

3. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕЛЬМГОЛЬЦА

3.1. Проблемы электродинамики в работе "О сохранении силы" (1847)

Впервые Гельмгольц рассматривает проблемы электродинамики в работе "О сохранении силы"^I /105/. Эту работу, подготовленную уже в студенческие годы, он окончил во время службы в качестве военного врача. Она принадлежит к самым известным исследованиям Гельмгольца.

В своих воспоминаниях (1891) Гельмгольц изложил главные этапы создания этой работы /138, стр.10/. С самого начала своей научной деятельности он боролся с виталистическим направлением в физиологии, "которое считает явления жизни не подчиняющимися общим законом природы и ищет объяс^{ения} причины жизни... в особой жизненной силе" /53, стр.20/. Он понимал, что признание "жизненной силы" значит не что иное, как признание возможности вечного двигателя. Обобщая проблему, он не ограничился областью физиологии, а поставил перед собой теоретическую общезначимую задачу: установить соотношения, которые должны существовать между различными видами энергии, если полагать, что вечный двигатель вообще невозможен. А ответ на вопрос, выполняются ли в действительности все эти отношения, требовал тщательной проверки во всех областях естествознания.

Значительное место в работе "О сохранении силы" занимает трактовка энергетических проблем электричества. И это неудивительно, поскольку была уже известна возможность непосредственного превращения энергии электричества во все другие известные тогда виды энергии. Но значение относящихся к электричеству раз-

^I / Сила - в смысле энергия.

делов "О сохранении силы" не исчерпывается тем, что в них подтверждался закон сохранения энергии. Связь оказывалась не односторонней. Уже в этой работе вырисовывалась роль закона сохранения и превращения энергии как путевода для дальнейших исследований, критерия в спорах о разных теориях электродинамики. Макс Планк в своей работе "Принцип сохранения энергии" подчеркнул значение именно этой стороны исследований Гельмгольца для дальнейшего развития электродинамики.

".... беря на себя задачу отыскать законы электричества, - пишет он, - мы видим, что не обладаем заранее никаким другим доступным вспомогательным средством исследования, кроме как единственно и исключительно принципом сохранения энергии. Следовательно здесь наиболее ясно выявляется значение принципа... он образует единственный надежный исходный пункт исследования, указывая руководящий ход идей, который является существенной предпосылкой для рационального использования результатов эксперимента и наблюдения" /161а, стр.195/.

В этом отношении любопытно заметить, что Планк в основу разработки своей теории электричества положил понятие и принцип энергии, поскольку это позволило ему вывести все законы данной области науки /см. 51/.

Для самого Гельмгольца закон сохранения и превращения энергии стал исходным пунктом всех дальнейших исследований в области электродинамики. Он играл роль первой точки опоры в лабиринте существовавших в то время разных теорий.

Первые плоды этого метода исследования, появились уже в самой работе "О сохранении энергий".

Так, применение закона сохранения энергии к явлению раз-

ряда конденсатора позволило Гельмгольцу выдвинуть предположение, что такой разряд должен происходить в виде затихающих электрических колебаний.

В основу своего изучения энергетических процессов в электростатике Гельмгольц положил выражение потенциальной энергии^{1/} системы двух зарядов, установленное на основе закона Кулона, подобно выражению Гаусса для магнитных полюсов.

$$P = \frac{e_1 e_2}{r}, \quad 2/ \quad (3.11)$$

где e_1 , e_2 - заряды, а r - расстояние между ними.

Эта формула, по Гельмгольцу, представляет работу, которая может производиться при перемещении заряда e_1 от бесконечности до расстояния r от заряда e_2 .

Выражение $P = e_1 e_2 / r$ называлось потенциалом обоих электрических зарядов. Поскольку по закону сохранения энергии сумма потенциальной и кинетической энергии в замкнутой системе постоянна, прирост кинетической энергии^{3/}, при некотором движении электрических зарядов, равняется уменьшению потенциала. Если при движении электричества в проводнике кинетическая энергия появляется только в виде теплоты, тогда величина энергии теплоты должна быть равна величине уменьшения потенциальной энергии. Таким образом Гельмгольц находит выражение энергии, которая при разряде конденсатора превращается в теплоту

1/ У Гельмгольца "сила напряжения".

2/ В оригинале еще: $- e_1 e_2 / r$, позже Гельмгольц принял уже пространственное определение. Гельмгольц объяснял самостоятельное определение отсутствием необходимой литературы в маленьком городе Потсдаме.

3/ У Гельмгольца - "живая сила".

$$W = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}, \quad (3.12)$$

где Q - количество электричества и C - емкость конденсатора^{I/}

Это выражение, найденное Гельмгольцем теоретическим путем соответствовало результатам ряда экспериментальных исследований, которыми было установлено, что теплота разряда пропорциональна только этой величине и не зависит от вида соединительного провода.

Теоретическое объяснение этого обстоятельства Гельмгольц дает следующими словами:

"Этот закон весьма легко объясняется, если мы разряд батареи будем представлять не как простое движение электричества в одном направлении, но как течение его то в одну, то в другую сторону, между двумя обкладками в виде колебаний, которые делаются все меньше и меньше, пока, наконец, вся живая сила не будет уничтожена суммой сопротивлений" /105а, стр. 83/.

Подобное мнение, однако, уже выразил Дж. Генри /1797-1878/ в 1842г. При изучении токов, индуцированных во вторичной цепи разрядом Лейденской банки, в первичной, он пришел к убеждению, что "обнаруженные явления заставляют нас допустить существование главного разряда в одном направлении, а затем нескольких отраженных действий назад и вперед..., продолжавшихся до тех пор, пока не наступит равновесие" /I, стр. 244/.

Но работа Генри, очевидно, почти не была известна в Европе, и в работах следующих десятилетий обычно приводят Гельмгольца как первого, который высказал предположение о колебательном разряде конденсатора. Интересно в этой связи письмо В. Фед-

I/ У Гельмгольца - Ableitungsgröße

дерсена Гельмгольцу от 4 ноября 1859г. Феддерсен, который именно в то время занимался экспериментальным исследованием электрических разрядов, не мог себе представить, что до Гельмгольца никто не нашел этого объяснения," -так как некоторые более ранние наблюдения едва ли можно объяснить без принуждения как -либо по- другому".(Приложение № 7).

Гельмгольц только в 1869г. вернулся к проблеме электрического разряда конденсаторов, подтверждая свои предположения собственными опытами.

Глава об энергетических процессах в электродинамике в работе "О сохранении силы" начинается обсуждением сущности электродинамических сил. Гельмгольц, который построил свою работу на предположении, что только центральные силы могут удовлетворять закону сохранения энергии, вынужден был установить, что до данного времени не нашлось гипотезы, с помощью которой было бы возможно свести явления электродинамики к центральным силам. Наоборот, по теории Вебера, силы между токами оказались совсем другого характера, а именно зависящими не только от положения взаимодействующих электрических масс, но и от их относительной скорости и ускорения.

Однако, эти проблемы еще ждали окончательного выяснения. Различные существующие математические выражения индукционных токов дали совпадающие результаты для токов в замкнутых контурах. Для токов в незамкнутых контурах они, однако, расходились. Но для таких токов еще не существовало экспериментальных данных. Гельмгольц, следовательно, должен был ограничиться подтверждением частично уже известных формул индукционных токов в замкнутых контурах на основе принципа невозможности создания "перпетуум

мобиле". Но, несмотря на это, можно допустить, что противоречие между концепцией центральных сил и теорией Вебера привлекало внимание Гельмгольца уже в это время, хотя он лишь спустя двадцать лет опубликовал работы, содержащие подробное рассмотрение этих проблем.

В работе "О сохранении силы" Гельмгольц рассматривает отдельные случаи индукции. В основу своих исследований он ~~вводит~~^{КЛа} ~~вводит~~ выражение потенциала одного тока на другой, введенное Ф.Нейманом. Для случая, когда магнит перемещается относительно проводника, ему удается вывести очень простым путем тот же самый закон, что уже установил Ф.Нейман на основе закона Ленца и предположения, что индуктированная э.д.с. пропорциональна скорости относительного движения между контуром и магнитом /159,160/.

Методика установления этого результата следующая: процесс действия тока в замкнутом контуре Гельмгольц характеризовал тремя видами энергии. При этом, по закону сохранения энергии, энергия источника $U I dt$ должна равняться энергии теплоты, возникающей в цепи $I^2 R dt$ и прибыли кинетической энергии магнита $I dP$, следовательно :

$$U I dt = I^2 R dt + I dP.$$

и из этого:

$$I = \frac{U - \frac{dP}{dt}}{R}, \quad (3.13)$$

где I - ток, U - э.д.с., R - сопротивление в контуре и P - потенциал магнита по отношению к току.

По закону Ома выражение $- dP/dt$ можно принять за э.д.с. индуктивного тока, которая вызывается при перемещении магнита по отношению к проводнику.

Таким образом, Гельмгольц смог подтвердить закон индукции Ф.Неймана, по которому электродвижущая сила тока, индуцированного изменением положения магнита относительно замкнутого контура, равняется изменению потенциала магнита относительно контура во времени /см.105, стр.62-63/.

Сравнивая результат с употребляемым теперь выражением, мы найдем, что потенциал P Неймана соответствует потоку напряженности магнитного поля через контур. Гельмгольц однако не учитывая существования поля, в своих рассуждениях исходил из позиций дальнего действия. Он, следовательно, не мог определить P как величину магнитного поля.

Электромагнитный потенциал по Гельмгольцу представляет собой выражение энергии взаимодействия токов. Потенциал одного тока на другой он определяет как количество работы, которое может быть совершено электромагнитными силами, если оба контура удалятся на бесконечно большое расстояние друг от друга /см. 118, стр.559/.

По Гельмгольцу, следовательно, индуцированная в проводнике э.д.с. пропорциональна не изменению потока напряженности магнитного поля во времени, а изменению некоторой энергии, которая соответствует изменению магнитного поля.

Описанный здесь случай представляется единственным, для которого Гельмгольц смог полностью вывести формулу. Для всех других этого не удалось из-за отсутствия необходимых предпосылок. Так, он не мог описать энергетические процессы при индукции, вызванной изменением силы тока," так как форма нарастания тока неизвестна и, кроме того, омовский закон неприменим сюда непосредственно, так как эти токи могут не совершенно одновременно

протекать через всю длину проводников "/105а, стр.54/.

В 1854г. Гельмгольц, однако, сам решает эти проблемы ^{1/}. Он выводит формулу нарастания тока при замыкании контура, учитывая самоиндукцию:

$$i = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{P}t} \right), \quad (3.14)$$

где i - суммарный ток;

U - напряжение;

R - сопротивление контура;

t - время;

P - некоторая постоянная, зависящая только от вида контура. (p соответствует коэффициенту самоиндукции²)

На основе этого результата и исследований других физиков после 1847 года, Гельмгольц в "Ответе на замечания госп.Клаузиуса" в 1854г. смог дополнить и, в частности, исправить свой вывод закона индукции /113/.

В этой работе Гельмгольц также подробно характеризует энергетические превращения при самоиндукции. Эквивалент энергии индуктированного при замыкании цепи тока, это, по Гельмгольцу, определенное количество теплоты, уничтоженное возникновением этого тока:

$$W = \frac{1}{2} p I^2 \quad (3.15)$$

То же самое количество теплоты снова освобождается индуктированным при размыкании током.

1/ Смотрите следующую главу

2/ Коэффициент самоиндукции Гельмгольц не смог точно определить Он и Нейман допускают, что $p = 2R$,

где P - потенциал тока самого на себя.

Обобщая эти данные и результаты работы "О сохранении силы Гельмгольц делает следующий вывод.

"Когда ток в контуре неизменяемого вида взаимодействует с постоянным стальным магнитом и с железом..., тогда в каждый момент индуцированный ток должен производить или уничтожать так много теплоты, как и затрачиваемая или получаемая работа при происходящем движении в процессе намагничивания железа и изменения силы тока. На основании этого можно вывести в общем виде закон Неймана, что индуцированная э.д.с. равняется изменению потенциала.. магнитов на контур, по которому течет единица тока..." / ИИЗ, стр.92/.

Из примера ясно, что Гельмгольц, не учитывая магнитное поле ищет общий эквивалент для всех происходящих процессов не в изменении поля, а в теплоте, эквивалентной энергии индуцированного тока. Если, однако, учитывать, что величина R соответствует коэффициенту самоиндукции L , тогда мы получим для энергии выражение

$$W = \frac{1}{2} L I^2, \quad (3.15a)$$

а это не что иное, как количество энергии магнитного поля. Совпадение этого результата привел М.Лауэ даже к заключению, что Гельмгольц в своей работе "О сохранении силы" дал выражение энергии электрических и магнитных полей. /М.Лауэ. История физики. М., 1956, стр.102 /.

Формулы, найденные Гельмгольцем для индуцированных токов не были новы. Они совпадают с выражениями, выдвинутыми уже Ф.Нейманом и В.Вебером до опубликования работы Гельмгольца. Новым, однако, было то, что он выводил эти формулы на основе закона сохранения и превращения энергии. Именно здесь ярким образом демонстрировалось плодотворность нового принципа.

Работа " О сохранении и силы" представляет собой научную программу дальнейших исследований Гельмгольца в области электродинамики. Она определяет методику исследований и в зародыше уже содержит в себе проблематику дальнейших работ Гельмгольца в этой области.

3.2 Электродинамические работы 50-х г. Их связь с физиологическими исследованиями

Следующие работы Гельмгольца в области электродинамики относятся к 50-м годам.

В этот период Гельмголец занимал должность профессора физиологии Кенигсбергского университета. Соответственно своему положению он в первую очередь занимался физиологическими вопросами. Но обширные разносторонние интересы и его склонность к физике приводили Гельмгольца часто к физическим и, в частности к электродинамическим проблемам.

Гельмголец уже с начала своей научной деятельности глубоко интересовался физикой и математикой и упорно занимался этими предметами. На выбор профессии врача оказало решающее влияние материальное положение отца, а не научные интересы молодого Гельмгольца (для будущего военного врача учение было бесплатным). Поэтому неудивительно, что Гельмголец часто интересовался такими физиологическими вопросами, которые соприкасались с физическими проблемами.

В середине прошлого века в области физиологии появились новые тенденции. Мы уже указывали на борьбу против гипотезы о жизненной силе. Но чтобы поднять физиологию на уровень, достигнутый уже в то время рядом других отраслей естественных наук, нужно было произвести решительный переворот в исследовательских методах: если признана применимость общих законов неорганической природы и к одушевленной природе, тогда следует при исследовании этих процессов пользоваться точными экспериментальными методами, вместо привычных общих наблюдений.

Гельмголец, наряду с другими физиологами, поставил перед собой именно эту задачу — подвести под физиологическую науку

физико-химический фундамент.

Первая и наиболее известная работа Гельмгольца по электродинамике того периода это "О продолжительности и ходе электрических токов, индуцированных колебаниями тока" /109, 1851/.

Она тесно связана с его исследованиями скорости распространения возбуждения по нервам.

Вопрос о том, затрачивается ли время на передачу возбуждения по нерву не был новым. Ответ на него переплетался с другим важным вопросом: какой агент действует внутри нервов, передавая возбуждение? Многие физиологи еще предполагали особую "живую силу", другие приписывали передачу возбуждения невесомым веществам. Обе группы ученых предполагали бесконечно большую скорость распространения возбуждения.

С середины 18 века встречалось и такое мнение, что этот агент тождествен с электричеством. Поэтому с тех пор, как скорость распространения электричества начали измерять, представители этих взглядов уже не могли утверждать мгновенность распространения возбуждения по нервам. Но вследствие краткости нервных путей у животных, они считали время распространения возбуждения неизмеримо малым /см.17, стр.16; 53 стр.15 /.

Вообще можно сказать словами Гельмгольца, что "Ответы на этот большой вопрос были так же различны, как и философские и физические знания физиологов" /110, ст.886/.

Гельмголец, исходя из результатов исследования Дюбуа-Реймона о животном электричестве ^{I/}, сомневался в невозможности измерить скорость распространения возбуждения и пытался под-

I/ Дюбуа-Раймон объяснял передачу возбуждения взаимодействием весоных частиц самих нервов.

твердить свои взгляды опытом. Для этого он в первую очередь нуждался в точном методе измерения маленьких промежутков времени. Известные уже методы оказались для этого недостаточно точными. Поэтому Гельмгольц, прервав физиологические исследования, поставил перед собой чисто физическую задачу: теоретически и экспериментально усовершенствовать метод измерения времени.

В своих исследованиях Гельмгольц использовал уже известный метод, при котором время измеряется по воздействию текущего в катушке электрического тока известной интенсивности на магнит /см.107 / .Разность величин дуги колебаний магнитной иглы до и после воздействия тока позволяет вычислить время воздействия тока, поскольку для малых отклонений магнита и для малых величин времени можно положить, что:

$$\int i dt = \frac{T (b_2 - b_1)}{2\pi} ,$$

где i - ток ;

t - время воздействия тока;

T - время одного колебания магнита ;

b_1, b_2 - величина дуг колебаний магнита до и после воздействия тока.

Метод должен быть применим к физиологическим опытам по следующей схеме: /см.рис.1/

Размыкание тока в первой цепи (I) индуцирует ток во второй (II). Одновременно с выключением первой цепи включается третья (III) с током, измеряющим промежуток времени. Ток, индуцированный в ^{II} возбуждает мышцу (M), та сокращается и, выключая цепь III, прерывает измерительный ток.

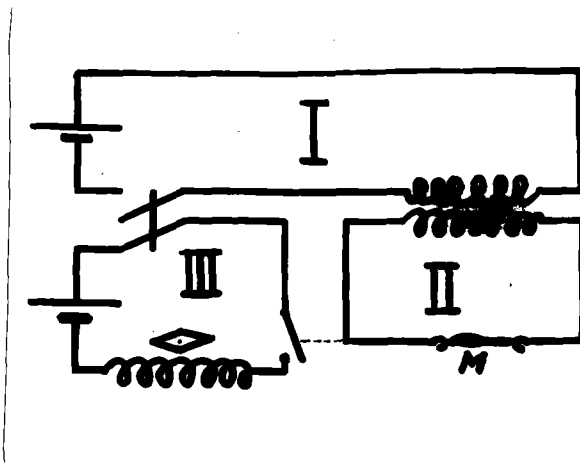


Рис. I

Вопрос состоял в том, существует ли промежуток времени между возбуждением и сокращением мышцы, зависящий от длины последней /см.106/.

Этот метод, однако, еще не мог гарантировать достаточно точных результатов, пока не стали известны все закономерности возникающих при этом физических явлений. Прежде всего нужно было исследовать влияние самоиндукции в мультипликаторе на измерительный ток при включении цепи I/.

Решение этой задачи стало предметом работы "О продолжительности и ходе электрических токов, индуктированных колебаниями тока" /109/. Вначале Гельмгольц вывел математическое выражение нарастания тока при включении цепи. Он показал, что существует экспериментальная возможность вызывать такие токи, I/ Пулье, в своей публикации, на которую ссылался Гельмгольц, не учитывал самоиндукцию / Claude Pouillet (1791-1869) /.

сила которых сравнительно медленно растет, имея в виду цепи с большой самоиндукцией. Для такого случая возможно было впервые применить закон Ома. На его основе Гельмгольц установил уравнение:

$$I R = U - p \frac{dI}{dt} .$$

Значит суммарная э.д.с. складывается из э.д.с. батареи и э.д.с. самоиндукции. Отсюда он получил выражение

$$I = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{P}t} \right) . \quad (3.21)$$

Оказалось, что продолжительность существования индуктированного тока теоретически не ограничена, и суммарный ток асимптотически приближается к величине, которая вычисляется без учета индукции. / Практически, однако, индуктированный ток через сравнительно короткое время достигает величины очень близкой к нулю, так что можно им пренебрегать, и индуктированный ток считать конечным/.

Таким образом, первая задача была решена. Выяснилось, что эти результаты следует принимать во внимание при использовании вышеназванного метода измерения коротких промежутков времени. Когда промежутки времени длиннее, чем продолжительность существования индуктированного тока, тогда, по Гельмгольцу, оказывается достаточным суммировать с полученным результатом маленькую постоянную /величина ее в опытах Гельмгольца - 0,000983 сек/.

Гельмгольц вывел формулу и для индуктированных во вторичной цепи токов при выключении первичной. Для силы тока он

нашел выражение:

$$i = \frac{I Q}{p} e^{-\frac{R}{p}t}, \quad (3.22)$$

где i - ток ;
 I - ток при $t = 0$;
 Q - потенциал первичной катушки на вторичную;
 p - коэффициент самоиндукции ;
 R - сопротивление ;
 t - время после размыкания .

Решение этих проблем создало все предпосылки для дальнейшего успешного исследования физиологических вопросов. На этой основе Гельмгольцу действительно удалось измерить скорость распространения возбуждения по нервам. У лягушек он определил ее равной приблизительно 27 м/сек.

В работе " О продолжительности и ходе электрических токов, индуцированных колебаниями тока " Гельмгольц впервые проявил себя в области физики как тонкий и опытный экспериментатор /см.напр., характеристику этой работы, данную И.М.Сеченовым, /55, стр.29/ /.

Но экспериментальные исследования Гельмгольца ни в этой, ни в дальнейших работах по электродинамике не стояли на первом плане. Они прежде всего должны были подтверждать найденные теоретические данные. Экспериментальное исследование тесно ^{было} связано с теоретическими работами. Такого рода связь характерна ^{всей} для научной деятельности Гельмгольца.

Исследования Гельмгольца в работе "О продолжительности и ходе индукционных токов..." частично можно рассматривать как

продолжение обсуждения электродинамических проблем в работе "О сохранении силы". Здесь Гельмгольц осветил прежде всего вопросы, нерешенность которых в 1847 году, среди ряда других, препятствовала ему полностью вывести закон индукции. К ним принадлежат расширение области применения закона Ома и вывод формулы самоиндукции. Можно, следовательно, предположить, что выбор тем определялся не только потребностями физиологических исследований, но и интересами Гельмгольца в области теории электродинамических явлений.

Интерес к проблемам электродинамики проявился и в следующей работе "О некоторых законах распределения электрических токов в объемных проводниках и применение их в опытах с животным электричеством" /112, 1853 /. Непосредственным поводом снова оказались потребности физиологического исследования. Причем на этот раз проблема распределения токов в мышцах и нервах была вызвана не собственными опытами Гельмгольца, а возникла в результате опытов Дюбуа-Реймона с животным электричеством. Гельмгольц, по словам последнего был свидетелем и участником этих опытов I/ /см.17, стр.35/. Непосредственной причиной для исследования распределения электрических токов была работа над статьей "Результаты новых исследований животного электричества" /110; 1852/.

При изучении книги Дюбуа-Реймона "Исследование животного электричества" /49 ; 1848 / с целью подбора материала, Гельмгольц нашел более удобным излагать отдельные части работы с помощью некоторых теорем/см.157, т.1, стр.159-160/.

I/ Я не могла найти данных, подтверждающих мнение У.И.Франкфурта, что эта работа Гельмгольца была вызвана собственными физиологическими исследованиями /см. 72, стр.50-51/

Общая задача в работе "О некоторых законах распространения электрических токов..." заключалась в следующем: При физиологическом исследовании мышцы и нервы представляют собой систему проводников, внутри которой распределены э.д.с. Когда соединяют такие части с гальванометром, ток в проводнике прибора представляет собой единственную часть тока, которую можно непосредственно наблюдать. Нужно было найти такие теоремы, с помощью которых можно было бы судить по току в проводнике о распределении токов внутри нервов.

Дюбуа-Реймон вспоминает о значении этой работы Гельмгольца для физиологических исследований:

"При своих исследованиях я постоянно наталкивался на задачу найти распределение тока в проводниках неправильного вида, в которых предполагалось действие э.д.с. Хотя законы распределения тока в непризматических проводниках были уже установлены Кирхгофом для двух и Вильгельмом Смаасеном для трех измерений, но все же этого было недостаточно, чтобы разбираться в столь запутанных отношениях, какие встречаются в животных электро-возбудителях. Здесь пришла мне на помощь выдающаяся аналитическая способность Гельмгольца. Развив далее учение о распределении тока в непризматических проводниках, он пришел к ряду положений и благодаря этому дотоле непреодолимые задачи стали почти элементарными" /17, стр.35 /.

И в письме Гельмгольцу от 3 августа 1852г. Дюбуа-Реймон пишет^{I/}. "Учение о токе мышц и нервов только теперь стало возможным наглядно описать, ужасная третья глава моей книги превращается в короткое изящное изложение" ./157, т.1, стр.177/.

I/ В июле 1852г. Гельмголец послал через Дюбуа-Реймона заметку о своих работах в Берлинскую Академию Наук / III /.

Отдельные теоремы, найденные в этой работе Гельмгольцем не представляются необходимым связующим звеном с дальнейшими исследованиями Гельмгольца в области электродинамики и не рассматриваются здесь. Следует только отметить, что если первая работа показала Гельмгольца как тонкого экспериментатора, то вторая удивила современников-физиков его способностью владеть математическим аппаратом в теоретических исследованиях. Здесь Гельмгольцу прежде всего нужно было разобраться в теории потенциалов, которую в это время, по словам Кенигсбергера, немецкие физики, за исключением Неймана, Вебера и Кирхгофа еще не использовали /см. 157, т. I. стр. 177 /.

После окончания исследования скорости распространения возбуждения по нервам Гельмгольц изменил тему своих работ и в дальнейшем занимался физиологией зрения и слуха. Соответственно этому и связь исследований с физикой относилась к другим областям. Лишь в 1862г. он опубликовал еще одну работу, которая по теме была близка предыдущей "Об общем методе трансформации проблем электрического распределения" /II4 /.

Эта работа, как и письмо Гельмгольца к Дюбуа-Реймону в 1857г ^{I/}, указывают на то, что Гельмгольц, наряду с физиологическими исследованиями и в дальнейшем занимался проблемами электродинамики, что он было хорошо знаком с развитием этой области.

Потребности физиологических занятий в первые десятилетия деятельности Гельмгольца сильно влияли на физические работы Гельмгольца, но, с другой стороны, физик Гельмгольц

I/ См. глава 3.4, стр. 44 .

наряду с другими учеными определил совсем новое направление в развитии физиологии. Нельзя поэтому предположить, что проблемы физиолога "создали физика Гельмгольца". Вернее сказать, что Гельмголец достиг таких значительных результатов в обеих областях потому, что он одновременно был выдающимся физиологом и физиком. Гельмголец сам не раз подчеркивал преимущество своего обширного образования для исследований в обеих отраслях науки. В своих воспоминаниях Гельмголец об этом пишет:

"Я сам приписывал свою удачу, главным образом, тому счастливому обстоятельству, что, обладая некоторой долей геометрического смысла и сведениями по физике, я попал в сферу медицины и здесь, в физиологии, встретил девственную почву необычайного плодородия; а с другой стороны, знакомство с явлениями жизни наводило меня на такие вопросы и соображения, которые обыкновенно бывают чужды чистому математику и физiku" /138а, стр.20 /.

В заключение можно резюмировать, что Гельмголец в 50-х годах впервые выступил с экспериментальными физическими работами, методы и результаты которых свидетельствуют о его выдающемся мастерстве экспериментатора. Экспериментальные работы, и это характерно также для дальнейших исследований Гельмгольца, тесно связаны с теоретической разработкой соответствующей проблемы. Экспериментальные данные служат Гельмгольцу прежде всего для подтверждения его теоретических результатов.

Непосредственным поводом для названных публикаций служили физиологические исследования. Но выбор и способ решения задач указывают на то, что рядом с потребностями физиологической науки стояли собственно физические интересы. Это особенно ясно проявляется в разработке проблем индукции, в продолжении

работы "О сохранении силы". Нельзя характеризовать эти работы только как вспомогательные исследования для решения физиологических задач, без учета последовательности рассматриваемых в них самостоятельных физических проблем.

3.3. Исследования электрических колебаний (1869)

(Переход к собственно физическим задачам)

После многолетнего перерыва Гельмгольц только в 1869г. снова вернулся в своих публикациях к электродинамике. На этот раз маленькое второстепенное физиологическое наблюдение привело Гельмгольца к самым центральным проблемам электродинамики, которыми он впоследствии занимался на протяжении нескольких лет.

В физиологической лаборатории сотрудники Гельмгольца обратили его внимание на то, что индукционные токи действуют на нервы, лежащие внутри человеческого тела гораздо слабее, чем постоянно действующие токи батареи, э.д.с. которых намного ниже первых. Гельмгольц проверил эти наблюдения специальными опытами. Результаты этих исследований он опубликовал в своей работе "О физиологическом действии коротко продолжающихся электрических ударов внутри пространственных проводящих масс" /115; 1869/. Они подтвердили наблюдения, что токи, индуктированные во вторичной цепи, производят иное физиологическое действие, чем постоянные токи. Гельмгольц, однако, еще не мог решиться на теоретическое объяснение этого факта. С одной стороны он учитывал, что в таком контуре должны происходить электрические колебания. А в соответствии с теорией на такие колебания кроме сопротивления проводника, еще добавочно должна действовать самоиндукция. Но, с другой стороны, он полагал возможным влияние еще не учтенных побочных явлений обратного действия индуцированного тока, которые изменяют действующие токи в зависимости от условий опыта. Решение второй проблемы требовало подробных экспериментальных исследований электрических колебаний.

Гельмгольц тотчас же обратился к выполнению этой задачи. Уже через два месяца, в апреле 1869г., он окончил новую работу

В 1857г. Г.Кирхгоф поставил перед собой еще более широкую задачу - разработать теорию движения электричества в линейном проводнике /153/. Он установил, что электричество волнообразно распространяется вдоль проволоки со скоростью близкой к скорости света. Найденные формулы Кирхгоф применил к ряду специальных случаев, в частности и к случаю, когда один конец проволоки изолирован, а другой связан с землей, т.е. к разработанной Томсоном проблеме. Уже в том же году Кирхгоф обобщил свои результаты и для проволоки любого вида /154/. В 1864г. он еще раз вернулся к этой задаче, сравнивая экспериментальные результаты В.Феддерсена с теорией разряда Лейденской банки /155/.

Наиболее систематические экспериментальные исследования разрядов конденсатора к тому времени были сделаны В.Феддерсеном /70, 71 /. Он исследовал электрические колебания разряда, наблюдая возникающие при этом в цепи искры. Колебания фиксировались с помощью фотографирования искр и таким образом было получено непосредственное и наглядное доказательство колебательного характера разряда конденсатора. Как мы увидим из письма (прилож. № 7), Феддерсен сам знакомил Гельмгольца со своими исследованиями.

Опираясь на результаты Томсона и Кирхгофа, Гельмголец смог путем новых экспериментов определить продолжительность существования и частоту колебаний в цепи, вызванных разрядами конденсаторов.

Преимущество метода Гельмгольца состояло в том, что он позволил наблюдать разряд без искровых помех до самого конца.

Сущность экспериментов следующая: ток индуцированный в катушке вторичной цепи размыканием первичной цепи заряжает

конденсатор, находящийся во вторичной цепи. После этого конденсатор разряжается через ту же катушку.

Через определенное время после размыкания первичной цепи, с помощью специально сконструированного Гельмгольцем маятника, размыкается и вторичная цепь, а конденсатор разряжается через проводник второго рода с мышцей лягушки (М) и производит при этом физиологическое воздействие на последнюю.

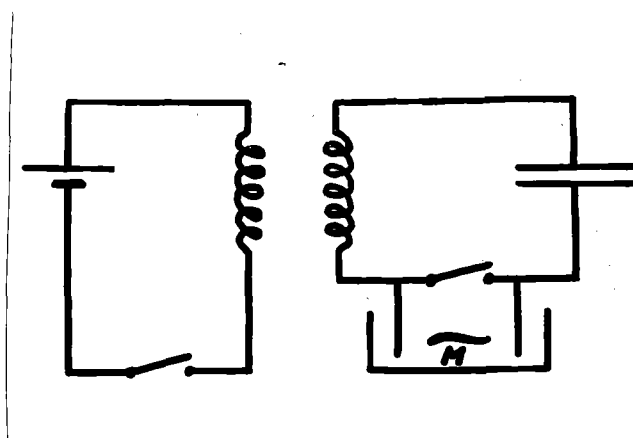


Рис.2.

Интенсивность этого воздействия зависит от силы тока в момент размыкания вторичной цепи. В момент, когда разность потенциалов между обкладками конденсатора достигает максимума, действия на мускул не производится. Изменяя промежуток времени между размыканием первичной и вторичной цепи, Гельмгольц определяет эти нулевые точки и, таким образом, продолжительность одного колебания (T). Результаты ряда таких экспериментов дают отдельные точки, по которым можно построить кривую электрических колебаний в зависимости от интенсивности тока и времени.

На основе подобных исследований Гельмгольц нашел, что при использовании одного элемента Грове суммарная продолжительность разряда равна приблизительно $1/50$ сек. Он получал частоту колебаний, в зависимости от емкости употребляемых конденсаторов от 2164 до 7300 в секунду. Результаты показали, что наряду с конденсатором и катушка имеет определенную емкость. Это обстоятельство привело Гельмгольца к попытке экспериментально доказать существование электрических колебаний и тогда, когда катушка не связана с лейденской банкой. Действительно, он мог доказать опытным путем, что "даже пустая катушка, изолированная на одном конце, соединенная на другом с землей, поочередно заряжается положительно и отрицательно, ... пока не утихнут колебания" /116, стр. 536 / . Результаты Гельмгольца, таким образом, подтвердили теорию электрических колебаний не только для разряда конденсатора, как данные Феддерсена, но и для более общего вида колебательного контура. Так Гельмгольц своей работой "Об электрических колебаниях" принял участие в создании экспериментальных предпосылок для дальнейших исследований Шиллера, Колли и других физиков, и, в конце концов, для успешных опытов Герца.

В работе "Об электрических колебаниях" Гельмгольца решены вопросы, возникшие в работе "О физиологическом действии коротко продолжающихся электрических ударов.." /115/, которые относились к экспериментальным условиям. Но в дальнейшем он уже не возвращался к физиологическим проблемам. Хотя следующий интересующий его вопрос - влияние самоиндукции на электрические колебания - еще связан с предыдущей работой, в ходе решения его Гельмгольц окончательно перешел к разработке чисто теоретических физических исследований.

При исследовании самоиндукции он прежде всего интересовался характером прохождения токов внутри проводников в начальный момент, потому что от этого должно было зависеть их физиологическое действие.

Гельмгольц ранее по другому поводу уже занимался экстра-токами. А именно, когда он уточнял метод измерения времени, учитывая воздействие индукции. Но в тот раз он имел дело с токами в замкнутых контурах, теперь же - с токами в незамкнутых контурах. Следовательно, по господствовавшим теориям дальнего действия, которые не учитывали тока смещения, он должен был предположить, что эти токи незамкнуты, т.е. что создаются накопления электричества на отдельных местах проводников, электромагнитное действие которого нужно было бы учитывать / см. I3I, стр. 10 /.

Гельмгольц искал ответ на свои вопросы в уже существующих теориях, но он должен ^{был} установить, что они дают совпадающие результаты для замкнутых токов, но расходятся для случая незамкнутых токов. Он видел в выяснении этого противоречия благодарную задачу для собственных исследований. Внешние обстоятельства также оказались благоприятными для проведения этих исследований. В 1871г. Гельмгольц после долголетней деятельности в должности профессора физиологии в Гейдельберге стал директором физического института Берлинского университета. Это ему позволило не только самому сосредоточиться на физических проблемах, но и руководить группой молодых физиков, которые могли участвовать в исследованиях, решая отдельные частные вопросы общего круга проблем. Это отвечало самым заветным желаниям Гельмгольца. Еще в 1868г., в ответ на приглашение занять должность профессора физики в Бонне, он писал: "Физика уже издавна представля-

ла собой науку, которой я интересовался в первую очередь.

К медицине и посредством нее к физиологии меня привели прежде всего внешние обстоятельства. То, что я сделал в области физиологии, в основном базируется на физической почве"/157, т.2, стр.115/.

" Итак произошло неслыханное - вспоминает Дюбуа-Реймон, - что медик и профессор физиологии получил самую ценную тогда в Германии кафедру физики. Таким образом Гельмгольц, который сам себя называл прирожденным физиком, в конце концов занял должность, которая соответствовала его специфическим способностям и его интересам. Гельмгольц, как он написал мне, в то время стал равнодушным к физиологии и по-настоящему только интересовался математической физикой" /157, т.2, стр.187/ .

Назначение Гельмгольца на должность профессора физики свидетельствует об авторитете, который Гельмгольц приобрел уже тогда среди физиков /см.157, т.2, стр.187/ . На то, что в области электродинамики он был вполне подготовлен к этой должности указывают дальнейшие его работы, которые сейчас же после их опубликования оказывали значительное влияние на дальнейшее развитие этой области. На это же указывают успехи быстро сконцентрировавшейся вокруг Гельмгольца школы молодых физиков.

3.4. Первая статья о теории электродинамики(1870)

Исследования, охарактеризованные в предыдущей главе, окончательно привели Гельмгольца к систематической разработке теории электродинамики. Дальнейшие его работы в этой области физики, начиная с предварительного сообщения " О законах непостоянных электрических токов в объемных проводниках"/117;1870,

были посвящены одной цели - выяснить сложную ситуацию в электродинамике.

"Стремясь разобраться в этой путанице - пишет Гельмгольц - я взял на себя задачу расчистить, насколько это в моих силах, область электродинамики". /I43a, стр.299/. Эти стремления Гельмгольц не раз подчеркивал в своих работах. Они проходят красной нитью через его публикации. В 1875 г. он пишет об этом:

"В моих исследованиях я преследовал цель выяснить, в какой степени те из известных теорий, которые вообще дают определенный и точный количественный отчет об электродинамических явлениях, соответствуют закону сохранения силы и в какой степени они дадут совпадающие следствия относительно наблюдаемых явлений или при каких условиях проявляются разногласия между ними. Мне именно казалось желательным найти такие случаи противоречий, при которых производимые опыты могли бы решить за или против следствий той или другой теории, чтобы таким путем получить решение о надежности той или другой теории".

/I27, стр.74 /.

В качестве первого и основного пробного камня Гельмгольц применил закон сохранения и превращения энергии к существовавшим тогда теориям электродинамики. Только те теории, результаты которых удовлетворяли бы этому принципу, могли претендовать на дальнейшую проверку.

В ходе предыдущих исследований Гельмгольц пришел к убеждению, что как раз самый распространенный тогда, по крайней мере в Германии, закон электродинамики Вебера противоречит закону сохранения энергии.

Еще в 26 мая 1857 г. Гельмгольц пишет Дюбуа-Реймону:

"Основной закон Вебера не может быть дефинитивным зако-

ном, для замкнутых проводников он совпадает с законом Неймана и с действительностью. Для незамкнутых токов он расходится с законами Неймана, которые удовлетворяют принципу сохранения силы, отсутствует, однако, опытное решение, которое, как кажется, очень трудно найти" /157, т.1, стр. 295/.

Эта маленькая заметка укрепляет наше предположение о том, что Гельмгольц постоянно следил за этими проблемами, охарактеризованными уже в работе "О сохранении силы". Однако, лишь 13 лет спустя, в 1870г. описанные физиологические исследования дали ему желанный повод подробно изложить свои взгляды. Это он сделал в уже цитированном предварительном сообщении и, прежде всего, в своей первой статье "О теории электродинамики. Об уравнениях движения электричества в неподвижных проводящих телах". /118; 1870/ .

В этих работах Гельмгольц объясняет, почему найденный им недостаток теории Вебера до этого времени не был замечен, почему ряд физиков даже успешно применяли формулу Вебера к решению частичных проблем электродинамики. Все они применяли закон Вебера к токам в замкнутых контурах. При таких условиях, однако, результаты, полученные на основании закона Вебера, совпадают с результатами других теорий.

Результаты отдельных теорий относительно пондеромоторных и электродинамических сил отличались друг от друга при применении их к токам в незамкнутых контурах, или - по тогдашней терминологии - просто для незамкнутых токов, поскольку в электродинамических теориях дальнего действия учитывались лишь электрические процессы, происходящие в проводниках.

По словам Гельмгольца, суть дела в том, что "замкнутые токи можно поддерживать какой угодно силы и сколь угодно времени, и во всяком случае достаточно долго, чтобы развитые ими силы имели бы возможность проявить свое действие. Благодаря этому фактическое действие этих токов было хорошо известно и точно установлено" /143а, стр.300/.

Что же касается явления незамкнутых токов, то здесь все строилось на предположениях. Разные гипотезы отдельных теорий приводили к разным следствиям о силе действия этих токов. Экспериментальное решение вопроса казалось трудным из-за очень короткого существования токов в незамкнутых контурах. Однако - именно эту цель поставил перед собой Гельмгольц.

В основу теоретических рассуждений Гельмгольц положил выражение потенциала двух элементов тока Ф.Неймана:

$$P = i i' \frac{\cos (ds, ds')}{r} ds ds' , \quad (3.41)$$

где ds, ds' - элементы контуров,
 i, i' - токи в этих элементах,
 (ds, ds') - угол между элементами контуров,
 r - расстояние между элементами.

Он поставил перед собой задачу установить, какой самый общий вид может иметь выражение потенциала для элементов незамкнутых токов, если предполагать, что выражение Ф.Неймана правильно для замкнутых токов.

Исходя из требования, что это выражение должно удовлетворять закону сохранения и превращения энергии и предположений, что потенциал и для незамкнутых токов пропорционален

силе токов и обратно пропорционален расстоянию между элементами токов, он получил следующее выражение потенциала:

$$P = - \frac{i i'}{2 c^2 r} \left[(1+k) \cos(ds, ds') + (1-k) \cos(rds) \cos(rds') \right] \quad (3.42)$$

где c - скорость света, и k - неизвестная еще постоянная.

Выражение потенциала, данное Гельмгольцем, содержит в себе выражения потенциала существовавших тогда теорий в зависимости от величины k . Из формулы Гельмгольца выводится выражение потенциала Ф.Неймана при постоянной $k = 1$, выражение соответствующее теории Максвелла при $k = 0$ и Вебера, при $k = -1$.

Нужно, однако, специально подчеркнуть, что Гельмгольц сравнивает отдельные теории только в рамках тех явлений, которые были охвачены теориями далекодействующих сил. В частности его здесь интересуют отдельные выражения закона индукции. Гельмгольц не учитывает те следствия теории Максвелла, которые отличают последнюю решающим образом от всех других теорий: следствия для быстропеременных электрических процессов и при воздействии диэлектриков. Только в таких пределах следует понимать произведенное Гельмгольцем сравнение отдельных существующих теорий.

Гельмгольц сам пока был сторонником Ф.Неймана. Он считал самым належащим и удобным тот вариант общего потенциала, для которого $k = 1$. То, что Гельмгольц позже понимает под "Потенциальным законом" электродинамики базируется именно на этом выражении, которое Гельмгольц применял, пока экспериментальные данные не опровергнули эти формулы. Следовательно, Гельмгольц,

хотя и учитывает теорию Максвелла в своих исследованиях, сам еще придерживается точки зрения действия на расстоянии.

На основе своего выражения потенциала Гельмгольц установил уравнения э.д.с. в неподвижных проводниках:

$$\begin{aligned} \alpha u &= -\frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial U}{\partial t} ; \\ \alpha v &= -\frac{\partial \varphi}{\partial y} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial V}{\partial t} ; \\ \alpha w &= -\frac{\partial \varphi}{\partial z} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial W}{\partial t} ; \end{aligned} \quad (3.43)$$

где u, v, w - компоненты тока,

α - удельное сопротивление,

φ - потенциал (в современном смысле),

c - скорость света,

U, V, W - компоненты потенциала Гельмгольца по осям координат.

Суммарная э.д.с. здесь складывается из э.д.с. подключенной к цепи и э.д.с. индукции.

Эти выражения соответствуют формулам, выведенным Г.Кирхгофом на основе закона Вебера в работе "О движении электричества в проводниках" (1857), когда в выражении потенциала Гельмгольца $k = -I / \dots$ /см.154; мтр.155 /.

$$I / U \text{ Кирхгофа} \quad u = -2k \left[\frac{\partial \Omega}{\partial x} + \frac{4}{c^2} \frac{\partial U}{\partial t} \right],$$

где k - коэф.проводимости, Ω - потенциал (в нынешнем смысле). Нужно учитывать, что величины Гельмгольца:

$$\text{соответствуют} \quad \frac{\alpha}{2k}, \quad \frac{\varphi}{2}, \quad \frac{c^2}{c^2} \quad \text{Кирхгофа.}$$

Выражения Максвелла для неподвижной цепи имеют вид:

$$\begin{aligned} P &= - \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{\partial F}{\partial t} ; \\ Q &= - \frac{\partial \varphi}{\partial y} - \frac{\partial G}{\partial t} ; \\ R &= - \frac{\partial \varphi}{\partial z} - \frac{\partial H}{\partial t} ; \end{aligned} \quad (3.44)$$

где P, Q, R — компоненты э.д.с.,

φ — потенциал,

F, G, H — компоненты магнитного потока, пронизывающего контур (У Максвелла: электромагнитное количество движения)

Таким образом, в формуле Максвелла, индуктированная в контуре э.д.с. выражается через изменение магнитного поля. В формулах Гельмгольца, который не учитывает здесь существование поля и основывается на принципе дальнего действия, индуктированная э.д.с. выражается изменением потенциала. А потенциал Гельмгольца — это выражение энергии, соответствующее индуктированному току. Поскольку эквивалент энергии индукционного тока нужно искать в изменении магнитного поля, мы можем сказать, что по-существу Максвелл характеризует индуктированную э.д.с. изменением магнитного поля, а Гельмгольц соответственным изменением энергии системы элементов электрических токов. Поэтому, когда Гельмгольц говорит о соответствующем его потенциалу выражений Максвелла, находящемся только в скрытом виде в работе последнего, то он должен иметь в виду "электромагнитное количество движения" (F, G, H) Максвелла, магнитный поток.

На основе вышеприведенного выражения для э.д.с. в неподвижном проводнике Гельмгольц установил следующую систему

уравнений:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} P &= -k \frac{\partial \varphi}{\partial t} ; \\ \Delta P - (1 - k) \operatorname{grad} \frac{\partial \varphi}{\partial t} &= 4\pi j ; \\ \Delta \varphi &= -4\pi \rho ; \end{aligned} \quad (3.45)$$

где φ - потенциал,
 ρ - плотность заряда,
 P - потенциал Гельмгольца,
 j - плотность тока,
 k - введенная Гельмгольцем постоянная.

Для квазистационарных токов, в том случае, когда зависимость от времени можно пренебречь, мы для $k = 1$, так и для $k = 0$ получаем систему уравнений:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} P &= 0 ; \\ \Delta P &= 4\pi j ; \\ \Delta \varphi &= -4\pi \rho ; \end{aligned} \quad (3.46)$$

что соответствует уравнениям для квазистационарных процессов по теории Максвелла.

В ходе дальнейших исследований Гельмгольц стремился выявить те случаи, при которых было бы возможным ожидать практического влияния постоянной k и таким образом выяснить, с помощью каких экспериментов можно найти верную постоянную k . Попытка однако не увенчалась успехом.

Его исследования скорости распространения электричества вдоль проводника показали, что постоянная k только в очень незначи-

тельной мере влияет на результаты. Гельмгольц не нашел возможности экспериментально определить постоянную k . Оказалось, что те вопросы, которые в теории оставались открытыми пока и не могли быть решены опытом. Тем не менее исследование Гельмгольца для современников — физиков было интересно тем, что оно подробно анализировало ситуацию в области электродинамики.

Максвелл в своей статье "Герман Людвиг Фердинанд Гельмгольц"/48/, написанной в 1877г., дал следующую характеристику этой работе.

"Он /Гельмгольц — Г.Б./ приводит в удобопонятную и систематическую форму сложные и запутанные исследования нескольких независимо работавших теоретиков для того, чтобы сравнить их друг с другом и с опытом" /48, стр. 183/.

Это, между прочим, единственное конкретное высказывание Максвелла о собственных электродинамических исследованиях Гельмгольца, которое я могла найти в работах Максвелла. В своем "Трактате об электричестве и магнетизме" он рассматривает исследования Гельмгольца, ограничиваясь проблемами, связанными с законом сохранения энергии.

На этом, однако, работа Гельмгольца "Об уравнениях движения электричества в неподвижных проводящих телах" не закончилась.

В конце статьи, в восьмой главе, как будто бы дополнительно, Гельмгольц делает попытку учесть в своих исследованиях также влияние промежуточной среды на электрические процессы.

Существование такого воздействия показал уже Фарадей бесспорными экспериментами. Гельмгольц уделял его исследованиям

очень большое внимание. Это можно заключить уже из того факта, что он перевел работу Джона Тиндаля "Фарадей и его открытия" в 1870г. на немецкий язык. /119/. В предисловии к этой работе Гельмгольц указывает на значение совершенно новых идей Фарадея о реальном существовании поля для дальнейшего развития электродинамики. Он подчеркивает, что после открытия Фарадемом воздействия диэлектрика на электрические процессы старые представления о существовании исключительно далекодействующих сил не могут остаться без значительных расширений и изменений^{1/}.

"После этих открытий (Фарадея Г.Б.) - писал Гельмгольц в 1891 г. - уже нельзя было отрицать того, что часть магнитного и электрического действия на расстоянии осуществляется при посредстве промежуточной поляризованной среды; но могла все же еще оставаться и другая часть, которая бы обуславливалась силой, непосредственно действующей на расстоянии... Я сам хорошо понял то, что вытекает из этих фактов, установленных Фарадемом, и прежде всего исследовал вопрос, существуют ли вообще силы, действующие на расстоянии, и, следовательно, должны ли они быть приняты во внимание. Мне казалось, что в такой запутанной области сомнение соответствует научной осторожности и может привести к решающим опытам."/143а, стр.302-303/.

Если учесть эти слова Гельмгольца, то восьмая глава первой статьи о теории электродинамики превращается из добавления в истинную цель работы. А "научная осторожность" Гельмгольца определила позицию его в этом исследовании: он учитывал близкодействие, поскольку оно было подтверждено опытом и не покинул позицию далекодействия, поскольку оно еще не было опровергнуто экспериментами.

1/ В новое издание (Мюнхен, 1948) предисловие Гельмгольца не включено.

Эта осторожность характерна для всей научной деятельности Гельмгольца. И.Крис в своей статье "Гельмгольц как физиолог" /158/ описывает ее следующими словами: "Он /Гельмгольц - Г.Б./ считал бы правильным для разумного научного исследования, употреблять.. / новое ^{I/} - Г.Б./ предположение только тогда, когда факты прямо заставляют его, но отказываться от него, как только это окажется возможным. Этот принцип, исходить прежде всего из простых по возможности предпосылок, и смотреть "как далеко можно идти с ними", мы не раз встречаем в исследовании Гельмгольца.. Этот принцип, однако,... без сомнения содержит в себе некоторую опасность, допускать новые или измененные предположения только тогда, когда факты неопровержимо принуждают к этому, но отказываться от них с некоторым упорством и тогда, когда очень большая причинная вероятность говорит за них.." /158, стр.675/.

Эти слова можно целиком отнести к электродинамическим исследованиям Гельмгольца. Они объясняют кажущиеся противоречия его позиций в этой отрасли физики.

В первой статье о теории электродинамики Гельмгольца обосновал уход от привычной почвы чистого дальнего действия следующими словами.

"В первых... параграфах электростатические и электродинамические действия были трактованы как чистые действия на расстоянии, которые не воздействуют на изолирующие среды и которые сами не зависят от них. Это было, по крайней мере до сих пор, самым распространенным способом рассмотрения большинства физиков - теоретиков хотя бы на континенте.

I/ Эта цитата Криса относится к взглядам Гельмгольца о сущности разных видов энергии.

Теперь благодаря открытиям Фарадея мы знаем, что большинство сред можно намагничивать и что бывает состояние диэлектрической поляризации, похоже на магнитную поляризацию...

Однако теория Фарадея, которой Максвелл.. дал математическое выражение, идет дальше, совсем отрицая силы, действующие на расстоянии, и заменяя их непрерывными действиями поляризуемой среды...

Из теории Максвелла получается удивительный результат, что электрические возмущения распространяются в диэлектрике в виде поперечных волн, скорость распространения которых в воздушном пространстве соответствует величине $1/A$, а значит скорости света.

Так как этот результат мог бы иметь огромное значение для дальнейшего развития физики и так как вопрос о скорости распространения электрических действий не раз поднимался в настоящее время, мне представлялось важным добавочно исследовать, какие результаты даст закон индукции, обобщенный для случая существования среды способной к намагничиванию и к диэлектрической поляризации." /II8, стр.556-57 /.

При учете влияния диэлектрика на электрические процессы Гельмгольц исходит из теории магнитной поляризации Пуассона, принимая его взгляды на диэлектрическую поляризацию. При этом Гельмгольц подчеркивает существенную разницу между представлениями Пуассона и Максвелла о поляризации: в то время как в теории Максвелла поляризация среды полностью заменяет дальное действие, в теории Пуассона поляризация существует наряду с дальним действием, причем она уменьшает последнее. Последняя точка зрения повторяется в электродинамической теории Гельмгольца.

Г.Герц, который в своем введении к книге "Исследование распространения электрической силы /148 / рассматривает разные теории дальнего действия и ближнего действия излагает, что по теории Гельмгольца...". Действие удаленного тела определяется не одними лишь непосредственными дальнедействующими силами. Напротив, в пространстве, которое мыслится всюду заполненным, силы вызывают такие изменения, которые со своей стороны вызывают новые дальнедействующие силы. Притяжение разделенных средой тел основывается тогда частично на непосредственном действии этих тел на расстоянии, частично же на влиянии измененной среды" /148а; стр.25 /. Данные там же, рисунки наглядно иллюстрируют разницу между взглядами Гельмгольца и Максвелла.

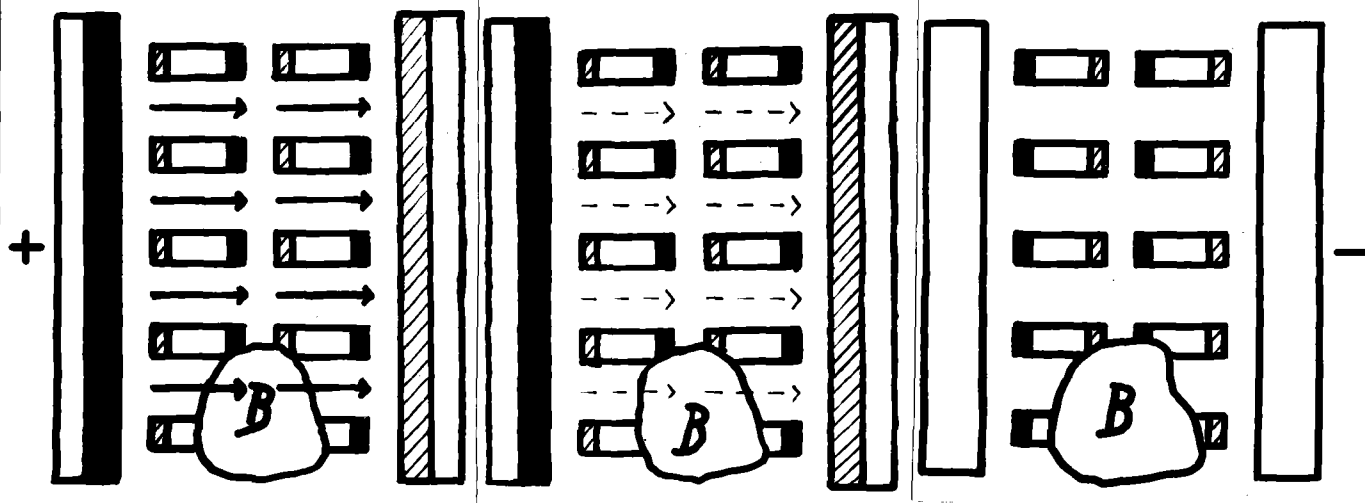
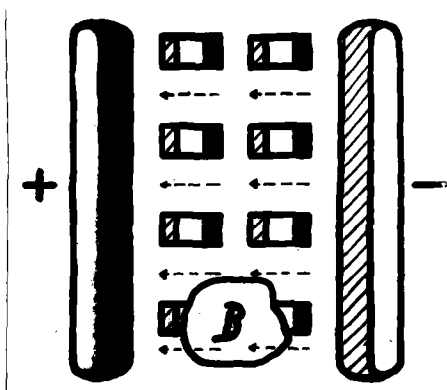


Рис.3

Рис.4^{I/}

Рис.5

I/ В книге П.С.Кудрявцева "История физики" /37; т.2, стр.209/ рисунок 97 не соответствует изложению Герца. Кудрявцев этот рисунок в измененном виде объясняет как "смещение зарядов в теории Максвелла". Но ни направление поляризации, ни су-



ществование далекодействующих сил (а ни что иное представляют собой нарисованные стрелки) не совместимо с теорией Максвелла. С другой стороны направление далекодействующих сил не соответствует теории Гельмгольца.

Рис.97

На рис.3 представлена схема электрического взаимодействия складывающегося по теории Гельмгольца из сил дальнего действия и поляризации. "Если мы представим себе - объясняет Герц - что пространство между пластинками содержит лишь световой эфир и сделаем в нем полость... В -/ Объем В мыслится свободным от светового эфира - Г.Б/ - , то силы в этой полости сохраняются, но поляризация исчезает" / 148а, стр. 127/.

Рис.4 изображает предельный случай, когда энергия, находящаяся в среде, очень велика по сравнению с энергией действующих сил. Здесь, продолжает Герц, "дальнедействующие силы сведены до уровня чистой схемы. Электричество в проводниках еще налицо и оно необходимо в этом представлении, но в своих действиях на расстоянии оно полностью нейтрализуется смещенным к нему противоположным электричеством среды" /148а, стр.128/ При этом предельном случае, фактически и по теории Гельмгольца, все электрические процессы можно описывать только изменением среды, как это показывает рис.5 для теории Максвелла. Только направления поляризации противоположны друг другу. Но "в теории Максвелла - объясняет Герц - мы рассматриваем эту поляризацию как единственно существующую в действительности". /148а, стр. 128/. По теории Гельмгольца, однако, силы дальнего действия представляют собой первичные силы, вызывающие поляризацию. Поэтому "невозможно в одно и то же время отрицать существование сил, действующих на расстоянии, и рассматривать их как причину поляризации"/148а, стр.128/. Таким образом, в предельном случае ,когда математические результаты теории Гельмгольца совпадают с результатами теории Максвелла "основы этой теории, к сожалению утрачиваются, как они вообще утраиваются, как только хотят отказаться от дальнедействующих сил" / 148а , стр. 125/.

Соответственно гипотетической основе своей теории Гельмгольц в своих исследованиях воздействия диэлектрика на электрические процессы исходит из выражения электрического момента:

$$\begin{aligned} p &= \chi \left[-\frac{\partial \psi}{\partial x} - \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right]; \\ \eta &= \chi \left[-\frac{\partial \psi}{\partial y} - \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right]; \\ z &= \chi \left[-\frac{\partial \psi}{\partial z} - \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right]; \end{aligned} \quad (3.47)$$

где p, η, z - компоненты электрического момента,
 χ - электрическая восприимчивость,
 ψ - электрический потенциал, который относится к источникам тока и к индукционным токам,
 φ - электрический потенциал, который относится к действию поляризации.

Электрический момент с компонентами (p, η, z) определяет поляризацию в каждом элементе объема диэлектрика. Он соответствует вектору электрической индукции (f, g, h) в теории Максвелла. Таким образом выражение (3.47) соответствует следующим формулам, полученным Максвеллом:

$$\begin{aligned} P &= k f ; \\ Q &= k g ; \\ R &= k h ; \end{aligned} \quad (3.48)$$

/ см. 45, стр.296 /,

где $k = \frac{4\pi}{\chi}$; I/ χ - электрическая восприимчивость,
P, Q, R - компоненты вектора напряженности электрического поля.
Или, в современном виде, выражению

$$D = (1 + 4\pi\chi) E .$$

Компоненте вектора электрической напряженности E по оси X, (P),
в теории Гельмгольца соответствует сумма

$$\left[-\frac{\partial\psi}{\partial x} - \frac{\partial\varphi}{\partial x} \right] ,$$

т.е. E складывается из градиентов двух потенциалов, выражающих
дальнодействующие и близкодействующие силы.

С помощью уравнения

$$-\frac{\partial\psi}{\partial x} - \frac{\partial\eta}{\partial y} - \frac{\partial z}{\partial z} = -\frac{1}{4\pi} \Delta\varphi ,$$

которое соединяет в себе два выражения плотности заряда и предпола-
гая, что χ в данном диэлектрике постоянно, Гельмгольц получает
формулу плотности электричества для суммы потенциалов

$$-\frac{1}{4\pi} \Delta(\psi + \varphi) = \frac{1}{(1+4\pi\chi)} \rho , \quad (3.49)$$

где ρ - плотность заряда.

Сумма потенциалов ($\psi + \varphi$) в диэлектрике следовательно соответ-
ствует плотности, которая в ϵ раз ниже, чем в вакууме. Гельмгольц
объясняет этот факт тем, что часть электричества нейтрализуется
диэлектрической поляризацией. Из этого он заключает, что сила, кото-
рую другие электрические массы оказывают на заряд E

I/ Л.Больцман в своей работе "Лекции о теории электричества и света
Максвелла"/93,1893/ определил постоянную Максвелла $k = 4\pi/\epsilon$
Гельмгольца, причем ϵ Гельмгольца - электрическая восприимчивость
Определение $k = \frac{4\pi}{1+4\pi\chi} = \frac{4\pi}{\epsilon}$ выражает современную теорию электро-
динамики, но в оригинальной теории Максвелла не имеет смысла, пос-
кольку при $\chi = 0$ нет электрических процессов. Эфир как носитель
всех электрических процессов представляет собой поляризуемую
среду.

должна иметь такую величину, как если бы не существовало нейтрализованной части электричества. Следовательно потенциал точечной электрической массы E_1 равняется

$$\frac{E_1}{(1 + 4\pi\chi) r},$$

а сила, действующая между E и E_1 :

$$R = \frac{E E_1}{(1 + 4\pi\chi) r^2} \quad (3.4.10)$$

Эту формулу П.А.Зилов позже подтвердил экспериментальным путем, определив на ее основе диэлектрическую постоянную нескольких жидкостей (см. гл. 4.3).

Эти выводы Гельмгольца, относящиеся пока еще только к электростатике, соответствует следствиям теории Максвелла. У Максвелла эта формула имеет вид (см. 45, стр.307):

$$R = \frac{E E_1}{\chi r^2}.$$

При $\chi = 0$ в теории Гельмгольца остаются лишь далекодействующие силы, По оригинальной теории Максвелла такое выражение не имеет физического смысла, поскольку все электрические процессы объясняются поляризацией среды "Оба воззрения сходятся, - пишет Шиллер - однако в том существенном пункте, что в разных средах взаимодействия разные. Существование такого общего пункта и обуславливает возможность тождественности результатов..." (83, стр.3).

Физики, которые в дальнейшем занимались исследованием свойств диэлектриков, основывали свои работы и на трудах Максвелла и на работах Гельмгольца. Л.Больцман в этом смысле даже говорит о "Теории Максвелла-Гельмгольца"(87, стр.413)

Непосредственное влияние Гельмгольца на исследование диэлектриков будет рассмотрено в главе 4.2 и 4.3 этой диссертации.

В дальнейшем Гельмгольц переходит к определению влияния диэлектрика при движении электрических зарядов. Здесь суммарный ток складывается из тока проводимости и изменения поляризации во времени, которое по Гельмгольцу как и по Максвеллу представляет токи в диэлектрике:

$$u = \frac{d\epsilon}{dt} + u_2, \quad (3.4.II)$$

где u — компонент суммарного тока,

u_2 — компонент тока проводимости,

ϵ — компонент вектора электрической индукции.

Учитывая, что $\epsilon = \chi E$ мы эту формулу можем переписать:

$$u = \chi \frac{dE}{dt} + u_2,$$

а это совпадает с определением полного тока у Максвелла:

$$j_{\text{полн.}} = \frac{\chi}{4\pi} \frac{dE}{dt} + j$$

и соответствует современной формуле

$$j_{\text{полн.}} = (1 + 4\pi\chi) \frac{dE}{dt}.$$

В неполяризуемой пустоте ($\chi = 0$) по Гельмгольцу нет тока смещения. Гельмгольц в этой теории как и Максвелл предполагает существование поляризуемого эфира, пронизывающего все пространство. В чистом эфире, следовательно, электрическая восприимчивость $\chi_0 \neq 0$, т.е. ток смещения существует. неполяризуемая

пустота ($\chi = 0$) в этой теории имеет только гипотетический характер. Она мыслится не существующей в действительности. Неполаризуемую пустоту можно считать реальной только при предположении, что существуют исключительно далекодействующие силы.

Этот результат не совпадает с мнением П.С.Кудрявцева в книге "История физики", что "Теория Гельмгольца отличается от теории Максвелла тем, что не рассматривает тока смещения в чистом эфире.." /37, т.2, стр.207/. Здесь очевидно, непolarизуемая пустота Гельмгольца не отличается от вакуума Максвелла, заполненного поляризуемым эфиром. Для первого и по теории Гельмгольца и по оригинальной теории Максвелла не существует тока смещения. Для второго в обеих теориях ток смещения имеет место. Сравнение выражения Гельмгольца с современной формулой без учета разницы гипотетических основ автор считает недопустимым. Такой подход не позволяет правильно изложить роль теории Гельмгольца в развитии электродинамики.

В результате своих исследований Гельмгольц получает систему формул следующего вида:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{z}{\chi} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{y}{\chi} \right) = \frac{(1 + 4\pi\chi_m)}{c \chi_m} \frac{\partial \lambda}{\partial t} ; \quad (3.4.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p}{\chi} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q}{\chi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{z}{\chi} \right) = - \Delta \varphi + \frac{1}{c^2} k \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} ; \quad (3.4.13)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v}{\chi_m} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{x}{\chi_m} \right) = \frac{1}{c} \left[\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial t} - 4\pi \frac{\partial p}{\partial t} + 4\pi u_2 \right] ; \quad (3.4.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda}{\chi_m} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{x}{\chi_m} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v}{\chi_m} \right) = 0 ; \quad (3.4.15)$$

где названия Гельмгольца-соответствуют :

- ϵ, η, ζ - D вектор электрической индукции
 χ электрическая восприимчивость,
- u, v, w - $j_{\text{полн}}$ плотность полного тока,
 u_2, v_2, w_2 - j ток проводимости,
 λ, κ, ν - B вектор магнитной индукции,
- $(1 + 4\pi\chi_m) = \mu$ магнитная проницаемость,
 χ_m магнитная восприимчивость,
 c скорость света.

Первой формуле (3.4.12)

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\zeta}{\chi} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\eta}{\chi} \right) = \frac{(1 + 4\pi\chi_m)}{c \chi_m} \frac{\partial \lambda}{\partial t}$$

можно придать следующий вид, учитывая, что ϵ, η, ζ соответствуют χE , а λ, κ, ν - $\chi_m H$:

$$\text{rot } E = \frac{1}{c} \frac{dH}{dt},$$

что полностью совпадает с соответствующим выражением теории Максвелла.

Вторая формула (3.4.13)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\epsilon}{\chi} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\eta}{\chi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\zeta}{\chi} \right) = -\Delta \varphi + \frac{1}{c^2} k \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2},$$

это единственное уравнение системы, в котором имеется неопределенная постоянная k из общего выражения потенциала Гельмгольца.

Для нее мы можем написать:

$$\operatorname{div} E = -\Delta\varphi + \frac{1}{c^2} k \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}$$

Поскольку здесь приравниваются два выражения плотности заряда, мы получим:

$$2 \text{ а) } \quad \operatorname{div} E = 4\pi\rho ,$$

$$2 \text{ в) } \quad \Delta\varphi - \frac{1}{c^2} k \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -4\pi\rho .$$

При $k = 1$ (2в) дает

$$\Delta\varphi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -4\pi\rho ,$$

а при $k = 0$

$$\Delta\varphi = -4\pi\rho .$$

Оба выражения представляют собой равноценные уравнения, относящиеся только к разным определениям величины дивергенции вектора - потенциала. Постоянная k , следовательно, здесь не играет существенной роли.

Третью формулу (3.4.14)

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v}{\chi_m} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{x}{\chi_m} \right) = \frac{1}{c} \left[\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial t} - 4\pi \frac{\partial k}{\partial t} - 4\pi u_2 \right]$$

можно написать следующим образом:

$$\operatorname{rot} H = \frac{1}{c} \operatorname{grad} \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \frac{4\pi x}{c} \frac{\partial E}{\partial t} - \frac{4\pi}{c} j .$$

Четвертая формула (3.4.15)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda}{\chi_m} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\kappa}{\chi_m} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu}{\chi_m} \right) = 0 ,$$

очевидно, соответствует выражению

$$\operatorname{div} \mathbf{H} = 0 .$$

Для облегчения ориентировки приводится сводная таблица полученных результатов. (см. следующую страницу)

Из этой таблицы видно, что гипотетическая позиция Гельмгольца нашла свое математическое выражение только в третьей формуле. Формулы теории Максвелла здесь для упрощения даны в современном виде. В оригинале /45,46/, например, Максвелл третью формулу дает только для замкнутых токов:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = 4 \pi \mathbf{j} .$$

Из этой системы уравнений Гельмгольц выводит уравнения электрического и магнитного момента.

Формулы магнитного момента имеют вид:

$$\begin{aligned} \Delta \lambda - 4 \pi \chi (1 + 4 \pi \chi_m) \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \lambda}{\partial t^2} &= 0 ; \\ \Delta \kappa - 4 \pi \chi (1 + 4 \pi \chi_m) \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \kappa}{\partial t^2} &= 0 ; \\ \Delta \nu - 4 \pi \chi (1 + 4 \pi \chi_m) \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \nu}{\partial t^2} &= 0 ; \end{aligned} \quad (3.4.16)$$

$$\frac{\partial \lambda}{\partial x} + \frac{\partial \kappa}{\partial y} + \frac{\partial \nu}{\partial z} = 0 .$$

Формулы, найденные Гельмгольцем на основе чистого дальнего действия	Формулы, найденные Гельмгольцем на основе поляризации диэлектрика	Формулы по теории Максвелла	Формулы по теории Максвелла в современном виде.
---	---	-----------------------------	---

$$\text{rot } E = \frac{1}{c} \mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad \text{rot } E = \frac{1}{c} \mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad \text{rot } E = \frac{1}{c} \mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

$$\Delta \varphi = -4\pi \rho \quad \text{div } E = 4\pi \rho \quad \text{div } E = 4\pi \rho \quad (2)$$

$$\Delta P - (1-k) \text{grad } \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 4\pi j \quad \text{rot } H = \frac{1}{c} \text{grad } \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \frac{4\pi \chi}{c} \frac{\partial E}{\partial t} - 4\pi j \quad \text{rot } H = \frac{\chi}{c} \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{4\pi j}{c} + \frac{4\pi j}{c} \quad (3)$$

$$\text{div } P = -k \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad \text{div } H = 0 \quad \text{div } H = 0 \quad \text{div } H = 0 \quad (4)$$

Формулы для квазистационарных процессов во всех четырех вариантах совпадают.

Эти уравнения дают лишь поперечные магнитные волны, распространяющиеся с той же скоростью как электрические волны и перпендикулярно к последним.

Уравнения электрического момента сложнее:

$$\Delta \phi = 4\pi\chi(1 + 4\pi\chi_m) \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (3.4.17.)$$

$$+ \left[1 - \frac{(1 + 4\pi\chi_m)(1 + 4\pi\chi)}{k} \right] \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \zeta}{\partial z} \right],$$

соответственные уравнения существуют для $\Delta \eta, \Delta \zeta$.

Здесь только при $\text{div } E = 0$ мы получаем лишь поперечные волны. В другом случае появляются и продольные волны, зависящие от постоянной k Гельмгольца.

Д.А.Гольдгаммер позже в своей работе "Электромагнитная теория света" / 5; см.гл.4.5 данной диссертации/, вывел волновое уравнение Гельмгольца не для электрического момента, а для потенциала Гельмгольца. При условии $\text{div } E = 0$ он получил следующие уравнения:

$$\Delta U - \frac{\mu 4\pi\chi}{v_0^2 (1 + 4\pi\chi_0)} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0 ;$$

$$\Delta V - \frac{\mu 4\pi\chi}{v_0^2 (1 + 4\pi\chi_0)} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = 0 ; \quad (3.4.18.)$$

$$\Delta W - \frac{\mu 4\pi\chi}{v_0^2 (1 + 4\pi\chi_0)} \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = 0 ;$$

Разница между теориями дальнего действия и частичного ближнего действия Гельмгольца прежде всего выявляется в независимости

потенциала — потенциала Р Гельмгольца от времени по первой теории. Г. Герц в своей статье "Об отношениях между основными уравнениями электродинамики Максвелла и основными уравнениями электродинамики их противников" /1884; 8/ указывает на этот недостаток всех теорий дальнего действия. Он, на основе принятых в теориях дальнего действия представлений, показывает, что можно получить формулы Максвелла, если от времени зависят только U, V, W , как компоненты потенциала, и они имеют вид:

$$U = u_1 - \frac{1}{4\pi c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} u_2 + \frac{1}{16\pi^2 c^4} \frac{\partial^4}{\partial t^4} u_3 - \dots,$$

где u_1 — представляет ту величину потенциала, которую учитывали лишь в теориях дальнего действия.

Формула $\Delta U = -4\pi u$

тогда примет вид:

$$\Delta U = -4\pi u + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} u_1 - \dots$$

и $\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} u_1 - \dots$

Вычитая второе из первого, мы получаем:

$$\Delta U - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -4\pi u.$$

Таким образом, потенциал представляет собой величину, распространяющуюся не мгновенно, а с конечной скоростью, т.е. со скоростью света.

Герц показал, что теории дальнего действия не удовлетворяют общепринятому принципу, что существует только один вид

магнитной силы, независимо от того, производит ли ее ток или магнит в случае, когда сила тока не постоянна. Свой результат он получил с помощью поправки, которая дополнительно к магнитному действию постоянных токов учитывала действие при изменении силы тока.

В заключение Герц делал вывод, что теории дальнего действия очевидно неполны. Когда он, однако, хотел пополнить системы уравнений, то приближался к теории Максвелла, отличающейся от этих уравнений лишь своими сложными и неудобными выражениями.

Изложение Герца хорошо выявляет степень приближения результатов теории дальнего действия к теории Максвелла.

"Для действий неподвижного или медленно движущегося электричества... такая гипотеза, которая предполагает поляризуемость.. заполняющего все пространство эфира, приводит к таким же результатам, как гипотеза, которая предполагает пространство, абсолютно бездействующим" /II8; стр.556/.

В теории Гельмгольца, учитывающей поляризацию, при условии $\chi \neq 0$ существует такая же зависимость потенциала от времени как и в теории Максвелла. В вакууме однако, т.е. при

$\chi = 0$, электрические процессы ограничиваются дальнедействующими силами, распространяющимися с бесконечно большой скоростью.

Исследования, произведенные Гельмгольцем в восьмой главе первой статьи по теории электродинамики, дали следующие результаты: /см.II8; стр.557-558/ .

I. Соответственно представлениям Гельмгольца о действии дальнедействующих и близкодействующих сил в диэлектрических изоляторах электрические действия могут распространяться поперечными и продольными волнами.

2. Скорость распространения поперечных волн в воздухе (или в эфирном пространстве) тем ниже, чем выше предполагается способность его к диэлектрической поляризации. Электрические поперечные волны по теории Гельмгольца распространяются со скоростью

$$v_{\text{эфир}} = \frac{c_{\text{вакуум}}}{\sqrt{4\pi\chi_0}} \quad \text{при } \mu = 1,$$

где c - скорость света.

Или, поскольку по теории Гельмгольца

$$c_{\text{вакуум}} = c_{\text{эфир}} \sqrt{1 + 4\pi\chi_0},$$

$$v_{\text{эфир}} = c_{\text{эфир}} \sqrt{\frac{1 + 4\pi\chi_0}{4\pi\chi_0}},$$

в то время, как у Максвелла

$$v_{\text{эфир}} = c_{\text{эфир}}.$$

К этому результату Максвелла Гельмгольц приближается при $\chi_0 \gg 1$.

При $\chi = 0$ величина v бесконечно большая.

3. Скорость продольных волн в эфире или в воздушном пространстве равна

$$v = c_{\text{эфир}} \frac{(1 + 4\pi\chi_0)}{\sqrt{4\pi\chi_0 k}}.$$

При $k = 0$ скорость распространения продольных волн будет бесконечно большой, т.е. при предположении действия лишь промежуточной среды, они не существуют. Это соответствует теории Максвелла

4. Скорость распространения поперечных волн в изоляторах тем меньше, чем больше соответствующая диэлектрическая постоянная превосходит диэлектрическую постоянную эфира (или воздуха). Так

$$v_{\text{диэлектрик}} = c_{\text{эфир}} \sqrt{\frac{(1 + 4\pi\chi_0)'}{4\pi\chi}}$$

или

$$v_{\text{диэлектрик}} = \frac{c_{\text{вакуум}}}{\sqrt{4\pi\chi}}$$

Максвелл в своей работе "Динамическая теория электромагнитного поля" / 45; 1864/ дает для этой величины следующую формулу:

$$v = c_{\text{эфир}} \sqrt{\frac{k}{4\pi}} ,$$

или при $k = \frac{4\pi}{\chi}$:

$$v = \frac{c_{\text{эфир}}}{\sqrt{\chi}}$$

Из этих формул хорошо видна разница между основными представлениями Гельмгольца и Максвелла.

Гельмгольц в своих исследованиях сравнивает электрические процессы в диэлектрике с процессами в неполяризуемой пустоте, Максвелл, однако, с процессами в эфире. При допущении, что поляризуемый эфир пронизывает все пространство, пустота Гельмгольца должна иметь лишь гипотетический характер, недоступный экспериментальным исследованиям. Гельмгольц поэтому и ввел в свои рассуждения вместо

$$c_{\text{вакуум}} = c_{\text{эфир}} \sqrt{1 + 4\pi\chi_0}$$

и таким образом практически также выбрал эфир в качестве стандартной среды. Незвестной и недоступной опытам, однако, осталась величина χ . - диэлектрическая восприимчивость эфира относительно к пустоте.

5. Когда изолятор, в котором распространяются поперечные электрические волны, магнитно поляризуем, тогда появляются магнитные поперечные волны, перпендикулярно к электрическим волнам. Магнитные поперечные волны распространяются с той же самой скоростью как и электрические.

Гельмгольц в конце своих исследований пришел к заключению - "что удивительная аналогия между движением электричества и движением светового эфира не зависит от особенностей гипотез Максвелла и получается точно также, если придерживаться и более старых мнений об электрических действиях на расстоянии" /118; стр. 558 /. Эти выводы Гельмгольца снова указывает на цель его исследования. Он не хотел установить еще одну новую теорию. Он хотел проверить исключают ли результаты, найденные Максвеллом, предложение существования далекодействующих сил или нет. Гельмгольц отрицательно ответил на этот вопрос. Он на своей гипотетической основе также пришел к электрическим процессам, отличающим теорию Максвелла от всех теорий далекодействующих сил. По теории Гельмгольца существуют ток смещения в эфире и электромагнитные волны. Гельмгольц в своей работе не употребляет слово "поле", но величины, лежащие в основе его теории соответствуют выражениям векторов электрической и магнитной напряженности. Они только, в отличии от теории Максвелла, складываются из градиентов двух потенциалов разного гипотетического происхождения.

При предположении, что $\chi_0, \chi_{m0} \rightarrow \infty$, т.е. в предельном случае, когда фактически вся энергия системы сосредоточена в диэлектрике, а дальнедействующие силы фактически уже не существуют, теория Гельмгольца дает результаты, совпадающие с результатами теории Максвелла /см. глава 4.5/. В этом случае, однако, как мы видели, гипотетическая основа Гельмгольца теряет свой физический смысл. Дальнейшее применение теории Гельмгольца, прежде всего для объяснения оптических явлений на основе электромагнитной теории света, дали правильные результаты именно в этом предельном случае /см. гл. 4.5/. Таким образом, результаты теории Гельмгольца, в конечном счете, сами опровергли гипотезу Гельмгольца.

«... не та теория наилучшая — пишет М. Планк — которая наиболее общая. Напротив, чем специальнее теория, чем более определенные ответы дает она на все касающиеся ее вопросы, тем лучше она разрешает свою задачу. Последняя заключается в том, чтобы дать... однозначное... предсказание ожидаемых явлений...» /51; стр. 10/ В этом и заключается решающее преимущество теории Максвелла. Она могла дать такие предсказания. Гельмгольц уже опирался на них при разработке своей теории. Нельзя поэтому сравнивать научную ценность обеих теорий.

Тем не менее теория электродинамики Гельмгольца в свое время сразу привлекла внимание физиков. Она позволила ученым принимать новые взгляды Максвелла, еще неокончательно покидая привычную позицию. Она позволяла ориентироваться в этой области без необходимости преждевременно выбрать определенную позицию. Она дала возможность, в любое время переходить на позицию Максвелла, а также возвращаться на более общую почву, когда

представления Максвелла казались еще не доступными пониманию.

Из теории Гельмгольца, как известно, и исходил Г. Герц. Он особенно подчеркнул этот факт во введении "Исследования распространения электрической силы" /148/

"При величайшем восхищении математическими соотношениями в теории Максвелла я по отношению к физическому смыслу его утверждений не всегда был полностью уверен, что угадываю его действительное мнение. Поэтому и в своих опытах я не мог позволить себе руководствоваться прямо книгой Максвелла, а руководствовался работами Гельмгольца.." /148а, стр. 125/.

Герц опирался на точку зрения Гельмгольца, хотя он хорошо понимал ее недостатки: "для особого предельного случая теории Гельмгольца - пишет он - , который приводит к уравнениям Максвелла и к которому приводят мои опыты, физические основы этой теории, к сожалению утрачиваются, как они вообще утрачиваются, как только хотят отказаться от далекодействующих сил" /148а; стр. 125/.

"Невозможно в одно и то же время отрицать существование сил, действующих на расстоянии, и рассматривать их как причину поляризации". /148а; стр. 128/.

Герц, очевидно, исходил из позиции Гельмгольца, потому, что в начале не мог охватить все подробности совершенно новой, по сравнению с привычными тогда взглядами резко отличной теории Максвелла.

Подобное замечание сделал и Д.А. Гольдгаммер в своей работе "Электромагнитная теория света" еще в 1891г. / см. гл. 4.5 данной диссертации/.

Можно сделать вывод о том, что теория Гельмгольца играла роль некоторой вспомогательной переходной ступени, которая позволила физикам принять позиции теории Максвелла, настолько противоположной привычным взглядам, что было бы трудно или просто невозможно постичь ее без всякого переходного звена.

Вскоре после этих теоретических исследований Гельмгольц обратился к экспериментальной проверке найденных результатов. Непосредственным поводом для этого была публикация П.Блазерна (1870). В ней утверждалось, что скорость распространения электрических действий при индукции не очень велика. Через воздух она равна 550 м/сек, а через другие диэлектрики еще меньше. Эти результаты, очевидно, противоречили всем существовавшим тогда теориям.

Предпосылки для повторения опытов Блазерна у Гельмгольца были весьма благоприятными. Он уже в своих предыдущих экспериментальных работах развил метод и создал устройства для измерения очень малых промежутков времени и для наблюдения индукционных токов.

Произведенные опыты по существу соответствовали опытам для определения частоты колебательного разряда конденсатора. Конечная скорость распространения электродинамических действий должна обнаруживаться перемещением нулевых точек колебания индукционного тока во времени в зависимости от расстояния между катушками. Результаты этих опытов, опубликованные в работе "О скорости распространения электродинамических действий" (1871) показали, что... "расстояние между обеими катушками в 136 см не изменяет положения нулевых точек индукционного тока ни на одну долю микрометра, это значит, ни на $1/231170$ сек. Если, следовательно, индукционные действия действительно рас-

пространяются с конечной скоростью, тогда она должна быть выше чем 314400 м/сек.." /120; стр.635/.

Из этой цитаты видно, что Гельмгольц смог доказать лишь неверность результатов Блазерна, с которым он в дальнейшем лично обсуждал возможные ошибки опыта. /см.157; т.2,стр.192-193/ Данные Гельмгольца, однако, не позволили сделать вывод относительно верности разных электродинамических теорий.

Гельмгольц не довольствовался этими исследованиями. Он считал нужным уточнить измерения и кроме воздуха исследовать возможное влияние других диэлектриков. Сам он, однако, уже не занимался этими исследованиями. Их продолжали Н.Н.Шиллер и П.А.Зилов под руководством Гельмгольца в Берлинской лаборатории /см. гл. 4.3/. Гельмгольц больше и больше сосредоточивался на теоретических исследованиях, а соответственными экспериментальными работами старался заинтересовать своих учеников.

3.5. Вторая статья о теории электродинамики. Критика закона Вебера

Вторая статья Гельмгольца по теории электродинамики "Критическое" была опубликована в 1873 году /124/. Эта статья и предварительное к ней сообщение "О теории электродинамики" /121, 1872 / по своему характеру отличаются от первой статьи тем, что в них Гельмгольц не дает дальнейшего развития своей теории электродинамики, ограничиваясь опровержением критики вызванной первой статьёй.

Сделанные замечания сосредоточены прежде всего на одной проблеме - на рассмотрении Гельмгольцем закона Вебера с точки зрения удовлетворения его закону сохранения энергии. Гельмгольц в своей работе "Об уравнениях движения электричества в неподвижных проводящих телах" (1870) указал на то, что закон Вебера, хотя и не допускает возникновения или исчезновения энергии в полном круговом процессе, противоречит закону сохранения энергии, поскольку "две наэлектризованные частицы, движущиеся в соответствии с этим законом с конечной начальной скоростью, на конечном расстоянии друг от друга достигают бесконечно большой живой силы /кинетической энергии, - Г.Б./ и, следовательно, могут производить бесконечное количество работы" /118, стр. 553 /.

Дискуссию против этого вывода вели как сам В.Вебер, так и его ученики и сторонники. В первую очередь здесь следует упомянуть К.Неймана,^{1/} сына Ф.Неймана и Дж.Бертрана^{2/}, а в дальнейшем также Ф.Цёлнера^{3/}. Они стремились доказать, что

- 1/ Carl Neumann (1832-1925/
2/ Joseph Bertrand (1822 -1900)
3/ Friedrich Zöllner (1834-1882)

следствия из закона Вебера противоречащие закону сохранения энергии выведенные Гельмгольцем, не относятся к действительно возможным случаям, или пробовали исправить это положение с помощью добавочных гипотез.

Вебер прежде всего возражал против положения Гельмгольца, утверждая, что бесконечная скорость могут возникать только при молекулярных расстояниях. В этом случае, однако, нужно уже учитывать молекулярные силы, которые, по всей вероятности, делают невозможным такое сближение частиц.

Кроме того, Вебер пытался устранять затруднения применяя гипотезу, по которой электричеству приписывалось свойство инерции.

Подробные возражения заставили Гельмгольца, в свою очередь еще более подробно изложить свои взгляды. Он показал, что расстояние между частицами, при котором они могут приобрести бесконечную кинетическую энергию, не обязательно должно лежать в пределах молекулярных величин. Он приводит случай, доступные экспериментальной проверке, для которых закон Вебера тоже может ^{три} вести к следствиям, противоречащим закону сохранения энергии.

Гельмгольц показал также, что эти следствия из теории Вебера не устраняются предположением Вебера об инерции электрических масс. Интересно в этом отношении заметить, что Гельмгольц, тем не менее, побудил Г. Герца экспериментально определить возможное влияние предположенной инерции электричества. Эта первая самостоятельная научная работа Герца выявила, что если инерция и существует, то ее величина настолько незначительна, что не может оказать существенного влияния на решение спорных проблем /см. 143; стр. XIX/.

В резюме второй статьи по электродинамике Гельмгольц повторяет то, что уже явно было подчеркнuto в первой статье. Закон Вебера не может претендовать на признание в качестве закона, который совершенно правильно выражает закономерности в электродинамике. Можно смотреть на него только как на приблизительное выражение фактов в определенных пределах. /см.124, стр.658/.

Так и Максвелл понимает значение закона Вебера, показывая, что в случае замкнутых токов формула Вебера для индукции согласуется с его теорией /см.46; стр.622-23/.

Гельмгольц своими работами пока еще не мог поколебать авторитет закона Вебера.

В дальнейшем он уже не участвовал в этой дискуссии, очевидно, и потому, что она проводилась сторонниками Вебера не всегда с достаточной объективностью и осведомленностью. Только в 1881 году, по поводу издания собрания своих сочинений, Гельмгольц сделал еще несколько замечаний к этой теме. /124, стр.684/. Но несмотря на это можно предположить, что критика Гельмгольцем закона Вебера подготовила почву для дальнейших дискуссий, и в конечном счете для вытеснения закона Вебера теорией Максвелла в Германии.

Гельмгольц в ходе своих систематических исследований в области электродинамики в 1876 году еще раз возвратился к обсуждению теории Вебера /128, стр.797/. Но в этот раз проблемы, охарактеризованные выше, уже не играли никакой роли. Подвергался сомнению уже основная позиция Вебера, существование далекодействующих сил вообще.

Предварительное сообщение, как и сама вторая статья по теории электродинамики, для историка естествознания, однако,

интересны прежде всего не своими дискуссионными сторонами, а данной Гельмгольцем общей характеристикой тогдашней ситуации в электродинамике. Здесь он явно подчеркивает то, что уже было заметно в работе "О сохранении силы": закон Вебера стоял в центре внимания Гельмгольца прежде всего потому, что он противоречил его представлениям о действии только центральных сил. А эта проблема имела большое значение не только для дальнейшего развития электродинамики, но и для общих воззрений в физике.

"Гипотеза Вебера о электрических силах, - пишет Гельмгольц была самой первой, до известной степени удачной попыткой обосновать объяснение группы явлений, которые до сих пор еще не удалось свести к элементарным силам, допущением сил, которые должны зависеть не только от положения действующих точек масс, но и от вида движения". /124; стр.647/.

Кроме того, Гельмгольц подчеркнул, что в своей гипотезе Вебер стремился свести электрические явления к силам, действующим между отдельными электрическими массами, и дать таким образом физическое объяснение основных электрических процессов, в то время как другие теории дальнего действия, ограничиваясь выражением элементов тока, не делали попыток объяснить сущность этих процессов.

Гельмгольц, несмотря на свою критику, очень высоко оценил теорию Вебера. В 1872г. он писал:

"Ей -(теория Вебера -Г.Б.) несомненно принадлежала и принадлежит такая же заслуга как и любой остроумной мысли, которая стремится вступить на новые пути в науке, если кажется, что старые тропинки ведут в крайне запутанные дебри. Здесь, наверно, не нужно подчеркивать то, что ценность подобного опыта,удовлет-

ворящего уровню науки своего времени, не уменьшается, если после 25 лет дальнейших успехов в науке он просто окажется невозможным. И тогда этот опыт не был бесплодным. Рекогносцировка неизвестной территории, расположенной рядом с проторенной улицей, произведенная тщательно и остроумно, не теряет своей ценности и тогда, когда она только показывает, что кроме широкой улицы не существует другой дороги". /121; стр.639-640/.

"Широкая улица" в этой области - это для Гельмгольца, очевидно, сведение всех явлений физики к центральным механическим силам. Причины неудачи всех попыток в области электродинамики шествовать прямо по "широкой улице" он видел не в самом характере электродинамических сил, а лишь в недостаточности научных знаний.

Подтверждение своих взглядов Гельмголец видел именно в механических аналогиях, разработанных Максвеллом в первых его работах для действия сил в диэлектрике. Резюмируя дискуссию о законе Вебера в работе "О теории электродинамики Гельмголец пишет: "Электромагнитные и электродинамические явления совсем не отличаются по характеру от остальных процессов в неорганической природе, поэтому нет необходимости предполагать для объяснения основные силы другого вида, а именно такие, которые зависят не только от положения действующих масс, но и от движения. Это вытекает из теории Максвелла, который сводит названные явления не к силам дальнего действия, а к непрерывно распространяющемуся в эфире движению. Допущенный способ действия между двумя сталкивающимися элементами объема эфира отличается от известного нам способа действия между твердыми и упругими телами, но его можно уподобить простым механическим механизмам.

Способ действия, следовательно не отличается от такого, который был бы возможен и для хорошо известных нам механических сил" /124; стр.674/.

Из этого следует, что дискуссия о законе электродинамики Вебера была развернута Гельмгольцем не только для выяснения отдельных фактов и для решения спора о существующих теориях электродинамики, но, кроме того и для проверки общепринятых тогда механических воззрений в естествознании. В результате этой дискуссии Гельмгольц, как и большинство его современников-физиков, по-прежнему остался на механической позиции.

3.6. Третья статья о теории электродинамики. Сравнение закона Ампера с потенциальным законом Ф.Неймана

Третья статья Гельмгольца о теории электродинамики "Электродинамические силы в подвижных проводниках" /125; 1874 /, и по содержанию, и по времени непосредственно продолжает предыдущие его работы. Здесь, как и в предварительном сообщении к этой статье "Сравнение законов электродинамических сил Ампера и Неймана " /122 ; 1873/, Гельмгольц дальше развивает свои взгляды на основе теории Ф.Неймана. Ни в одной другой работе он так явно не подчеркивает эту связь с работами Неймана, как в этих публикациях.

В следующей работе Гельмгольца "Критическое к электродинамике" /126; 1874 /, также еще относящейся к тому же самому комплексу вопросов, и написанной в ответ на некоторые возражения против третьей статьи, он выражает свою точку зрения следующими словами:

"... в течение тридцати лет я никогда не применял другого принципа кроме потенциального закона, и ... не нуждался в другом чтобы выбраться из лабиринта электродинамических проблем, зачастую никем еще не затронутых до данного времени" /126; стр.772
Все исследования Гельмгольца в вышеназванных работах сосредоточиваются на обобщении закона Ф.Неймана и на доказательстве его преимущества перед другими теориями дальнего действия. Прежде всего он здесь учитывает теорию Ампера.

Такое сужение предмета исследования, по сравнению с первой статьей, вероятно, было вызвано тем обстоятельством, что Гельмгольц именно в этом направлении исследований подозревал возможность выбора между отдельными теориями электродинамики.

Уже в предварительном сообщении "Сравнение законов электродинамических сил Ампера и Неймана" (1873) он указывает на возможность экспериментальной проверки следствий обоих законов.

В третьей статье по теории электродинамики (1874) Гельмгольц предлагает уже более подходящие методы экспериментальной проверки, а в работе "Критическое к электродинамике" (1874) он сообщает о скором окончании подобных опытов.

Такое сообщение после долгих лет одних лишь теоретических споров, очевидно, вызвало большой интерес среди физиков-современников.

"Я с нетерпением ожидаю опытов в области спорных вопросов электродинамики, потому что у меня еще нет соображений о возможности преодоления практических трудностей, которые, как кажется, противостоят этим опытам", — пишет Больцман в письме к Гельмгольцу от 21 апреля 1874г^{1/}. /Приложение 4 /.

Было бы, однако, неправильным на основе предмета третьей статьи сделать заключение, что Гельмгольц со времени первой статьи об электродинамике пренебрег теорией Максвелла. Против такого предположения говорят исследования, проведенные в эти годы прежде всего Л.Больцманом и Н.Н.Шиллером в Берлинской лаборатории. Они под руководством и частично непосредственно по предложению Гельмгольца занимались проверкой следствий теории Максвелла. Отношение Гельмгольца к этим работам рассматривается в главе о электродинамических работах Шиллера. Там также описаны предложенные Гельмгольцем для проверки потенциального закона эксперименты. Поэтому в этой главе мы ограничиваемся рассмотрением теоретических исследований, которые привели Гельмгольца к соответствующим опытам.

1/ Относится к работе /122 / или /125 /.

Как уже было сказано, Гельмгольц исходил из потенциального закона Ф.Неймана. Последний в (1847г) привел доказательство применимости этого закона только для замкнутых контуров с постоянной силой тока. Гельмгольц стремится доказать верность его для общего случая также незамкнутых проводников при изменении силы тока и при перемещении контуров. При этом он отдельно рассматривает явления подеромоторных сил между проводниками и явления индукции в подвижных проводниках.

Гельмгольц показывает, что силы притяжения или отталкивания между замкнутыми контурами одинаково выражаются как по закону Неймана, так и по закону Ампера. Для токов в незамкнутых контурах эти законы, однако, отличаются друг от друга. Закон Ампера учитывает только такие силы, которые действуют между отдельными элементами токов, т.е. не учитывает возможное действие концов токов. Формула для сил между элементами токов по потенциальному закону совпадает с выражением закона Ампера. Гельмгольц приводит:

1. Для сил между элементами токов выражение:

$$\frac{j}{c^2} \frac{j}{r^2} \left[2 \cos(ds, d\delta) - 3 \cos(r, ds) \cos(r, d\delta) \right].$$

Но кроме таких сил потенциальный закон учитывает еще силы, обусловленные предполагаемым накоплением электричества на концах незамкнутых контуров, а именно:

2. Силы между элементами тока $j d\delta$ и электричеством e , накопленным на конце незамкнутого контура s :

$$\frac{j}{c^2} \frac{de}{dt} \frac{\cos(r, d\delta)}{r} ds$$

и наоборот силы между $i ds$ и e .

3) силы между двумя концами токов с количествами электричества e и e' :

$$- \frac{1 + k}{2c^2} \frac{de}{dt} \frac{de'}{dt}$$

Дальнейшие теоретические исследования Гельмгольца, однако, не дали никакого указания на возможное исключение одного из этих двух вариантов. Оба, удовлетворяли закону сохранения энергии и принципу действия и противодействия. Решить этот вопрос могли только опыты с токами в незамкнутых контурах. Они должны были показать, существуют ли действия концов токов или нет.

Самая большая трудность таких опытов состояла в очень малой продолжительности существования токов в незамкнутых проводниках. Поэтому предложенные Гельмгольцем опыты были направлены на проверку взаимодействия между замкнутым контуром и концом тока. Здесь по крайней мере один из участвующих токов мог быть достаточно сильным и постоянным.

Гельмгольц сообщил о проведении таких экспериментов в ближайшем будущем. Вероятно, он и занимался, по крайней мере, подготовительными опытами. Потом он поручил эту задачу Н.Н.Шиллеру, который летом 1874г. занимался такими экспериментами в лаборатории берлинского Физического института.

Показалась, однако, еще другая возможность проверки законов "Ампера"^{I/} и Ф.Неймана. Не только пондеромоторные силы, но и э.д.с., индуктированные в незамкнутых проводниках при относительном движении друг к другу и при изменении силы тока в этих законах не совпадали.

I/ То, что Гельмгольц называет "законом Ампера", имея в виду математическое выражение индуктированных э.д.с., соответствует первому варианту закона индукции Ф.Неймана, развитому в 1845г./159/ на основе закона Ампера. Этот закон в своих следствиях не совпадает с позже развитым Нейманом потенциальным законом.

Гельмгольц вычисляет эту разницу для случая, когда ин-
 дуктирующий контур δ замкнут. Ток в таком контуре действует на
 незамкнутый проводник ϵ (а,б), который перемещается до положе-
 ния (в,л). Тогда э.д.с. R по потенциальному закону будет:

$$dt \int R ds = A^2 j \int \left[\frac{1}{r} \frac{dr}{ds} \frac{dr}{d\delta} \right] ds .$$

А по закону Ампера: $dt \int (R+r) ds = A^2 j \int \frac{1}{r} \frac{dr}{ds} \frac{dr}{d\varrho} d\varrho ,$

где результаты по "закону Ампера" соответствуют э.д.с., индук-
 тированной в замкнутом контуре ϱ /а,б, г, в / (см.рис.б)

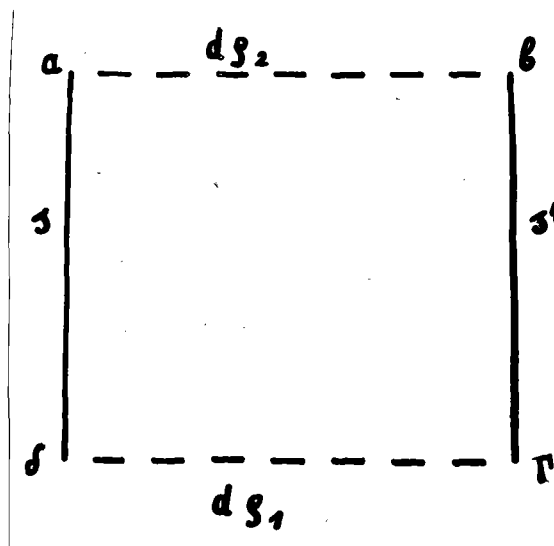


Рис.б.

Значит, результат "закона Ампера" в этом случае совпадает с за-
 коном Фарадея, по которому э.д.с. индукции зависит от числа
 пересекаемых линий магнитной напряженности.

По потенциальному закону э.д.с. индуктированная в проводе ϵ ,
 зависит от изменения потенциала во времени и складывается из

э.д.с., индуцированных только в элементах проводника S .

Можно представить такой случай, когда при движении незамкнутого проводника относительно индуцирующего контура потенциал не изменяется. Тогда по потенциальному закону Неймана не должен индуцироваться ток, а по "закону Ампера" должен возникать индукционный ток, поскольку проводник пересекает определенную площадь .

"Предположим круглый металлический диск, быстро вращающийся вокруг оси и пронизаемый линиями магнитной напряженности, параллельными оси и симметрично распределенными вокруг нее, тогда по закону Ампера край диска становится наэлектризованным, а по потенциальному закону нет" /125; стр.762/.

Этими словами Гельмгольц закончил третью статью по электродинамике. Теоретическим путем он не смог решить поставленные вопросы. Но он нашел отправные точки для экспериментальной проверки . А это, как мы видели было настоящей конечной целью всех исследований Гельмгольца по электродинамике .

По содержанию следующей работы Гельмгольца " Опыты над электродвижущими силами, индуцированными движением в незамкнутой цепи /127;1875/ мы можем судить, какое большое значение Гельмгольц придавал этим экспериментам. Он даже сам вернулся к экспериментальной работе, изучая индуцированные в незамкнутом контуре токи, вопрос о справедливости "закона Ампера " или потенциального закона. Ф.Неймана путем опытов, в сущности совпадающих со вторым методом, описанным в третьей статье о теории электродинамики /125/.

Найденные результаты опровергли теоретические работы Гельмгольца, основанные на потенциальном законе и заставили его отказаться от привычного пути исследования/см.гл. 3.7 /

Пока Гельмгольц, однако, еще не имел в руках таких результатов, он не раз подчеркивал преимущество этого закона по сравнению с другими законами, основанными на предположении дальнего действия. Прежде всего его увлекала простота и широкая область применения этого закона. Для Гельмгольца в 1874г. потенциальный закон имел еще значение как наиболее вероятного выражения электродинамических явлений. Установление этого закон Ф.Нейманом он считает самой плодотворной идеей, возникшей в теоретической физике /см. 126; стр. 772-73/.

3.7 Роль Гельмгольца и его школы в экспериментальной проверке теории электродинамики

Рассмотренные в предыдущих главах три статьи Гельмгольца представляют собой основную часть его электродинамических исследований. Эти работы отличаются от более ранних исследований в этой области тем, что они имеют исключительно теоретический характер. Отсутствует тесная связь между теоретической разработкой проблемы и экспериментальной проверкой. Только один раз за эти годы Гельмгольц провел экспериментальные исследования, а именно в 1871г., когда он пытался определить скорость распространения электрических действий, вызывающих индукцию.

Этот факт в дальнейшем способствовал тенденции рассматривать роль Гельмгольца в развитии электродинамики только на основе теоретических работ, не связывая с ними экспериментальные успехи, достигнутые в физической лаборатории Берлинского университета под руководством Гельмгольца.

Гельмгольц выбрал своей окончательной целью разработку теоретической физики и все более и более сосредоточивался на этой области физики. Экспериментальные исследования, вытекавшие из теоретических обсуждений, он поручал своим ученикам. Поэтому, для того, чтобы увидеть, с какой последовательностью Гельмгольц осуществлял свою конечную цель - опытным путем решить спорные вопросы электродинамики, нужно учитывать деятельность его как руководителя физического института в Берлине.

К сожалению, в архиве Университета имени Гумбольдта в Берлине не сохранялись документы о деятельности физического института того времени. Мы поэтому не в состоянии прямым путем выяснить, кто из физиков работал у Гельмгольца. Несмотря на это

имеется несколько примеров, которые позволяют сделать вывод о том, что заслуги Гельмгольца в развитии электродинамики велики не только в области теории. Он был прекрасным руководителем центра исследований, стоявшего в первом ряду среди экспериментальных учреждений, способствовавших своими работами подтверждению теории Максвелла.

Произведенные экспериментальные исследования можно разделить по трем центрам тяжести:

1. Исследования свойств диэлектриков.
2. Экспериментальная проверка разных теорий дальнего действия.
3. Опыты по определению скорости распространения электромагнитных действий.

Первый комплекс проблем стал актуальным начиная с опытов Фарадея. Систематическая обработка подобных задач, однако, началась в 70-е годы, частично на основе теории Максвелла, а частично на основе теории Гельмгольца. Но несмотря на это, с самого начала вопрос сосредоточился на подтверждении или опровержении теории Максвелла, поскольку она дала конкретные следствия, доступные проверке и непосредственно связанные с сущностью этой теории.

В лаборатории Гельмгольца этими проблемами начал заниматься в 1871г. Л.Больцман. За ним следовали Н.Н.Шиллер в 1872г. и П.А.Зилов в 1875г. Они, в частности, определили диэлектрические постоянные материалов разных агрегатных состояний и доказали верность соотношения между диэлектрической постоянной и показателем преломления $\epsilon = n^2$, вытекающего из теории Максвелла. На результаты этих трех физиков ссылался Максвелл, как на важные экспериментальные подтверждения своей теории / 47; стр. 131-132/.

Неизвестно, имел ли Гельмгольц влияние на выбор темы и решение задач в этих первых опытах Больцмана по определению диэлектрических постоянных. Письма Больцмана к Гельмгольцу, однако указывают на то, что Гельмгольц с большим интересом следил за работами Больцмана и своими советами принимал активное участие в них. / Приложения 1-5 /. Роль Гельмгольца по отношению к работам Шиллера и Зилова определена в главах 4.2 и 4.3. Там будут подробно рассмотрены все другие проблемы, относящиеся к этому комплексу экспериментов.

Второй центр экспериментальных исследований связан с третьей статьей Гельмгольца по электродинамике. Он непосредственно связан с проверкой потенциального закона.

Первую часть экспериментов, относящуюся к исследованию действующих пондеромоторных сил, производил Н.Н.Шиллер, частично в Берлинской лаборатории, частично в лаборатории Московского университета под руководством А.Г.Столетова /см.гл.4.2/.

Вторую часть, относящуюся к индукционному действию, производил сам Гельмгольц. О результатах обеих работ Гельмгольц сообщает в статье "Опыты с электродвижущими силами, индуктированными движением в незамкнутых проводниках"/127; 1875 /. В этой работе, после повторного подробного изложения ситуации в области электродинамики, он описывает опыты Шиллера, сделанные по принципу, предположенному Гельмгольцем в третьей статье о теории электродинамики. Результаты Шиллера опровергали потенциальный закон и Гельмгольц вынужден был сделать вывод, что: "... или не существует действий концов токов, предполагаемых потенциальным законом, или же кроме электродинамических действий, соответствующих этому закону, существуют действия и конвекционных токов

и, потенциальный закон является неполным, если учитывает действия только движущегося в проводниках электричества" /127; стр.781 /.

Одновременно с Шиллером Гельмгольц исследовал индукционные действия на основе рассмотренного в предыдущей главе принципа. Он нашел, что и индукционные действия не соответствуют потенциальному закону и таким образом подтвердил результаты Шиллера.

Если Гельмгольц на основе экспериментов Шиллера сделал заключение о неполноценности потенциального закона, поскольку он не учитывает электромагнитных действий конвекционных токов, то в этот раз он вынужден был прийти к выводу, что должны действовать токи смещения.

"Потенциальный закон - пишет он - соответственно найденным здесь результатам, можно дополнять таким образом: принимать по Фарадею и Максвеллу, что в изоляторах тоже могут происходить электрические движения с электродинамическими действиями, вследствие чего они поляризуются" /127; стр.788 /.

Таким образом, найденные результаты привели Гельмгольца снова к теории, изложенной им в восьмой главе первой статьи по электродинамике, к учету электродинамического действия диэлектрика наряду с силами дальнего действия. Теперь он поставил перед собой задачу решить проблемы, рассмотренные в третьей работе с точки зрения существования только дальнедействующих сил, на основе этой теории.

Такое исследование должно было окончательно установить соотношения между этой теорией и теорией Максвелла. Других теорий Гельмгольц здесь уже не учитывал.

Потенциальный закон был опровергнут опытом.

"...Я до сих пор защищал потенциальный закон против несущественных возражений, - писал Гельмгольц, но всегда видел в нем такой закон, верность которого в конечном счете можно решить только опытным путем. Найти точку, за которую можно будет уцепиться, было действительной целью моих прежних работ, которая теперь в значительной части достигнута" /127; стр.787/.

Оставались лишь две теории, соответствовавшие основным принципам физики, - теория выведенная Нейманом в 1845г. из закона Ампера, и теория Максвелла.

Вследствие многочисленных опытов над свойствами изоляторов теория, выведенная из закона Ампера, практически уже не могла конкурировать с теорией Максвелла. Хотя она для квазистационарных процессов, происходящих в воздухе /т.е. по существовавшим в то время представлениям: $\epsilon = 1$), не противоречила и экспериментальным данным, чистая теория дальнего действия становилась все более и более невероятной. Гельмгольц в работе "Опыты с электродвижущими силами, индуктированными движением в незамкнутых проводниках" (1875) приводит ее скорее ради полноты освещения ситуации, чем с убеждением в ее практической важности.

В следующей работе Гельмгольца "Сообщение об опытах над электромагнитным действием электрической конвекции, произведенных Генри А.Роуландом" (1876) Гельмгольц снова смог сообщить об очень важном опыте, произведенном в его лаборатории /128 /. Американцу Генри А.Роуланду (1848-1901) удалось непосредственно доказать электродинамическое действие конвекционного тока /см. также 16 /. Но в этой работе Гельмгольц подчеркнул, что Роуланд уже полностью составил план своих исследований до при-

езда в Берлин, и следовательно, без влияния Гельмгольца.

В наследстве Гельмгольца, хранимом в архиве Германской Академии наук в Берлине находятся также письма Генри А. Роуланда к Гельмгольцу. В письме от 13 ноября 1875г. Роуланд, прибывший уже в Берлин, попросил разрешения Гельмгольца работать в Физическом институте под его руководством. Кроме того он изложил свой план экспериментальных работ, которыми хотел заниматься. В 1876г, уже вернувшись на родину, Роуланд поблагодарил Гельмгольца за публикацию своего открытия и ознакомил его с результатами новых экспериментов.

Интересно, что эти исследования второго комплекса проблем, хотя и основаны прежде всего на теории дальнего действия, своими результатами подтвердили теорию Максвелла тем, что доказали тождество действий конвекционного тока с током в проводниках и косвенно тоже для токов смещения.

Эти результаты решающим образом повлияли на позицию Гельмгольца в области электродинамики, что явно выражается в докладе "Современное развитие фарадеевских воззрений на электричество", произнесенном в память Фарадея на торжественном заседании Лондонского химического общества 5 января 1881 г. /131/. Здесь Гельмгольц высказывает мнение, что спор между различными электродинамическими теориями еще не решен, но что решение уже вырисовывается, поскольку

"... в настоящее время фарадеево воззрение является единственным, согласным со всеми экспериментальными данными и не противоречащим ни в каком из своих выводов основным законам динамики"/131а; стр.12/.

Гельмгольц, однако, отмечает, что в Германии еще много

видных физиков стоит на позиции теории дальнего действия. Но одновременно он доказывает на примере гипотезы Р.Клаузиуса^{I/}, что и здесь возникающие затруднения все более и более приближают физиков к признанию роли промежуточной среды, и что "при современном развитии..., по-видимому не остается другого исхода, кроме принятия фарадеева воззрения". / I31a, стр.12/.

А "проявления сил - продолжает он в другом месте - действующих вдаль, если допускать их еще, должны быть ничтожны сравнительно с проявлениями диэлектрических и магнитных напряжений в изоляторах..." /I31a; стр.13/.

Здесь Гельмгольц, очевидно, обращается к собственной теории близкого действия и уже признает ее сомнительное право на существование лишь для предельного случая, когда силы дальнего действия чрезвычайно малы по сравнению с силами в изоляторе, а значит, для случая, когда результаты его теории совпадают с результатами теории Максвелла.

Поскольку, однако, еще отсутствовали решающие доказательства теории Максвелла в виде определения электромагнитных волн и непосредственное доказательство электромагнитной природы света, Гельмгольц в работе "О силах, действующих внутри магнитно-или электрически поляризованных тел" /I30; 1881/ еще не видел необходимости покидать ~~уже~~ почву своей теории. В этой работе, объявленной Гельмгольцем уже в 1875 г., он дает формулы действующих через диэлектрик пондеромоторных сил между двумя электрическими системами при их движении друг относительно-

I/ Теория электродинамики Клаузиуса противоречила принципу действия и противодействия. Обойти этот недостаток он мог только при допущении участия диэлектрика в электрических процессах.

но друга. В этой работе Гельмгольц прежде всего убеждается в том, что возможно свести эти силы только к близко-действующим в виде поляризации.

Такие силы имеют вид:

$$\begin{aligned} X &= \frac{\partial}{\partial x} A_x + \frac{\partial}{\partial y} A_y + \frac{\partial}{\partial z} A_z ; \\ Y &= \frac{\partial}{\partial x} B_x + \frac{\partial}{\partial y} B_y + \frac{\partial}{\partial z} B_z ; \\ Z &= \frac{\partial}{\partial x} C_x + \frac{\partial}{\partial y} C_y + \frac{\partial}{\partial z} C_z ; \end{aligned}$$

где X , Y , Z компоненты пондеромоторных сил по осям координат, а

$$\begin{aligned} A_x &= \frac{1+4\pi\chi}{8\pi} \left[\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x} \right)^2 - \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y} \right)^2 - \left(\frac{\partial\varphi}{\partial z} \right)^2 \right] \\ &\quad + \frac{\theta}{2} \left[\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial z} \right)^2 \right] ; \\ B_y &= \frac{1+4\pi\chi}{8\pi} \left[- \left(\frac{\partial\varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y} \right)^2 - \left(\frac{\partial\varphi}{\partial z} \right)^2 \right] \\ &\quad + \frac{\theta}{2} \left[\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial z} \right)^2 \right] ; \\ C_z &= \frac{1+4\pi\chi}{8\pi} \left[- \left(\frac{\partial\varphi}{\partial x} \right)^2 - \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial z} \right)^2 \right] \\ &\quad + \frac{\theta}{2} \left[\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial z} \right)^2 \right] ; \end{aligned}$$

$$A_y = B_x = \frac{1+4\pi\chi}{4\pi} \frac{\partial\varphi}{\partial x} \frac{\partial\varphi}{\partial y} ;$$

$$B_z = C_y = \frac{1+4\pi\chi}{4\pi} \frac{\partial\varphi}{\partial y} \frac{\partial\varphi}{\partial z} ;$$

$$C_x = A_z = \frac{1+4\pi\chi}{4\pi} \frac{\partial\varphi}{\partial z} \frac{\partial\varphi}{\partial x} ;$$

где χ - электрическая восприимчивость,

φ - электростатический потенциал,

θ - постоянная величина, которая равняется нулю при условии, что χ постоянно.

Для случая, когда χ постоянно, уравнения Гельмгольца совпадут с формулами Максвелла, данными им в "Трактате электричества и магнетизма" §§ 104-107 /46а, стр.156-163/ и, таким образом, с предположением существования только сил близкодействия.

"Можно, однако, -оговаривает Гельмгольц, - придерживаться обеих причин-, /дальнодействие и близкодействие - Г.Б. / - если не хочешь отказываться от непосредственных действий на расстоянии" /130; стр.818/. Он показывает, что χ можно выразить и следующей формулой:

$$\chi = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\Delta \varphi}{4\chi} + \frac{\partial}{\partial x} (A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z) ,$$

где

$$A_x = \frac{\chi}{2} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 - \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 - \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{\theta}{2} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right] ,$$

$$A_y = B_x = \chi \frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\partial \varphi}{\partial y} ,$$

и т.д.

Здесь первый член представляет собой силы дальнодействия,

а остальные - силы поляризации. При $\chi = 0$ остаются только силы дальнего действия.

И здесь объяснение электрических процессов одновременным действием сил дальнего действия и ближнего действия играет уже очень незначительную роль. Оно осталось только как возможность, маловероятная, но еще не целиком опровергнутая опытом.

"Теории ближнего действия - Г.Б. /пишет Гельмгольц позже в уже цитированном введении к "Принципам механики" Герца- правильность которых впоследствии подтвердил Герц, выдвигались.. еще до него Фарадеем и Максвеллом как возможные или даже в высшей степени вероятные, однако опытных доказательств их достоверности еще не было". /I43a; стр.304/.

Таким образом, опыты, произведенные Гельмгольцем и Шиллером, привели не только к опровержению потенциального закона, но и в ходе дальнейших теоретических работ подтачивали электромагнитную теорию, развитую Гельмгольцем в восьмой главе первой статьи по теории электродинамики.

Гельмгольц, следовательно, все более и более сосредоточивал свои мысли на непосредственной проверке теории Максвелла. Работу такого типа представляет собой третья группа экспериментальных исследований, произведенных школой Гельмгольца. Она прежде всего связана с открытием Герцем электромагнитных волн.

Влияние Гельмгольца на научное формирование Герца хорошо известно в научной литературе. Уже было показано, что Гельмгольц обратил внимание ученика на проблемы электродинамики, предлагая ему задачу по определению величин возможного влияния инерции электрических масс на электрическую индукцию.

В 1879 г. Академия наук в Берлине объявила конкурс на экспериментальное доказательство положения о том, что ток смещения производит такое же электродинамическое действие, как и ток проводимости. Тема задачи была предложена Гельмгольцем.

" По мнению Максвелла - пишет он - для его теории было существенным и решающим, ^{знать} вызывает ли возникновение и исчезновение диэлектрической поляризации в изоляторе те же самые электродинамические действия в окружающей среде, какие вызывает в проводнике гальванический ток. Решение этого вопроса мне казалось работой выполнимой и достаточно важной, чтобы стать темой одной из больших конкурсных задач Берлинской Академии".
/143а; стр.303/.

Гельмгольц выбрал тогда эту задачу с надеждой, что именно Герц займется данной проблемой. Как известно, Герц не смог решить ее в то время. Но в дальнейшем он не потерял из виду эту проблему, и в 1887 г. он был действительно в состоянии сообщить Берлинской Академии наук "О явлении индукции, вызванном электрическими процессами в изоляторе" /150/.

Правда, Герц в это время уже давно покинул Физический институт в Берлине. Он занимал должность профессора в Карлсруэ и самостоятельно пришел к своим открытиям. Но несмотря на это его работы и письма указывают на то, что влияние Гельмгольца сказывалось и в дальнейшем на направлении исследований Герца.

Так, 17 октября 1887г. Герц пишет своим родителям по поводу смерти Кирхгофа:

"Надеюсь, что Гельмгольц еще долго останется среди нас... втайне при каждой работе невольно думается, что он скажет о ней. И разрабатывают как раз такие темы, о которых думают, что они привлекают внимание именно этих людей" /151; стр.177/

Герцу удалось установить существование электромагнитных волн и определить их длину и скорость распространения. Ход своих исследований Герц подробно изложил во введении ко второму тому собрания сочинений "О исследовании распространения электрической силы" / 148 /.

Когда Герц сообщил своему учителю о достигнутых успехах, тот увидел в открытии Герца осуществление собственных долготных стремлений в области электродинамики.

"Дорогой друг - пишет он Герцу 15 декабря 1888г. -

Я очень радовался Вашим последним делам. Это вещи, в которые я вгрызался долгие годы, чтобы найти дырку для подступа к ним, и поэтому весь круг мыслей мне хорошо знаком, и также с самого начала мне ясна их большая важность". /151; стр.261/

Но несмотря на непосредственную роль Гельмгольца в научном формировании Герца, связь осуществлялась и другим образом: исследования Гельмгольца и других его учеников в области электрических колебаний использовались Герцем в период, предшествовавший открытию. Это непосредственно бросается в глаза, когда просматривают литературу, приведенную Герцем в работе "О весьма быстрых электрических колебаниях" /149; 1887 /. Герц непосредственно ссылается на список литературы, данный Колли в работе "О нескольких новых методах изучения электрических колебаний и о некоторых их приложениях" /32, 1885/.

Здесь, как и в примечаниях, сделанных Герцем в 1891г. /63, стр.286 /, наряду с работами В.Томсона и В.Феддерсена, большую роль играют работы Гельмгольца, Шиллера и Колли /см.гл. 3.3, 4.2, 4.4/. Герц опирался на эти работы также при определении скорости распространения электрических волн, т.е. при решении той проблемы, которую Гельмгольц безуспешно стремился решить еще в 1871г. и которой не более успешно занимался Шиллер.

Таким образом, влияние Гельмгольца на формирование Герца как ученого оказывалось прежде всего преемственностью² благода¹ря теоретических воззрений Гельмгольца, которые облегчили Герцу путь к представлениям Максвелла, затем посредством экспериментальной основы, которую дали работы Гельмгольца исследованиям Герца, и наконец, этому способствовали личные контакты, поддерживавшиеся до самой смерти Герца. Кроме того, здесь существовал косвенный путь влияния Гельмгольца на Герца через работы Шиллера и Колли в области электромагнитных колебаний /см.гл. 4.4/. Эта преемственность в работах названных ученых подчеркивает роль школы Гельмгольца в окончательном подтверждении электромагнитной теории света Максвелла.

В заключение данной главы можно сделать вывод, что значительная часть всех экспериментальных работ, непосредственно подтверждающих теорию Максвелла, была сделана в лаборатории Гельмгольца или, по крайней мере, непосредственно овязана с деятельностью учеников Гельмгольца в берлинской лаборатории под руководством последнего.

И.С.Кудрявцев в заметке "Разработка русскими физиками XIX века проблем максвелловской электродинамики" (1957) пере-

числяет пять центров тяжести экспериментальных исследований, решение которых было необходимо для полной победы теории Максвелла: /38; стр.197/.

1. Изучение роли среды в электрических и магнитных взаимодействиях.
2. Изучение связи оптических и электрических характеристик, в частности, измерение скорости света электрическими методами.
3. Подтверждение обобщения Максвеллом понятия тока, экспериментальное доказательство принципа замкнутости тока, измерение тока смещения.
4. Получение и исследование электромагнитных волн.
5. Изучение механических свойств электромагнитного поля.

Если сравнивать эти центры тяжести исследований с темами, успешно разработанными школой молодых физиков под руководством Гельмгольца, то остается только одна задача, не охваченная им: определение отношения между электродинамической и электростатической единицей электричества.

Не уменьшая заслуг учеников Гельмгольца, можно сказать, что Гельмголец в этих достижениях принимал значительное участие своими целеустремленными исследованиями, которые шаг за шагом приближали его к успешному решению, достигнутому в конечном счете его учениками.

3.8. З а к л ю ч е н и е

Последние работы Гельмгольца по электродинамике

Основная задача, которую Гельмгольц поставил перед собой в своих исследованиях в области электродинамики, была решена. Дискуссия о разных теориях электродинамики привела к победе теории Максвелла. Открытие Герцем электромагнитных волн окончательно подтвердило ее.

Казалось, что Гельмгольц довольствовался завершением своего многолетнего труда. Уже в 80-х годах он предоставил другим ученым окончательно подтвердить уже весьма вероятную, по его мнению, победу теории Максвелла.

Гельмгольц это время между прочим посвятил участию в конгрессах и совещаниях по определению общепринятых международных систем электрических единиц. Материалы о деятельности этих научных органов он опубликовал в нескольких работах /132,133,134, 135/.

Публикации о деятельности международной комиссии прежде всего интересны тем, что они дают представление о влиянии бурно развивающейся электротехнической промышленности на выбор системы электрических единиц.

По словам Гельмгольца, интересы научного исследования играли при этом решении только второстепенную роль. Создается впечатление, что дискуссии ученых в некоторой степени выражали интересы соответствующих промышленных кругов. Было бы очень интересно, в специальной работе проследить эту проблему.

Однако, Гельмгольц в 80-х годах не потерял из виду проблемы теоретической электродинамики о чем свидетельствует его работа "О физическом значении принципа наименьшего действия"

/136; 1886/. В этой работе он выразил мнение, что принцип наименьшего действия в его применении не ограничивается областью механики, но имеет основное значение для всех областей физики. Для Гельмгольца названная работа имел прежде всего подготовительный характер. Она как и исследования истории принципа наименьшего действия^{I/} должна была дать основу для дальнейших теоретических исследований в области электродинамики.

"Именно исследование вида кинетического потенциала - пишет Гельмгольц - которого требует теория Максвелла, вели меня к этим подготовительным исследованиям" /136; стр.209/.

В 1892г. Гельмгольц выступил на заседании Академии Наук в Берлине с докладом "Принцип наименьшего действия в электродинамике" /139/. Здесь он поставил перед собой задачу, выразить теорию Максвелла в виде принципа наименьшего действия. Нужно, однако, сразу заметить, что решение такой задачи в свою очередь должно было служить ему исходным пунктом для доказательства общей применимости принципа наименьшего действия ко всей области физики.

Частично Гельмгольц уже в 1886г. в работе "О физическом значении принципа наименьшего действия" применил этот принцип к электродинамике. Там он показал, что особый случай действия квазистационарного тока в замкнутом контуре при отсутствии диэлектрика математически можно выразить в виде принципа наименьшего действия. Функцией подлежащей вариации, названной Гельмгольцем "кинетическим потенциалом", здесь является потенциал между двумя токами Неймана.

I/ Исследования Гельмгольцем истории принципа наименьшего действия были опубликованы только частью в работе

"Об истории принципа наименьшего действия" /137; 1887 /

В работе "Принцип наименьшего действия в электродинамике" Гельмгольц поставил более общий вопрос; возможно ли выразить теорию электродинамики Максвелла в виде этого принципа? В основу исследования Гельмгольц положил обобщенный вариант принципа Гамильтона:

$$\delta \int_{t_0}^{t_1} \left[H + \sum P_i p_i \right] dt = 0 ,$$

где H - кинетический потенциал Гельмгольца

P - действующие внешние силы вдоль координаты p .

Подробное изложение разработанной Гельмгольцем проблемы дает А.П.Грузинцев в работе "Герман фон-Гельмгольц в его последних произведениях" /13; 1895/. Грузинцев подчеркивает, что обобщенная форма принципа Гамильтона, примененная Гельмгольцем, позволит применять ее к самым разным физическим явлениям и, таким образом, она уводит далеко за рамки области механики, в пределах которой принцип был открыт.

Определив величины выражений H и $\sum P_i p_i$ и вычислив соответственные вариации, Гельмгольц действительно получил результаты, которые совпадали с уравнениями Максвелла. То есть, Гельмгольц имел все основания предполагать, что законы электродинамики подчиняются принципу наименьшего действия. Но ему не пришлось всесторонне и окончательно решить эту проблему. Как показывает "Добавление к статье: Принцип наименьшего действия в электродинамике" /144; 1894/, напечатанное уже после смерти Гельмгольца, он в последующее время прежде всего искал возможность более простого и наглядного решения задачи.

Несмотря на это, как показывает Л.С.Полак в своей книге "Вариационные принципы механики, их развитие и применение в физике" /52/, Гельмгольцу принадлежит заслуга впервые сделанной попытки вывести теорию Максвелла на основе принципа наименьшего действия, причем "постановка им задачи применения вариационного принципа явно превосходит современную". /52, стр.450/.

Названные, как и все другие, исследования Гельмгольца в области электродинамики этого периода коренным образом отличаются от прежних его работ. В них теория Максвелла предполагается единственно возможной основой для исследований в области электродинамики. Соответственно этому, и характер отдельных работ изменился. Гельмголец пытается в них приводить новые доказательства этой теории, как например, в работе о принципе наименьшего действия в электродинамике, уточнить условия действия этой теории, как в работе "Следствия теории Максвелла относительно движения чистого эфира". /142; 1893/ или применять к отдельным проблемам оптики, как в работе "Электромагнитная теория светорассеяния" /140; 1893/.

В труде "Следствия теории Максвелла относительно движения чистого эфира" Гельмголец занимается вопросом, какие механические свойства должен иметь эфир, чтобы позволить теоретически обосновать все явления электродинамики. Он поставил вопрос, может ли существовать чистый эфир, лишенный всякой инерции и может ли такое предположение удовлетворять всем случаям в теории Максвелла. И если это так, то какие движения он должен производить?

Гельмголец в своих исследованиях механических свойств эфира, которые должны были удовлетворять электромагнитной теории,

исходит из предпосылки, что чистый эфир имеет свойства несжимаемой и свободной от трения жидкости без всякой инерции.

Эта работа также не была закончена. Найденные в наследии Гельмгольца неопубликованные проекты по этой теме свидетельствуют о том, что Гельмгольц еще в последние месяцы своей жизни упорно занимался именно этими проблемами. /см.157; т.3, стр.76-78, 115-117/.

Можно сделать вывод о том, что Гельмгольц своими работами прежде всего влиял на современников в период до открытия Герцем электрических магнитных волн. Но, хотя незаконченные работы Гельмгольца по электродинамике в начале 90-х годов показывают, что в последние годы своей жизни он также стоял на вершине развития этой области и избирал для собственных исследований очень актуальные для дальнейшего развития электродинамики проблемы.