	111
Гальванометръ Гельмгольца	112
Дифференціальныи гальванометръ Беккерели. Соленоида	113
Распредѣленіе магнитной силы вдоль оси соленоида. Мультипликаторъ. Градуированіе мультипликатора	114
Выборъ переводнаго множителя. Электродвигатели. Выборъ числа оборотовъ проволоки въ ихъ катушкахъ	115
Электродвигатель Гефнеръ-Альтенева	116

5. *Электрическое дѣйствіе на разстояніи.*

Равновѣсіе подъ вліяніемъ магнитныхъ силъ. Величина потенциала магнитнаго слоя въ равномерномъ полѣ	117
Напряженіе трубки силъ. Величина потенциала тока въ неравномерномъ полѣ	118
Потенціалъ тока на одинъ магнитный полюсъ. Знакъ работы при передвиженіи тока въ магнитномъ полѣ	119
Электродинамическое дѣйствіе и потенциалъ двухъ токовъ другъ на друга	120
Коэффициентъ индукціи. Взаимодѣйствіе двухъ прямолинейныхъ токовъ	121
Величина электродинамическаго отталкиванія двухъ прямолинейныхъ токовъ	122
Моментъ вращенія сомянутого тока въ равномерномъ полѣ	123
Коэффициентъ индукціи концентрическихъ круговыхъ токовъ	124
Коэффициентъ индукціи коаксиальныхъ катушекъ. Динамометръ Вебера	125

IV. О явленіяхъ индукціи.

1) *Индукція токосостоянія.*

Дѣйствія на разстояніи не механическаго свойства	126
Индукція движеніемъ. Направленіе индуктированнаго тока. Однаковое отношеніе къ индукціи всѣхъ веществъ	127
Вліяніе проводимости. Законъ Ома имѣетъ силу и въ случаѣ индуктированныхъ токовъ	128
Многозначность индуктированнаго распредѣленія потенциаловъ	129
Индукція измѣненіемъ токонапряженія. Индукція измѣненіемъ поперечнаго сѣченія трубки силъ	130
Зависимость индукціоннаго дѣйствія отъ измѣненія магнитнаго напряженія. Законъ пропорціональности	131
Уравненіе индукціи. Спираль Румкорфа	132
Теорія Неймана	133

Нѣкоторыя количественныя данныя. Магнитная единица электрическаго потенциала	134
Измѣреніе магнитныхъ единицъ потенциала и сопротивленія. Практическія единицы потенциала и сопротивленія	135
Поясненіе закона индукціи	136
Машины для полученія тока. Электрическая передача силы на разстояніе. Происхожденіе энергіи индукированного тока	137
Экстра-токъ. Самоиндукція. Электрическое колебаніе	138
Опыты Фелдерсена	139
Распространеніе электрическихъ колебаній	140

2. Индукція магнитнаго состоянія.

Временное (индукированное) намагничиваніе. Направленіе временнаго намагничиванія. Сила и коэффициентъ временнаго намагничиванія	141
Электризація чрезъ вліяніе. Коэффициентъ электризаціи. Коэффициентъ электризаціи дурныхъ проводниковъ	142
Электрическая сила внутри тѣла, наэлектризованнаго чрезъ вліяніе	143
Діэлектрическая и діаманитная постоянныя. Оттаиваніе тѣлъ, наэлектризованныхъ или намагниченныхъ чрезъ вліяніе	144
Относительный діаманитизмъ. Остаточный зарядъ	145
Остаточный магнитизмъ. Вліяніе сотрясенія на намагничиваніе. Вліяніе температуры на намагничиваніе. Сравненіе намагничиванія чрезъ вліяніе съ индукціей токовъ	146
Электромагниты. Телеграфія	147
Земля какъ обратный проводъ	148
Другіе электро-магнитные приборы. Машины Вильде и динамомашинны	149
Телефонъ. Электрооптическія явленія	150