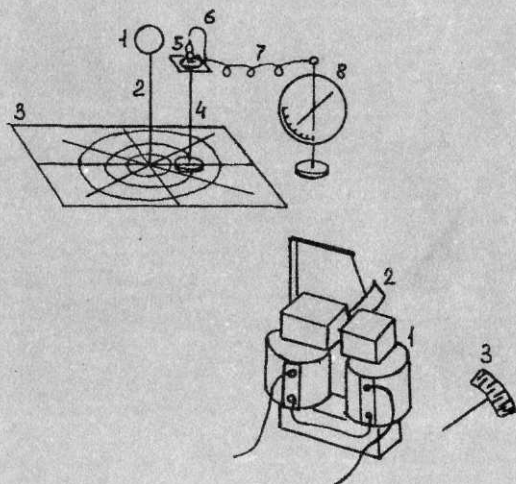


ЛЕКЦИОННЫЕ ДЕМОНСТРАЦИИ ПО ФИЗИКЕ

Часть 2. Электричество и магнетизм

Методическое руководство для преподавателей



Настоящее издание является второй частью методического руководства для преподавателей по лекционным демонстрациям, используемым в курсе физики в НГТУ. Содержит описания лекционных опытов, иллюстрации к ним и методические указания.

Данная работа адресована лекторам, читающим курс общей физики во вузах, аспирантам кафедр физики, ассистентам - демонстраторам опытов.

Составил канд. физ.-мат. наук, доц. Ю.Е. Невский

Рецензент канд. физ.-мат. наук, доц. А.А. Харьков

Работа подготовлена на кафедре прикладной
и теоретической физики



Оглавление

Стр.

3. Электричество и магнетизм.....	6
3.1. Электростатика.....	6
3.1.1. Приборы, используемые в опытах по электростатике.....	6
3.1.2. Электризация посредством контакта тел (электризация трением).....	11
3.1.3. Два вида электрических зарядов.....	11
3.1.4. Электризация посредством влияния (электростатическая индукция).....	12
3.1.5. Электрофор.....	13
3.1.6. Взаимодействие заряженных тел с незаряженными телами.....	14
3.1.7. Силовые линии электрического поля.....	15
3.1.8. Потенциал заряженного проводника.....	17
3.1.9. Потенциал точек электрического поля. Эквипотенциальные поверхности.....	18
3.1.10. Распределение заряда по поверхности проводника. Опыт с гибкой металлической сеткой.....	19
3.1.11. Исследование распределения заряда по поверхности проводника с помощью металлического шарика на изолирующей ручке и электрометра.....	19
3.1.12. Электрическое поле заряженного металлического диска.....	21
3.1.13. Действие заряженного острия в воздухе. Электрический ветер.....	21
3.1.14. Реактивные силы при истечении зарядов с острия.....	22
3.1.15. Экранирующее действие проводника.....	23

3.1.16.	Экранирование поля зарядов, находящихся внутри металлической оболочки.....	23
3.1.17.	Отсутствие электрического поля внутри метал- лической оболочки. Цилиндр Фарадея.....	24
3.1.18.	Зависимость электроёмкости тел от их размеров.....	25
3.1.19.	Электроёмкость конденсатора.....	25
3.1.20.	Поляризация диэлектриков.....	26
3.1.21.	Прямой пьезоэффект.....	27
3.1.22.	Обратный пьезоэффект.....	28
3.1.23.	Петля гистерезиса сегнетоэлектрика.....	28
3.1.24.	Работа электрического поля по перемещению заряженных тел.....	29
3.2.	Магнитные явления.....	31
3.2.1.	Магнитное поле тока. Опыт Эрстеда.....	31
3.2.2.	Магнитное поле тока. Силовые линии.....	31
3.2.3.	Сила Лоренца. Движение проводящей жидкости в магнитном поле.....	32
3.2.4.	Демонстрация действия силы Лоренца с помощью осциллографа.....	33
3.2.5.	Закон Ампера.....	34
3.2.6.	Рамка с током в магнитном поле.....	34
3.2.7.	Взаимодействие параллельных токов (опыт 1).....	35
3.2.8.	Взаимодействие параллельных токов (опыт 2).....	35
3.2.9.	Рамка с током в неоднородном магнитном поле....	36
3.2.10.	ЭДС электромагнитной индукции. Опыт Фарадея...	37
3.2.11.	Непотенциальность вихревого электри- ческого поля.....	39
3.2.12.	Правило Ленца. Взаимодействие постоянного магнита с индуцированным им током.....	39
3.2.13.	Правило Ленца. Взаимодействие электромагнита с индуцированным им током.....	40
3.2.14.	Токи Фуко. Использование для демпфирования колебаний.....	41

3.2.15. Токи Фуко. Увлечение магнита вращающимся металлическим диском.....	41
3.2.16. Скин-эффект.....	42
3.2.17. ЭДС самоиндукции, возникающая при замыкании или размыкании цепи.....	43
3.2.18. Диамагнетики и парамагнетики в магнитном поле.	44
3.2.19. Втягивание ферромагнетика внутрь катушки. Электромагнитная пушка.....	45
3.2.20. Петля гистерезиса ферромагнетика.....	46
3.2.21. Точка Кюри ферромагнетика.....	47
3.2.22. Эффект Баркгаузена.....	48

3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

3.1. Электростатика

3.1.1. Приборы, используемые в опытах по электростатике

Часть приборов, используемых в лекционных опытах по электростатике, не имеет широкого распространения в современной измерительной технике. Поэтому описание принципов работы этих приборов в современной учебной литературе часто отсутствует. Ниже приводится описание некоторых из этих приборов.

Э л е к т р о с к о п

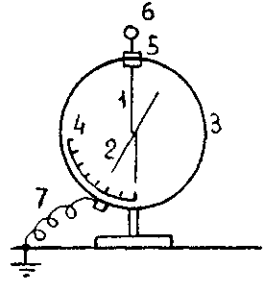
Назначение электроскопа - обнаружение (индикация) заряда. Простейший электроскоп представляет собой бутылку с пробкой из изолирующего материала. Сквозь пробку пропущен металлический стержень. На верхнем конце стержня закреплен металлический шарик, на нижнем - два листочка тонкой папиросной бумаги.

Если к шарiku электроскопа поднести заряженное тело, не касаясь шарика, то за счет электростатической индукции на шарике появится заряд противоположного знака, а нижний конец стержня и полочки бумаги приобретут заряд, одноименный с исследуемым. Наличие одноименных зарядов на листочках приводит к их кулоновскому отталкиванию. Расхождение листочков свидетельствует о наличии заряда на подносимом к электроскопу тела. Если заряженное тело удалить от электроскопа, то индуцированные заряды исчезнут и листочки опять сойдутся. Если исследуемое тело привести в соприкосновение с шариком электроскопа, то часть заряда тела перейдет к электроскопу. Переданный заряд распределится по поверхности шарика, стержня и листочкам. Заряженные листочки разойдутся. В данном случае при удалении исследуемого тела от электроскопа электроскоп остается заряженным и листочки остаются разошедшимися.

Электрометр

Электрометр - прибор для количественного измерения величины заряда. Вполне понятно, что любой электрометр можно использовать и как электроскоп. Устройство простейшего электрометра показано на рисунке.

На металлическом стержне 1 относительно горизонтальной оси 0 может вращаться легкая металлическая стрелка 2. Стрелка и основная часть стержня находится внутри металлического корпуса 3. Шкала 4 служит для измерений отклонения стрелки. Верхний конец стержня проходит сквозь корпус через изолирующую втулку 5. На конце стержня может быть закреплен металлический шарик 6 или полый металлический шар с небольшим отверстием сверху, а также проводник другой формы. Передняя стенка электрометра стеклянная, и через неё можно наблюдать за отклонением стрелки. Корпус имеет клемму 7 для заземления. Корпус прибора заземляется для того, чтобы окружающие его заземленные предметы, а также экспериментатор имели одинаковый с корпусом потенциал и между ними не могли возникнуть электрические поля, действие которых могло бы повлиять на результаты измерений.



Отклонение стрелки обусловлено кулоновским отталкиванием одноименных зарядов, расположенных на стержне и стрелке. Шкала 4 может быть отградуирована так, чтобы отклонение стрелки показывало заряд, сообщенный электрометру.

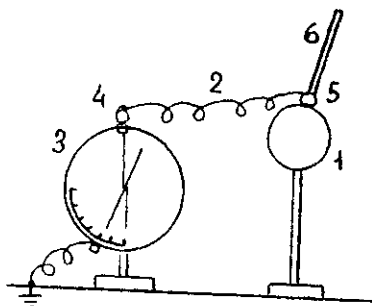
Для того чтобы при измерении заряда с помощью электрометра весь измеряемый заряд был передан электрометру, на верхнем конце стержня должен быть закреплен полый шар с отверстием сверху. Исследуемый заряд должен находиться на металлическом шарике диаметром, несколько меньшим диаметра отверстия в полном шаре. Этот шарик должен быть закреплен на изолирующем стержне. Если заряженный шарик внести внутрь полости и коснуться им внутренней стенки полого шара, то весь заряд маленького шара перейдет к полному шару и выступит на его внешней поверхности.

Известно, что потенциал любого заряженного тела относительно земли пропорционален величине этого заряда. Поэтому, зная ёмкость электрометра и его заряд, можно определить потенциал электрического поля на поверхности металлических деталей, на которых располо-

жен заряд. Следовательно, электрометр можно использовать также для измерения потенциала, проградуировав его шкалу в вольтах.

Для измерения потенциала заряженного проводника его соединяют длинной проволокой 2 с электрометром 3, как это показано на рисунке.

Заряды, располагавшиеся на теле 1, частично переходят на электрометр и проволочку. Все соединенные поверхности приобретают одинаковый потенциал, и электрометр измеряет потенциал проводника 1 относительно земли.

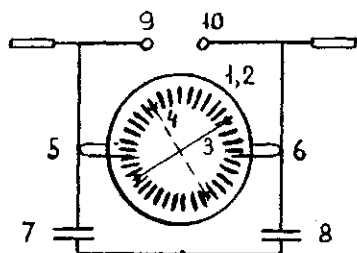


Следует обратить внимание на то, что переход части зарядов с тела 1 к электроскопу и проволочке уменьшает первоначальный заряд тела и приводит к ошибке измерений. Для уменьшения этой ошибки надо, чтобы электрическая ёмкость тела 1 была значительно больше ёмкости электроскопа. С этой целью заряженное тело 1 должно быть возможно больших размеров, а шарик на конце стержня электроскопа и шарик 5 на конце изолирующей ручки 6 должны быть по возможности маленькими.

Индукционная (электрофорная) машина

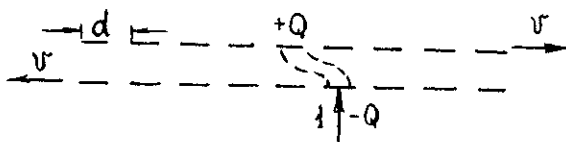
Индукционная машина является источником высокого напряжения (до 10^5 В) и малого тока (до $15 \cdot 10^{-5}$ А). В этих машинах используется явление электризации по влиянию, или электростатическая индукция. На рисунке показана схема такой машины.

В этой машине имеются два стеклянных диска 1 и 2, расположенных в параллельных плоскостях на небольшом расстоянии друг от друга. Диски насажены на общую ось, но вращаются в противоположных направлениях. На внешние поверхности дисков наклеены в радиальных направлениях металлические полоски. На концах двух дугообразных металлических держателей 3 и 4 расположены мягкие металлические метелочки. С помощью этих метелочек и держателя может быть осуществлен электрический контакт между диаметрально противоположными полосками. Держатель 3 осуществляет контакт между полосками переднего диска, держатель 4 - между полосками заднего диска. На вилкообразных держателях 5 и 6, охватывающих диски 1 и 2, находятся острия для снятия зарядов с подходящих к ним полосок. Эти острия не

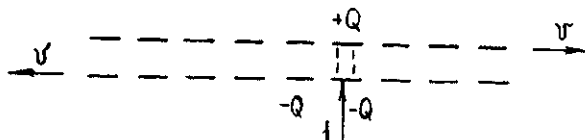


касаются не касаются полосок. Снятие зарядов происходит за счет электрического разряда через воздух. Для накопления заряда используются конденсаторы 7 и 8. В качестве этих конденсаторов обычно применяются лейденские банки. На внешние приборы напряжение снимается с противоположно заряженных шариков 9 и 10.

Для пояснения принципа действия индукционной машины рассмотрим вначале следующий рисунок.

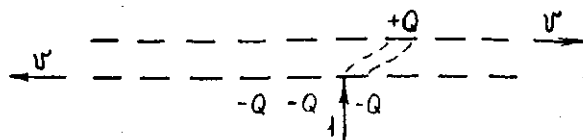


На этом рисунке черточки символизируют металлические полоски, наклеенные на стеклянные диски. Стрелка 1 символизирует одну из металлических метелочек. Пусть верхняя система полосок движется вправо, а нижняя - влево. Предположим, что на одной из полосочек имеется небольшой заряд $+Q$ случайного происхождения. Этот заряд индуцирует на полосочках, контактирующих с метелочками, связанными металлическим держателем, свободные заряды. На полосочке, контактирующей с метелочкой, показанной на рисунке, этот заряд будет отрицательным. На других полосках индуцированные заряды только одного знака возникнуть не могут. Силовые линии системы зарядов показаны на рисунке пунктиром.

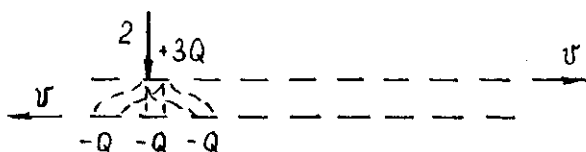


Рассмотрим теперь момент времени, когда система верхних полосок сместится на один период d вправо, а нижних - на один период d влево при неподвижной метелочке 1. Индуцированный ранее заряд $-Q$ сместится влево, а на полосочке, контактирующей с метелочкой, индуцируется новый отрицательный заряд такой же величины.

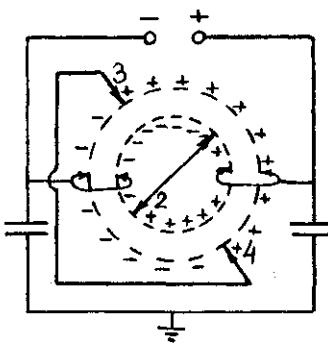
Распределение зарядов при смещении полосочек ещё на один период показано на следующем рисунке.



При дальнейшем движении системы полосок заряд $+Q$ новых зарядов на метелочке не индуцирует, так как удаляется от неё на значительное расстояние. Система трех отрицательных зарядов продолжает двигаться влево, приближаясь к метелочке 2, контактирующей с другой (верхней на чертеже) системой полосок. Проходя мимо этой метелочки, три отрицательно заряженные полосочки индуцируют положительные заряды, в результате чего окажутся заряженными положительно 5 полосочек. Наибольшая величина положительного заряда индуцируется в положении, показанном ниже.



В этом случае индуцируется заряд, в три раза больший, чем первоначальный случайный заряд.



Таким образом, при движении системы полосок число заряженных полосок возрастает. Возрастает также и величина этих зарядов. На следующем схематическом рисунке показано установившееся распределение зарядов по полосочкам. На этом рисунке черточки, расположенные по двум окружностям, как и на предыдущих рисунках, символизируют металлические

полоски, наклеенные на стеклянные диски. Цифрами 1, 2, 3 и 4 помечены стрелочки, символизирующие метелочки, контактирующие с полосками. Линии, соединяющие метелочки 1 и 2, а также 3 и 4, — металлические держатели метелочек.

В установленном режиме возрастание зарядов на полосочках компенсируется потерями, связанными со стеканием зарядов в атмосферу, а также с потерями в подключаемых к машине приборах.

3.1.2. Электризация посредством контакта тел (электризация трением)

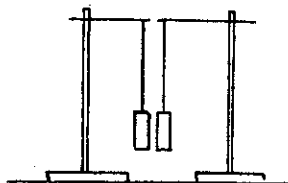
Из свойств, присущих заряженным телам, одним из первых было установлено свойство отталкивания этих тел, если они заряжены от одного и того же третьего тела. Это свойство используется для обнаружения заряда в электроскопах и электрометрах.

С помощью электрометра легко показать, что если стеклянную палочку потереть бумагой или эбонитовую палочку потереть шерстяной тканью, то на них возникают электрические заряды.

При передаче заряда от палочки электрометру следует помнить, что эбонит и стекло — изоляторы. Заряды в них не могут перемещаться вдоль поверхности. Поэтому при касании палочкой стержня электрометра только в одной точке на электромер перейдет лишь незначительная часть заряда. Для увеличения числа зарядов, переданных электрометру, следует совершить несколько скользящих движений палочки относительно стержня электроскопа. Наилучший результат получается, если на конце стержня находится полый металлический шар с отверстием наверху, а заряженной палочкой делать скользящие движения вдоль кромки отверстия.

3.1.3. Два вида электрических зарядов

Для выполнения опыта нужно иметь два легких цилиндра, подвешенных на нитях, укрепленных на штативах с изолирующими подставками, а также эбонитовую и стеклянную палочки. Если оба цилиндра зарядить от эбонитовой палочки, то они будут отталкиваться. Если их зарядить от стеклянной палочки, то также будут отталкиваться. Но если один цилиндр зарядить от эбонитовой палочки, а другой — от стеклянной, то цилиндрики будут притягиваться. Это говорит о том, что заряды на эбонитовой и стеклянной палочках не идентичны. Заряды, возникающие на стеклянной палочке, были названы положительными, а на эбонитовой —

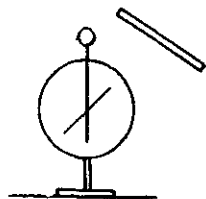


отрицательными. В этом опыте вместо бумажных цилиндров можно использовать "султаны".

3.1.4. Электризация посредством влияния (электростатическая индукция)

В опытах по электризации через влияние подтверждается сразу несколько утверждений:

- а) наличие в проводниках как положительных, так и отрицательных зарядов;
- б) существование в металлических телах свободных зарядов (хотя бы одного знака);
- в) выполнимость для изолированной системы закона сохранения заряда.

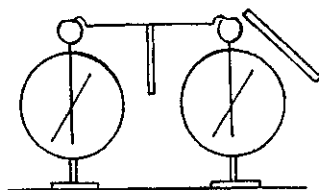


Существует несколько вариантов исполнения этих опытов. В первом варианте используются электрометр и стеклянная, либо эбонитовая палочка. Если заряженную палочку поднести к электроскопу, но не касаться его внешнего металлического шара, то стрелка электроскопа отклонится, что говорит о наличии на стрелке электрического заряда. Если палочку убрать, то стрелка возвращается в исходное положение. Следовательно, заряд на ней исчезает. Заряд на стрелке возникает (индуцируется) и существует только при наличии влияния на электроскоп заряда, находящегося на палочке.

Для объяснения описанного опыта надо предположить, что в металлических телах имеются как положительные, так и отрицательные заряды в равных количествах, причем в отсутствие внешнего электрического поля плотности этих зарядов в каждой точке проводника совпадают. Далее следует предположить, что под действием внешнего поля заряды могут перемещаться (свободные заряды). Если палочка заряжена положительным зарядом, то отрицательные заряды под действием кулоновских сил притяжения соберутся на внешнем шаре электрометра, а положительные заряды должны сконцентрироваться на стрелке и стержне, на котором закреплена стрелка. Наличие этих положительных зарядов и вызывает отклонение стрелки. В целом же заряд электрометра равен нулю.

Если, не убирая поднесенную заряженную палочку, шарик электроскопа заземлить (достаточно прикоснуться рукой), то индуцированные положительные заряды уйдут в землю. Это энергетически более выгодно. Отклонение стрелки станет равным нулю. Если после этого заземление убрать, а затем удалить палочку, то на электроскопе останется избыточный, отрицательный заряд. Стрелка электроскопа опять отклонится.

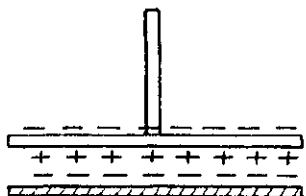
Во втором варианте исполнения этих опытов используются два электроскопа, эбонитовая и стеклянная палочки и металлические перемычки с изолированной ручкой.



Если поднести заряженную палочку к одному из электроскопов, то в том случае, когда электроскопы соединены перемычкой, отклонятся стрелки на двух электроскопах. Если палочку убрать, то разряжаются сразу оба электроскопа. Если же вначале убрать перемычку, а затем убрать палочку, то оба электроскопа окажутся заряженными. При соединении электроскопов перемычкой оба электроскопа разряжаются. Это говорит о том, что электроскопы были заряжены одинаковыми по величине зарядами противоположного знака.

3.1.5. Электрофор

Электрофор представляет собой эбонитовую пластинку и металлический диск на изолирующей ручке. Если эбонитовую пластинку наэлектризовать, потерев мехом или сукном, а затем к поверхности пластины близко поднести металлический диск, то за счет электростатической индукции верхняя и нижняя поверхности диска зарядятся противоположными зарядами.



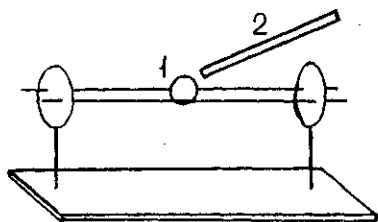
Отрицательный заряд верхней поверхности пластины можно убрать, заземлив эту поверхность (можно коснуться её рукой). На диске останется только положительный заряд. Этот заряд можно перенести на другое тело, например на электроскоп. Так как заряд эбонитовой пластинки не изменился, то эту операцию можно повторить много раз и передать телу значительный заряд. Этот принцип используется в электрофорной (индукционной) машине.

В этом опыте металлический диск может касаться эбонитовой пластины. Поскольку диск касается эбонитовой пластины всего в нескольких точках, а электропроводность вдоль поверхности диэлектрика отсутствует, то за одно касание с пластиной заряд пластины изменится незначительно.

3.1.6. Взаимодействие заряженных тел с незаряженными телами

Опытным путем можно установить, что заряженные тела взаимодействуют не только с другими заряженными телами, но и с незаряженными телами. При этом в общем случае могут быть отличными от нуля как равнодействующая сил взаимодействия, так и момент этих сил. Равнодействующая сил, действующих на незаряженное тело, всегда направлена в сторону заряженного тела. В результате этого заряженное и незаряженное тела всегда притягиваются друг к другу. (Поэтому притяжение какого-либо тела к заряженному телу не является доказательством того, что оно заряжено.)

Момент сил взаимодействия стремится повернуть незаряженное тело в сторону наиболее устойчивого состояния. Наиболее устойчивым состоянием оказывается состояние, когда длина продолговатого тела будет ориентирована вдоль линии действия электрических сил (вдоль силовой линии).

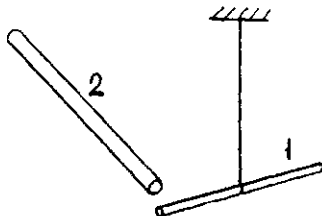


Для демонстрации того, что под действием равнодействующей сил взаимодействия незаряженные тела притягиваются к заряженным, можно использовать легкие шарики (например, от настольного тенниса), расположенные на параллельных горизонтально ориентированных непроводящих стержнях, как показано на рисунке.

Если к 1 поднести наэлектризованную палочку 2, то шарик начнет двигаться в сторону палочки. Если при этом палочку перемещать в сторону направления скорости шарика, не давая возможности шарика коснуться палочки, то можно добиться значительного смещения шарика, видимого всей аудитории. Шарик 1 может быть как непроводящим, так и с проводящим покрытием.

Для демонстрации действия момента сил на незаряженное тело удобно использовать тела продолговатой формы, подвешенные на нити, например горизонтально расположенные стержни. Такая установка обладает очень высокой чувствительностью.

Стержень 1, показанный на рисунке, может быть как металлическим, так и диэлектрическим. Если к концу стержня поднести наэлектризованную палочку 2, то стержень придет во вращательное движение относительно оси, совпадающей с нитью подвеса. Ближайший к заряженной палочке конец стержня будет двигаться в сторону палочки. Наблюдаемое явление в случае металлического незаряженного тела объясняется тем, что под действием электрического поля наэлектризованной палочки на поверхности этого тела индуцируются свободные заряды. На той стороне тела, которая обращена к палочке, возникают заряды противоположного по сравнению с зарядом палочки знака. На противоположной стороне возникают заряды того же знака, как и на палочке. Незаряженное тело становится диполем.



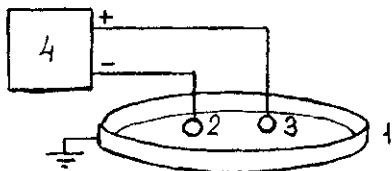
Известно, что на диполь, помещенный в однородное поле, действует только момент силы, стремящейся ориентировать диполь вдоль силовой линии. Если поле неоднородно (как в случае наэлектризованной палочки), то на диполь действует также отличная от нуля равнодействующая сила. Эта сила всегда направлена в сторону возрастания плотности энергии электрического поля, т.е. в сторону возрастания модуля напряженности поля $|\vec{E}|$.

В том случае, когда незаряженное тело является диэлектриком, на его поверхности под действием внешнего электрического поля также появляются заряды, но не свободные, а связанные, поляризованные. В результате диэлектрическое тело становится диполем.

3.1.7. Силовые линии электрического поля

Для наглядной демонстрации конфигурации электрического поля вблизи тел различной формы удобно использовать мелкие крупинки в жидком диэлектрике. Схема демонстрационной установки показана на рисунке.

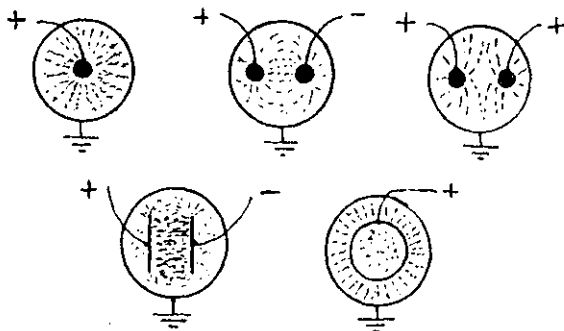
В стеклянную кювету 1 наливается слой прозрачного машинного или касторового масла. В масло насыпают манную крупу. Промешивая стеклянной палочкой, добиваются равномерного распределения крупинок по кювете. Затем в масло погружают металлические электроды 2 и 3, которые могут иметь различную форму. Электроды заряжаются от индукционной машины 4. Электрод, охватывающий цилиндрическую поверхность кюветы, заземлен. В электрическом поле крупинки группируются в цепочки, вытянутые вдоль силовых линий, и дают наглядное представление о конфигурации электрического поля.



Следует заметить, что форма отдельных крупинок близка к шарообразной. Поэтому изменение ориентации отдельных крупинок визуально обнаружить очень трудно. Если бы воздействие электрического поля на крупинки сводилось лишь только к изменению их ориентации, то наблюдение конфигурации электрического поля было бы невозможным.

В электрическом поле крупинки поляризуются и становятся диполями. При небольших расстояниях между диполями кроме действия внешнего электрического поля на диполи следует учитывать также взаимодействие между ближайшими диполями. В результате этого взаимодействия диполи притягиваются друг к другу, образуются более крупные диполи вытянутой формы, которые ориентируются вдоль силовых линий.

Имеются электроды для наблюдения конфигураций электрического поля, показанных на рисунке.



Для того чтобы полученная картина была видна большой аудитории, с помощью проектора создается увеличенное изображение этой картины на экране.

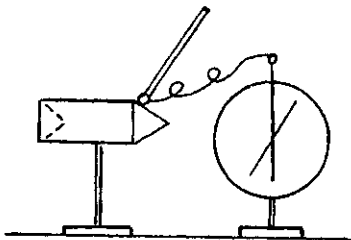
Простейший опыт можно осуществить с помощью двух "султанов". "Султаны" состоят из нескольких десятков тонких полосок папиросной бумаги, укрепленных на металлическом стержне, вставленном в изолирующий штатив. При отсутствии заряда на "султанах" полоски бумаги висят вертикально.

Если взять один "султан", соединить его с одним из полюсов индукционной машины и сообщить ему заряд, то полосочки "султана" расположатся радиально, демонстрируя картину поля одиночного заряда. Если два близко расположенных "султана" зарядить одноименными зарядами, то листочки одного "султана" будут отталкиваться от листочков другого "султана" и их расположение окажется аналогичным расположению силовых линий поля двух одноименных зарядов. Если "султаны" зарядить разноименными зарядами, то полосочки разных "султанов" будут притягиваться и их расположение окажется аналогичным расположению силовых линий поля разноименных зарядов.

3.1.8. Потенциал заряженного проводника

В электростатическом поле потенциал во всех точках проводника одинаков. Поверхность проводника является эквипотенциальной.

Для экспериментальной проверки этого утверждения используется металлическое тело, укрепленное на изолирующей подставке. Это тело может быть заряжено от индукционной машины либо с помощью наэлектризованной палочки. Потенциал может быть измерен с помощью электрометра. Для этого надо взять металлический шарик на изолирующей ручке, соединенный проводником с электрометром, и коснуться им той точки поверхности, потенциал в которой следует измерить.



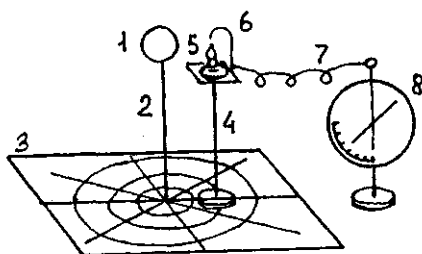
Перемещая шарик вдоль поверхности исследуемого металлического тела, можно убедиться, что угол отклонения стрелки электрометра не изменяется. Это означает, что потенциал всех точек одинаков, т.е. поверхность металлического тела в случае статического заряда является эквипотенциальной.

3.1.9. Потенциал точек электрического поля. Эквипотенциальные поверхности

Измерение потенциала электрического поля в воздухе представляет определенные трудности. Если в ту точку поля, в которой следует измерить потенциал, поместить зонд (заостренный конец проволоочки) и с помощью проводника соединить с электрометром, то в системе проводников зонд – соединительный проводник – стержень электрометра за счет электростатической индукции произойдет перераспределение зарядов, которое приведет к единому потенциалу всей системы проводников. Стрелка электрометра отклонится. Однако потенциал, который при этом будет измерен, не будет равен потенциалу поля вблизи острия зонда, так как на границе острие – воздух обычно наблюдается скачок потенциала.

Для того, чтобы скачок потенциала на границе острие – воздух исчез, в маленькой области пространства вблизи острия надо вызвать электропроводность воздуха. Для этого используется ионизация воздуха вблизи острия с помощью пламени газовой горелки либо спиртовки. За счет скачка потенциала ионы воздуха, имеющие знак заряда,

противоположный знаку заряда острия, будут переходить на острие и уменьшать этот скачок до тех пор, пока он не исчезнет. В этом случае потенциал зонда будет равен потенциалу поля вблизи острия и показания электрометра будут соответствовать потенциалу электрического поля вблизи острия зонда.



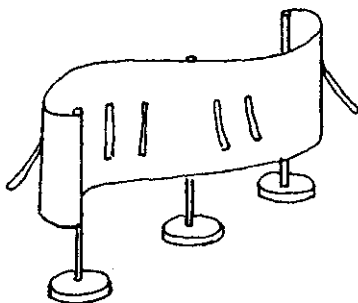
На рисунке показана схема демонстрационной установки. Электрическое поле создается металлическим шаром 1, заряженным от индукционной машины. Шар укреплен на изолирующей стойке 2. Пластина 3, на которой укреплена стойка 2, имеет разметку в виде концентрических окружностей и радиальных линий. Стойка укреплена в центре этой картины. На верхнем конце стойки 4 имеется площадка, на которой стоит спиртовка 5. В пламени спиртовки находится зонд 6, который проводником 7 соединен с электрометром 8. Стойка 4 может перемещаться. Соответственно зонд 6 можно перемещать как в радиальном направлении, так и вдоль окружности вокруг шара.

Двигая зонд вдоль радиуса, наблюдают, что отклонение стрелки электрометра увеличивается при приближении зонда к шару. Двигая зонд по окружности вокруг шара, наблюдают, что показания электрометра не изменяются, т.е. точки этой окружности лежат на одной эквипотенциальной поверхности.

3.1.10. Распределение заряда по поверхности проводника.

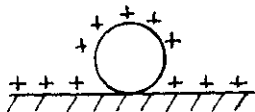
Опыт с гибкой металлической сеткой

Зависимость поверхностной плотности заряда от кривизны поверхности заряженного проводника (в отсутствие внешнего поля) можно продемонстрировать на следующей установке. Гибкая металлическая сетка закреплена между изолирующими стойками. На поверхности сетки с обеих сторон закреплены легкие полосочки из папиросной бумаги. Поскольку сетка гибкая, ей можно придавать различную форму. Если сетку зарядить от индукционной машины, то листочки, заряжаясь от сетки одноименными зарядами, будут от неё отклоняться. Наибольший угол отклонения будет в тех местах, где поверхностная плотность заряда также наибольшая. В опыте можно наблюдать, что там, где поверхность выпуклая, листочки отклоняются больше, причем тем больше, чем меньше радиус кривизны поверхности.



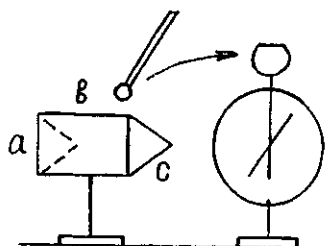
3.1.11. Исследование распределения заряда по поверхности проводника с помощью металлического шарика на изолирующей ручке и электрометра

Если незаряженный металлический шарик привести в соприкосновение с заряженной металлической поверхностью некоторого тела, то часть зарядов с поверхности тела перейдет на поверхность шарика. Переход зарядов с заряженного тела на шарик прекратится тогда, когда напряженность электрического поля внутри шарика станет равной нулю, т.е. когда внутри шарика электрическое поле зарядов тела будет компенсироваться электрическим полем зарядов шарика. Вблизи заряженной метал-



лической поверхности напряженность электрического поля пропорциональна поверхностной плотности зарядов в соответствии с формулой $E_n = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$. Следовательно, заряд шарика также должен быть пропорционален плотности зарядов поверхности тела на участке, ближайшем к шарика. Этот факт можно использовать для исследования распределения заряда по поверхности проводника.

Металлический шарик диаметром около двух сантиметров закреплен на изолирующей ручке длиной около 15 см. Если этим шариком коснуться заряженной металлической поверхности в некоторой точке, а затем коснуться им стержня электроскопа, то отклонение стрелки электроскопа будет пропорционально заряду шарика и, следовательно, поверхностной плотности заряда вблизи точки касания шарика с телом.



Для демонстрации используется металлическое тело, закрепленное на изолирующей подставке. Поверхность тела состоит из трех частей. Часть "в"- цилиндрическая, части "а" и "с" - конические. Вершина конуса "а" расположена внутри цилиндра "в". Вершина конуса "с" расположена вне цилиндра "в". Тело заряжается от индукционной машины.

Касаясь шариком конической поверхности "а" вблизи вершины, а затем электрометра, замечаем, что стрелка электрометра не отклоняется. Заряд на этой поверхности отсутствует. При переносе заряда с цилиндрической части поверхности замечаем отклонение стрелки электрометра на некоторый угол. При переносе заряда с поверхности "с" отклонение стрелки электрометра увеличивается. Наибольшая поверхностная плотность зарядов наблюдается вблизи выступающих заостренных частей тела.

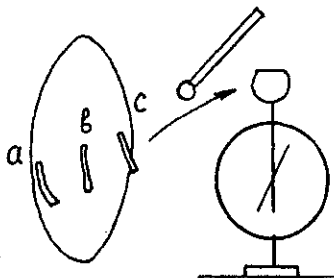
Следует заметить, что шарик в этом опыте не должен быть очень большим, чтобы его емкость была во много раз меньше емкости тела. Кроме того, ручка должна быть целиком из изолирующего материала. Если использовать шарик, закрепленный на металлическом стержне, заканчивающемся изолирующей ручкой, то результаты опыта будут значительно искажены.

3.1.12. Электрическое поле заряженного металлического диска

Электрические заряды по поверхности металлического диска распределяются неравномерно. За счет кулоновского отталкивания наибольшая плотность зарядов будет наблюдаться на краю диска, наименьшая - в центре диска.

Для демонстрации используется алюминиевый диск диаметром 35 см. Диск располагается в вертикальной плоскости. В точках "а", "в" и "с" подвешены полоски алюминиевой фольги. Если диск зарядить от индукционной машины, то полоски фольги отклонятся. При этом отклонение полоски "в" будет наименьшим.

Показать, что поверхностная плотность зарядов в центре диска меньше, чем по краям, можно также методом, описанным в п.3.1.11, с помощью металлического шарика и электрометра. Касаясь шариком различных точек поверхности диска и перенося полученные заряды на электрометр, можно убедиться, что наименьшее отклонение стрелки электрометра наблюдается при перенесении заряда из центра диска. В центре диска наименьшая плотность зарядов и, следовательно, напряженность электрического поля вблизи центра диска также наименьшая. Электрическое поле заряженного металлического диска не является однородным.



3.1.13. Действие заряженного острия в воздухе. Электрический ветер

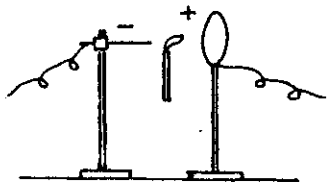
На заостренных участках поверхности металлического заряженного тела поверхностная плотность заряда может быть весьма значительной. Соответственно и напряженность электрического поля вблизи такого участка может быть также весьма большой. При этом происходит заметное стекание зарядов с острия и возникает электрический ветер.

Рассмотрим острие, заряженное положительным зарядом. Так как напряженность электрического поля вблизи острия весьма высока, то такое поле вызывает ионизацию воздуха. Отрицательные ионы (или электроны) притягиваются к положительному острию и переходят на



него. В результате положительный заряд острия уменьшается. Это дает основание говорить об утечке или стекании заряда с острия.

Между положительными зарядами острия и положительными ионами воздуха действуют силы отталкивания. В результате этого возникает поток положительных ионов, направленный от острия. Движущиеся ионы увлекают за собой другие молекулы воздуха. Возникает так называемый электрический ветер.



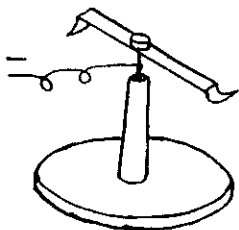
Рассмотрение отрицательного заряженного острия также приводит к выводу о стекании зарядов и возникновении электрического ветра.

Электрический ветер можно обнаружить в опыте, схема которого показана на рисунке.

С помощью индукционной машины создается электрическое поле между острием и плоским электродом. Между острием и плоскостью помещается зажженная свеча. Под действием ветра пламя свечи отклоняется.

3.1.14. Реактивные силы при истечении зарядов с острия

Вблизи острия ионы воздуха приобретают скорость, а следовательно, и импульс, направленный от острия. На основании закона сохранения импульса такой же импульс, но в противоположном направлении должно получить острие. На острие должна действовать реактивная сила. Это можно продемонстрировать с помощью следующего устройства. На изолирующей подставке вертикально расположена игла, на которую подобно магнитной стрелке в компасе опирается легкая металлическая пластинка, как показано на рисунке.

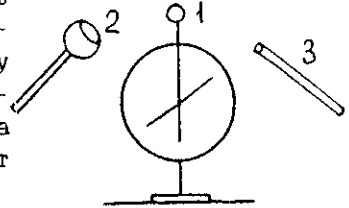


На краях пластинки расположены два острия, ориентированные в противоположных направлениях. Такое устройство часто называют колесом Франклина. Пластины заряжают от электрофорной машины. При стекании зарядов за счет действия момента реактивных сил колесо начинает вращаться.

3.1.15. Экранирующее действие проводника

В этом опыте демонстрируется, что электрическое поле внутри полого проводника отсутствует, несмотря на то, что снаружи имеется внешнее электрическое поле. Для демонстрации используется электроскоп с небольшим шариком 1 наверху. Кроме этого используется большой полый шар 2 на изолирующей руке. На поверхности этого шара имеется отверстие, в которое свободно, не касаясь шара, может проходить шарик, закрепленный на электроскопе.

Внешнее поле можно создать наэлектризованной палочкой 3 или каким-либо другим заряженным телом. То, что палочка наэлектризована, можно проверить, поднеся палочку к электроскопу (но не касаясь его). Стрелка электроскопа отклонится под действием зарядов индуцированного в электроскопе. Если теперь полым шаром 2 накрыть шарик 1 (не касаясь его) и поднести палочку 3 к этому шару, то стрелка не отклонится, что подтверждает, что поле внутри полого шара отсутствует. Внешнее поле не проникает внутрь заэкранированного объема.

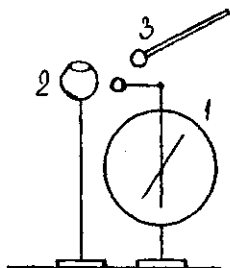


3.1.16. Экранирование поля зарядов, находящихся внутри металлической оболочки

Если внутри некоторого объема, окруженного металлической оболочкой - экраном, поместить заряд Q , то под действием электростатической индукции на внутренней поверхности экрана появятся заряды противоположного знака, а на внешней - одноименные с зарядом Q . С помощью теоремы Гаусса легко доказать, что поток силовых линий через произвольную замкнутую поверхность, экран, будет такой же, как и в случае отсутствия экрана. Экранирующее действие металлической оболочки отсутствует.

Если внешнюю поверхность оболочки (экрана) заземлить, то заряды с этой поверхности перейдут на Землю. Поле заряда Q снаружи от экрана будет компенсировано полем зарядов противоположного знака, индуцированного на внутренней поверхности экрана. Следовательно, электрическое поле зарядов, находящихся внутри заземленного экрана, снаружи экрана отсутствует.

Для демонстрации опыта нужно иметь электроскоп 1, полый шар 2 на изолирующей подставке и металлический шар 3 на изолирующей ручке, заряжаемый от электрофорной машины. Если заряженный шар 3 поднести к электроскопу, то стрелка электроскопа отклонится. Если заряженный шар внести внутрь полости шара 2, то стрелка электроскопа также отклонится. Но если шар 2 заземлить (можно просто касаться его рукой), то заряженный шар 3, находящийся внутри шара 2, не вызовет отклонения стрелки электроскопа. Поле шара 3 будет заэкранировано.

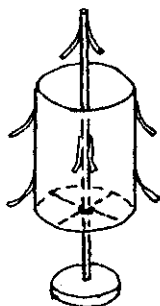


В конце опыта заряженный шар 3 следует вынуть из экрана, поднести опять к электроскопу и убедиться, что заряд сохранился.

3.1.17. Отсутствие электрического поля внутри металлической оболочки. Цилиндр Фарадея

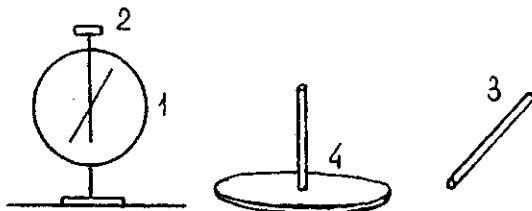
Цилиндр Фарадея представляет собой цилиндр, изготовленный из металлической сетки и укрепленный на металлическом стержне, как показано на рисунке.

Цилиндр и стержень изолированы друг от друга. На внешней и внутренней поверхностях цилиндра наклеены узкие тонкие полоски бумаги. Такие же полоски наклеены и на металлический стержень. Как стержень, так и сетка могут быть заряжены от индукционной машины; при этом и в том и в другом случаях наблюдается отклонения листочков, находящихся на внешней поверхности сетки и на той части стержня, которая не входит внутрь цилиндра. На внутренней поверхности цилиндра и на той части стержня, которая расположена внутри цилиндра, отклонения листочков не наблюдается, что говорит о том, что электрическое поле внутри цилиндра отсутствует.



3.1.18. Зависимость электроемкости тел от их размеров

Электроемкость металлических тел возрастает с увеличением их размеров. Для демонстрационного опыта, подтверждающего это высказывание, используется электрометр 1, на верхнем конце металлического стержня которого закреплено небольшое тело 2, имеющее в верхней части горизонтальную площадку. Тело 2 может быть заряжено от наэлектризованной палочки 3. При этом стрелка электрометра отклонится на некоторый угол, пропорциональный потенциалу тела. После этого берется металлический диск 4 на изолирующей ручке и кладется на горизонтальную площадку тела 2. Показания электрометра при этом уменьшаются. Это свидетельствует об уменьшении потенциала системы тел 2 и 4 при неизменной величине заряда. Так как электроемкость тела пропорциональна отношению заряда к потенциалу, то из результата опыта можно сделать вывод, что электроемкость системы тел 2 и 4 больше, чем электроемкость тела 2.



Следует заметить, что если снять тело 4 с электроскопа, то показание электрометра не изменится, хотя электроемкость уменьшится. Это объясняется тем, что тело 4 мы убрали вместе с находившимся на нем зарядом.

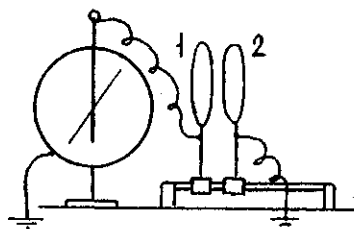
В опыте используется диск диаметром около 15 см.

3.1.19. Электроемкость конденсатора

Демонстрационный конденсатор представляет собой две круглые металлические пластины диаметром 20 см, расположенные вертикально, параллельно друг другу. Пластины закреплены на изолирующих стержнях, а стержни закреплены на подставках, которые могут перемещаться вдоль горизонтально расположенных направляющих основания прибора. Пластина 1 конденсатора может быть заряжена от индукционной машины или от наэлектризованной палочки. Пластина 2 заземлена. Электрометр соединен с пластиной 1.

Для того чтобы показать, что с увеличением расстояния между пластинами электроемкость уменьшается, постепенно увеличиваем это расстояние и наблюдаем увеличение разности потенциалов между пластинами.

Если при фиксированном расстоянии между пластинами в пространство между пластинами конденсатора ввести диэлектрическую пластину, то заметим уменьшение разности потенциалов, что говорит об увеличении электроемкости.

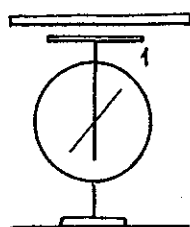


Если одну из пластин смещать в сторону, т.е. уменьшать площадь рабочей части пластин конденсатора, то можно будет заметить увеличение разности потенциалов, т.е. уменьшение электроемкости конденсатора.

3.1.20. Поляризация диэлектриков

Косвенным подтверждением поляризации диэлектриков являются опыты по взаимодействию заряженных тел с диэлектрическими незаряженными телами, рассмотренные в п.3.1.6. Кроме того, в п.3.1.19 рассмотрен опыт по увеличению емкости конденсатора при внесении в него диэлектрической пластины.

Дополнительно можно показать следующий опыт. На верхнем конце стержня электрометра закрепляется металлический диск 1 диаметром 10...15 см. Диск заряжен от наэлектризованной палочки. При этом

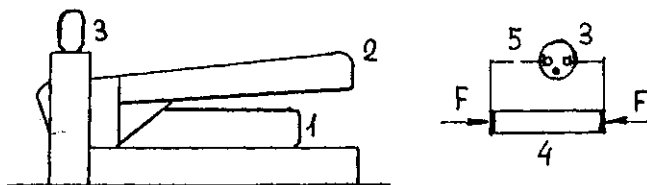


стрелка электрометра отклоняется на некоторый угол. Если к диску 1 поднести диэлектрическую пластинку 2, то угол отклонения стрелки уменьшится. Это объясняется тем, что в электрическом поле зарядов, расположенных на диске 1, диэлектрик пластины 2 поляризуется. На поверхности пластины, обращенной к диску 1, выступают поляризационные заряды, знак которых противоположен знаку заряда диска. Электрическое поле поляризационных зарядов ослабит электрическое поле вблизи стрелки электрометра, уменьшит его потенциал.

3.1.21. Прямой пьезоэффект

Поляризованное состояние большинства диэлектриков вызывается действием внешнего электрического поля. В веществах, названных пьезоэлектриками, поляризованное состояние возникает не только при деформации под действием внешних сил. При деформации тел, изготовленных из пьезоэлектриков, даже в отсутствие электрического поля от внешних источников возникают поверхностные поляризационные заряды противоположных знаков. Возникает собственное электрическое поле. Между участками поверхности с поверхностными зарядами противоположного знака возникает разность потенциалов. Эта разность потенциалов может иметь значительную величину и легко может быть обнаружена экспериментально. В демонстрационной установке используются пьезоэлемент и рычаг для создания давления на пьезоэлемент от пьезоэлектрической аажигалки для газовых плит. При нажатии на рычаг между торцами пьезоэлектрического стержня возникает напряжение в несколько киловольт. В искровом промежутке аажигалки возникает искра, служащая для поджигания газа.

Для того чтобы результат опыта был виден большой аудитории, в качестве индикатора возникающей разности потенциалов используется неоновая лампа. Внешний вид и схема установки показаны на рисунке, где обозначены:



1 - держатель пьезоэлемента; 2 - рычаг; 3 - неоновая лампа; 4 - пьезоэлемент; 5 - искровой промежуток

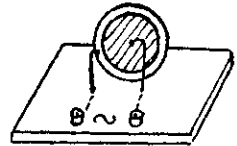
Описанный эффект называется **прямым пьезоэффектом**.

3.1.22. Обратный пьезоэффект

Обратный пьезоэффект заключается в том, что под действием электрического поля пьезоэлектрики деформируются. Эта деформация невелика, и невооруженным глазом обнаружить её невозможно. Однако если пьезоэлектрик поместить в переменное электрическое поле звукового диапазона частот, то механические колебания поверхности пьезоэлектрического тела будут передаваться молекулам воздуха. Это тело станет источником звука, который можно услышать.

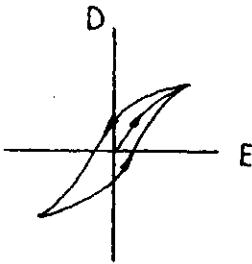
Для демонстрации обратного пьезоэффекта используется пьезоэлектрическая пластина, укрепленная на подставке, на которую подается переменное электрическое напряжение от генератора звуковых частот.

Частота подаваемых колебаний 3-4 кГц.
Напряжение - порядка 10 В.

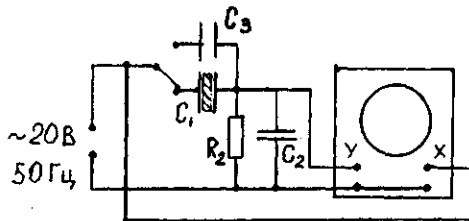


3.1.23. Петля гистерезиса сегнетоэлектрика

Для сегнетоэлектриков зависимость поляризованности \mathcal{P} , а также смещения D от напряженности электрического поля E не является линейной. Кроме того, \mathcal{P} и D определяются не только величиной напряжения в данный момент, но и предшествующими значениями E . При циклических изменениях E график зависимости $D(E)$ имеет форму петли, называемой петлей гистерезиса.



Вид этой петли можно продемонстрировать на экране осциллографа. Схема установки показана на следующем рисунке.



На этом рисунке C_1 - сегнетоэлектрический конденсатор. На вход X осциллографа подается напряжение около 20 В. На вход Y подается напряжение с делителя напряжения, состоящего из последовательно соединенных конденсатора C_1 и конденсатора C_2 , шунтированного сопротивлением R_2 . Если бы емкость сегнетоэлектрического конденсатора не зависела от подаваемого на него напряжения, то напряжение, подаваемое на вход Y осциллографа с делителя напряжения, было бы пропорционально входному напряжению и на экране наблюдалась бы прямая наклонная линия (при дополнительном условии равенства фаз складываемых колебаний). Так как диэлектрическая проницаемость ϵ сегнетоэлектриков зависит от напряжения, то и емкость C_1 , а следовательно, и коэффициент деления напряжения также зависят от напряжения. При условии $C_2 \gg C_1$ коэффициент деления пропорционален диэлектрической проницаемости ϵ .

Таким образом, напряжение, подаваемое на вход X, не зависит от ϵ сегнетоэлектрика, в то время как напряжение, подаваемое на вход Y, пропорционально ϵ . Поскольку ϵ зависит от напряжения, зависимость напряжения на входе Y от напряжения, подаваемого на вход X, не является линейной. Эта зависимость аналогична зависимости смещения D от напряженности E. Фигура, получаемая на экране осциллографа, имеет вид петли гистерезиса.

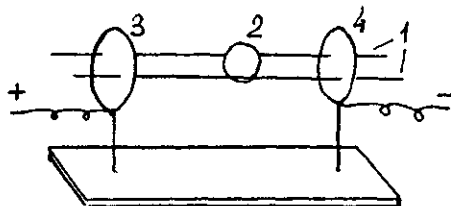
Для того, чтобы фазы напряжений, подаваемых на вход X и вход Y, были одинаковы, необходимо выполнение условия, чтобы $R_1 C_1 = R_2 C_2$, где R_1 - омическое сопротивление сегнетоэлектрика.

Если вместо сегнетоэлектрического конденсатора C_1 в схему включить несегнетоэлектрический конденсатор C_3 , то на экране будет наблюдаться прямая наклонная линия.

3.1.24. Работа электрического поля по перемещению заряженных тел

Поскольку в электрическом поле на заряженные тела действует сила, при перемещении этих тел совершается работа. Для соответствующей демонстрации могут быть использованы любые опыты, в которых заряженные тела смещаются под действием электрической силы (см. например, 3.1.3). существуют конструкции, в которых эта работа может совершаться достаточно значительное время - электрические машины. В качестве примера такой циклически действующей машины рассмотрим следующую конструкцию. На двух параллельных горизон-

тально расположенных стеклянных палочках 1 лежит легкий шарик 2 с металлизированной поверхностью. Палочки закреплены между двумя металлическими дисками 3 и 4. Диски 3 и 4 закреплены на изолирующей подставке.



К дискам 3 и 4 подводится напряжение от индукционной машины.

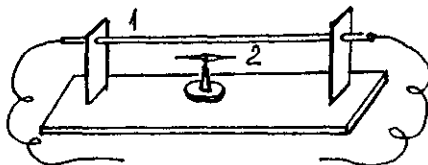
Если с помощью диэлектрической палочки шарик 2 сместить в сторону одного из дисков, например 3, до контакта с этим диском, то шарик зарядится зарядом одного знака с зарядом диска 3 и будет отталкиваться от него, двигаясь в сторону диска 4. Диск 4 заряжен зарядом противоположного знака, и шарик притягивается к нему. Когда шарик коснется диска 4, то он перезарядится и заряд на нем будет того же знака, что и на пластине 4. Шарик оттолкнется от пластины 4 и будет двигаться в сторону пластины 3 до столкновения с ней. Такое движение будет повторяться в течение всего времени, пока между дисками 3 и 4 поддерживается достаточная разность потенциалов.

При своём движении шарик переносит заряд, причем, двигаясь вправо, он приносит заряд одного знака, двигаясь влево, - заряд другого знака. Касаясь дисков, он уменьшает их заряды. Для поддержания величины этих зарядов, соответственно и величины электрического поля необходимо непрерывно вращать индукционную машину и совершать механическую работу. Таким образом, в электрической машине механическая работа совершается, в конечном итоге, за счет неэлектрического источника энергии.

3.2. Магнитные явления

3.2.1. Магнитное поле тока. Опыт Эрстеда

Установка для демонстрации опыта Эрстеда показана на рисунке.



На подставке закреплен в горизонтальном направлении стержень 1 длиной около 40 см и диаметром 6 мм. Концы стержня с помощью гибких проводов могут быть подсоединены к источнику постоянного тока. Под стержнем 1 на специальной подставке устанавливается магнитная стрелка 2, которая может вращаться в горизонтальной плоскости.

При отсутствии тока в стержне 1 магнитная стрелка устанавливается в плоскости магнитного меридиана Земли. Если через стержень будет протекать ток, то под действием магнитного поля этого тока стрелка будет поворачиваться. Если индукция магнитного поля тока будет значительно больше индукции магнитного поля Земли, то магнитная стрелка расположится в плоскости, перпендикулярной стержню, вдоль направления вектора магнитной индукции магнитного поля тока.

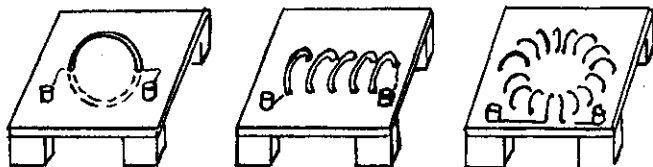
Если направление тока в стержне изменить на противоположное, то магнитная стрелка повернется на 180° . Это говорит о том, что при изменении направления тока в проводнике направление вектора магнитной индукции изменяется на противоположное.

В этом опыте сила тока может регулироваться от нуля до 10 А. Применять большие токи надо непродолжительно, чтобы избежать перегрева подводящих проводов.

3.2.2. Магнитное поле тока. Силовые линии

Эти опыты демонстрируются в проекции на экран или на потолок аудитории. При этом используется свойство железных опилок ориентироваться вдоль силовых линий магнитного поля. Под действием магнитного поля железные опилки намагничиваются и сами становятся маленькими магнитиками. Под действием внешнего магнитного поля они подобно магнитным стрелкам стремятся повернуться более длинной

стороной вдоль силовой линии поля. Кроме того, при малых расстояниях между опилками опилки-магнитики взаимодействуют между собой, притягиваясь разноименными полюсами и отталкиваясь одноименными. В результате этого им энергетически выгодно выстраиваться в цепочки вдоль силовых линий.



Проводники в виде кольца, соленоида и тороида смонтированы на подставках из оргстекла, как показано на рисунке. На поверхность пластины из коробочки, в крышке которой проделаны мелкие отверстия, по возможности равномерно насыпаются мелкие железные опилки.

При включении тока через проводник и одновременном легком постукивании пальцем по пластине опилки располагаются вдоль силовых линий и выявляют картину распределения силовых линий вблизи этих проводников.

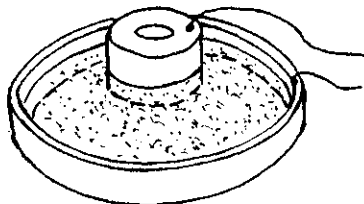
Сразу после возникновения картины силовых линий ток надо выключить, чтобы не вызвать перегрева проводников и источника тока. Картина силовых линий при этом сохраняется.

В опытах используется ток силой до 10 А.

3.2.3. Сила Лоренца. Движение проводящей жидкости в магнитном поле

Для демонстрации используется плоская стеклянная чашка диаметром 11 см и высотой 1,5 см. В центре чашки расположен кольцевой постоянный магнит. Полюсами магнита являются торцевые поверхности. Силовые линии магнитного поля внутри чашки имеют вертикальное направление. Электрическое поле создается между двумя электродами. Одним из электродов является магнит. Второй электрод имеет форму кольца и расположен вблизи вертикальной стенки чашки с внутренней стороны. В чашку наливается проводящая жидкость (раствор соды, поваренной соли, медного купороса). Под действием электрического поля, силовые линии которого направлены радиально, ионы электродита приходят в движение в радиальном направлении. На ионы, движущиеся в магнитном поле, действует сила Лоренца, направ-

ленная перпендикулярно векторам \vec{B} и \vec{E} одновременно. Следует заметить, что под действием электрического поля положительные и отрицательные ионы движутся в противоположном направлении. Учитывая, что ионы имеют также противоположные знаки зарядов, приходим к выводу, что сила Лоренца действует как на положительные, так и на отрицательные ионы в одном и том же направлении.



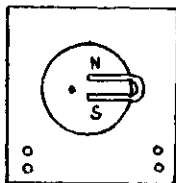
Под действием силы Лоренца ионы получают импульс в направлении этой силы. Этот импульс затем передается другим молекулам жидкости, в результате чего жидкость приходит во вращательное движение вокруг кольцевого магнита. Если изменить направление электрического поля на противоположное, то и жидкость начнет вращаться в противоположном направлении.

Для того чтобы движение жидкости было заметным, на поверхность жидкости надо посыпать крупинки какого-либо вещества. В нашем опыте используются крупинки ликоподия. Опыт показывается в проекции на экран или потолок аудитории.

Подводимое напряжение - несколько вольт. Ток через жидкость - несколько сотен миллиампер.

3.2.4. Демонстрация действия силы Лоренца с помощью осциллографа

В опыте используются демонстрационный электронный осциллограф и постоянный подковообразный магнит. Электронный луч трубки осциллографа фокусируется в центре экрана.



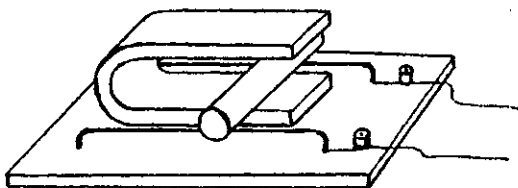
Если вплотную к экрану поднести подковообразный постоянный магнит, как показано на рисунке, то светлое пятно, находившееся вначале в центре экрана, сместится в горизонтальном направлении, если северный полюс магнита расположен сверху, а южный - внизу, то пятно смещается вправо. Если магнитные полюса поменять местами, то пятно сместится влево.

Смещение пятна происходит в результате того, что на подлетающие к экрану электроны в магнитном поле магнита действует сила Лоренца. По известным направлениям скорости электронов, направлению вектора индукции магнитного поля и направлению силы Лоренца можно

определить знак подлетающих к экрану зарядов и убедиться, что заряды отрицательные.

3.2.5. Закон Ампера

На изолирующем основании закреплены два параллельных металлических стержня в горизонтальном направлении. Между стержнями помещается подковообразный магнит, как показано на рисунке. На стержнях в перпендикулярном к ним направлении лежит легкий алюминиевый цилиндр. При подключении установки к источнику тока по цилиндру протекает ток в направлении, перпендикулярном силовым линиям магнитного поля. На цилиндр при этом действует сила Ампера в горизонтальном направлении. Под действием этой силы цилиндр приходит в движение.

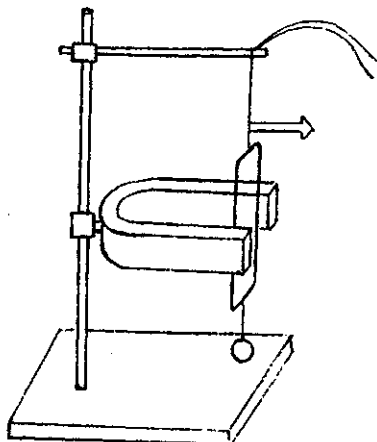


Направление движения цилиндра изменяется на противоположное, если изменить направление тока в цепи или если магнит повернуть так, чтобы северный и южный полюса поменялись местами.

Если направление тока и расположение полюсов известны, то можно убедиться в справедливости правила левой руки.

3.2.6. Рамка с током в магнитном поле

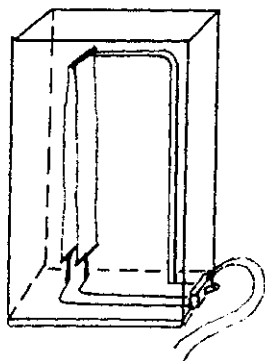
На штативе укреплен подковообразный постоянный магнит и подвешена прямоугольная рамка, как показано на рисунке. Рамка может вращаться относительно вертикальной оси. Для того чтобы ориентация рамки была заметна на большом расстоянии, к рамке перпендикулярно её плоскости прикреплена стрелка. При отсутствии тока рамку следует ориентировать так, чтобы угол между стрелкой и силовыми линиями магнитного поля был около 90° . При включении тока рамка поворачивается относительно вертикальной оси. Плоскость рамки стремится занять положение, перпендикулярное силовым линиям. Если направление тока поменять на обратное, то рамка развернется на 180° .



Если направление тока и направление силовых линий магнитного поля известны, то можно убедиться, что рамка стремится повернуться так, чтобы угол между направлением силовых линий магнитного поля и вектором магнитного момента рамки оказался минимальным.

3.2.7. Взаимодействие параллельных токов (опыт 1)

Для наблюдения взаимодействия токов используются проводники в виде полосок, изготовленных из тонкой металлической фольги. Полоски фольги расположены вертикально. Направление тока можно изменять с помощью переключателя. Для того чтобы потоки воздуха не влияли на расположение проводников, они находятся внутри прозрачного корпуса. При токах, текущих в противоположных направлениях, полоски фольги расходятся. При параллельных токах полоски фольги сближаются.

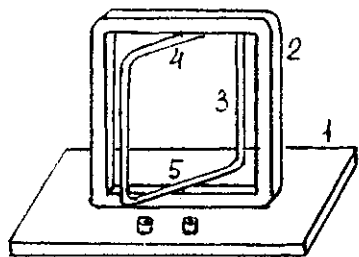


3.2.8. Взаимодействие параллельных токов (опыт 2)

Взаимодействие параллельных токов можно продемонстрировать на установке, состоящей из двух рамок с током. Вид этой установки показан на рисунке. На деревянном основании 1 вертикально расположе-

на неподвижная рамка 2, на которую намотано несколько десятков витков провода. Внутри неподвижной рамки располагается подвижная рамка 3. Эта рамка может вращаться в опорах 4 и 5 относительно вертикальной оси.

Силы взаимодействия токов горизонтальных частей рамок компенсируются силами реакции в опорах 4 и 5 и не могут вызвать движение рамки. Силы взаимодействия токов вертикальных частей рамок создают момент силы относительно вертикальной оси и приводят к повороту подвижной рамки на некоторый угол.



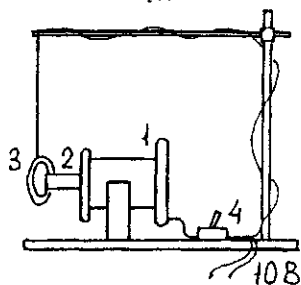
При отсутствии тока в рамках подвижную рамку следует установить так, чтобы её плоскость составляла с плоскостью неподвижной рамки небольшой

угол. При включении тока при параллельных токах в соседних элементах рамок будут действовать силы притяжения, в результате чего подвижная рамка будет поворачиваться в сторону уменьшения угла между рамками. Если соседние токи антипараллельны, то рамка будет поворачиваться в сторону увеличения этого угла.

3.2.9. Рамка с током в неоднородном магнитном поле

На рамку с током, помещенную в однородное магнитное поле, действует момент силы, стремящийся вызвать поворот этой рамки. Если магнитное поле неоднородное, то совокупность сил, действующих на элементы рамки, не сводится только к паре сил. Возникает также отличная от нуля равнодействующая сил. Под действием этой силы рамка (или виток) с током либо втягивается в область более сильного поля, либо выталкивается из него. Если вектор магнитного момента рамки с током составляет острый угол с вектором индукции внешнего магнитного поля, то возникший момент силы будет стремиться повернуть рамку в направлении уменьшения этого угла, а равнодействующая сила будет втягивать рамку в область более сильного поля. Если вектор магнитного момента рамки составляет тупой угол с вектором индукции внешнего магнитного поля, то рамка будет выталкиваться из области более сильного поля и одновременно поворачиваться в сторону уменьшения угла между положительными направлениями указанных векторов.

Демонстрационная установка показана на рисунке. Магнитное поле создается катушкой 1 с цилиндрическим железным сердечником 2. Вблизи торца сердечника подвешена круглая рамка 3, состоящая из нескольких десятков витков проволоки. Магнитное поле, возникающее при протекании тока через катушку, вблизи торца сердечника 2 является неоднородным. Если теперь включать ток через рамку, то возможны два варианта наблюдаемого явления.



Вариант 1

Магнитный момент рамки составляет острый угол с направлением вектора индукции магнитного поля катушки вблизи рамки. В этом случае рамка притянется к катушке и прижмется к её торцу.

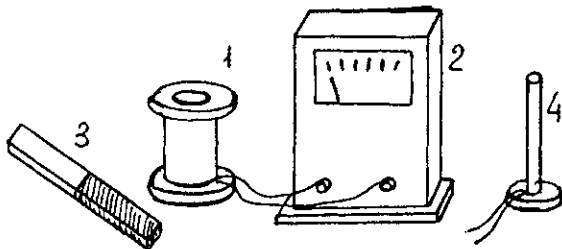
Вариант 2

Магнитный момент рамки составляет тупой угол с направлением вектора индукции магнитного поля катушки. В этом случае рамка отталкивается от катушки и одновременно вращается. После того как в результате вращения угол между векторами станет острым, рамка начнет притягиваться к катушке и, так же как и в первом случае, прижмется к её торцу. Переключатель 4 позволяет изменять направление тока в катушке и тем самым наблюдать оба варианта взаимодействия.

3.2.10. ЭДС электромагнитной индукции. Опыт Фарадея

Опыт 1

В опыте используются катушка 1, гальванометр 2 и постоянный магнит 3. В момент внесения полюса магнита внутрь катушки наблюдается отклонение стрелки гальванометра. При неподвижном магните стрелка не отклоняется. При вытаскивании магнита из катушки стрелка



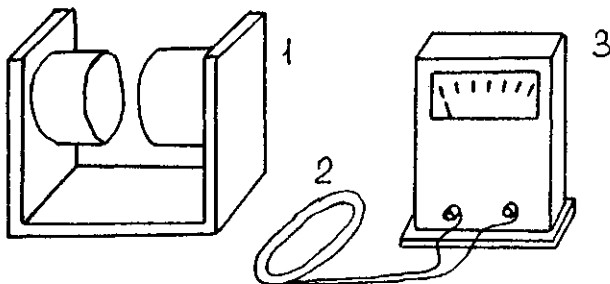
ка также отклоняется, но в противоположную сторону. Направление отклонения стрелки изменяется на противоположное также при изменении полюса, вдвигаемого в катушку или вытаскиваемого из нее. Величина отклонения стрелки зависит от скорости вдвигания магнита. Чем меньше время вдвигания, тем больше отклонение стрелки.

Опыт 2

В этом опыте вместо постоянного магнита используется тонкая катушка 4, по которой пропускается электрический ток. Вдвигая тонкую катушку с током внутрь большой катушки, можно наблюдать те же эффекты, что и с постоянными магнитами. Это говорит об идентичности магнитных полей постоянных магнитов и токов.

Опыт 3

Для проведения этого опыта используются большой постоянный магнит 1, рамка 2 и гальванометр 3. Рамка содержит несколько десятков витков провода и не имеет жесткого каркаса. Её легко деформировать. Целью этого опыта является демонстрация того факта, что ЭДС индукции возникает всегда, когда происходит изменение магнитного потока через рамку, независимо от того, каким способом это изменение достигается.



В рассматриваемом опыте изменение магнитного потока можно осуществить тремя способами:

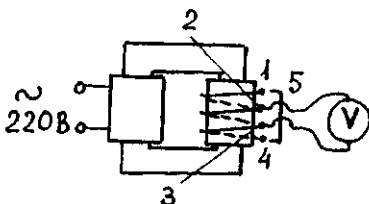
- 1) внесением рамки в зазор между полюсами магнита (или вытаскиванием из этого зазора);
- 2) вращением рамки в зазоре между полюсами;
- 3) деформацией формы рамки, приводящей к изменению площади поверхности, пронизываемой силовыми линиями магнитного поля (сжатие или растяжение рамки).

Во всех этих случаях обнаруживается ЭДС индукции.

3.2.11. Непотенциальность вихревого электрического поля

В электростатике рассматривается электрическое поле, созданное неподвижными электрическими зарядами. Такое поле является потенциальным. Электрическое поле, возникающее при изменении магнитного поля, не является потенциальным. Это вихревое электрическое поле. В чисто вихревом электрическом поле (при отсутствии поля неподвижных зарядов) разность потенциалов между двумя произвольными точками равна нулю. В этом можно убедиться на опыте.

Схема установки показана на рисунке. Вторичная обмотка трансформатора содержит 3 витка медного провода. Если цепь вторичной катушки разомкнута, то под действием вихревого электрического поля (сторонних сил) на концах провода выступят разноименные заряды, которые создадут потенциальное электрическое поле. Разность потенциалов на концах провода в этом случае будет равна ЭДС. Эту разность потенциалов можно измерить, подключив к клеммам 1 и 4 достаточно высокоомный вольтметр. Между клеммами 2 и 3 также будет наблюдаться некоторая разность потенциалов.



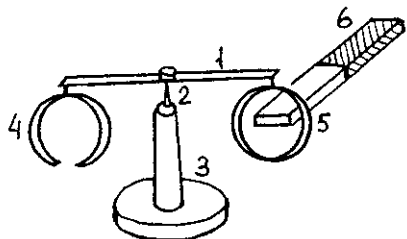
Если клеммы 1 и 4 теперь замкнуть с помощью очень низкоомной, расположенной перпендикулярно линиям напряженности вихревого поля перемычки, то в образовавшейся замкнутой цепи не будет мест скопления зарядов какого-либо одного знака. Следовательно, не будет и потенциального поля. Показания вольтметра, подключенного к клеммам 2 и 3 (или каким-либо другим), должны быть равными нулю, несмотря на наличие тока в цепи.

В опыте используются сердечник трансформатора и первичная катушка от стандартного учебного набора по электромагнетизму. Вторичная обмотка расположена на отдельной катушке. Предел измерения вольтметра должен быть не менее двух вольт.

3.2.12. Правило Ленца. Взаимодействие постоянного магнита с индуцированным им током

Легкое коромысло 1 опирается на острие 2, закрепленное на подставке 3. Коромысло может вращаться в горизонтальной плоскости. На концах коромысла закреплены алюминиевые кольца 4 и 5. Кольцо 4 разомкнуто. Кольцо 5 замкнуто.

Если внутрь замкнутого кольца 5 вносить полюс постоянного магнита 6, то в кольце будет индуцироваться ЭДС и потечет индукционный ток. Этот ток будет взаимодействовать с магнитом в соответствии с правилом Ленца.



Поскольку причиной появления тока является приближение магнита к кольцу, кольцо с током будет стремиться удалиться от магнита и тем самым ослабить причину, его породившую. Коромысло с кольцами начнет поворачиваться так, чтобы кольцо 5 удалялось от магнита.

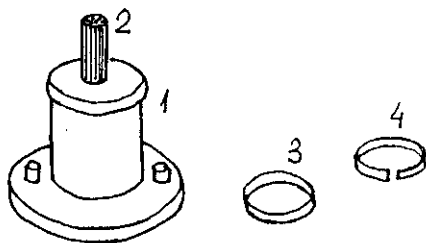
При выдергивании полюса магнита из кольца наблюдается движение кольца вслед за магнитом.

Если полюс магнита вносить в разомкнутое кольцо 4, то кольцо и магнит взаимодействовать не будут, так как в разомкнутом витке ток отсутствует (хотя ЭДС отлична от нуля).

3.2.13. Правило Ленца. Взаимодействие электромагнита с индуцированным им током

В этом опыте используется катушка 1 с железным сердечником 2. На сердечник можно надеть либо замкнутое алюминиевое кольцо 3, либо разомкнутое кольцо 4.

Если на сердечнике находится кольцо 4, то при включении тока через катушку ничего заметного не наблюдается. Если на сердечник надеть замкнутое кольцо 3, а затем включить ток через катушку, то кольцо оттолкнется от катушки и будет сброшено с сердечника. Это соответствует выводу, получаемому при использовании правила Ленца.



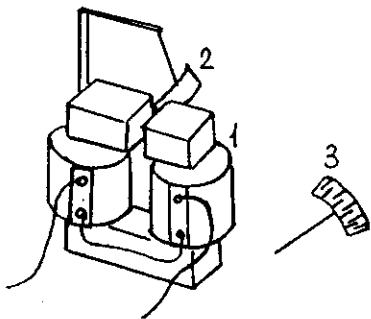
При включении тока в катушке в кольце 3 возникает индукционный ток. Причиной возникновения тока является увеличение магнитной индукции в плоскости кольца. Взаимодействие катушки с индукционным током в кольце согласно правила Ленца должно быть таким, чтобы перемещение катушки сопровождалось ослаблением магнитного поля. Поэтому катушка выталкивается в область слабого поля.

3.2.14. Токи Фуко. Использование для демпфирования колебаний

Установка представляет собой электромагнит, в зазоре между полюсами которого может колебаться маятник. В установке используются два сменных маятника. Маятник 2 представляет собой сплошную пластинку, подвешенную на тонком стержне. Маятник 3 имеет такие же внешние размеры, но пластинка у него имеет систему прорезей для уменьшения вихревых токов.

Если при выключенном электромагните вначале пронаблюдать за колебаниями маятника 2, а затем маятника 3 (можно и наоборот), то можно заметить, что колебания маятника 2 затухают значительно быстрее.

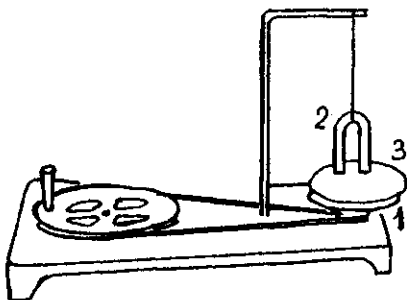
Наблюдаемый эффект объясняется тем, что при вхождении пластины в область сильного магнитного поля между полюсами магнита поток вектора магнитной индукции через каждую элементарную площадку поверхности пластины увеличивается. При этом в пластине возникает вихревое электрическое поле, которое вызывает вихревые электрические токи — токи Фуко. При выходе пластины из зазора также возникают вихревые токи. Но противоположного направления по сравнению с описанными выше. Причиной появления вихревых токов можно считать колебательное движение маятника. По правилу Ленца силы взаимодействия вихревых токов с магнитом должны стремиться ослабить это движение, т.е. сила, действующая на пластину, должна быть направлена против скорости этой пластины. В результате этого колебания быстро затухают. В пластине с разрезами вихревые токи значительно слабее. Поэтому колебания маятника 3 затухают не так быстро, как маятника 2.



3.2.15. Токи Фуко. Увлечение магнита вращающимся металлическим диском

С помощью ручной вращательной машины приводится во вращательное движение алюминиевый диск 1, расположенный горизонтально. Над диском на нити подвешен подковообразный постоянный магнит 2. Точка

подвеса находится на оси вращения диска. Силовые линии магнитного поля пронизывают алюминиевый диск вблизи полюсов магнита. Так как диск по отношению к полюсам движется, то на участках диска, близких к полюсам, поток вектора магнитной индукции изменяется. В результате возникают вихревые токи. В соответствии с правилом Ленца



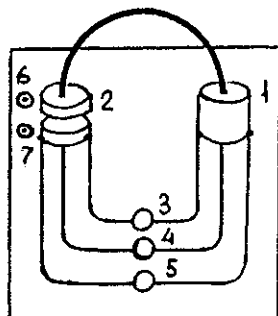
силы взаимодействия вихревых токов с магнитом будут стремиться уменьшить их относительную скорость. Магнит придет во вращательное движение в ту же сторону, что и диск.

Для того чтобы исключить влияние на магнит вихревых потоков воздуха, вызванных вращающимся диском, между диском 1 и магнитом расположена тонкая пластина 3 из диэлектрика.

3.2.16. Скин - эффект

Если по проводнику протекает переменный ток очень большой частоты (СВЧ-диапазона), то магнитное поле этого тока внутри проводника будет изменяться с очень высокой скоростью. Такое быстропеременное магнитное поле индуцирует внутри проводника вихревые токи. Вблизи поверхности проводника направление вихревых токов совпадает с направлением основного тока, а в глубине проводника эти токи направлены противоположно. В результате по сечению проводника ток распределяется неравномерно. Основная часть тока протекает в приповерхностном слое проводника.

На рисунке показана схема используемого в демонстрационном опыте контура. Нас интересует распределение тока по сечению цилиндров 1 и 2. Цилиндр 2 имеет поперечную щель. Поэтому по постоянному току цепь является разомкнутой.



Для переменного тока цепь замкнута. Зазор в цилиндре 2 можно считать конденсатором, в котором протекает ток смещения.

В цепь контура включены лампочки 3, 4 и 5. Лампочки 3 и 5 подключены к наружным точкам цилиндров. Лампочка 4 подключена к центрам торцевых поверхностей цилиндров. Через клеммы 6 и 7 на контур можно подать постоянное напряжение. В этом случае следует убедиться, что лампочки 3, 4 и 5 светят одинаково ярко.

Если теперь источник постоянного тока отключить и рассматриваемый контур поднести к высокочастотному контуру генератора, то лампочки опять загорятся, но лампочка 4 будет гореть менее ярко чем лампочки 3 и 5.

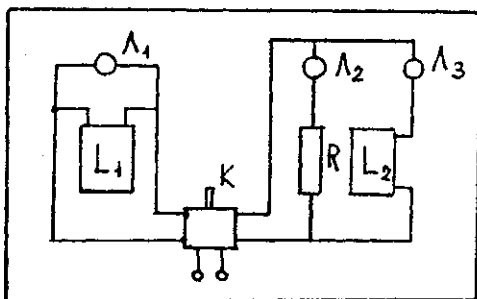
3.2.17. ЭДС самоиндукции, возникающая при замыкании или размыкании цепи

В момент замыкания или размыкания цепи происходит очень быстрое изменение силы тока в цепи. Это приводит к появлению ЭДС самоиндукции. В соответствии с правилом Ленца при размыкании цепи возникает ЭДС самоиндукции того же знака, как у источника тока. При замыкании цепи возникает ЭДС противоположного знака по сравнению с ЭДС источника тока.

Демонстрационная установка смонтирована на вертикальном щите. Вид установки показан на рисунке.

Для демонстрации ЭДС самоиндукции, возникающей при размыкании цепи, используется схема, смонтированная в левой части щита. С помощью ключа к источнику постоянного напряжения порядка 10 В подключается катушка с железным сердечником L_1 . Параллельно катушке подключена неоновая лампочка L_1 . Напряжение зажигания лампочки L_1 несколько выше ЭДС источника. Поэтому при включении цепи лампочка не загорается. При размыкании цепи наблюдается кратковременная вспышка лампочки L_1 , так как в момент размыкания к ЭДС источника добавляется ЭДС самоиндукции и напряжение на лампочке становится достаточным для её загорания.

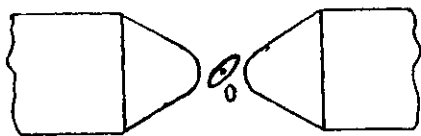
Для демонстрации ЭДС самоиндукции, возникающей при замыкании цепи, используется схема, расположенная справа. В этой схеме используются две лампочки накаливания L_2 и L_3 . Лампочка L_2 включена последовательно с резистором R . Лампочка L_3 включена последовательно с дросселем L_2 . Сопротивление резистора подобрано так, чтобы в установившемся режиме после включения цепи лампочки L_2 и L_3 горели одинаково ярко. В цепи лампочки L_2 в момент её включения ЭДС самоиндукции не возникает ($L=0$). В цепи лампочки L_3 в момент



включения действует ЭДС индукции, знак которой противоположен знаку ЭДС источника. В результате этого в момент включения и в течение короткого промежутка после него напряжение на лампочке L_3 будет меньше установившегося. Яркость лампочки L_3 достигнет установившегося значения позднее, чем лампочки L_2 . Это запаздывание можно обнаружить визуально.

3.2.18. Диамагнетики и парамагнетики в магнитном поле

Диамагнетики и парамагнетики обладают слабо выраженными магнитными свойствами. Для используемого в нашей демонстрации диамагнетика - висмута магнитная восприимчивость $\chi = -1,35 \cdot 10^{-6}$. Для парамагнетика - алюминия $\chi = +0,65 \cdot 10^{-6}$. Несмотря на малую величину магнитной восприимчивости этих веществ, на опыте можно наблюдать различие в поведении диамагнитных и парамагнитных тел в магнитном поле.



В зазоре между полюсами электромагнита поместим симметричное тело продолговатой формы, подвесив его на нити. На рисунке показаны наконечники электромагнита и намагничиваемое тело (вид сверху). Тело может поворачиваться относительно оси, перпендикулярной плоскости рисунка, проходящей через точку O . Точка O расположена на оси симметрии картины силовых линий магнитного поля.

Если подвешенное на нити тело является парамагнетиком, то под действием внешнего магнитного поля магнитные моменты атомов вещества получают преимущественную ориентацию вдоль поля. Эти атомы ведут себя в магнитном поле аналогично виткам с током, магнитные

моменты которых образуют с внешним полем острый угол. На такие витки действует сила, втягивающая их в область более сильного магнитного поля (см. опыт 3.2.9, первый вариант). В нашем случае наибольшая плотность энергии магнитного поля наблюдается вблизи оси симметрии этого поля. Под действием этих сил парамагнитное тело повернется так, чтобы как можно больше точек этого тела находилось в области магнитного поля с максимальной плотностью энергии. Это соответствует ориентации тела вдоль силовой линии вблизи оси симметрии поля.

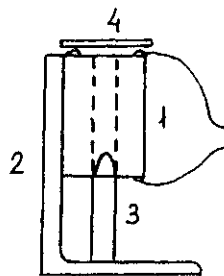
Если подвешенное на нити тело является диамагнетиком, то под действием внешнего магнитного поля в атомах вещества возникают магнитные моменты, направленные преимущественно против поля. Как рассмотрено в п.3.2.9 (второй вариант), витки с током в таком случае выталкиваются в область поля с меньшей плотностью энергии магнитного поля. Следовательно, на атомы диамагнитного вещества должны действовать силы, стремящиеся удалить их от оси симметрии. В результате этого диамагнитное тело расположится перпендикулярно оси симметрии поля.

В опыте применяются тела длиной ~20 мм. Для того чтобы эти тела и их ориентация были видны большой аудитории, используется увеличенная теневая проекция на экран.

3.2.19. Втягивание ферромагнетика внутрь катушки.

Электромагнитная пушка

Ферромагнетики, как и парамагнетики (см. п.3.2.18), втягиваются в область более сильного магнитного поля. Поскольку магнитная восприимчивость ферромагнетиков на много порядков больше, чем парамагнетиков, силы, действующие на ферромагнитные тела со стороны неоднородного магнитного поля, могут достигать значительной величины. Основным элементом используемой в опыте электромагнитной пушки является многослойный соленоид 1, витки которого намотаны на цилиндрическую катушку, полую внутри. Катушка закреплена вертикально на стойке 2. Снаряд 3 стоит на основании стойки 2 и лишь частично входит в цилиндрический канал катушки. При включении тока в цепи ферромагнитный (железный) снаряд втягивается внутрь катушки и приобретает некоторую ки-

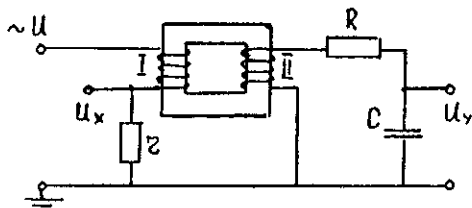


нетическую энергию. Если ток не выключить, то снаряд пролетит сквозь область с максимальной плотностью энергии магнитного поля и попадет в область с меньшей плотностью энергии магнитного поля. Теперь магнитная сила будет тормозить снаряд и втягивать его обратно в катушку. В результате этого снаряд будет совершать колебательное движение вблизи центра катушки.

Для того чтобы избежать торможения снаряда магнитным полем, надо цепь разомкнуть в тот момент, когда снаряд войдет в область максимального магнитного поля. С этой целью используется выключатель 4. Выключатель представляет собой легкую перемычку, опирающуюся на два неподвижных контакта. Вылетающий из катушки снаряд сбрасывает перемычку и тем самым размыкает цепь. Далее он движется свободно.

3.2.20. Петля гистерезиса ферромагнетика

Петлю гистерезиса можно наблюдать на экране осциллографа, если на вход X подать напряжение U_x пропорциональное напряженности поля H , а на вход Y подать напряжение U_y , пропорциональное индукции поля B , и периодически изменять H и B как по величине, так и по направлению. Электрическая схема установки показана на рисунке.



Напряжение U_x пропорционально току в обмотке I. Напряженность H внутри замкнутого сердечника также пропорциональна току. Следовательно, U_x пропорционально H .

ЭДС, возникающая во вторичной обмотке, C_{11} пропорциональна производной $\frac{dB}{dt}$. Если сопротивление R во много раз больше суммарного реактивного сопротивления вторичной обмотки и конденсатора, то

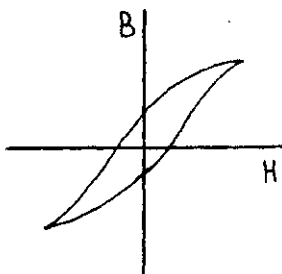
ток в цепи обмотки II $J = \frac{C_{11}}{R}$, т.е. ток пропорционален ЭДС и, сле-

довательно, производной $\frac{dB}{dt}$. С другой стороны, ток через конденсатор равен $\frac{dq}{dt}$, где q - заряд конденсатора. Поэтому можно считать,

что $\frac{dq}{dt} \sim \frac{dB}{dt}$, а $dq \sim dB$ и $q \sim B$. Так как $U_X = \frac{q}{C}$, то $U_X \sim B$.

Если на вход X осциллографа подать напряжение U_X , а на вход Y - напряжение U_Y , то на экране осциллографа можно наблюдать фигуру, показанную на рисунке. Эта фигура называется петлей гистерезиса.

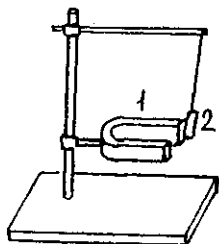
На первичную обмотку трансформатора подается напряжение частоты 50 Гц, регулируемое в пределах 0...20 В. При достаточной силе тока в первичной обмотке на петле должна наблюдаться область насыщения.



3.2.21. Точка Кюри ферромагнетика

Для всех ферромагнетиков существует температура (точка Кюри, температура Кюри), при переходе через которую он испытывает фазовый переход второго рода и переходит в парамагнетик. Для железа эта температура составляет 770 °С, для никеля 356 °С.

В установке для демонстрационного опыта на штативе закреплен постоянный магнит 1, вблизи которого на нити подвешена никелиевая пластинка 2. При комнатной температуре никель является ферромагнетиком, поэтому никелиевая пластинка притягивается к магниту. Если к пластинке 2 поднести горящую спиртовку 3, то при достижении температуры Кюри пластинка станет парамагнитной, притяжение к магниту прекратится и нить с пластинкой расположатся вдоль вертикали, проходящей через точку крепления нити к штативу.

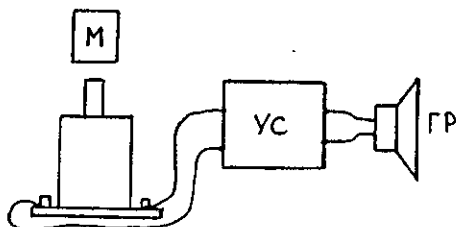


Если спиртовку убрать, то при охлаждении никель опять станет ферромагнетиком и пластинка опять притянется к магниту.

3.2.22. Эффект Баркгаузена

Эффект Баркгаузена заключается в том, что при увеличении напряженности внешнего магнитного поля намагниченность ферромагнетика увеличивается не монотонно, а частыми мелкими скачками. Наиболее четко этот эффект обнаруживается на крутых участках кривой намагничивания, когда изменение магнитного состояния в основном происходит путем смещения границ между доменами. Причиной эффекта Баркгаузена являются различного рода неоднородности в кристаллической структуре ферромагнетика (включения, остаточные напряжения, неоднородности состава и т.п.), препятствующие перестройке магнитной структуры. Плавно смещающаяся под действием поля граница встречает на своем пути препятствие, задерживающее его продвижение. При дальнейшем возрастании поля наступает момент, когда граница преодолевает это препятствие и перемещается на некоторое расстояние при неизменной величине поля.

Для демонстрации эффекта Баркгаузена используется катушка с ферромагнитным сердечником. Концы обмотки катушки подсоединяются ко входу усилителя электрических колебаний.



С выхода усилителя электрические колебания подаются на громкоговоритель. При поднесении постоянного магнита к сердечнику, последний намагничивается. Это намагничивание происходит не плавно, а небольшими по величине, но кратковременными скачками. В результате этого производная $\frac{dB}{dt}$ в момент скачков имеет заметную величину и в катушке индуцируются импульсы напряжения, которые затем усиливаются усилителем. С помощью громкоговорителя электрические импульсы превращаются в звуковые, которые воспринимаются как щелчки или шумы.

Для большей убедительности полезно также продемонстрировать, что в отсутствие сердечника или при неподвижном магните эти щелчки отсутствуют.