

Министерство образования и науки Украины  
Национальный технический университет  
«Днепропетровская политехника»

**И.П.Гаркуша**

## **Лекционные демонстрации по физике**

Учебное пособие

г. Днепр  
НТУ «Днепропетровская политехника»  
2018

УДК 53(075.8)

Г53

Рекомендовано Ученым советом Национального технического университета «Днепровская политехника» как учебное пособие для студентов всех технических специальностей (направлений подготовки). (Протокол № 11 от 18 сентября 2018 г.).

## **Гаркуша И.П.**

Лекционные демонстрации по физике: учебное пособие: – Д.: Национальный технический университет «Днепровская политехника», 2018. – 162 с.

Пособие содержит каталог и описание лекционных демонстраций физического кабинета НТУ «Днепровская политехника» по разделам механика, молекулярная физика, электродинамика, колебания и волны, оптика и квантовая теория дисциплины «Физика».

Описания лекционных демонстраций включают название, перечень приборов, их изображение, методику проведения опыта, теоретическое объяснение демонстрируемого опыта.

Учебное пособие отражает 115-летний опыт работы кабинета лекционных демонстраций кафедры физики НТУ «Днепровская политехника».

Предназначено для преподавателей физики вузов с целью оказания помощи в обеспечении курса физики лекционными опытами. Может быть полезным также для студентов дневной и дистанционной форм обучения.

# Оглавление

Предисловие.....	9
<b>Часть 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ.....</b>	<b>11</b>
<i>Поступательное движение</i>	
1. 1. Векторный характер скорости (опыт с точилом).....	12
1. 2. Центробежные силы инерции. «Бегающая цепочка».....	12
1. 3. Демонстрация принципа независимости движений.....	13
1. 4. 1-й закон Ньютона. Инерция. Выбивание картонки из-под шарика.....	14
1. 5. Закон сохранения импульса.....	14
1. 6. 3-й закон Ньютона. Тяжелая гиря на доске.....	15
1. 7. 3-й закон Ньютона. Два динамометра.....	16
1. 8. Изменение импульса. Инерция груза на нити. Гиря с нитями сверху и снизу.....	16
1. 9. Инертность тел. Ломание палки в бумажных кольцах.....	17
1. 10. Удар шаров: центральный абсолютно упругий.....	17
1. 11. Удар шаров: центральный абсолютно неупругий.....	18
1. 12. Косой удар. Стальной шарик падает на стальную плиту.....	18
1. 13. Скатывание шарика по «мертвой петле».....	19
<i>Вращательное движение</i>	
.1.14. Модель сил и моментов при вращении твердого тела вокруг неподвижной оси.....	20
1. 15. Маятник Обербека.....	21
1. 16. Скатывание цилиндров с наклонной плоскости.....	21
1. 17. Скамья Жуковского. Студент с гантелями.....	22
1. 18. Скамья Жуковского. Студент с колесом.....	22
1. 19. Большой гироскоп. Прецессия.....	23
1. 20. Малые гироскопы авиационные. Прецессия.....	25
1. 21. Демонстрационный гироскоп, приводимый во вращение специальным приводом. Прецессия.....	26
1.22. Палочка с привязанным на конце нити шариком («маятник переменного радиуса»).....	28
1. 23. Вращение тел различной формы. Свободные оси вращения.....	28
1. 24. Вращение коробки вокруг свободных осей.....	29
1. 25. Маятник Максвелла.....	30
<b>Часть 2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА.....</b>	<b>31</b>
<i>Свойства газов</i>	
2.1. Доска Гальтона. Установление статистических закономерностей.....	32

2.2. Адиабатное расширение. Образование тумана. ....	33
2.3. Адиабатное сжатие. «Воздушное огниво».....	33

#### *Реальные газы*

2.4. Переход эфира через критическое состояние.....	34
2.5. Свойства жидкого азота.....	36

#### *Явления переноса*

2.6. Диффузия в газах.....	37
2.7. Диффузия газов через пористую стенку.....	38
2.8. Внутреннее трение в газах.....	39

#### *Свойства жидкостей*

2.9. Поверхностное натяжение. Поплавок Архимеда.....	40
2.10. Поверхностное натяжение. Мыльные пленки.....	41
2.11. Смачивание и несмачивание. Капилляры.....	42
2.12. Модель флотации.....	42
2.13. Свойства поверхностного слоя жидкости.....	43

#### *Твердые тела*

2.14. Модели кристаллических решеток.....	44
2.15. Модель упругой деформации твердого тела.....	45

### **Часть 3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ .....46**

#### *Электростатика*

3.1. Элементарные опыты по электростатике. Два рода электричества. Взаимодействие заряженных тел.....	47
3.2. Электрофорная машина.....	48
3.3. Силовые линии электрического поля (султаны бумажные).....	49
3.4. Проводники и диэлектрики.....	49
3.5. Электризация посредством влияния (электростатическая индукция).....	50
3.6. Распределение зарядов и потенциала на поверхности и внутри заряженного проводника.....	51
3.7. Измерение потенциала электрического поля в воздухе с помощью пламенно-го зонда.....	53
3.8. Реактивные силы, возникающие при стекании зарядов с остриев. Колесо Франклина.....	54
3.9. Экранирующее действие проводников. Клетка Фарадея.....	54

3.10. Раздвижной конденсатор. Зависимость напряжения на конденсаторе от расстояния между пластинами и диэлектрической проницаемости диэлектрика.....	55
3.11. Работа электрических сил.....	57
3.12. Поляризация диэлектрика (стерженек плексигласа).....	57
3.13. Поляризация края деревянной планки.....	58
3.14. Разборная лейденская банка. Электреты.....	58
3.15. Пьезоэффект (прямой).....	60

### *Постоянный электрический ток*

3.16. Очистка газов. Электрический фильтр.....	61
3.17. Ионизация воздуха и рекомбинация ионов.....	61
3.18. Катушка Румкорфа (высоковольтный индуктор). Искровой разряд в воздухе.....	62
3.19. Наблюдение тлеющего разряда с эвакуацией воздуха.....	64
3.20. Катодные трубки (трубки Крукса).....	65
3.21. Влияние температуры на сопротивление металлов и полупроводников.....	66
3.22. Полупроводники. Выпрямляющее действие $p-n$ перехода.....	67
3.23. Термопара. Демонстрация промышленной термопары из доменной печи...	70
3.24. Термопара со шкалой температур.....	70
3.25. Явление Зеебека. Возникновение термоЭДС.....	70
3.26. Термоэлектронная эмиссия. Работа электронной лампы-триода.....	72

### *Магнитное поле*

3.27. Инclinатор и деклинатор. Магнитная стрелка в магнитном поле Земли.....	73
3.28. Магнитные силовые линии постоянных магнитов .....	73
3.29. Магнитное поле прямого тока. Опыт Эрстеда.....	73
3.30. Магнитное поле различных проводников с током.....	74
3.31. Неподвижная модель индукции магнитного поля на оси кругового тока...	76
3.32. Действие магнитного поля на ток («качели»).....	76
3.33. Действие магнитного поля на ток. Станок Ампера.....	77
3.34.. Действие магнитного поля на ток. Обвивание проводника с током вокруг электромагнита.....	77
3.35. Рамка с током в магнитном поле. Модель электродвигателя постоянного тока.....	78
3.36. Взаимодействие параллельных токов.....	79
3.37. Катушка с током в неоднородном магнитном поле.....	80
3.38. Взаимодействие двух катушек с током.....	81
3.39. Отклонение пучка электронов магнитом. Сила Лоренца.....	81

### *Электромагнитная индукция*

3.40. Основные опыты М.Фарадея.....	82
3.41. Земной индуктор.....	83
3.42. Демонстрация правила Ленца при возникновении индукционного тока....	84
3.43. Сбрасывание колец.....	85
3.44. Прыгающее кольцо.....	86
3.45. Получение переменного и постоянного тока.....	87
3.46. Токи самоиндукции при замыкании и размыкании цепи.....	88
3.47. Явление самоиндукции. Экстраток размыкания.....	89
3.48. Трансформатор .....	90
3.49. Увлечение проводника движущимся магнитным полем. ....	91
3.50. Вихревые токи в массивных проводниках (токи Фуко). Торможение колеблющегося маятника.....	91

#### *Магнитное поле в веществе*

3.51. Скачкообразное намагничивание. Эффект Баркгаузена.....	93
3.52. Демонстрация постоянного магнита ( $B \sim 0,01$ Тл), к которому подносят железный ключ.....	96
3.53. Петля гистерезиса на электронном осциллографе.....	97
3.54. Точка Кюри ферромагнетика.....	98
3.55. Намагничивание железного стержня ударом в магнитном поле Земли.....	99
3.56. Свойства диа- и парамагнетиков.....	99

### **Часть 4. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ.....101**

#### *Механические колебания и волны*

4.1. Гармонические колебания. Движение тени от вращающегося шарика.....	102
4.2. Механическая запись колебаний.....	103
4.3. Маятник пружинный.....	104
4.4. Физический маятник.....	104
4.5. Связанные маятники.....	105
4.6. Вынужденные колебания. Резонанс на пружинном маятнике.....	105
4.7. Механический резонанс. Резонатор Фрама .....	107
4.8. Автоколебания (коромысло).....	107
4.9. Автоколебания. Забивка свай.....	108
4.10. Двойной маятник (маятник Айри). Сложение 2-х взаимно перпендикулярных колебаний.....	108
4.11. Фигуры Лиссажу на экране осциллографа.....	109
4.12. Камертоны. Сложение колебаний. Биения.....	110
4.13. Образование бегущего волнового импульса на резиновом шланге. Стоячие волны на резиновом шланге.....	111

4.14. Волны на поверхности воды. Наблюдение интерференции волн от двух когерентных источников.....	112
4.15. Модель бегущей упругой волны – продольной и поперечной. (Волновая машина Э. Маха).....	113
4.16. Предел слышимости звуков.....	114
4.17. Анализ звуковых колебаний с помощью осциллографа.....	116
4.18. Явление Доплера в акустике.....	117

### *Электромагнитные колебания и волны*

4.19. Затухающие колебания в колебательном контуре.....	117
4.20. Биения электрических сигналов на осциллографе.....	118
4.21. Релаксационные колебания в схеме с неоновой лампой .....	119
4.22. Трансформатор Н. Теслы.....	120
4.23. Конденсатор в цепи переменного тока. Ток смещения.....	122
4.24. Стоячие электромагнитные волны в двухпроводной линии (система Лехера).....	123
4.25. Свойства электромагнитных волн.....	126
4.26. Стоячие электромагнитные волны.....	129
4.27. Передача и прием электромагнитных волн.....	130

### **Часть 5. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА.....131**

5.1. Интерференция света. Опыт Юнга.....	132
5.2. Интерференция света. Бипризма Френеля.....	133
5. 3. Интерференция света в тонких пленках. Мыльный клин.....	133
5. 4. Интерференция света в тонких пленках. Застывшие твердые пленки.....	134
5. 5. Интерференция света. Кольца Ньютона (Плоская и плоско-выпуклая стеклянные пластинки).....	135
5.6. Интерференция света. Кольца Ньютона. (Стеклянная пластинка и плоско-выпуклая линза).....	136
5. 7. Дифракция лазерного света на дифракционной решетке.....	137
5. 8. Дифракция лазерного света на круглом экране. Пятно Пуассона.....	138
5. 9. Дифракция на дифракционной решетке в белом свете.....	139
5.10. Опыт с зонной пластинкой.....	139
5. 11. Понятие о спектральном анализе. Демонстрация фотографии спектров....	140
5. 12. Голограмма. ....	140
(* ) 5. 13. Поляризация света при отражении от поверхности диэлектрика.....	141
(* )5. 14. Двойное лучепреломление в кристаллах исландского шпата.....	143
(* )5. 15. Модель призмы Николя.....	144
(* ) 5.16. Поляризация света. Проверка закона Малюса с помощью двух николей.....	144
5.17. Свойства поляризованного света. Проверка закона Малюса с помощью двух поляроидов .....	145

5.18. Интерференция поляризованных лучей.....	145
5.19. Искусственная анизотропия. Опыты с пластинками и моделями, помещенными между скрещенными поляроидами .....	146
5.20. Дисперсия света. Дисперсионные призмы и призма прямого зрения.....	148
5.21. Демонстрация световода.....	149
<b>Часть 6. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА.....</b>	<b>151</b>
6.1. Тепловое излучение. Демонстрация закона Кирхгофа.....	152
6.2. Модель абсолютно черного тела.....	153
6.3. Внешний фотоэффект.....	153
6.4. Фотореле.....	155
6.5. Люминесценция. Люминофоры – жидкие и порошкообразные. Послесвечение.....	156
6.6. Дозиметрические приборы.....	157
Список рекомендованной литературы.....	161

Національний технічний університет  
«Дніпровська політехніка»  
Кафедра фізики  
<http://physics.ntu.org.ua>

## Предисловие.

Из всех учебных дисциплин, которые изучаются в техническом ВУЗе, именно физика в значительной степени закладывает основы грамотности будущего специалиста, формирует интеллект личности.

Физика является фундаментом, основой, как современной техники, так и всего естествознания. Законы физики опираются на опытные факты, поэтому очевидно, что преподавание физики должно включать физические опыты. Лекционные опыты являются необходимой частью курса общей физики и важным дидактическим приемом.

Как правило, все основные явления, составляющие предмет физической лекции, могут и должны демонстрироваться на опыте. Лекционные демонстрации делают всякое явление более ясным, помогают его более полному пониманию и запоминанию. На основе наблюдений и размышлений у студентов формируется собственная точка зрения на те, или иные явления природы.

Национальный технический университет «Днепровская политехника» - один из старейших (1899) вузов Украины. Еще в начале своей истории университет (тогда Высшее горное училище) готовил горных инженеров, которые в числе прочих наук изучали физику 5 семестров и были высокообразованными и разносторонне грамотными специалистами, известными в своих регионах. Лекции по курсу физики сопровождались демонстрационными опытами с использованием новейшего на то время оборудования. Демонстрационное оборудование ввозилось из-за границы.

Трудами многих поколений преподавателей и лаборантов кафедры физики НТУ «Днепровская политехника» был создан уникальный кабинет лекционных демонстраций, который и до настоящего времени в числе лучших среди технических вузов Украины.

Кафедра имеет физическую аудиторию амфитеатром на 100 мест. Это оснащённое рядом специфических технических устройств помещение, пригодное для чтения курса физики с применением лекционных демонстраций.

К ней примыкает кабинет физических демонстраций, который представляет собой лабораторию, где хранится оборудование лекционного обеспечения и готовятся демонстрации.

В последние годы в учебных планах вузов на физику отводится два, а часто и один семестр. За это время студент должен **получить знания из всех разделов** общей физики, начиная от физических основ механики и кончая ядерной физикой.

Понятно, что в таких условиях методика преподавания физики должна быть максимально эффективной, а лекционные опыты должны быть тщательно отобраны, глубоко продуманы и квалифицированно осуществлены.

Лекционная аудитория во всех вузах, как правило, сильно загружена. Естественно, что лекционные опыты не всегда могут быть в течение перерыва между лекциями подготовлены и отлажены на демонстрационном столе физической аудитории.

В результате многолетнего опыта кафедры физики сложилась следующая технология подготовки демонстрации. Была создана картотека лекционных демонстраций, в которой систематизированы по разделам курса физики все имеющиеся в наличии демонстрационные опыты.

На каждой карточке приводится название опыта, его краткое содержание, рисунок и указания для демонстратора. Лектор при подготовке к лекции отбирает нужные ему демонстрации, и демонстратор вписывает их в журнал заказов демонстраций. Демонстратор заранее знакомится с заказами и готовит лекционные опыты.

**Настоящее учебное пособие** с кратким описанием лекционных демонстраций **может играть роль картотеки** для лектора, особенно начинающего. Как правило, описание каждого демонстрационного опыта сопровождается рисунком. Во многих случаях приводится объяснение опыта. Если же теория опыта достаточно полно изложена в учебниках, дается ссылка на литературу.

За более чем столетнюю историю существования кафедры физики НТУ «Днепровская политехника» разработала и применила **целый ряд** уникальных лекционных опытов. Таких, например, как зонные пластинки для ультразвука, поляризационные призмы Николя, исландского шпата, эпидиаскоп фирмы Карл Цейсс, электромагнит с магнитной индукцией около 0, 1 Тл, ванна Гюйгенса, волновая машина Э.Маха и других.

К сожалению, демонстрационное оборудование устаревает физически и морально. Сегодня многие вузы Украины имеют проблемы с лекционными физическими демонстрациями.

Одно из наиболее существенных затруднений заключается в том, что ограниченность финансирования не позволяет многим вузам оснастить кафедры физики современным демонстрационным оборудованием, а объем выпуска, например, предприятием «Учебная техника» (г. Ровно) демонстрационного оборудования охватывает только небольшой круг физических явлений.

В то же время быстрое развитие получает мультимедийная проекция и компьютерное моделирование и, фактически, постепенно парк стареющего демонстрационного оборудования заменяется компьютерными средствами. Однако это, по-нашему мнению, не заменит живого лекционного опыта.

По словам великого физика Дж.К. Максвелла «чем проще материалы иллюстративного опыта и чем более они привычны учащимся, тем глубже они поймут идею, которую должен иллюстрировать этот опыт. Воспитательная ценность таких опытов часто обратно пропорциональна сложности приборов».

Все изложенное подчеркивает необходимость сохранения накопленного в НТУ «Днепровская политехника» опыта, которую преследует настоящее издание.

Заметим, что некоторые опыты, отмеченные в данном пособии звездочкой, представляют лишь исторический интерес, подобно тому, как ламповая радиотехника практически исчезла из пользования.

## **Часть 1**

# **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ**

Національний технічний університет

«Дніпровська політехніка»

кафедра фізики

<http://physics.ntu.org.ua>

## 1.1. Векторный характер скорости (опыт с точилом)

**Приборы.** На валу электродвигателя укреплен деревянный шкив. К его боковой поверхности приклеена грубая наждачная бумага. Напильник.

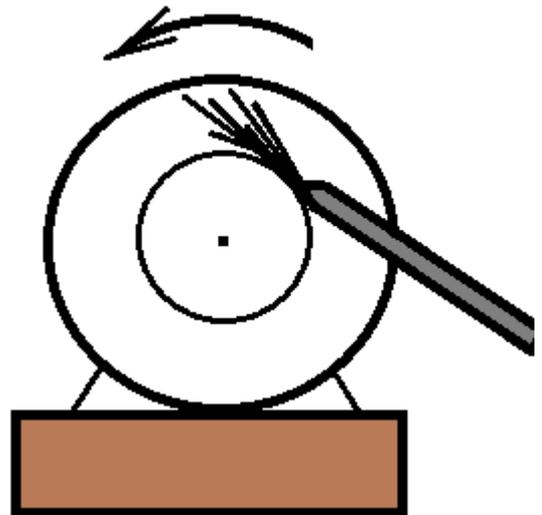
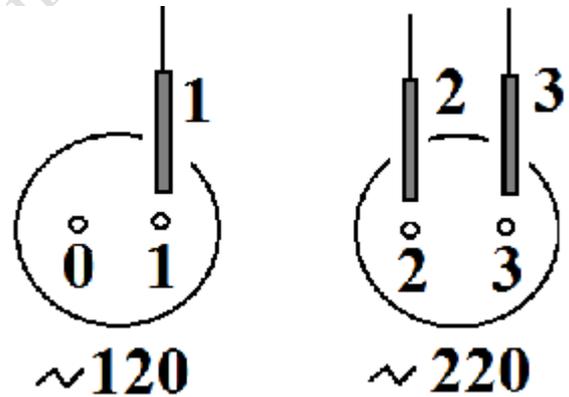
**Опыт.** Приводят в быстрое вращение электродвигатель и прикасаются к боковой наждачной поверхности шкива напильником (или каким-либо стержнем из закаленной стали). Пучок искр вылетает в месте касания напильника по касательной к окружности.

**Объяснение опыта.** Скорость материальной точки направлена по касательной к траектории. Роль материальных точек выполняют раскаленные частицы металла.

**Указания для демонстратора.** Включение электродвигателя осуществляется тремя пронумерованными штекерами в три пронумерованных гнезда на демонстрационном столе. Если номера штекеров соответствуют номерам розеток, вал будет крутиться против часовой стрелки, если смотреть из аудитории. Изменяя номера соединений (например, меняя местами две фазы), можно заставить мотор крутиться в другую сторону.

**ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ.** Опыт требует большой осторожности. Опыт обязательно показывают вдвоем. Один человек (например, демонстратор) прижимает к большому столу основание электродвигателя (если его не прижимать, огромная скорость вращения ротора может привести к повороту статора в противоположную сторону и падению электродвигателя со стола). Второй человек (например, лектор) касается по очереди вращающегося наждака в нескольких местах напильником, не загораясь спиной картину от аудитории.

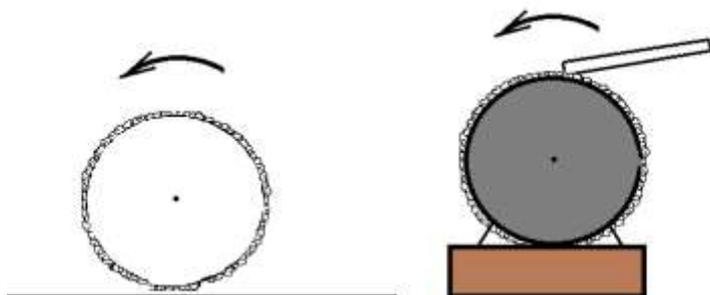
Прижимать напильник следует **ВСЛЕД НАПРАВЛЕНИЮ !!!** вращения. Если прижать *навстречу вращению, напильник вырвет из рук* и последствия будут весьма печальными. Если эту процедуру будет выполнять в качестве второго демонстратора лектор, то надо перед лекцией показать ему, как правильно следует держать напильник.



## 1.2. Центробежные силы инерции. «Бегающая цепочка»

**Приборы.** На деревянный шкив электродвигателя, описанного в предыдущем опыте, плотно одевается металлическая цепочка. Звенья этой цепочки небольшого размера ( $\approx 8$  мм) позволяют ей принять форму окружности. Если цепочку выложить по окружности, диаметр получившегося кольца будет равен примерно 25-30 см. Мотор ставят на край демонстрационного стола, ближний к входной двери. Включают, соблюдая правила опыта 1.1.

**Опыт.** Когда шкив на валу электромотора устойчиво раскрутится, цепочку деревянной дощечкой сдвигают со шкива. Цепочка катится по столу как упругое кольцо и пробегает весь демонстрационный стол. В конце стола лектор может поймать цепочку указкой, если хорошо потренируется. В противном случае цепочка просто соскочит со стола и с грохотом упадет на пол.



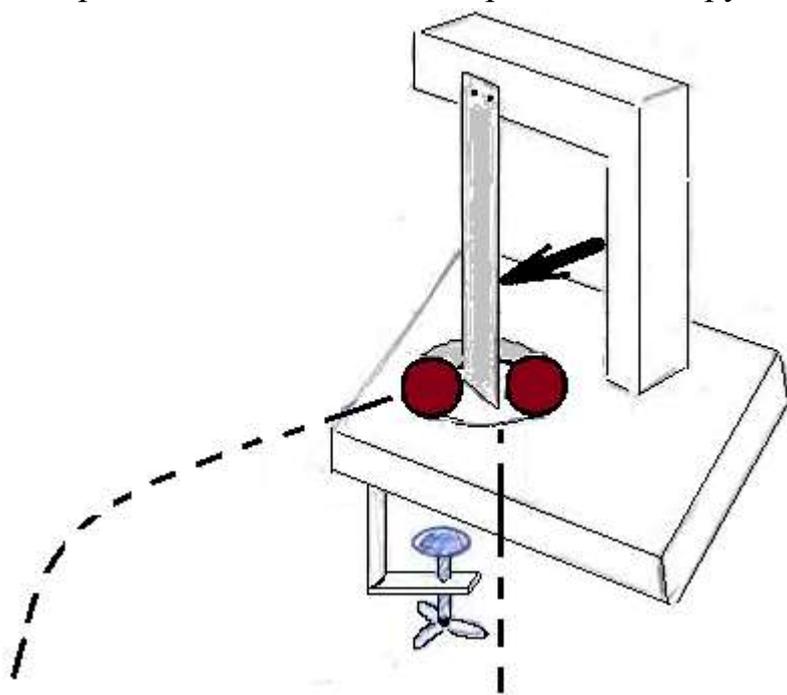
**Объяснение опыта.** В лабораторной (инерциальной) системе отсчета на звенья цепочки действует сила, направленная к центру и сообщающая частицам цепочки нормальное ускорение. Она является упругой силой, возникающей в результате растяжения звеньев цепочки.

Наблюдатель, находящийся во вращающейся системе отсчета, которая является неинерциальной, делает вывод, что на звенья цепочки действует сила  $F = m\omega^2 R$ , направленная вдоль радиуса от центра, которая уравнивается упругой силой натяжения звеньев. Ее называют центробежной силой инерции.

**ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ.** Опыт требует большой осторожности. Опыт показывают вдвоем (см. указания к опыту с искрами). Дощечку, как и напильник в первом опыте, ставят ПО ХОДУ колеса, а не против хода. Цепочка ни в коем случае не должна попасть в человека, для этого второй демонстратор (лектор, например) не должен стоять в плоскости вращения цепочки, а только сбоку.

### 1.3. Демонстрация принципа независимости движений

**Приборы.** Прибор с отверстием и стальной пластинчатой пружиной. Прибор крепится к малому демонстрационному столу струбциной. Два деревянных шарика одинакового диаметра и массы. Пружина удерживает шарики от падения в отверстие прибора.



**Опыт.** Ударом деревянного молоточка по низу пружины перпендикулярно ее плоскости (см. рис.) одному шарiku сообщается горизонтальная скорость и он будет падать по параболе. Другой шарик, освободившись от пружины, падает вертикально вниз.

Оба шарика падают с одной высоты. По стуку шариков о пол делают вывод о том, что они достигли пола одновременно.

**Объяснение опыта.** Демонстрируется принцип независимости движений.

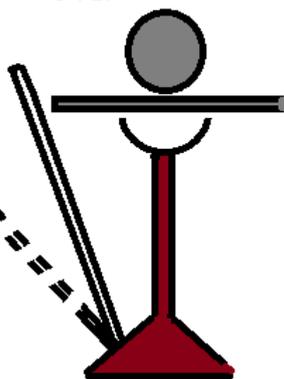
Принцип установлен экспериментально: если тело участвует одновременно в нескольких движениях, то каждое из них совершается независимо от остальных.

Шарик, получивший в начальный момент времени горизонтальный импульс, совершает сложное движение. Он движется горизонтально с постоянной скоростью (если сопротивлением воздуха пренебрегают) и одновременно свободно падает. Оба движения независимы друг от друга.

Вертикальная составляющая скорости шарика изменяется независимо от того, каков был получен начальный горизонтальный импульс. Поэтому время спуска обоих шариков до пола будет одно и то же. Мы услышим один удар, а не два удара.

#### 1.4. 1-й закон Ньютона. Инерция. Выбивание картонки из-под шарика

**Приборы.** На картонку, положенную на стойку с углублением, кладут металлический шарик. Это проделывают тщательно, глядя сбоку, так, чтобы шарик оказался как раз над углублением.



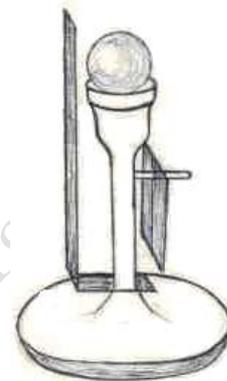
**Опыт.** Если потянуть медленно картонку рукой, шарик движется вместе с картонкой.

При резком ударе пружинкой по картонке она вылетает, а шарик остается и падает в углубление.

**Объяснение опыта.** При медленном вытягивании картонки из-под шарика он движется за картонкой за счет

силы трения. При этом время действия силы большое и изменение импульса шарика  $\Delta p = F_{тр} \Delta t$  значительное, он движется за картонкой.

Если сила действует на покоящееся тело в течение малого промежутка времени  $\Delta t$ , то изменение импульса  $\Delta p$  мало и тело большой массы остается в покое.

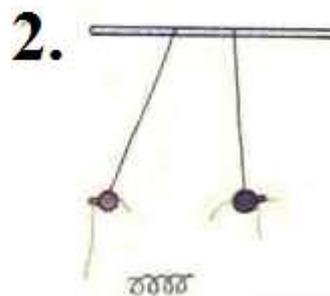
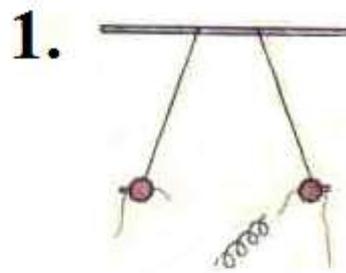
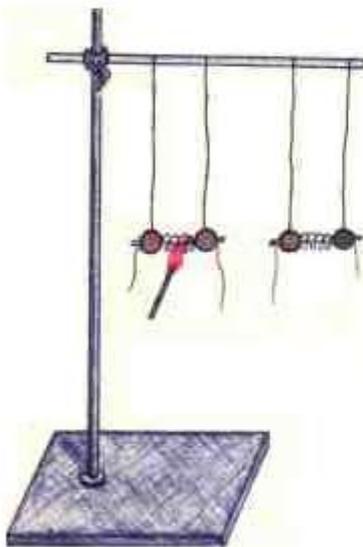


#### 1.5. Закон сохранения импульса

**Приборы:** На штативе на нитках подвешены шарiki. Между двумя деревянными шариками зажата стальная пружина. Шарики связаны между собой ниткой, протянутой в отверстия шариков, просверленные по диаметру.



**Опыт. 1.** Нитка пережигается, и пружина расталкивает шарики, которые отскакивают на равные углы от вертикали, а пружина падает вниз.



2. Если проделать тот же опыт, но вместо одного из деревянных шариков взять свинцовый такого же диаметра, то после пережигания нитки свинцовый шарик отклонится немного, а деревянный - отлетает на большое расстояние.

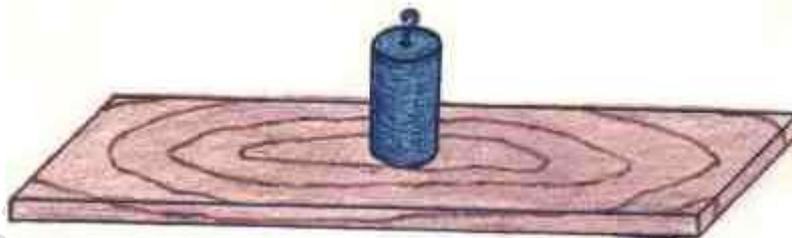
**Объяснение опыта.** Пружина действует с одинаковой силой на оба шарика. Когда нить, стягивающую пружину, пережигают, каждый из них получает одинаковый по модулю импульс, т.к. векторная сумма импульсов шариков должна быть такой же, как и до пережигания, т.е. равной нулю. Из второго закона Ньютона следует, что в случае одинаковых масс шариков их ускорения одинаковы. Если массы шариков разные, ускорения обратно пропорциональны их массам.

**Примечание** для демонстратора. Пружину очень сильно не сжимать.

### 1.6. 3-й закон Ньютона. Тяжелая гиря на доске

**Приборы.** Доска, гиря.

**Опыт.** Студент держит на уровне груди на ладонях вытянутых рук гирю на доске. Демонстратор, выждав немного, неожиданно для студента снимает гирю. При этом руки студента непроизвольно делают рывок вверх.



**Объяснение опыта.** По 3-му закону Ньютона гиря действует на ладони с силой, направленной вниз и приложенной к ладоням.

Ладони в свою очередь действуют на гирию (с доской) с такой же по модулю силой, направленной вверх и приложенной к доске.

**Примечание.** Ладони должны быть обращены внутренней стороной вверх. Большими пальцами рук доску не зажимать.

### 1.7. 3-й закон Ньютона. Два динамометра



**Приборы:** два динамометра, штатив.

**Опыт.** Укрепить динамометры на штативе. Сцепить их крючками. Верхний динамометр показывает вес нижнего, а нижний – свой вес, т.е. показания динамометров одинаковые.

### 1.8. Изменение импульса. Инерция груза на нити. Гирия с нитками сверху и снизу

**Приборы:** штатив универсальный, массивный груз (гирия) с двумя крючками – сверху и снизу, палочка, нитки.

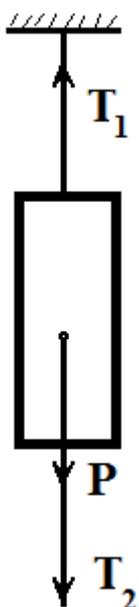
**Опыт.** Тяжелый груз подвешивают на нити за верхний крючок. Внизу к грузу нужно подвесить такую же петлю, которая свободно свисает.

Если намотать конец этой нити на палочку и резко дернуть вниз - она оборвется, а груз останется висеть на верхней нити.

Если медленно тянуть нижнюю нить, то оборвется верхняя нить и груз упадет.

Примером из жизни служит обрыв гибкого троса при попытке рывком сдвинуть с места буксируемый транспорт.

**Указание:** чтобы груз при падении не травмировал руку, наматывать нитку на палочку следует ближе к краю палочки.



**Объяснение опыта.** Когда нижнюю нить резко дергают, время взаимодействия руки и нити мало и груз не успевает изменить свой импульс, сохраняет состояние покоя.

Когда натяжение нити увеличивается постепенно, воздействие длится большее время и груз приобретает скорость. Из рисунка видно, что  $T_1 = T_2 + P$ .

Отсюда  $T_1 > T_2$  При **медленном натяжении** нижней нити в некоторый момент времени  $T_1$  достигает предельной величины  $T_{\max}$  В этот момент времени  $T_2$  еще меньше  $T_{\max}$  Поэтому **нижняя нить не обрывается.**

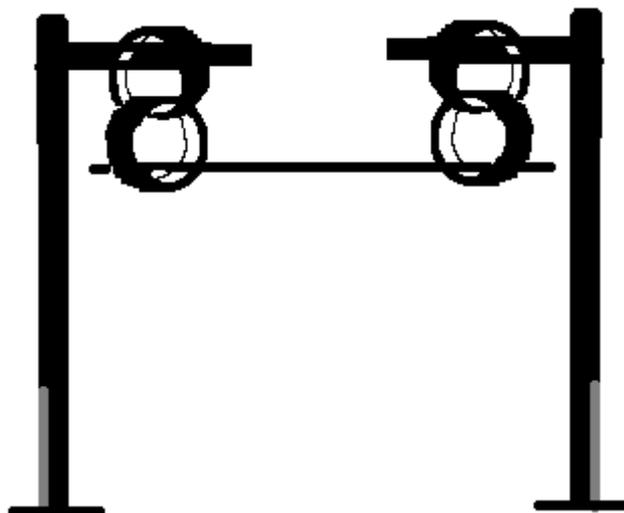
## 1. 9. Инертность тел. Ломание палки в бумажных кольцах

**Приборы:** штативы, четыре бумажных кольца, деревянная рейка, металлический прут (кусок арматуры длиной 70 см, диаметром 1 см).

**Опыт.** Медленно нажимают достаточно тяжелым металлическим прутком на середину рейки. Это приводит к разрыву одного из колец. После этого, вставив новые кольца, изо всех сил с размаху ударяют посередине рейки. Теперь рейка ломается, а кольца остаются целыми.

Демонстрируется инертность тел.

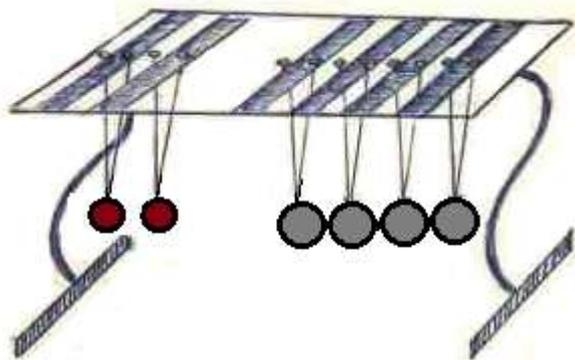
**Указание.** Бумажные кольца шириной 3 см вырезают из ватманской бумаги и склеивают.



## 1. 10. Удар шаров: центральный абсолютно упругий

**Приборы.** На специальной стойке бифилярно подвешено несколько бильярдных шаров.

**Опыт.** Шары одинаковой массы. Вначале оставляют только два шара. Остальные аккуратно поднимают на верхнюю часть стойки. Туда же отправляют и два пластилиновых шара.



Отклонив один из шаров, отпускают его. Ударившись о второй шар, первый шар останавливается, а второй отклоняется почти на такое же расстояние - происходит обмен скоростями. В этом месте опыта демонстратор ловит рукой отклонившийся второй шар и объясняет физику процесса. Затем отпускает второй шар, он ударяется о первый и остается на месте. Так они поочередно останавливаются и отскакивают.

После двух – трех ударов шары надо остановить, т.к. в результате не вполне центрального удара шары начинают раскачиваться.

Если отвести оба шара в стороны на разные расстояния и отпустить, происходит обмен скоростями.

Затем берут три шара одинаковой массы. Отклоняют крайний шар. После удара отскакивает шар, висящий с противоположного конца цепочки шаров, а все

остальные остаются на месте (выполняется закон сохранения импульса). Если отклонить два шара, то после удара отскакивают тоже два шара.

Наконец, отклоняют четыре из пяти шаров. На месте остается один.

После этого берут *два шара разной массы*. При ударе малого шара о большой малый шар отскакивает обратно с меньшей скоростью, а большой шар отклоняется незначительно. При ударе большого шара о малый шары движутся в одном направлении, но с разными скоростями.

*Указание.* Перед опытом необходимо тщательно выровнять *линию центров шаров и оставить между шарами очень малые зазоры*, подкручивая или отпуская их бифилярные подвесы. Обычно прибор выносят в аудиторию заранее, установку центрируют на демонстрационном столе и больше до показа не передвигают.

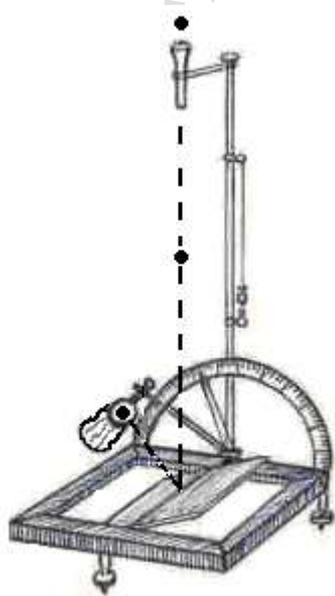
### 1.11. Удар шаров: центральный абсолютно неупругий

**Приборы.** На той же стойке, на которой висят бильярдные шары (опыт 1.10), подвешены на бифилярных подвесах два пластилиновых шара диаметром 4-5 см. В положении равновесия шары слегка касаются друг друга.

**Опыт.** Отводят один шар в сторону и отпускают. При ударе шары слипаются и движутся вместе.

*Указание.* Если опыт давно не показывали, пластилин может подсохнуть, и шары покрываются твердой корочкой. Полезно перед опытом слегка нагреть шары струей теплого воздуха для большей их пластичности.

### 1.12. Косой удар. Стальной шарик падает на стальную плиту



**Приборы.** Специальный прибор снабжен шкалой углов, выраженной в градусах. Плита, на которую вертикально через направляющую трубку падает шарик, может поворачиваться и фиксироваться винтом. Перпендикуляром к плите служит совмещенная с плитой стрелка-указатель. Угол между перпендикуляром к плите (стрелкой) и вертикалью по определению есть угол падения.

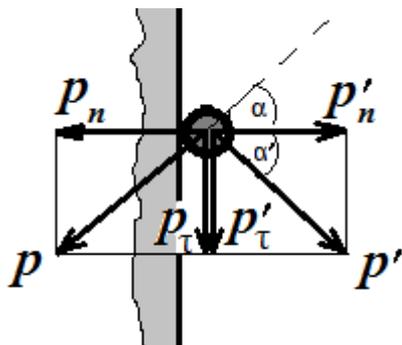
Если полагать удар абсолютно упругим, справедлив закон: «угол падения равен углу отражения». Этот закон и проверяют на опыте.

**Опыт.** Устанавливают мешочек, в который ловят шарики, по шкале прибора на *двойной угол по сравнению с углом падения*, отсчитываемый по шкале.

(Например, угол, который образует стрелка с вертикалью, равен  $30^\circ$ . Отсчет угла идет от нуля сверху. Тогда держатель мешочка надо установить на угол  $60^\circ$ , и закрепить все винты).

Устанавливают углы и ловят один шарик точно в мешочек. Опускают затем подряд несколько шариков – и все падают в мешочек!

*Указание.* Прибор устанавливают строго по отвесу.

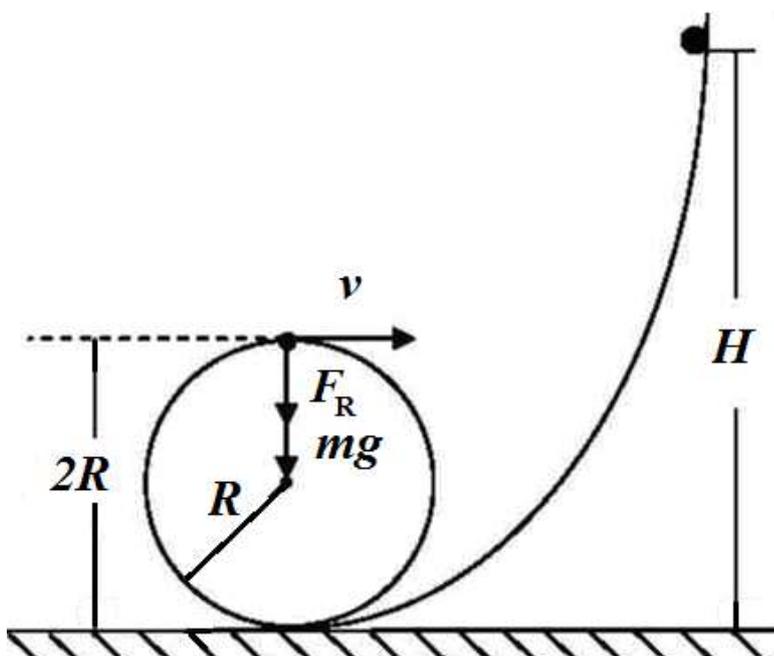
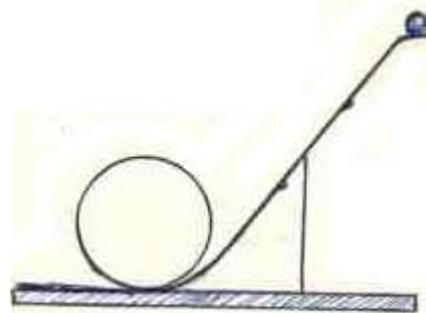


**Объяснение опыта.** В случае, когда силы трения, возникающие при скольжении поверхности шара по пластине, очень малы по сравнению с упругими силами, можно пренебречь действием сил трения. В отсутствие сил трения касательная к пластине составляющая импульса шара  $p_\tau$  до и после удара не изменяется. Нормальная же составляющая импульса только меняет знак, а по величине не изменяется (т.к. удар полагается абсолютно упругим). В итоге становится справедливым закон отражения  $\alpha = \alpha'$ .

### 1.13. Скатывание шарика по «мертвой петле»

**Приборы:** желоб с петлёй, шарик.

**Опыт.** Берут шарик и скатывают его по желобу с различной высоты. Если пускать с высоты, меньшей  $2R$ , шарик не проходит окружность. Если пускать с высоты ровно  $2R$ , шарик тоже срывается с петли, т.к. шарик приобретает скорость, плюс работают силы трения. Затем скатывают шарик с высоты, равной  $2,5R$ . При этом шарик движется по окружности без отрыва в верхней точке петли



"Мертвая петля" применяется для демонстрации перехода потенциальной энергии тела в энергию качения (суперпозицию поступательного и вращательного движения).

**Объяснение опыта.** Чтобы найти минимальную высоту  $H$ , с которой должен скатываться шарик, чтобы он не сорвался в верхней точке петли, воспользуемся законом сохранения энергии.

Потенциальная энергия шарика на высоте  $H$  должна быть равна сумме кинетической

и потенциальной энергий в верхней точке петли (на высоте  $2R$ ):

$$mgH = \frac{mv^2}{2} + mg2R.. \quad (1)$$

Чтобы определить скорость в верхней точке петли, применим второй закон Ньютона. На шарик в верхней точке мертвой петли действуют сила тяжести  $mg$  и сила реакции петли  $F_R$ . Их сумма сообщает шариком нормальное ускорение  $\frac{v^2}{R}$ :

$$mg + F_R = m \frac{v^2}{R}. \quad (2)$$

В момент отрыва  $F_R = 0$ , тогда  $v^2 = gR$ .

Окончательно имеем

$$H \geq 2R + \frac{v^2}{2g} = 2R + \frac{R}{2} = \frac{5}{2}R. \quad (3)$$

Для иллюстрации можно рассказать о "мертвой петле" летчиков.

#### 1.14. Модель сил и моментов при вращении твердого тела вокруг неподвижной оси



Показаны вектор силы, действующей на  $i$ -ю частицу, его составляющие по осям и момент импульса  $i$ -й частицы.

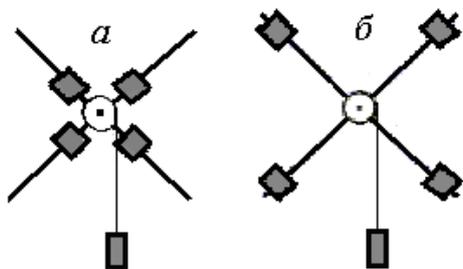


Рис. 29.2.

## 1.15. Маятник Обербека

**Цель опыта.** Проверка уравнения вращательного движения абсолютно твёрдого тела относительно неподвижной оси  $M = I \varepsilon$ .

**Приборы:** маятник Обербека, грузы, секундомер.

**Опыт.** Маятник имеет два шкива разного радиуса. Маятник раскручивается одним или несколькими грузами. Изменяя количество грузов и радиус (плечо) шкива, на котором намотан шнур, убеждаемся, что угловое ускорение  $\varepsilon$  пропорционально моменту силы  $M$ .

Угловое ускорение обратно пропорционально квадрату времени, за которое грузы пройдут от края демонстрационного стола до пола. Время можно измерять демонстрационным секундомером.

Масса вращающейся крестовины с грузами одна и та же. Но она по-разному распределена в двух опытах. Чем дальше от оси вращения сосредоточена масса тела, тем труднее раскрутить крестовину при воздействии постоянной силой, имеющей одно и то же плечо – радиус шкива, на который намотана нить.

Изменяя расстояние грузов на стержнях маятника от центра при одном и том же моменте сил, убеждаемся в том, что угловое ускорение тем меньше, чем больше момент инерции.

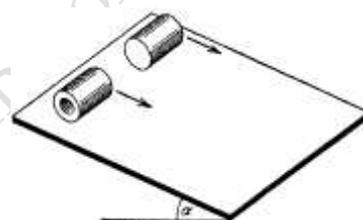
## 1.16. Скатывание цилиндров с наклонной плоскости

**Приборы:** два цилиндра – пустотелый металлический и сплошной деревянный – одинаковой массы и одного радиуса. Наклонная плоскость. Линейка.

**Опыт.** Берут два цилиндра, прикладывают их друг к другу основаниями и показывают, что внешние радиусы у них одинаковы. Линейкой наверху наклонной плоскости удерживают от движения оба цилиндра.

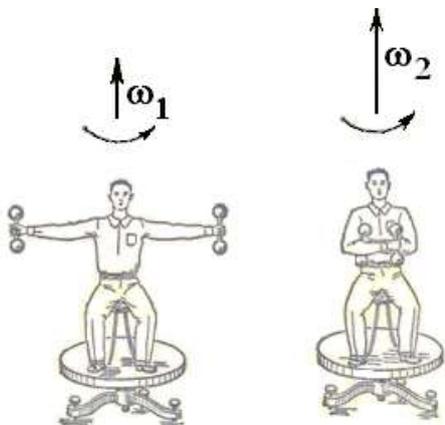
Спрашивают аудиторию: какой раньше скатится, если убрать линейку? (В 90% случаев ответ – железный...). Внезапно убирают линейку. Деревянный обгоняет.

**Объяснение опыта.** Моменты вращающих сил (момент силы тяжести относительно мгновенной оси, проходящей через точку касания) в обоих случаях одинаковы, так как у обоих цилиндров одинаковые массы и радиусы. Моменты инерции разные – деревянный имеет меньший момент инерции ( $\frac{mr^2}{2}$ ), чем металлический ( $mr^2$ ). Из основного уравнения динамики вращательного движения твердого



тела  $M = I\varepsilon$  следует:  $I_d\varepsilon_d = I_m\varepsilon_m$ , Угловые ускорения, поэтому, тоже разные:  $\varepsilon_d > \varepsilon_m$  (деревянный обгоняет металлический).

### 1. 17. Скамья Жуковского. Студент с гантелями



**Приборы.** Скамья Жуковского - платформа в форме кресла, которая может свободно вращаться вокруг вертикальной оси на подшипниках, гантели.

**Опыт.** 1. Студент садится на скамью. Скамья не вращается. Держа на вытянутых вперед руках гантели, студент резко поворачивает руки с гантелями влево (вправо), скамья при этом поворачивается в другую сторону - вправо (влево).

2. Студент держит руки с гантелями, разведенными в стороны. Демонстратор приводит студента в медленное вращение. По команде демонстратора студент быстро прижимает гантели к груди, локти опускает, как говорят спортсмены, «группируется». Вследствие уменьшения момента инерции системы угловая скорость вращения резко увеличивается.

По следующей команде студент снова расставляет руки. Скорость вращения уменьшается.

Можно повторить опыт снова.

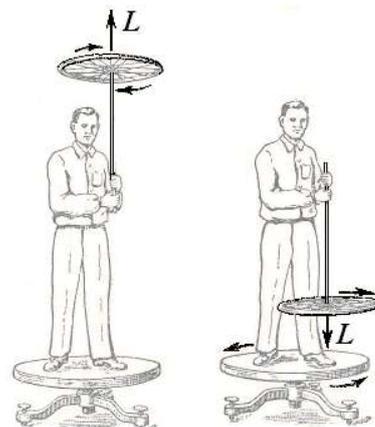
**Объяснение опыта.** Моменты всех внешних сил можно считать равными нулю. Момент силы тяжести человека равен нулю, т.к. центр его тяжести расположен на оси вращения. Силами трения в подшипниках и силами сопротивления воздуха вследствие их малости можно пренебречь. Поэтому *вращательный импульс (момент импульса) системы  $I\omega$  должен оставаться постоянным*. Какие бы внутренние движения не совершались, внутренние силы не могут изменить вращательного импульса системы.

**Указание.** Необходимо следить за тем, чтобы гантели при раскручивании с разведенными руками не задевали за стенку и не травмировали демонстратора.

### 1.18. Скамья Жуковского. Студент с колесом

**Приборы.** Скамья Жуковского, велосипедное колесо.

**Опыт.** Для демонстрации векторного характера закона сохранения вращательного импульса в руки студента на не вращающейся скамье Жуковского передается велосипедное колесо, утяжеленное по ободу для

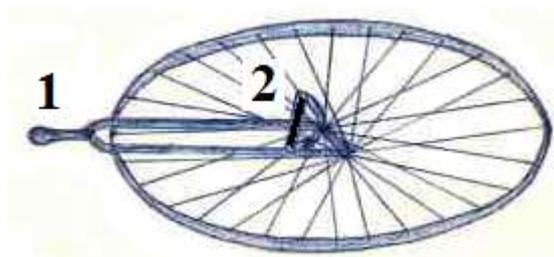


увеличения его момента инерции. Колесо держат двумя руками так, чтобы ось его вращения была направлена вертикально. Например, левой рукой держат ручку 1, правой – ручку 2 так, чтобы она была сверху колеса (см. рис. колеса).

Демонстратор сильным рывком раскручивает колесо. Тем самым системе сообщается некоторый вращательный импульс  $L$  (направленный, например, как на рисунке, вертикально вверх). Весь вращательный импульс сосредоточен в колесе.

По команде демонстратора студент переворачивает колесо на  $180^\circ$ . Для этого, оставляя на месте ручку 1, поворачивает ручку 2 так, чтобы она оказалась снизу колеса.

Теперь направление вращения колеса относительно скамьи изменится на противоположное, и вращательный импульс колеса будет теперь направлен вниз. Тогда студент со скамьей начинает вращаться в противоположную вращению колеса сторону так, чтобы сумма векторов вращательного импульса студента со скамьей и вращательного импульса колеса давала прежний вектор вращательного импульса.



Еще один вариант опыта. Скамья со студентом неподвижна. Студент упирает в пряжку пояса на животе ручку 1 колеса, и держит левой рукой колесо за ручку 2. Демонстратор раскручивает колесо резким движением и просит студента правой свободной рукой

схватиться за обод вращающегося колеса и таким образом остановить его. (Перед этим сначала на неподвижном колесе, а затем на медленно вращающемся студент тренируется в остановке колеса так, чтобы хвататься за обод, а не за спицы). После остановки колеса скамья начинает вращаться в ту же сторону.

Объяснение опыта см. в опыте 1.17.

Указание. Перед проведением опыта с переворотом колеса необходимо потренировать студента переворачивать неподвижное колесо.

## 1. 19. Большой гироскоп. Прецессия

**Прибор.** Демонстрационный гироскоп с горизонтальной осью вращения, который раскручивается электромотором. Опора оси гироскопа позволяет ему вращаться вокруг вертикальной и горизонтальной осей, проходящих через точку опоры.

**Опыт.** Свойство уравновешенного гироскопа состоит в том, что его ось стремится устойчиво сохранять в пространстве приданное ей первоначальное направление.

Вначале на не раскрученном гироскопе показывают, как прибор может свободно вращаться вокруг горизонтальной и вертикальной осей – ось неподвижного гироскопа покачивают рукой вверх-вниз и вправо-влево.

Затем включают мотор. Плавно гироскоп набирает обороты. Число оборотов лектор считает вслух со шкалы прибора. Раскручивая гироскоп, демонстратор придерживает рукой планку с противовесом в каком-либо одном направлении (например, направляя на сидящего в аудитории выбранного студента). Когда гироскоп наберет обороты, очень легко прикасаются указкой к планке с противовесом. Она застыла неподвижно. (Лектор комментирует: «Это принцип автопилота –

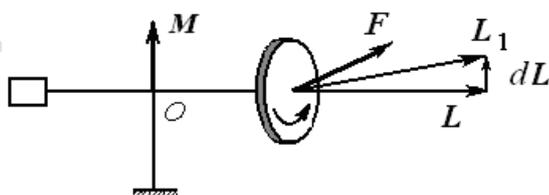


Рис. 1.

Подеиствуем на ось некоторой горизонтальной силой  $F$  (рис. 1) (можно слегка подействовать концом указки горизонтально на противовес). Казалось бы, ось гироскопа должна повернуться вправо. Так было бы, если бы гироскоп не вращался. Вращающийся же гироскоп повернет свою правую часть в перпендикулярном линии действия силы направлении – вверх в вертикальной плоскости.

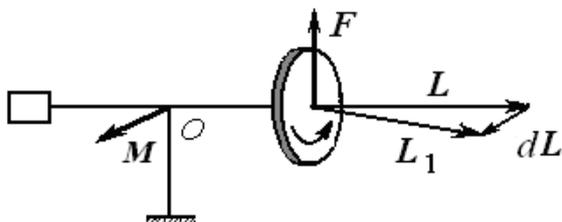


Рис. 2.

Если теперь подействовать на ось гироскопа силой  $F$  в вертикальном направлении (рис. 2, проще надавить слегка вертикально вниз на противовес), то его ось будет поворачиваться в горизонтальной плоскости.



сохранять заданное направление»).

**Объяснение опыта.** Свойство гироскопа проявляется, когда на его ось начинает действовать сила, стремящаяся привести ось в движение.

Такое поведение гироскопа называется *гироскопическим эффектом*. Движение конца оси гироскопа происходит не в направлении силы  $F$ , а в направлении момента силы  $M$ .

Вращение оси гироскопа под действием силы называется *прецессией*. Передвигая уравновешивающий груз-противовес ближе или дальше от точки опоры (это равносильно постоянно действующей на ось гироскопа вертикально вниз (вверх) силе), наблюдаем прецессию оси то в одну, то в другую сторону.

*Указания.* Порядок включения и выключения стационарного гироскопа.

1. Проверить, включен ли «Регулятор скорости».
2. Установить ось вращения гироскопа в горизонтальном положении и уравновесить планку грузом.
3. Включить в розетку 220 В на демонстрационном столе.
4. Нажать красную кнопку «Сеть».
5. Увеличивать скорость вращения гироскопа «Регулятором скорости» до 6000 об/мин.
6. Медленно уменьшать скорость вращения «Регулятором скорости» до полной остановки.
7. Выключить «Регулятор скорости». Нажать красную кнопку «Сеть». Выключить из розетки.

## 1.20. Малые гироскопы авиационные. Прецессия

*Приборы.* 1). Преобразователь напряжения ПАГ-1Ф. Предназначен для преобразования постоянного напряжения 24 - 28 В в переменное трехфазное напряжение 3 х

36 В х 400 Гц. для питания авиагоризонтов. Конструктивно состоит из двух узлов: электродвигателя постоянного тока и генератора переменного тока, соединенных общим валом.

Применяется на самолетах и вертолетах. 2). Авиационные гироскопы - 3 шт. Переключатель. Соединительные провода.



В демонстрационной аудитории на выпрямителе КЭФ -8 выставляется напряжение в розетку на столе 27 В (3 А).

*Опыт.* Соединяя разъем, идущий от ПАГ-1Ф, с малым гироскопом, раскручивают гироскопы по очереди. 2 раскрученных гироскопа передают по рядам студентов. Предлагают слушателям взять гироскоп в ладонь и, вращая ладонью в разных направлениях, ощутить стремление гироскопа сохранить направление оси вращения («гироскопический эффект»).



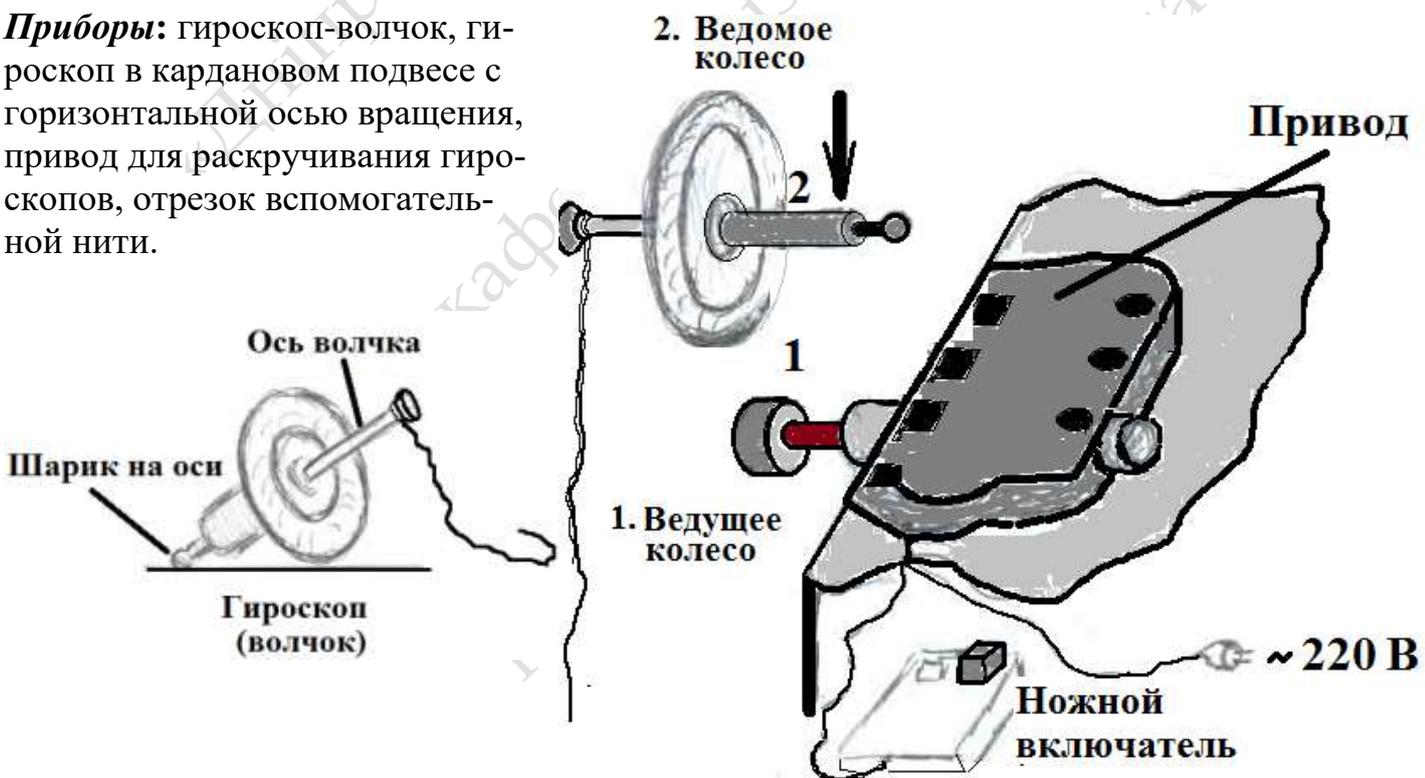
На третий раскрученный гироскоп навинчивают удлинитель оси, ставят его этим удлинителем на демонстрационный столик и наблюдают прецессию оси (см. фото).

*Указание.* Следует оберегать гироскопы от ударов и падений.

## 1.21. Демонстрационный гироскоп, приводимый во вращение специальным приводом. Прецессия



**Приборы:** гироскоп-волчок, гироскоп в кардановом подвесе с горизонтальной осью вращения, привод для раскручивания гироскопов, отрезок вспомогательной нити.



**Опыт.** Вначале раскручивают гироскоп-волчок.

Лектор показывает невращающийся волчок аудитории и объясняет, для чего колесико волчка имеет утолщение по ободу.

Затем демонстратор становится правым боком к аудитории и опирается боком о стол. На ближний к аудиторной доске край стола кладут моторчик с ведущим колесом так, чтобы это колесо свисало со стола (см. рис). Ребром ладони правой руки демонстратор опирается на плоскую часть моторчика и прижимает ее к столу. Пальцами этой же правой руки держит шарик на конце оси гироскопа.

Левой рукой демонстратор держит другой конец оси гироскопа, к которой привязана нить. Нить свободно свисает. Ногой демонстратор нажимает педаль пуска моторчика. Не отпуская педали, плавно приближает (см. рис.) ведомое колесо волчка (с шероховатой поверхностью) к ведущему колесу моторчика (с резиновой поверхностью) до их контакта. Увеличивая силу контакта, раскручивают волчок до нужной скорости.

Когда гироскоп наберет нужные обороты, убирают ногу с педали.

Демонстратор берет волчок за свисающий конец нити и поднимает его перед аудиторией на уровень груди. Происходит прецессия волчка.

После нескольких полных кругов прецессии берут волчок за конец оси, к которой привязана нить, и ставят волчок вертикально на демонстрационный стол. Вращающийся волчок не падает и стоит ровно.

**Внимание.** Не допускайте падения волчка со стола! Лучше убрать волчок со стола, не дожидаясь его остановки!



Затем раскручивается приводом гироскоп с горизонтальной осью в кардановом подвесе. В этом случае берут в руки моторчик и манипулируют ведущим колесом. Ногой включают педаль пуска

моторчика и прижимают его ведущее колесо к неподвижно закрепленному в обойме ведомому колесу. Здесь нужна большая сноровка и ловкость рук! Можно раскрутить гироскоп одному демонстратору, а можно привлечь второго демон-

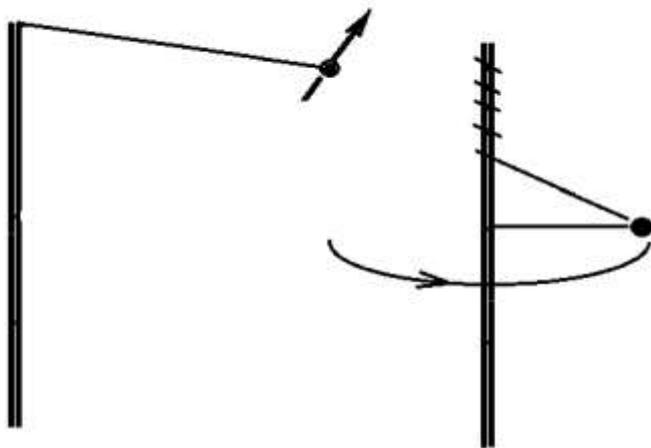
стратора (лектора), чтобы тот держал обойму гироскопа, пока первый человек прижимает ведущее колесико к ведомому.

Когда гироскоп раскручен, берут вспомогательную нить обеими руками и пытаются слегка надавить ею на горизонтальную ось ближе к противовесу. Надавливают вертикально – ось уходит горизонтально, действуют на ось горизонтально – ось поворачивается вертикально.

**Указание.** Раскручивание обоих гироскопов требует определенной сноровки и усилий. Если опыты демонстрирует женщина, в целях безопасности лучше опыт не показывать. Лектор-мужчина при желании продемонстрировать опыт должен заранее несколько раз провести тренировку.

## 1.22. Палочка с привязанным на конце нити шариком («маятник переменного радиуса»)

**Опыт.** Держа в левой руке стержень «маятника», правой рукой отводят в сторону шарик и натягивают нить так, чтобы она образовала со стержнем почти прямой угол. Затем резко толкают шарик.



По мере наматывания нити шарик приближается к стержню, момент инерции шарика уменьшается, а скорость вращения возрастает. Особенно хорошо это заметно в конце опыта, когда радиус окружности, описываемой шариком, становится малым.

## 1.23. Вращение тел различной формы. Свободные оси вращения

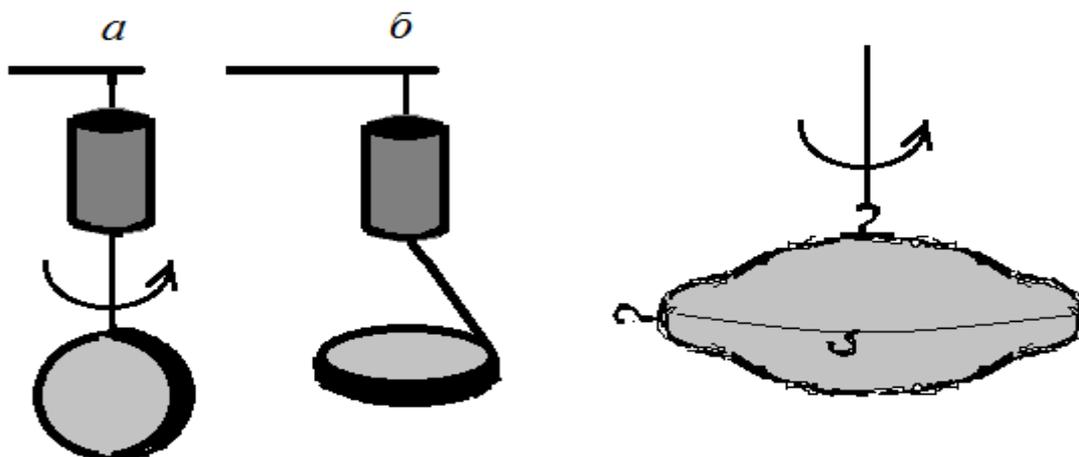
**Приборы.** На стойке закреплен небольшой электромотор, ось вращения которого расположена вертикально. К оси прикреплена вертикально висящая капроновая нить с крючком. К крючку можно подвешивать различные тела: цилиндрический стержень, диск, эллипсоид, цепочку.

**Опыт.** Подвешивают различные тела. Диск подвешивают за край, стержень – за конец, цепочку – за одно из звеньев, у эллипсоида имеется три варианта подвеса.

С помощью ЛАТРА постепенно добавляют обороты мотору.

Вначале вращение совершается с небольшим числом оборотов. Тела вращаются неустойчиво. Затем по мере добавления оборотов мотору тела постепенно принимают устойчивое положение – вращение происходит вокруг оси с наибольшим моментом инерции. Все тела постепенно занимают горизонтальное положение, вращаясь вокруг оси, проходящей через центр тяжести тела.

В том числе цепочка, расширяясь при вращении, принимает форму кольца, сохраняя на время вращения жесткость.



*Подключение приборов.* Электромотор подключается к выходу ЛАТРа. Напряжение подается постепенно от 0 до примерно 30 В, при этом непрерывно наблюдают за устойчивым вращением подвесок, внося коррективы.

## 1.24. Вращение коробки вокруг свободных осей

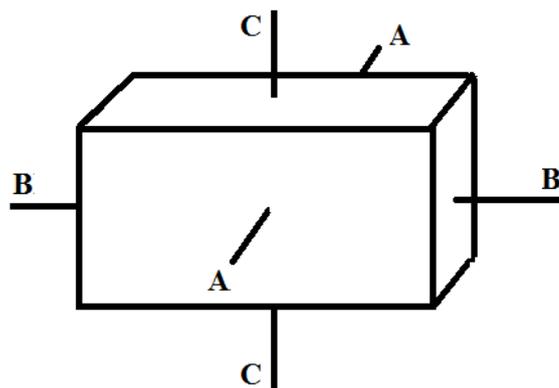
**Приборы:** пустая коробка из картона, имеющая форму параллелепипеда размером приблизительно 30 см x 20 см x 5 см.

**Опыт.** Сначала подбрасывают коробку, сообщая ей одновременно быстрое вращение вокруг оси  $AA$ . Ось  $AA$  представляет собой ось, относительно которой момент инерции наибольший. Коробка во время полета вращается устойчиво, сохраняя неизменным направление оси  $AA$ .

Затем коробку подбрасывают, сообщая ей вращение вокруг оси  $BB$ . Ось  $BB$  соответствует наименьший момент инерции. Это вращение также устойчиво.

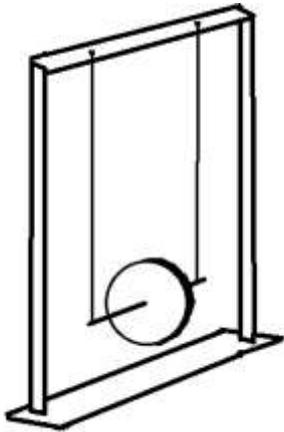
Наконец, подбросив коробку и сообщив ей вращение вокруг оси  $CC$ , наблюдают неустойчивое вращение. Ось  $CC$  соответствует промежуточное значение момента инерции. Коробка движется неровно, меняя направление оси  $CC$  в пространстве, как бы «кувыркаясь» в воздухе.

*Указание.* Крышку коробки заклеивают, чтобы при бросании она не раскрывалась.



## 1.25. Маятник Максвелла

**Прибор** состоит из массивного диска, к концам оси которого привязаны два шнура. За концы этих шнуров маятник подвешивают к стойке.



**Опыт.** Если маятник поднять, намотав шнуры на ось, а затем отпустить, то под действием веса диск будет опускаться, а шнуры разматываться с оси. В нижней точке потенциальную энергию можно принять равной нулю, зато кинетическая энергия максимальна. В нижнем положении диск вращается по инерции в том же направлении, а шнуры наматываются на ось, вследствие чего маятник поднимается.

**Объяснение опыта.** Опыт иллюстрирует закон сохранения энергии. Потенциальная энергия маятника вверху переходит в кинетическую энергию внизу и наоборот.

**Указание.** Оба шнура вначале надо наматывать на ось симметрично. Ось в верхнем положении должна быть строго горизонтальной.

## Часть 2

# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

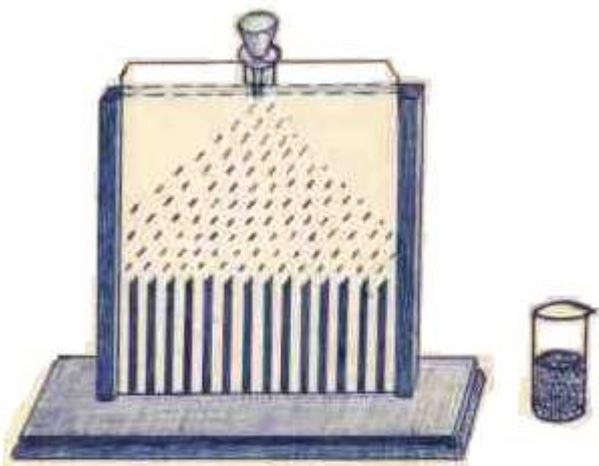
Національний технічний університет

«Дніпровська політехніка»  
кафедра фізики

<http://physics.ntu.org.ua>

## 2.1. Доска Гальтона. Установление статистических закономерностей.

**Приборы.** Доска Гальтона представляет собой вертикальную доску, в которую в шахматном порядке вбиты гвоздики без шляпок. Под ними находится ряд вертикальных ячеек, разделенных перегородками. По центру сверху устанавливается воронка. Все это прикрыто стеклом.



**Опыт.** Вначале в воронку опускают один маленький шарик. Его траектория – случайное событие. Обращают внимание аудитории на движение шарика. Затем последовательно бросают еще пару шариков. Они падают в разные ячейки.

Ставится вопрос: можно ли по этим трем опытам определить вероятность попадания следующего шарика в ту или иную ячейку?

Ответ – нет. Надо проделать большое число опытов (аналогично – бросание монеты «орел» - «решка»). Чтобы установить закон вероятности, надо повторять бросание монеты сотни и тысячи раз.

Берут стакан с пшеном. Аккуратно (т.е. не торопясь, иначе забьется воронка) сыплют пшено до тех пор, пока не высыплется весь стакан. Уровень пшена принимает вид столбчатой диаграммы – *гистограммы*, которую можно аппроксимировать гладкой кривой - кривой Гаусса. Этому распределению (называемому нормальным или распределением вероятностей случайной величины) подчиняются самые разнообразные по своей физической природе случайные переменные. В данном опыте это отклонение от центра.

Лектор коротко говорит о свойствах распределения Гаусса ( $f(x) \sim \exp(-x^2)$ ) Например, хорошо моделируются нормальным распределением такие случайные величины, как отклонение пули при стрельбе по мишени; погрешности измерений и др. При измерениях ошибка в большую или меньшую стороны равновероятны. Большая ошибка мало вероятна и т.д.

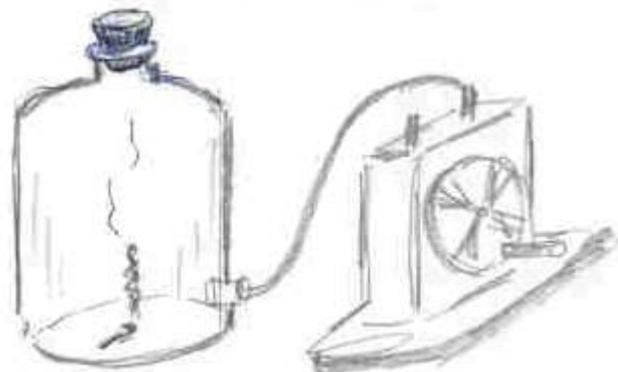
Теперь каким будет ответ на поставленный вопрос? Аудитория помогает...

Возникает вопрос. Причем здесь молекулы? Ответ. Для установления статистических закономерностей в распределении молекул по скоростям необходимо очень большое число молекул и абсолютно случайный характер их столкновений. Что и имеет место.

**Указание.** В демонстрационной аудитории после окончания лекции наклоняют прибор над листом ватмана лицом к листу, аккуратно выдвигают немного вверх переднее стекло, высыплют пшено на лист ватмана и вынимают отдельно шарики в баночку, отдельно пшено в стакан.

## 2.2. Адиабатное расширение. Образование тумана.

**Приборы.** Большой стеклянный баллон, плотно закрывающийся резиновой пробкой. Снизу в баллон входит шланг от насоса. На дно баллона наливают очень немного воды, чтобы создать атмосферу насыщенных паров. Перед опытом баллон покачивают в руках так, чтобы вода омыла стенки изнутри. Ручной насос, соединенный с баллоном на нагнетание воздуха в баллон.



**Опыт.** Собирают установку: насос, резиновая трубка от выхода насоса к баллону, пробка баллона закрыта и придерживается рукой. Нагнетают воздух внутрь баллона (приглашается на помощь студент). Делают 20 -30 качаний, прекращают накачивать воздух, делают паузу, придерживая рукой пробку, и обращаются к аудитории: «При внезапном расширении процесс можно считать адиабатным. Должна понизиться температура воздуха в баллоне. На дне баллона есть вода. Водяной пар станет насыщающим и в баллоне должен образоваться туман». После этих слов быстро вынимают пробку. Пробка открывается с шумом. *Но туман не образуется!!!*

Лектор объясняет: «Туман - это капельки воды. Они легче зарождаются на твердых частицах, взвешенных в воздухе – пыль, дым и т.д. В чистом воздухе их рост затруднен. «Загрязним» воздух».

Демонстратор зажигает спичку, бросает зажженную в баллон так, чтобы легкий дымок от погаснувшей спички был виден. Лучше бросить пару спичек.

Все действия повторяются сначала. Нагнетают воздух. Быстро открывают пробку. Шумовой эффект (хлопок). И весь баллон затягивает туманом.

*Примечание. После опыта баллон промывают, удаляя грязь с его дна.*

## 2.3. Адиабатное сжатие. «Воздушное огниво»

**Приборы.** Прозрачный толстостенный цилиндр с поршнем, укрепленным на штоке.

**Опыт.** Сначала продувают спринцовкой цилиндр огнива от прошлых опытов - необходимо «проветрить» полость цилиндра. Затем на дно цилиндра опускают небольшой кусочек ваты, слегка смоченный эфиром, и закрывают цилиндр поршнем. (Иногда вата прикрепляется прямо к поршню).

Держа горизонтально на прямых вытянутых руках в затемненной аудитории огниво, резко вдвигают поршень. В конце хода поршня видна яркая вспышка эфира.

(Более легкий в исполнении вариант для женщин-демонстраторов – опирают прибор вертикально на стол и резко вдвигают вертикально вниз поршень внутрь цилиндра.)

Воздух при быстром сжатии сильно нагревается, и пары эфира воспламеняются. При демонстрации опыта полезно частично затемнить аудиторию, тогда вспышка паров будет особенно отчетливо видна студентам. Описанный опыт очень хорошо иллюстрирует зажигание рабочей смеси в дизельном двигателе.

**Примечание.** Эфир перестали продавать в аптеках. Можно применять легко воспламеняющиеся вещества - спирт и др. .

## 2.4. Переход эфира через критическое состояние

**Приборы.** Ампула с эфиром, электрическая печь, проекционный фонарь, проектирующий объектив, оборотная призма, экран.

**Опыт.**

Вначале лектор рисует на доске семейство изотерм реального газа. Проводит линию от точки  $V_{кр}$  на оси объемов вертикально вверх, которая пересекает критическую изотерму в критической точке. При изохорическом ( $V = const$ ) нагревании жидкости (движении на рисунке на доске по прямой вертикально вверх) и соответствующем подборе массы жидкой фазы можно пройти через критическое состояние.

Наблюдать переход вещества через критическое состояние можно при нагревании эфира в запаянной ампуле. (Излагаемый метод разработан в Киевском университете выдающимся украинским физиком М.П. Авенариусом).

Ампула с этиловым эфиром ( $t_{крит} = 193,8^{\circ}C$ ) запаяна и помещена в нагреватель.

При подготовке опыта в ампулу вводится такая масса эфира, объем которой в критическом состоянии равен внутреннему объему ампулы.

Границей, отделяющей жидкость от пара, является свободная поверхность жидкости.

Наличие этой поверхности дает возможность точно указать, где находится жидкая фаза вещества, и где газообразная. Такое резкое различие между



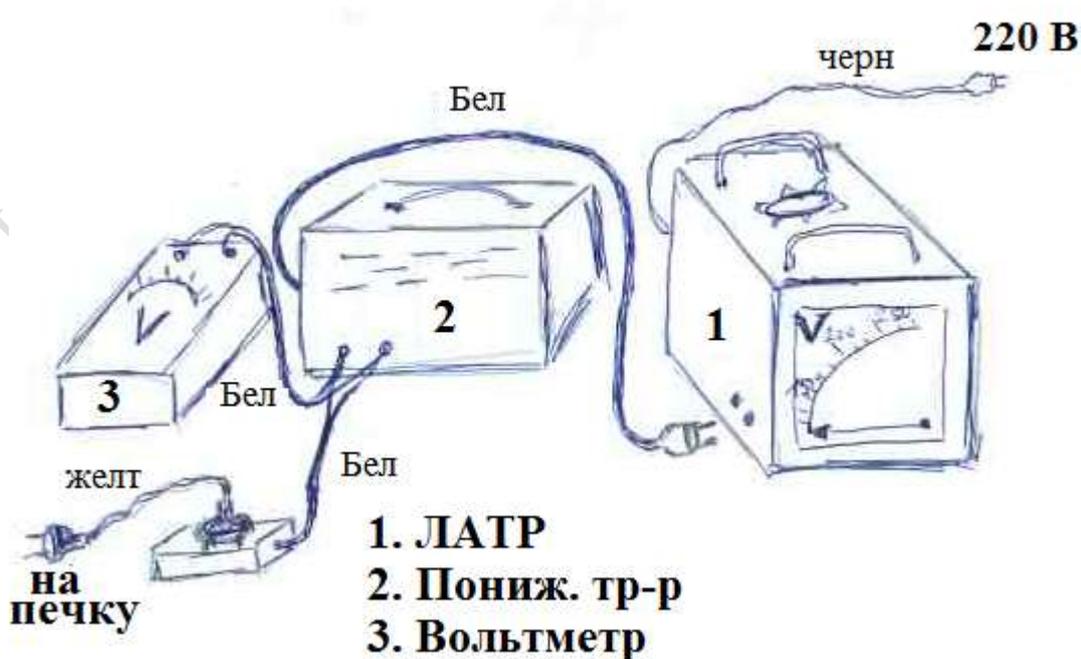
жидкостью и ее паром объясняется тем, что плотность жидкости во много раз больше, чем у ее пара. Если в обычном состоянии количество молекул в одном  $\text{см}^3$  в газах  $n \cong 10^{19} \text{ 1/см}^3$ , то в жидкостях  $n \cong 10^{22} \text{ 1/см}^3$ , т.е. отличается в 1000 раз.

Сначала включают проходящий через ампулу свет, проектируют ампулу на экран и наблюдают на экране две фазы эфира – жидкость и сверху жидкости пар.

Затем включается печь и происходит нагрев. Плотность жидкости вследствие расширения уменьшается, а плотность пара над ней увеличивается (напомним - ампула запаяна!). Происходит кипение эфира.

По мере приближения к критической температуре мениск становится плоским, поверхностное натяжение обращается в ноль. Наконец, **мениск исчезает**, и весь эфир переходит в газообразное состояние. В критическом состоянии исчезает различие между жидкостью и ее паром.

Поскольку нагрев идет быстро и критическое состояние можно проскочить, опыт лучше **наблюдать при охлаждении** от температуры выше  $T_{\text{крит}}$  до комнатной, которое происходит медленнее, чем нагрев.



Выключают печь, ампула медленно остывает в воздухе, и наблюдают на экране обратный процесс. (На доске лектор показывает вертикаль через все изотермы сверху вниз через критическую точку

– процесс остывания *изохорический*).

Как увидеть момент критического состояния? При прохождении света через вещество в критическом состоянии свет рассеивается, и ампула на мгновение чернеет. При дальнейшем остывании наблюдается уже двухфазное состояние эфира - капельки жидкости стекают ко дну ампулы, снизу накапливается жидкость с явно видимым мениском, сверху ее пар.

#### Указания для лекционного демонстратора.

Опыт демонстрируют в вертикальной проекции с оборотной призмой. Схема опыта показана на рисунке.

Нагреватель – так называемая «воздушная баня» - представляет собой небольшой ящик из железа со съемной крышкой, в крышке имеется отверстие для пробки, к которой подвешива-

ется ампулка с эфиром. Длина толстостенной стеклянной ампулки 3 – 5 мм, внешний диаметр около 5 мм. Сверху – крючок для подвешивания в воздушной бане. В передней и задней стенках ящика имеются два стеклянных окошка из толстого стекла (5 - 6 мм) для пропускания света от проекционного устройства. Нагрев воздуха в бане производится пропусканием тока через спираль из нихрома, укрепленную внутри ящика около его дна. Проволоки должны иметь общее сопротивление 60 Ом, диаметр 0,3 мм, сила тока приблизительно 2 А.

Напряжение к спирали нагревателя подводится через ЛАТР от сети 220 В, 50 Гц. Постепенно поворотом ручки ЛАТРа увеличивают напряжение на печке (смотрят на показания вольтметра 3 на рисунке) *от нуля* и наблюдают за ампулкой на экране. В момент начала закипания эфира прекращают увеличивать напряжение. Обычно это составляет около 67 В. Больше не подавать! Уровень эфира начинает двигаться к верхнему концу ампулки. Когда мениск исчезает, выключают печку. Ампулка начинает медленно остывать. Наконец, при прохождении критического состояния, ампулка внезапно чернеет.

## 2.5. Свойства жидкого азота

**Приборы:** жидкий азот в сосуде Дьюара, тонкостенный стакан, свинцовый колокольчик, куски резины, кусок деревянной доски, молоток.

**Опыт.** Жидкий азот представляет собой бесцветную жидкость. Для демонстрации свойств жидкого азота следует налить его из сосуда Дьюара в тонкостенный стеклянный стакан. Лектор напоминает, что температура жидкого азота – 195,7 °С.

При низких температурах изменяются механические свойства веществ. В стакан с жидким азотом пинцетом опускают: кусок резиновой трубки, свинцовый колокольчик (предварительно демонстратор бесполезно пытается заставить его звенеть), кусочки резиновой пластинки, нарезанной в форме небольших клиньев, и, если есть возможность, небольшой цветок.

После прекращения бурного кипения все указанные предметы вынимают по очереди пинцетом.

Резина, охлажденная до температуры жидкого азота, становится хрупкой. Кусок резиновой трубки можно ударом молотка на наковальне разбить на куски. Эффектно выглядит забивание «гвоздей» (резиновых клиньев) в деревянную доску. В конце лекции желающие могут потрогать резиновые клинья, забитые в доску.

Вынутый из жидкого азота свинцовый колокольчик вследствие повышения у свинца упругости звенит. Наконец, вынутый последним цветок, брошенный с небольшой высоты на стол, разбивается, как стеклянный, на мелкие куски (опыт П.Л. Капицы).

В заключение можно плеснуть оставшийся в стакане жидкий азот на демонстрационный стол. Капли жидкости интенсивно испаряются, покрываются газовыми оболочками и быстро разбегаются на газовых подушках во все стороны. Можно осторожно плеснуть также жидким азотом на руку (по касательной к вы-

прямленной ладони). За счет воздушной подушки, возникающей при интенсивном испарении жидкости, рука не получит переохлаждения.

## 2.6. Диффузия в газах

**Приборы.** Горизонтально расположенная стеклянная труба, закрытая с одной стороны наглухо, с другой стороны - пробкой. Полоска стекла. Промокательная бумага, нашатырный спирт, фенолфталеин.

**Опыт.** На стеклянную пластинку накладывают промокательную бумагу белого цвета, пропитанную раствором фенолфталеина, и помещают ее в стеклянный цилиндр, один из торцов которого закрыт наглухо.

Цилиндр укреплен на специальном штативе. Закрывают цилиндр пробкой, на которой находится кусочек ваты, смоченной в нашатырном спирте.

Аммиак диффундирует вдоль цилиндра, и бумага постепенно окрашивается в малиновый цвет.

Воздух внутри цилиндра изолирован от окружающего воздействия, т.о. конвекция исключается. Происходит диффузия аммиака вдоль цилиндра. Индикаторная бумага постепенно приобретает малиновую окраску.

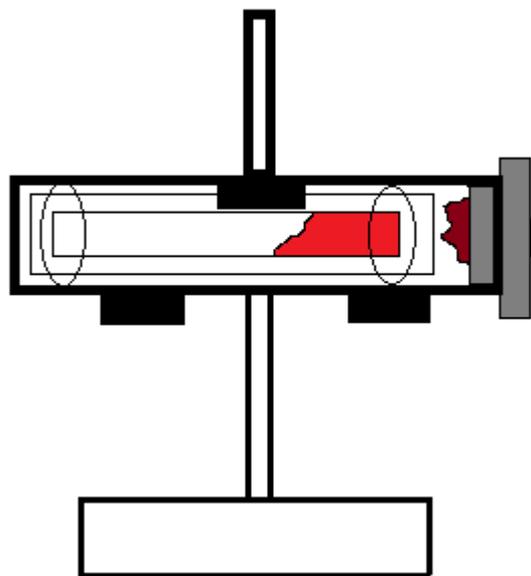
Отдвигают прибор в сторону. Пока идет показ других опытов, на него не обращают внимания. Через некоторое время показывают аудитории, что пары аммиака за счет диффузии достигли конца цилиндра – вся индикаторная бумага стала малиновой.

### **Приготовление фенолфталеинового раствора.**

Фенолфталеин - 1 г.

Этиловый спирт – 100 г.

Вода - 100 г.



## 2.7. Диффузия газов через пористую стенку

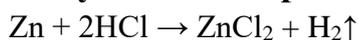
**Приборы:** пористый стакан для демонстрации диффузии газов, стеклянный сосуд с подкрашенной водой для демонстрации избыточного давления, резиновые трубки, прибор для получения водорода (аппарат Киппа), стакан химический.



**Опыт.** Пористый цилиндр соединяют резиновой трубкой с сосудом-регистратором давления. Цилиндр поворачивают доньшком вверх и накрывают небольшим химическим стаканом. В стакан вводят водород из аппарата Киппа (водород легче воздуха и он накапливается сверху) и наблюдают, как из сосуда-регистратора фонтанчиком выплескивается вода.

**Объяснение.** Средняя скорость движения молекул водорода при одинаковых условиях значительно выше, чем скорость движения более массивных молекул азота и кислорода, составляющих воздух. Последние выходят из цилиндра в меньшем количестве, чем проникают туда более подвижные молекулы водорода. Поэтому внутри цилиндра создается давление, которое и отмечает появившийся фонтанчик воды.

### Получение водорода.



Аппарат Киппа изготавливается из стекла и состоит из нескольких частей:

1. Колба-реактор с резервуаром;
2. Воронка с длинной трубкой;
3. Газоотводная трубка;
4. Ловушка для улавливания паров кислоты (например, соляной).

Колба-реактор имеет верхнюю шарообразную часть с тубулусом, в который вставляется газоотводная трубка, снабженная краном или зажимом Мора, и нижний резервуар в виде полу-сферы. Нижний резервуар и колба-реактор разделены резиновой или пластиковой прокладкой с отверстием, через которое проходит в нижний резервуар длинная трубка воронки, доходящая почти до дна.



Раствор в нижнем резервуаре прибора служит затвором, препятствующим выделению газа обратно через воронку во время опыта. Нижний резервуар обычно имеет тубулус, закрытый притёртой стеклянной пробкой: он необходим для слива жидкости после использования прибора.

На прокладку через боковой тубулус шпателем насыпают твёрдые вещества (мрамор, цинк, алюминий, сульфид натрия, сульфит натрия). Тубулус закрывается пробкой с газоотводной трубкой. Затем при открытом кране или зажиме в верхнюю воронку заливается раствор реагента. Когда уровень жидкости достигает вещества на прокладке, начинается химическая реакция с выделением газа.

При закрытии крана давление выделяющегося газа выдавливает жидкость

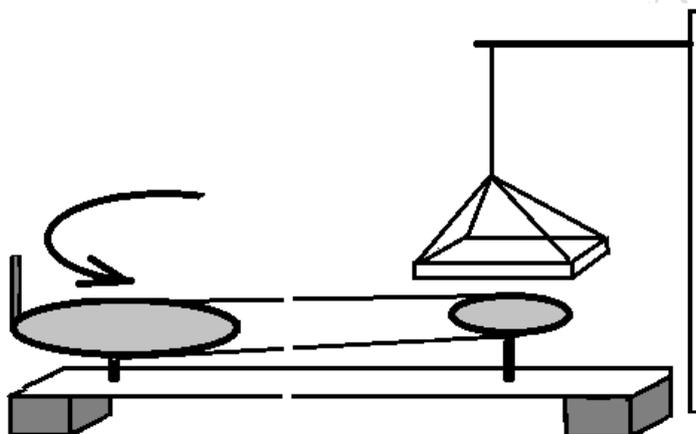
из реактора в верхнюю часть воронки. Реакция прекращается. Открытие крана приводит к возобновлению реакции. Таким образом, аппарат Киппа относится к аппаратам автоматического действия.

## 2.8. Внутреннее трение в газах

**Приборы:** центробежная машина и подвешенная на штативе пластина пенопласта.

**Опыт.** Демонстрацию внутреннего трения в воздухе показывают с легкой пластиной пенопласта, подвешенной на нити. Под пластиной устанавливают центробежную машину так, что ее вращающийся диск находился на расстоянии 1,5 – 2 см от пластины. Вращают центробежную машину и наблюдают, как благодаря наличию сил внутреннего трения в слоях воздуха, находящегося между диском машины и пластиной пенопласта, последняя поворачивается, закручивая нить подвеса. Для удобства наблюдения за поворотом пластины к ней приклеивают флажок. Силы внутреннего трения пропорциональны градиенту скоростей. Градиент скорости можно менять, регулируя частоту вращения центробежной машины или изменяя расстояние между ее диском и пластиной.

Если поместить между диском центробежной машины и пенопластом большой лист стекла, силы внутреннего трения **не смогут закручивать** подвешенную пластину пенопласта.



## 2.9. Поверхностное натяжение. Поплавок Архимеда

**Приборы:** Банка с водой, поплавок Архимеда, стеклянная палочка.

**Опыт.** Большая стеклянная банка заполняется водой примерно на  $5/6$  объема.

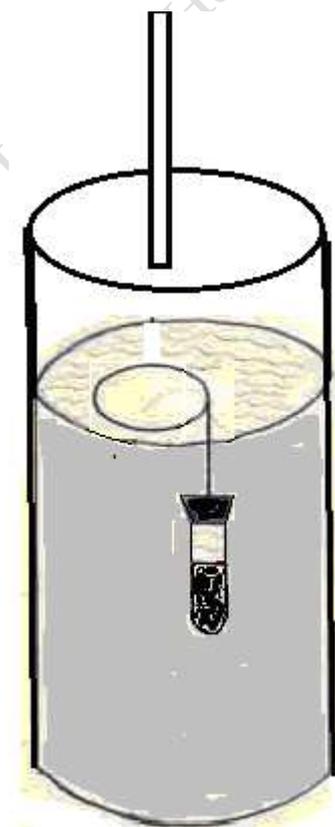
Опускают в воду поплавок Архимеда, имеющий вид пробирки, заполненной наполовину свинцовым грузилом. Сверху поплавок снабжен проволочной петлей. Поплавок погружается до пробки. Петля при этом находится выше уровня воды в воздухе.

Затем стеклянной палочкой осторожно утапливают поплавок настолько, чтобы петля окунулась ниже уровня воды. Медленно отпускают поплавок кверху – и вот поверхность воды держит петлю силой поверхностного натяжения и не дает поплавку выйти выше.

Лектор объясняет: поверхностный слой жидкости по своим свойствам напоминает упругую пленку.

Стеклянной палочкой осторожно раскачивают поплавок. Пленка не рвется. Наконец, при большой амплитуде качаний она прорывается, поплавок всплывает, и петля воз-

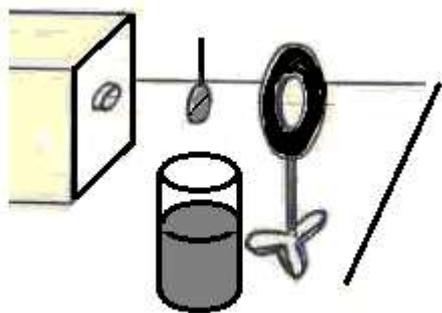
вышается над водой.



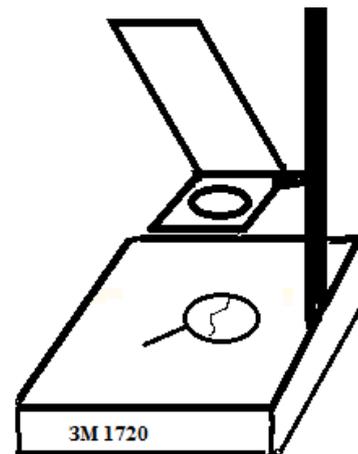
## 2.10. Поверхностное натяжение. Мыльные пленки

**Приборы:** Проекционный аппарат ЛЭТИ-60 М с проектирующим объективом. (Замена - диапроектор «Святязь-Авто»). Проволочные каркасы. Мыльная вода. Иголочка.

**Опыт. 1 вариант.** Между проектором и проекционным объективом по очереди помещают вертикально проволочные каркасы разной формы (левый рисунок). Окуная их в мыльную воду, показывают в проекции на экран, как вода затягивает каркасы.



**2 вариант.** В случае выхода из строя проектора ЛЭТИ, используется горизонтальный проектор (кодоскоп) ЗМ 1720 с поворотным зеркалом (правый рисунок). В этом случае каркасы держат горизонтально.



Демонстрируют:

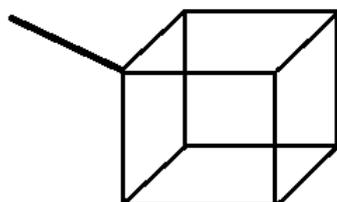
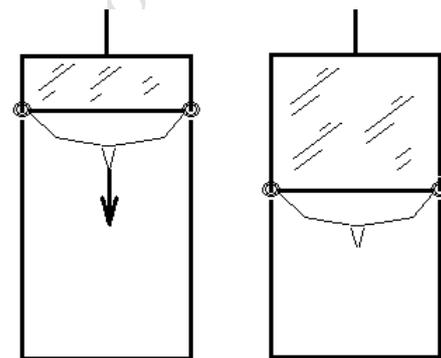
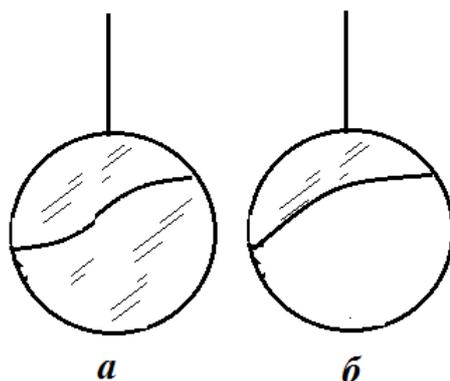
1. Кольцо с плавающей перемычкой. Если проткнуть иголочкой часть пленки, оставшаяся часть натянется в виде полумесяца (рис. а, б).

2. Проволочная рамка с подвижной стороной. Оттягивая и отпуская подвижную сторону, наблюдаем стремление пленки сократить площадь поверхности – пленка поднимает вверх подвижное ребро рамки.

3. Проволочный куб и проволочная спираль затягиваются «экономно», т.е. с минимальной площадью поверхности.

**Примечание.** Жидкость для мыльных пленок изготавливают из мыльной стружки (хорошо – детского мыла) или мыльного порошка в количестве 2-3% от массы воды.

При демонстрации на горизонтальном проекторе мыльная вода капает на зеркало проектора. Необходимо запастись



мягкой влажной тряпкой, чтобы стирать мыльную воду и не повредить зеркало.

## 2.11. Смачивание и несмачивание. Капилляры



**Приборы:** диапроектор Лэти-60 (или «Святязь. Авто»); проекционный объектив; поворотная призма; экран; сосуд с подкрашенной водой; капилляры на штативе:

- набор прямых стеклянных трубок разного диаметра;
- U –образная трубка со ртутью и разными по диаметру коленами.

**Опыт.** Проектируют на экран по очереди капилляры.

Сначала вертикальные трубки. Подносят плоский сосуд с подкрашенной водой к трубкам снизу, окунают концы трубок. Вода поднимается на разную высоту в зависимости от диаметра капилляра. Чем уже капилляр, тем выше столб воды.

Затем проектируют на экран U –образную трубку со ртутью. В широком колене уровень ртути выше, т. к. кривизна мениска меньше.

## 2.12. Модель флотации

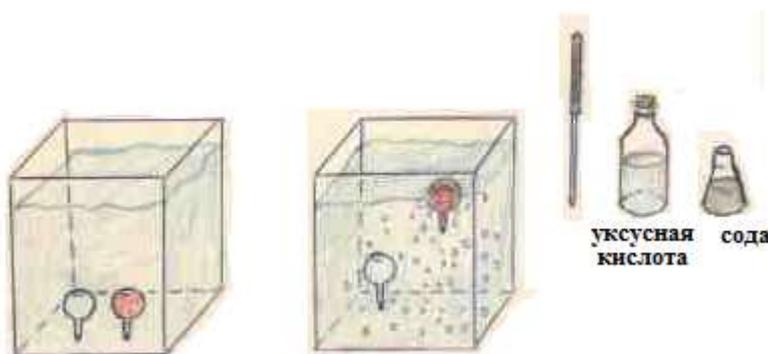
**Флотация** (фр. *flottation*, от *flotter* — плавать) — один из методов обогащения полезных ископаемых, который основан на различии способностей минералов удерживаться на межфазовой поверхности, обусловленном различием в удельных поверхностных энергиях. **Гидрофобные (плохо смачиваемые водой)** частицы минералов избирательно закрепляются на границе раздела фаз, обычно газа и воды, и отделяются от **гидрофильных (хорошо смачиваемых водой)** частиц. **При флотации пузырьки газа или капли масла прилипают к плохо смачиваемым водой частицам и поднимают их к поверхности.** Для образования пузырьков используют различные методы, например, образование углекислого газа за счёт химической реакции.

**Приборы.** Аквариум с водой. Поплавки. Уксусная кислота. Сода. Пипетка.

**Опыт.** В аквариуме с водой у самого дна плавают две поплавок в виде перевернутых маленьких колбочек разного цвета. Красная колбочка имитирует полезное ископаемое (гидрофобная частица минерала), она не смачивается водой, т.к. заранее покрыта парафином.

Бесцветная колбочка имитирует пустую породу, которую необходимо отделить от минерала. Она смачивается водой (гидрофильная частица) – ее стеклянная поверхность очищена.

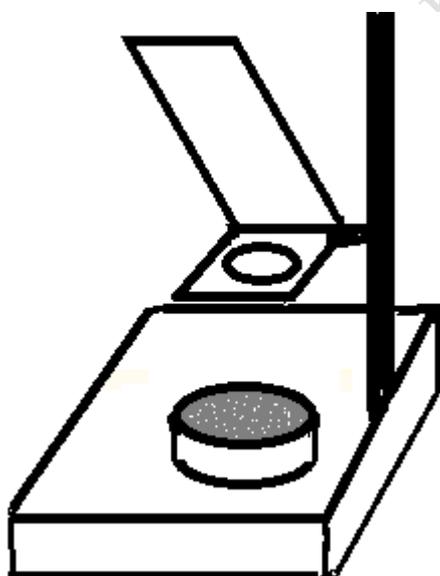
В аквариум насыпают соду ближе к красной колбочке. Затем пипеткой набирают уксусной кислоты, погружают пипетку и выдавливают несколько капель в воду (также ближе к красной колбочке). Сода взаимодействует с кислотой и выделяется углекислый газ. Пузырьки углекислого газа прилипают к красной колбочке и поднимают ее вверх. Бесцветная колбочка остается внизу.



**Объяснение опыта.** В промышленных условиях вместе с пузырьками газа в пену выносятся частицы полезного ископаемого, а пустая порода остается на дне ванны.

**Примечание.** Для покрытия колбочки парафином следует на стеклянную пластинку расплавить парафин и прокатать колбочку по нему.

## 2.13. Свойства поверхностного слоя жидкости



**Приборы:** Кодоскоп «Полилюкс», кювета плоская прозрачная, вода, порошок ликоподия (серы, мела), игла, спиртовка, камфора, мыло.

**Опыт.** Наливают в кювету воду, посыпают ликоподием поверхность так, чтобы не было просветов. Кювету ставят на проектор, освещают снизу и проецируют на большой экран. Фокусируют на экране поверхность воды.

1. На кончик иголки (или стеклянной палочки) соскребают кусочек мыла. Этим кончиком прикасаются в каком-либо месте к поверхности. Здесь поверхностное натяжение резко уменьшается. Порошок разбегается во все стороны, образуя «окна».

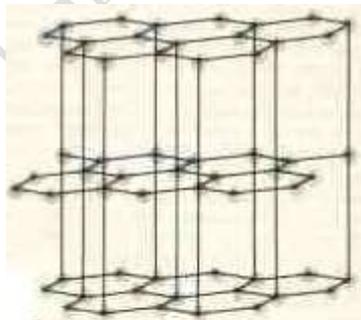
2. Второй вариант – на пламени зажигалки нагревают кончик иголки и тоже прикасаются к пленке. Эффект тот же.

3. Движение камфары. Предварительно вымывают кювету под хорошей струей водопроводной воды. К внутренней поверхности кюветы нельзя прикасаться пальцами. Кювету ставят на прибор и наполняют свежей водопроводной водой.

Берут кусочек камфоры за один конец, а с другого конца ножом соскабливают мелкие кусочки, чтобы они падали на поверхность воды. Вследствие неравномерного изменения поверхностного натяжения происходит движение кусочков камфоры по поверхности воды. Чем кусочек мельче, тем он движется энергичнее.

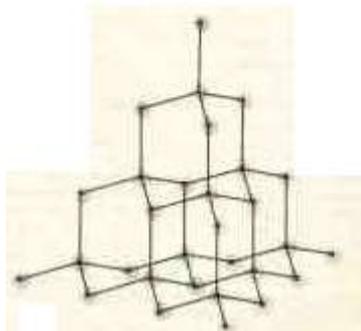
Если теперь посыпать поверхность лycopодием, порошок будет разбегаться от быстро движущихся частиц камфоры. (Иногда ситуацию шуточно называют «Волк в стаде овец»).

## 2.14. Модели кристаллических решеток



**Приборы:** механические модели кристаллических решеток: алмаза, графита, сплава железо-углерод (объемно центрированная и гранецентрированная ячейки).

**Опыт** иллюстрирует типы кристаллических решеток. Лектор отмечает, что понятие кристаллических решеток дает правильное описание внутренней структуры кристалла.



Демонстрация основана на механическом моделировании связей атомов в периодических структурах. Показывая студентам модели элементарных ячеек, определяют их тип, систему симметрии, дают краткую характеристику типов связей атомов в периодической структуре.

## 2.15. Модель упругой деформации твёрдого тела



**Приборы:** модели деформируемого твёрдого тела (несколько параллельно расположенных деревянных и пластмассовых пластин, скреплённых пружинами).

**Опыт** иллюстрирует изменения, происходящие с кристаллической решёткой твёрдого тела при деформации разных типов: сжатие, растяжение, кручение, а также их комбинации, например, изгиб.

Демонстрация основана на аналогии между поведением атомов, принадлежащих параллельным атомным плоскостям деформируемой кристаллической решётки, и системой параллельных пластин, соединённых между собою пружинами.

Сжимают, растягивают и иным образом упруго деформируют модель.

**Объяснение опыта.** Имеется аналогия между этой моделью и кристаллом. Так же, как и в случае кристаллической решётки, существует некоторое расстояние между соседними слоями, которому соответствует состояние устойчивого равновесия системы. При изменении этого расстояния возникают силы (отталкивания или притяжения), стремящиеся вернуть систему в начальное состояние.

## **Часть 3**

# **ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ**

Національний технічний університет  
«Дніпровська політехніка»

кафедра фізики

<http://physics.ntu.org.ua>

### 3.1. Элементарные опыты по электростатике. Два рода электричества. Взаимодействие заряженных тел

**Приборы.** Стеклянная палочка и пластинка резины; пластмассовая (или эбонитовая) палочка и кусок шерстяной ткани. Два электрометра. Шарики из фольги, подвешенные на шелковых нитях.

**Опыт.** На демонстрационный стол сыплют мелкие кусочки бумаги. Подносят наэлектризованные эбонитовую и стеклянную палочки и наблюдают прилипание кусочков бумаги к ним.

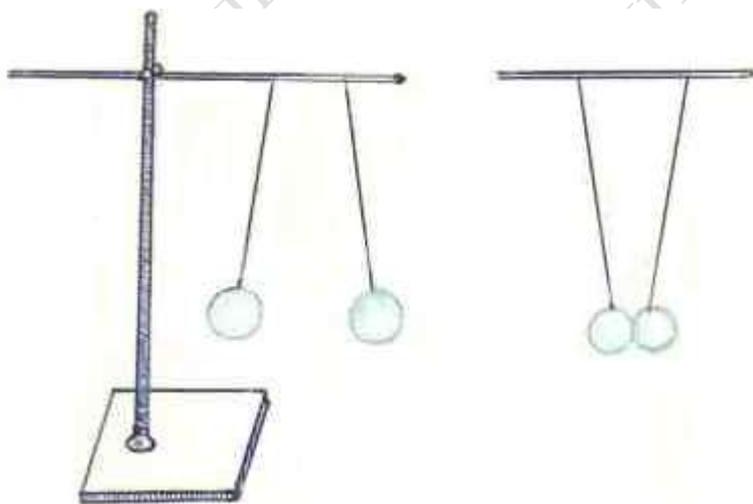
Натирают стеклянную палочку листом резины. Прикасаются палочкой и резиновым листом отдельно к шарикам двух разных электрометров. Убеждаются, что заряды разного знака - положительные и отрицательные - возникают как на палочке, так и на куске резины. Для этого подносят по очереди, но не прикасаются, к каждому электрометру, например, стеклянную заряженную палочку. В од-

ном случае стрелка электрометра падает, в другом - поднимается.

**Притяжение и отталкивание зарядов.** На штативе на тонких капроновых нитках подвешены легкие шарики из фольги. Какой-либо наэлектризованной (например, эбонитовой) палочкой прикасаются и заряжают шарики. Крайний шарик подвешен к узкой горизонтальной подвижной стек-

лянной трубке, которая входит в более широкую неподвижную стеклянную трубку. Перемещая узкую трубку внутри широкой, можно изменять расстояние между шариками. Медленно сближают заряженные шарики. Заряженные одноименно, шарики отталкиваются друг от друга и от палочки. Подносят заряженную стеклянную палочку. Так как стеклянная палочка имеет противоположный знак заряда, шарики притягиваются к ней.

Аналогично наблюдают притяжение шариков, для чего прикасаются к одному шарiku наэлектризованной стеклянной, а к другому - пластмассовой палочками, а затем, втягивая стеклянную трубку наверху штатива, сближают шарики. При некотором расстоянии между шариками, они быстро сближаются до касания. После касания заряды, как правило, нейтрализуются.



## 3.2. Электрофорная машина

Позволяет разделять электрические заряды противоположных знаков и накапливать их. Использует явление электростатической индукции, при этом на полюсах машины (цилиндрических конденсаторах) накапливаются электрические заряды, разность потенциалов на разрядниках достигает нескольких сотен тысяч вольт. Работает с помощью механической энергии.

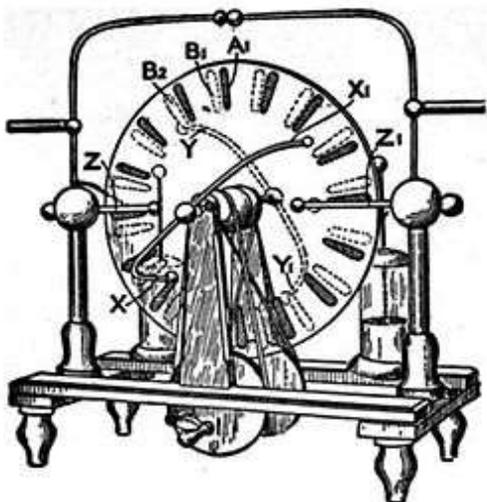


Схема электрофорной машины Уимсхёрста.

Машина состоит из двух соосных дисков (А- ближний к нам на рисунке и В – дальний от нас) из изолирующего материала (стекло или оргстекло), на которые наклеены проводящие станиолевые **полоски-секторы** (см. рис.). Диски приводятся во встречное вращение с равной угловой скоростью.

Полоски при вращении дисков соприкасаются со щетками Х, Y и Z, которые играют роль контакта для переноса зарядов. Проводники Z и Z<sub>1</sub> служат для съема и накопления зарядов с обоих дисков. Проводники Х (на рисунке на ближней к нам стороне машины) и Y (на обратной стороне) расположены каждый по одну сторону диска и соединяют диаметрально противоположные полоски.

Предположим, что сектор А<sub>1</sub> вначале несёт небольшой избыточный положительный заряд, а сектор В<sub>1</sub> — отрицательный. Когда А<sub>1</sub> движется влево, а В<sub>1</sub> — вправо, их потенциалы растут *за счёт работы, выполняемой против силы их электростатического притяжения*.

Когда А<sub>1</sub> достигает положения напротив сектора В<sub>2</sub> пластины В, который в этот момент контактирует со щёткой Y, он будет под высоким положительным потенциалом. Сектор А<sub>1</sub> вызовет разделение заряда в проводнике, соединяющем Y и Y<sub>1</sub>, перенеся большой отрицательный заряд на В<sub>2</sub> и большой положительный заряд на удалённый сектор, которого в этот момент касается щётка Y<sub>1</sub>.

Двигаясь дальше, А<sub>1</sub> касается щётки Z и частично разряжается во внешнюю цепь (нагрузкой служит лейденская банка). При последующем вращении дисков, А<sub>1</sub> касается



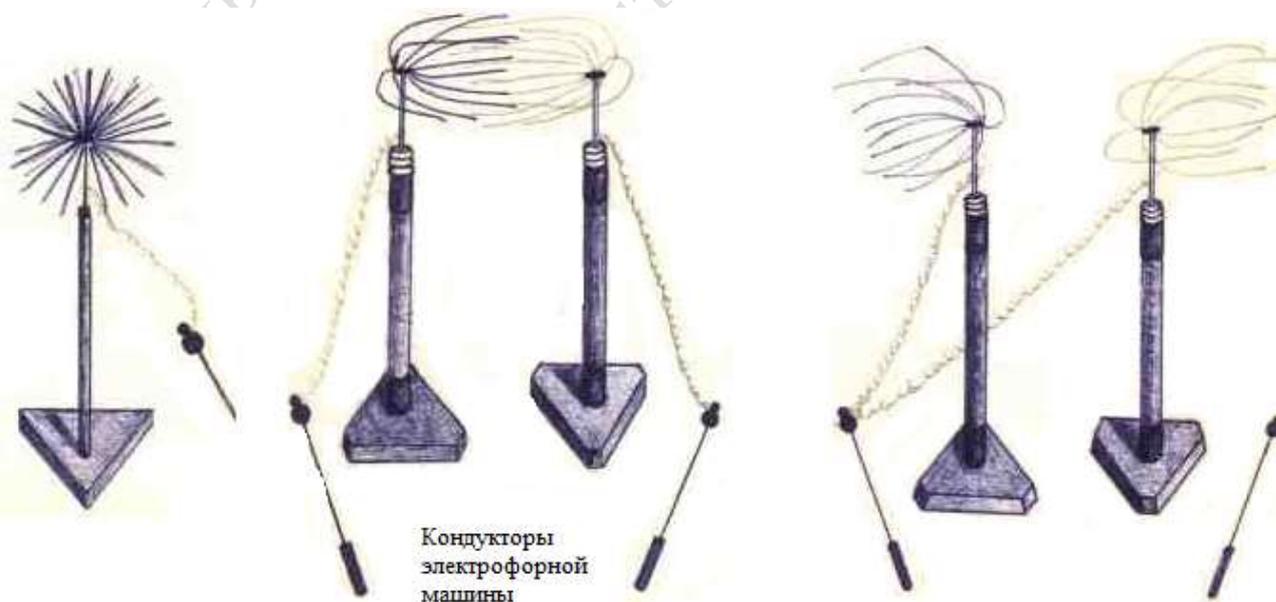
щётки  $X$ , которая связана проводником со щёткой  $X_1$ , и снова получает заряд, на этот раз отрицательный, который отталкивается отрицательно заряженным сектором  $B_2$  (находящимся в этот момент напротив сектора на диске  $A$ , контактирующего со щёткой  $X_1$ ). Таким образом, положительный заряд переносится справа налево верхней частью диска  $A$ , а отрицательный слева направо его нижней частью.

### 3.3. Силовые линии электрического поля (султаны бумажные)

**Приборы:** электрофорная машина, бумажные султаны на изолирующих штативах, соединительные проводники с «крокодильчиками» на конце.

**Опыт.** С помощью крокодильчика соединяют проводом кондуктор электрофорной машины с одним султаном. Вращают диски машины. Обращают внимание на радиальное расположение бумажных полосок.

Затем заряжают оба султана сначала одноименными, а затем разноименными

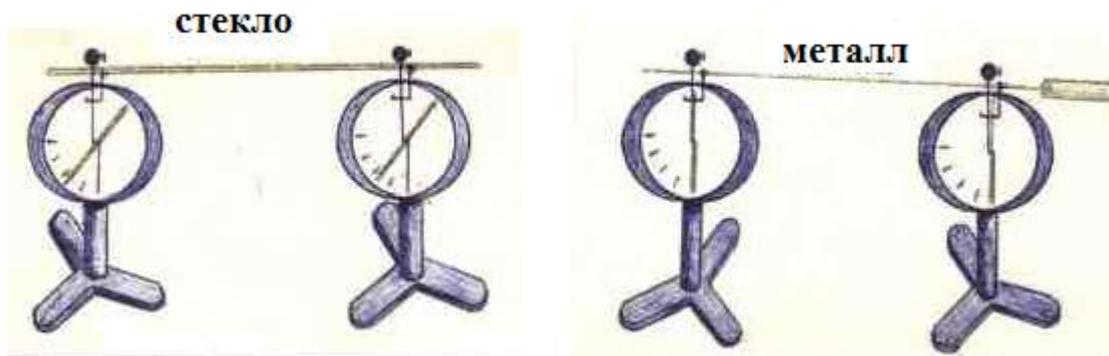


ми зарядами. Для этого соединяют их, соответственно, с одним и тем же кондуктором электрофорной машины и с разными. Показывают искривление полосок при отталкивании и притяжении.

### 3.4. Проводники и диэлектрики

**Приборы.** Стеклянная палочка и пластинка резины; пластмассовая (или эбонитовая) палочка и кусок шерстяной ткани. Два электрометра. Стеклянная трубочка. Медная проволока на изолирующей ручке.

**Опыт.** Два заряженных разноименно электрометра соединяют: медной проволокой на изолирующей ручке, и стеклянной трубочкой. В случае проводника заряд спадает. В случае диэлектрика – держится.

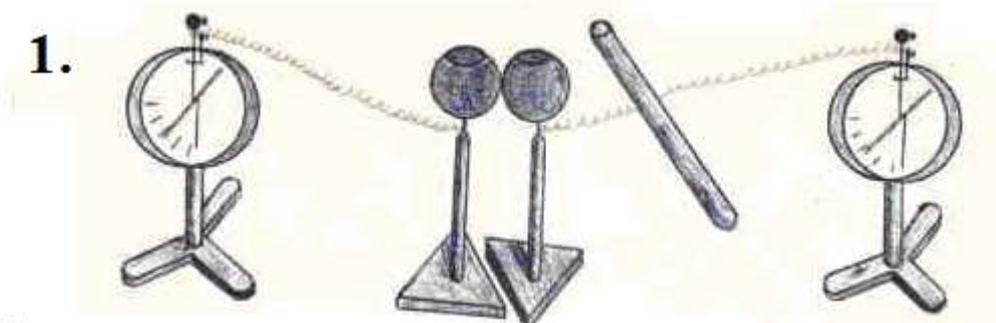


### 3.5. Электризация посредством влияния (электростатическая индукция)

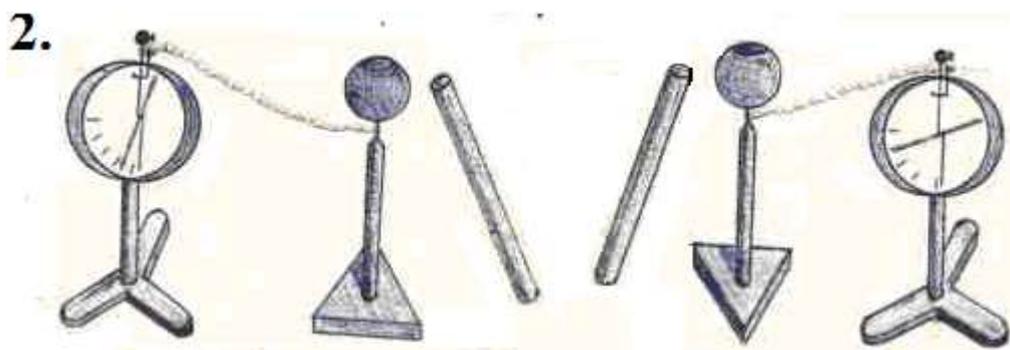
**Приборы.** Два пустотелых металлических шара на изолирующих подставках. Два электрометра. Стеклоянная и пластмассовая палочки, лоскут резиновый и шерстяной ткани. Медная проволока на изолирующей ручке.

**Опыт.** Сдвинув специальные несимметричные треугольные подставки шаров, соединяют шары до касания (слышен звон шаров) так, чтобы они образовали единый проводник. Каждый из шаров соединяют со своим электрометром. Электрометры ничего не показывают, т.к. шары не заряжены.

Подносят сбоку к одному из шаров, но не прикасаются, заряженную палочку. Оба электрометра показывают появившиеся заряды (см. рис. 1). Раздвигают шары



в присутствии заряженной палочки. Заряды на электрометрах сохраняются. Убеждаются в том, что они разных знаков (рис. 2), для чего подносят к каждому шару по очереди стеклянную и пластмассовую заряженные палочки. Стрелки электрометров реагируют по-разному. Следовательно, заряды противоположные. В конце опыта соединяют оба заряженных шара медной проволокой на изолирующей ручке. Происходит нейтрализация заряженных шаров.



### 3.6. Распределение зарядов и потенциала на поверхности и внутри заряженного проводника

**Приборы:** укреплённый на стойке цилиндрический проводник с конусообразными торцами: с одного конца - в виде выступа, а с другого – в виде углубления. Большой полый металлический шар на изолирующей подставке. Электрофорная машина. Электромметр. Пробный металлический шарик на изолирующей ручке. Стеклопалочка и лоскут резины. Пластмассовая палочка и кусок шерстяной ткани.

**Опыты 1.А и 1.Б. Распределение зарядов. Рис.1**

1. А.

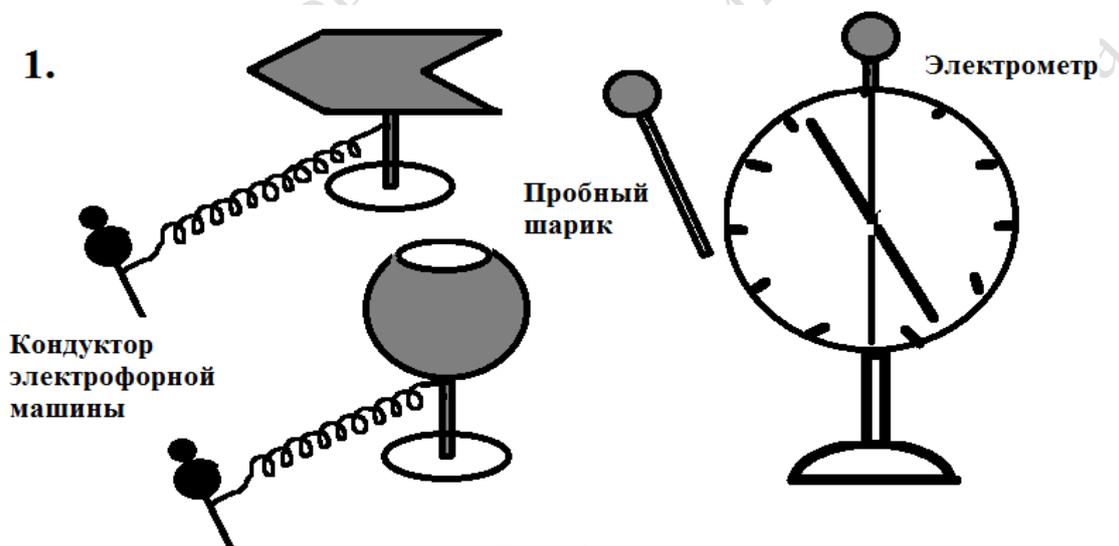


Рис. 1

Заряжают от электрофорной машины большой полый металлический шар на изолирующей подставке. Пробный шарик на эбонитовой ручке вставляют в отверстие сверху полого шара, прикасаются изнутри, водят по внутренней поверхности, «собирая» якобы заряд (мы знаем, что его там нет!). «Собранный» заряд переносят на шарик электромметра. Электромметр ничего не показывает.

Тем же пробным шариком водят по наружной поверхности полого заряженного шара. Переносят собранное электричество на электрометр. Теперь стрелка электрометра отклоняется.

**Объяснение опыта:** заряд распределяется на наружной поверхности проводника; внутри проводника свободных зарядов нет.

**1. Б.** Аналогично заряжают цилиндрический проводник с острым выступом и впадиной. Пробным шариком снимают заряд, прикасаясь по очереди к поверхности проводника в разных местах – на плоской части, на острие выступа, на вогнутой части. Каждый раз заряд переносится для сравнения на электрометр, который в каждом случае предварительно освобождается от предыдущего заряда прикосновением ладони.

**Объяснение опыта.** Плотность электрических зарядов на поверхности проводника различная – на выпуклых поверхностях она больше, на вогнутых – меньше. Это объясняется тем, что электрические заряды в проводнике, благодаря кулоновскому отталкиванию, стремятся расположиться на максимально далёком расстоянии друг от друга. Поэтому в состоянии равновесия на выступающем острие конуса зарядов значительно больше, чем на боковой поверхности, и тем более, на вогнутой внутрь торцевой поверхности.

**Рекомендация.** Поскольку заряды постепенно стекают с заряженных проводников, несмотря на изолирующие подставки, можно эти проводники подзаряжать от электрофорной машины. Проводник соединяется с одним из кондукторов (любым) электрофорной машины. Один демонстратор (например, лектор) медленно вращает ручку электрофорной машины, сообщая проводнику заряд и компенсируя убыль заряда за счет стекания зарядов, другой сканирует поверхность проводника.

## **Опыт 2. Распределение потенциала. Рис.2**

Теперь пробный шарик соединяют длинным тонким спиральным проводником с электрометром. Прикасаются шариком к поверхности заряженного шара. Стрелка прибора отклонится на некоторый угол. Не отрывая шарика от поверхности шара, проводят им вдоль всей поверхности. Затем прикасаются шариком к какой-либо точке цилиндрического проводника, проводят им вдоль всей поверхности от выступающей части до вдающейся части. Показания электрометра в обоих случаях не изменяются.

**Объяснение опыта.** Отклонение стрелки электрометра зависит от заряда, а заряд, в

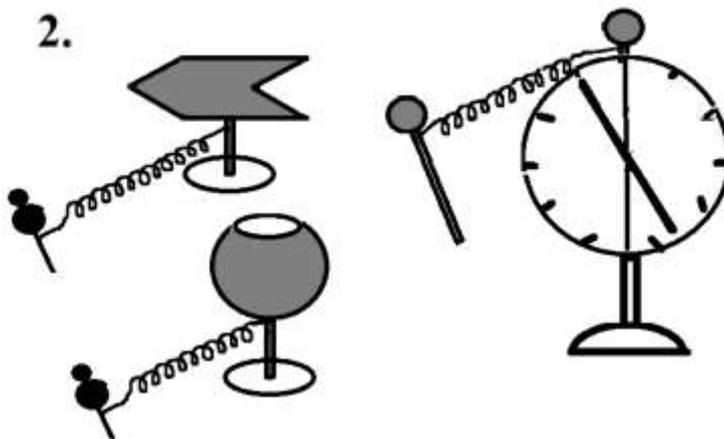


Рис.2.

свою очередь, от потенциала данной точки тела. Поверхность проводника является эквипотенциальной.

### 3.7. Измерение потенциала электрического поля в воздухе с помощью пламенного зонда

**Приборы:** укрепленные на одном штативе проводник в форме конуса и пламенный зонд, электрометр, гибкие провода, наэлектризованная палочка.

**Цель опыта.** Разность потенциалов между двумя проводниками 1 и 2 можно измерить с помощью электрометра. Для этого один проводник соединяют со стержнем (шариком) электрометра, другой - с его оболочкой (корпусом). Стрелка электрометра при этом примет потенциал тела 1, а оболочка - потенциал тела 2.

В качестве второго тела обычно используют Землю, то есть оболочку электрометра заземляют. В таком случае электрометр покажет потенциал тела 1 относительно Земли.

Для измерения потенциала в какой-либо точке электрического поля в воздухе пользуются **зондом**.

Зонд представляет собой кончик металлической проволоочки (острие), соединенный проводником со стержнем электрометра.

Однако, на зонде, помещенном в электрическое поле, появляются индуцированные заряды. Это изменяет потенциал в измеряемой точке пространства.

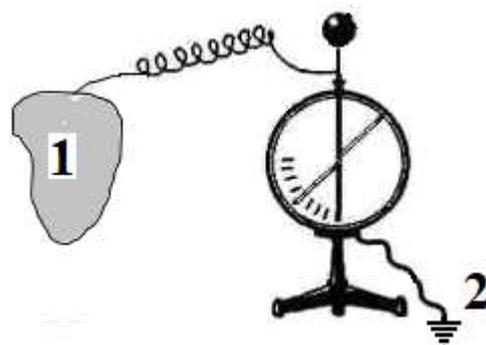
Поэтому для того, чтобы была возможность истинного измерения потенциала надо, чтобы при внесении зонда в исследуемую точку зонд и соединенный с ним шарик электроскопа приняли потенциал, который был в данной точке до внесения зонда. Этого можно достичь, если убрать индуцированные заряды с зонда.

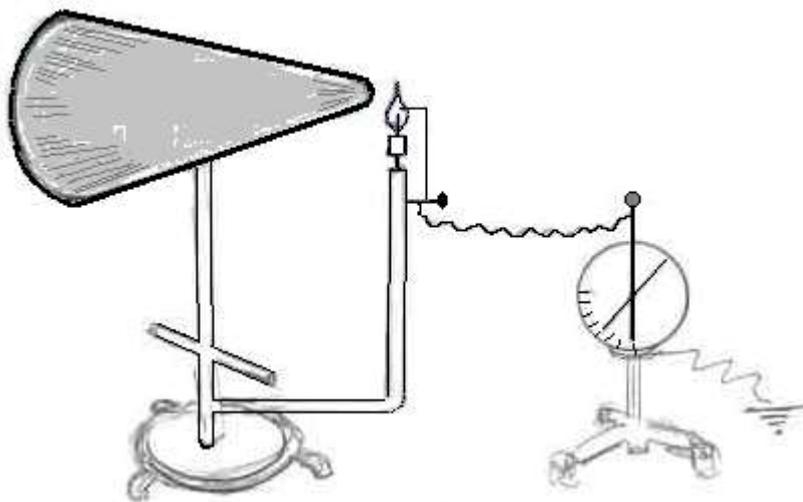
Удаление индуцированных зарядов можно осуществить с помощью **пламенного зонда**. Кончик проволоочки помещают в пламя горелки. Благодаря высокой температуре пламени окружающий воздух ионизируется. Образующиеся ионы снимают индуцированные заряды с зонда и уносятся потоком окружающего газа.

**Опыт.** Заряжают наэлектризованной палочкой металлический конусообразный проводник и подносят к нему на расстоянии 5 - 7 см зонд (см. рис.).

Стрелка отклоняется, электрометр показывает разность потенциалов между острием, находящимся в данной точке поля, и землей.

Поворачивая за ручку конусообразный проводник вокруг вертикальной оси на  $180^\circ$ , измеряют потенциалы на одинаковом расстоянии от острого и тупого конца металлического заряженного конуса. Наблюдают большее или меньшее показание электрометра.





поля больше, а у острого конца – на далекую.

#### **Объяснение опыта.**

Вблизи острого конца заряженного проводника напряженность электрического поля больше, т.к. больше поверхностная плотность зарядов. Соответственно у этого конца больше градиент потенциала. Поэтому на одинаковом расстоянии от проводника зонд попадает у тупого конца на близкую эквипотенциальную поверхность, здесь потенциал

### **3.8. Реактивные силы, возникающие при стекании зарядов с металлических остриев. Колесо Франклина**

**Приборы:** легкая S-образная металлическая вертушка с острыми концами, опирающаяся на игольчатый подшипник подставки. Электрофорная машина. Демонстрационный столик.

**Опыт.** Колесо Франклина помещают на демонстрационный столик, чтобы лучше было видно аудитории. Заряжают вертушку от кондуктора электрофорной машины и наблюдают вращение за счет реактивных сил от двух остриев.

**Объяснение опыта.** Вблизи остриев плотность зарядов может быть настолько большой, что молекулы воздуха вблизи острия ионизируются (ударом).

Затем эти молекулы увлекаются полем острия и образуют «электрический ветер», направленный от острия. S-образная вертушка стоит на острие вертикальной подставки и может вращаться.

Опыт был предложен американским исследователем природы Бенджаменом Франклином (1706-1790), впоследствии ставшим президентом США. Его портрет помещен на стоцентовую купюру.



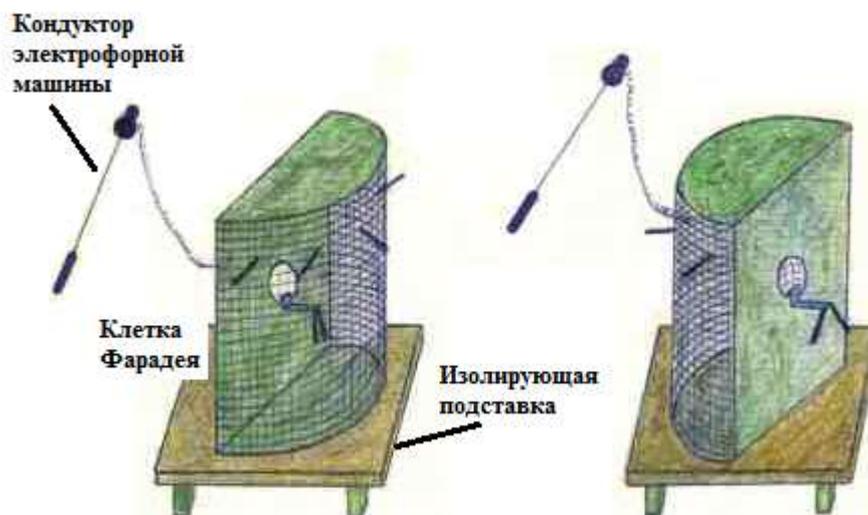
### **3.9. Экранирующее действие проводников. Клетка Фарадея**

**Приборы:** защитная металлическая оболочка цилиндрической формы – клетка Фарадея, образующая замкнутую поверхность. Деревянная подставка на четырех стеклянных ножках - изоляторах. Электрофорная машина.

**Опыт.** Клетка Фарадея - устройство, изобретённое знаменитым английским физиком Майклом **Фарадеем** в 1836 году для экранирования аппаратуры от внешних электромагнитных полей.

К клетке Фарадея, изготовленной из мелкой латунной сетки (в опыте окрашена), с двух сторон - наружной и внутренней - прикреплены бумажные лепестки, играющие роль электроскопов.

Соединяют клетку с любым кондуктором электрофорной машины и медленно вращают диски машины. Листочки – электроскопы – отклоняются только на внешней поверхности заряженной сетки. Бумажные флажки электроскопов снаружи расходятся. Если флажок один, он становится перпендикулярно к сетке. Внутри клетки флажки-индикаторы висят неподвижно. Чтобы не было сомнений по поводу внутреннего индикатора, его можно перевесить так, чтобы флажки висели снаружи. Снова заряжают клетку. Лепестки перевешенного наружу индикатора теперь расходятся (см. рис.).



**Объяснение опыта.** Электрического поля внутри проводника в состоянии равновесия нет. А поле на поверхности перпендикулярно к этой поверхности.

Проведенные опыты демонстрируют действие электростатической защиты - помещение приборов, чувствительных к электрическому полю, внутрь замкнутой проводящей оболочки для экранирования от внешнего электрического поля.

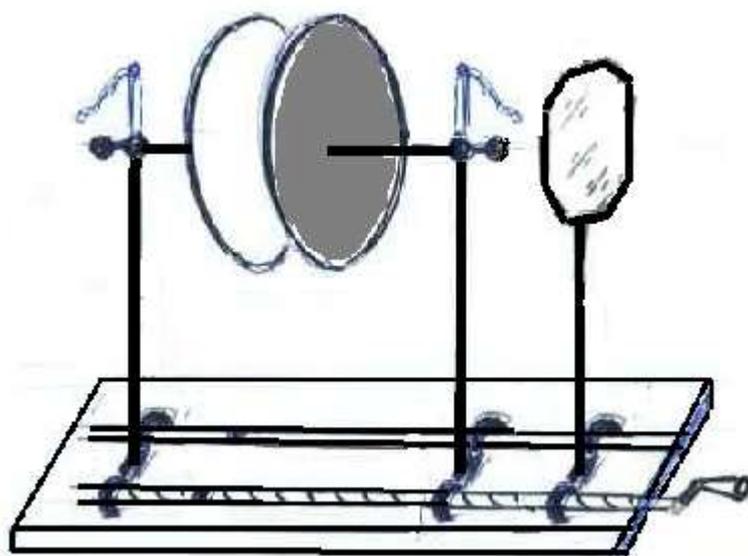
### 3.10. Раздвижной конденсатор. Зависимость напряжения на конденсаторе от расстояния между пластинами и диэлектрической проницаемости диэлектрика

**Приборы:** две пластины конденсатора, укрепленные на подставке, пластина стекла, которая может заполнять промежуток между обкладками. Одна пластина конденсатора закреплена неподвижно, вторая может перемещаться с помощью винта. Одна из пластин снабжена электроскопом – бумажным лепестком, висящим на стойке этой пластины. Вторую пластину желательно при этом заземлить.

### Опыт.

1) Неподвижную пластину конденсатора заряжают от наэлектризованной пластмассовой палочки (можно и стеклянной). Флажок электроскопа отходит на некоторый угол и регистрирует потенциал пластины. Вращая ручку прибора, отодвигаем винтом подвижную пластину. При этом флажок отклоняется на больший угол.

2) Подвижную пластину конденсатора устанавливают от неподвижной пластины на расстоянии немного большем, чем толщина прилагаемой к прибору стеклянной пластины. Заряжают неподвижную пластину конденсатора. Стрелка электроскопа отклонится на некоторый угол. Вводят между обкладками конденсатора стеклянную пластину. Отклонение стрелки электроскопа уменьшится. Удаляют диэлектрическую пластину из конденсатора. Стрелка электроскопа возвращается в исходное положение.



### Объяснение опыта.

При переносе заряда  $q$  на одну из обкладок конденсатора между его обкладками устанавливается разность потенциалов  $\Delta\varphi = q/C$ , где  $C$  – электроёмкость конденсатора. **Электроскоп регистрирует эту разность потенциалов.** Электроёмкость плоского конденсатора определяется формулой:  $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$ , где  $S$  – площадь пла-

стин конденсатора;  $d$  – расстояние между пластинами;

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{Ф/м}$  – электрическая постоянная,  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрической пластины. Таким образом, разность потенциалов на обкладках конденсатора в данном эксперименте определяется формулой:

$$\Delta\varphi = \frac{qd}{\varepsilon\varepsilon_0 S}.$$

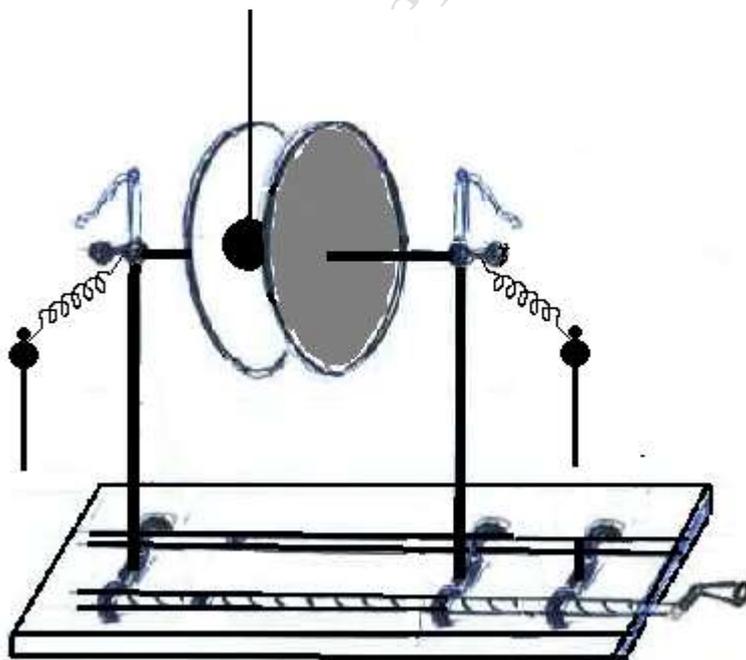
1) Увеличение расстояния  $d$  между обкладками конденсатора при неизменном заряде  $q$  приводит к увеличению разности потенциалов между ними. Отклонение стрелки электроскопа увеличивается.

2) Введение диэлектрической пластины между обкладками конденсатора приводит к уменьшению разности потенциалов между ними. Отклонение стрелки электроскопа уменьшается, так как для диэлектрика  $\varepsilon > 1$ , а для воздуха  $\varepsilon = 1$ .

*Рекомендация.* Чтобы не было утечки зарядов, приборы перед опытом необходимо просушить.

### 3.11. Работа электрических сил

**Приборы.** Раздвижной плоский конденсатор. Электрофорная машина. Легкий станиолевый шарик, подвешенный на тонкой изолирующей нити на штативе между пластинами конденсатора

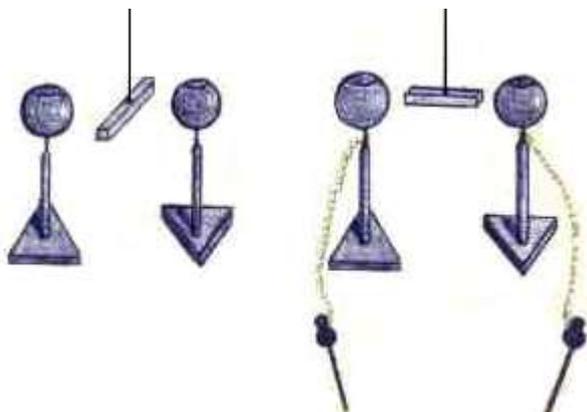


**Опыт.** Соединяют каждую пластину раздвижного конденсатора с соответствующим кондуктором (электродом) электрофорной машины. Заряжают пластины, медленно и непрерывно вращая ручку машины. При таком способе заряжения компенсируется неизбежное стекание зарядов с пластин. Шарик начинает очень быстро колебаться между пластинами, отскакивая и перенося заряд от пластины к пластине. При этом шарик издает дробный звук при ударах. Расстояние между пластинами около 10 см. Длина нити подвеса около 1 м.

### 3.12. Поляризация диэлектрика (стерженек плексигласа)

**Приборы.** Два полых металлических шара на изолирующих подставках, между которыми на высоком штативе подвешивается палочка - брусок диэлектрика (плексиглас), которая может вращаться на капроновой нити подвеса. Электрофорная машина, с полюсами (кондукторами) которой соединен каждый из шаров.

**Опыт.** Стерженек плексигласа устанавливают перпендикулярно полю и, медленно вращая диски электрофорной машины, начинают заряжать шары. Когда шары достаточно зарядятся, в создаваемом ими поле произойдет поляризация подвешенного стерженька, он повернется вдоль поля.



Снимают заряды, закорачивая контакты электрофорной машины, – стерженек возвращается в исходное положение перпендикулярно полю.

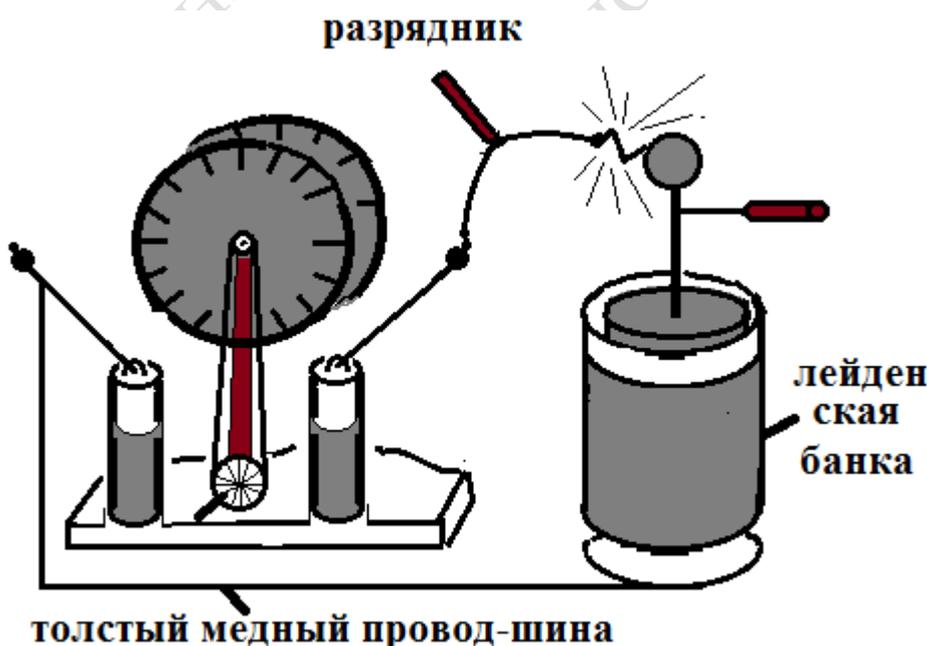
### 3.13. Поляризация края деревянной планки

**Опыт.** Большая деревянная планка подвешена за середину и уравновешена на стойке рядом с лекционной доской. Можно ее раскачать, поляризуя край планки. Не прикасаясь, подносят к планке стеклянную палочку, потертую о резину.

За счет возникших поляризационных зарядов стеклянная палочка притягивает деревянную планку. Повторяют несколько раз, пока притягивание не станет очевидным, и планка не начнет раскачиваться.

### 3.14. Разборная лейденская банка. Электреты

Лейденская банка — одна из самых опасных вещей, которую используют в электротехнике. Разряд такого конденсатора может быть смертельным. Будьте осторожны, никогда не беритесь за лейденские банки двумя руками!



**Устройство.**  
Лейденская банка (по сути – разборный цилиндрический конденсатор) *состоит из 3-х частей:*  
· Наружный цилиндр полый цинковый;  
· Цилиндр полый из диэлектрика, вставляется в наружный;  
· Внутренний цилиндр полый цинковый закрытой формы, с центральным стержнем-разрядником, на конце которого находится шарик разрядника.

Вставляется в диэлектрический цилиндр. Внутренний цилиндр снабжен изолирующей ручкой, которая используется при разборке заряженной банки.

**Опыт.** На глазах аудитории из трех стоящих на столе цилиндров собирают предварительно проверенную (разряженную на всякий случай разрядником) лейденскую банку. Вставляют диэлектрик в наружный цилиндр, последним вставляют внутренний цилиндр. За все три части можно брать руками (если до этого они долго лежали в демонстрационной аудитории).

**Зарядание лейденской банки.** С одним кондуктором (электродом) электрофорной машины соединяют специальный толстый медный провод-шину без

изоляции, заканчивающийся петлей. Шина изгибается в нескольких местах и прокладывается рядом с подставкой электрофорной машины, так, чтобы конец шины – петля – находилась на столе на некотором удалении от машины. На эту петлю ставят доньшком собранную лейденскую банку.



К шарик у второго кондуктора электрофорной машины плотно прикасаются одним концом специального разрядника, снабженного изолирующей ручкой. Другой конец этого разрядника подносят к центральному шарик у лейденской банки на расстояние примерно 2-5 мм, но не касаются его. При работе электрофорной машины между вторым концом разрядника и шариком лейденской банки начинают проскакивать искры. Вначале, когда лейденская банка еще не заряжена, она хорошо «берет заряд», искры звучат как непрерывный треск и довольно большие. Затем, по мере зарядки лейденской банки искры становятся мельче и мельче, разрядник следует постепенно приближать к центральному шарик у лейденской банки вплоть до касания в конце заряда.

Зарядка длится примерно 20 секунд.

Прекращают зарядку, убирая разрядник.

1. Тем же разрядником на изолирующей ручке прикасаются к наружной боковой металлической поверхности банки и осторожно подносят второй конец разрядника к центральному шарик у банки. При сближении раздается громкий разряд.

2. Закорачивают разрядником наглухо – банка при этом полностью разряжается.

3. Снова заряжают лейденскую банку. Заряженную банку на этот раз не разряжают.

4. Разбирают лейденскую банку. Не касаясь рукой внутреннего цилиндра (иначе **можно получить сильный электрический удар!!!**) изолирующей рукояткой вынимают внутренний цилиндр и ставят на стол. Затем берутся руками за наружный цилиндр и снимают его с диэлектрического. Эти два цилиндра тоже ставят на стол. Приводят в касание металлические цилиндры. Вставляют внутренний цилиндр в наружный без диэлектрика. За оба цилиндра можно брать руками. В том, что заряда на этих цилиндрах нет, убеждают аудиторию, прикоснувшись каждым цилиндром к шарик у электрометра. Электрометр молчит.

5. На столе лежат три составных части лейденской банки.

Собирают затем осторожно из лежащих на столе частей лейденскую банку. Сначала руками вставляют диэлектрик в наружный цилиндр. Затем **берут**

за изолирующую ручку (!!!) внутренний цилиндр и вставляют его. К наружному прикасаться при этом нельзя!!!

Банку больше руками не трогают. Прикасаются разрядником к наружной части и центральному шарик. Снова стреляет разряд, банка дает хорошую искру! Недоумение. Ведь банка была разобрана, и заряда не было.

**Объяснение опыта.** Между цилиндрами лейденской банки находится диэлектрик, который сохраняет в течение нескольких минут поляризованность (электрет). Поэтому при сборке банки на металлических частях индуцируется заряд.

### 3.15. Пьезоэффект (прямой)

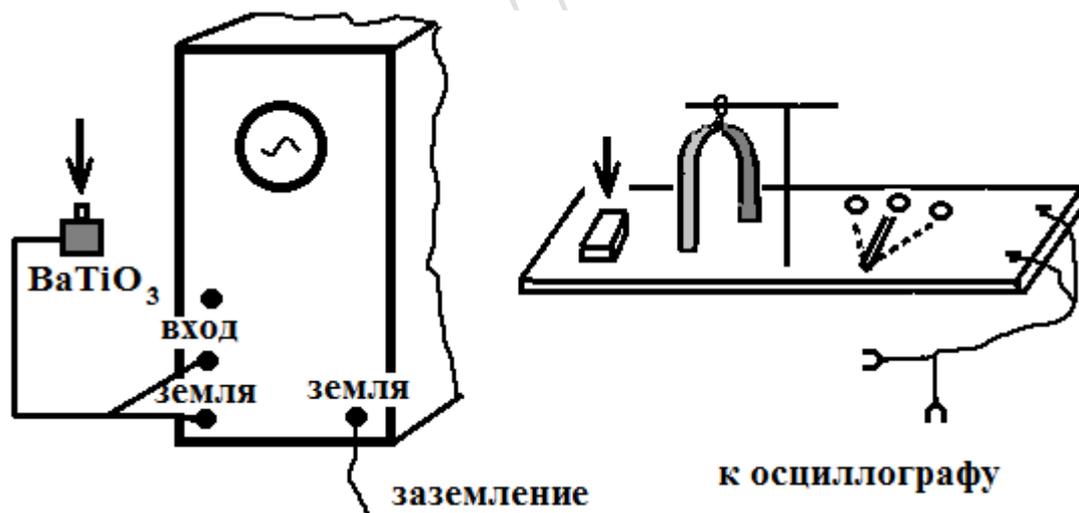
**Приборы:** пьезоэлементы (кристалл титаната бария с прикрепленными к нему контактными металлическими пластинами и более чувствительный пьезодатчик), деревянный молоточек, осциллограф. Собирают схему, показанную на рисунке.

**Опыт.** По контактной пластине кристаллика титаната бария легко (!) ударяют деревянным молоточком. На экране осциллографа от возникшего электрического сигнала появляется всплеск.

Затем демонстрируют более чувствительный пьезодатчик. Вначале проводят пальцем по подушечкам, в которых зажат пьезодатчик. На экране осциллографа видны шумы – нерегулярные электрические сигналы. Потом переключают схему на пьезодатчик, укрепленный на ножке камертона. Если тихонько ударить молоточком по ножке камертона, ножка придет в колебания, камертон издает слабый гармонический звук. Пьезодатчик теперь деформируется по гармоническому закону – на экране осциллографа появляется синусоида.

**Объяснение опыта.** Ионные кристаллы (кварц, турмалин, цинковая обманка, хлорат натрия, сегнетова соль, титанат бария и др.) построены из кристаллических решеток положительных и отрицательных ионов. Под действием внешних сил эти решетки деформируются по-разному и на противоположных поверхностях кристалла выступают электрические заряды разных знаков. Это и есть прямой пьезоэффект. Опыт иллюстрирует явление возникновения электрического заряда на поверхности кристалла при его сжатии

Пластинки из искусственно выращенных кристаллов служат основным рабочим элементом пьезодатчиков и пьезомикрофонов.



Установочные данные на осциллографе.

Ослабление 1:10.

Усиление по X 2.

Усиление по Y ...7.

Амплитуда синхронизации 4.

Частота плавно ...7.

Диапазон частот ...7.

Синхронизация от сети.

## Электрический ток

### 3.16. Очистка газов. Электрический фильтр

**Приборы:** стеклянный сосуд, имеющий форму аквариума, с двумя электродами-щетками. Электрофорная машина. Сигарета. Спички.

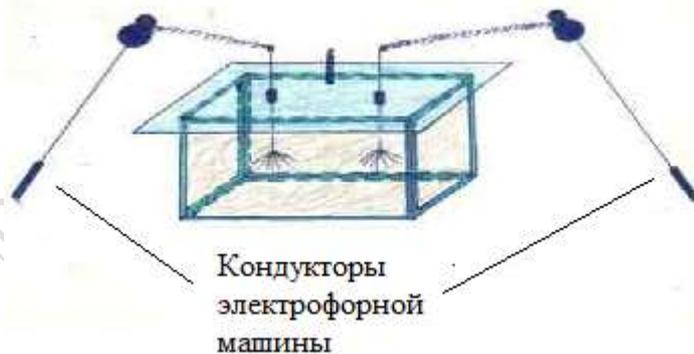
**Опыт.** Коронный разряд можно наблюдать при атмосферном давлении в сильно неоднородном электрическом поле. Такое поле можно создать между двумя проволочными электродами, имеющими форму пучка торчащих проводов.

Соединяют электроды устройства с кондукторами электрофорной машины. В объем камеры, прикрытый стеклом, напускают дыму. Для этого, слегка отодвигают уголок стекла и вставляют туда источник дыма. Струя дыма хорошо получается, если прикурить сигарету, оторвать фильтр и взять ее горячей стороной в рот, вдуть в аквариум дым. Нужна тренировка, можно обжечься!! Для этих целей удобны были раньше папиросы.

Задвигают стекло, закрывая сосуд, и вращают электрофорную машину. Дым быстро рассеивается в виде вихрей.

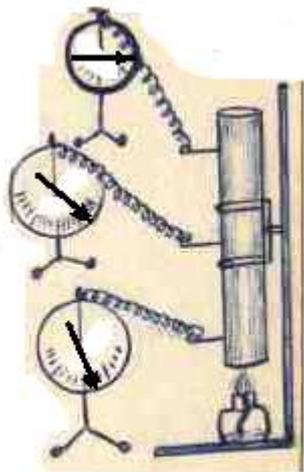
Коронный разряд используют в электрических фильтрах для очистки газов. Ионы газового разряда оседают на частицах дыма. Поэтому **частицы дыма** движутся под действием электрического поля и **оседают на электродах**.

В конце опыта лектор показывает щетки, на которых осели частицы дыма, щупает их пальцами и говорит о вреде курения.



### 3.17. Ионизация воздуха и рекомбинация ионов

**Приборы:** вертикальная жестяная труба диаметром 6 см с тремя выводами-зондами. Каждый зонд изолирован от трубы специальными втулками. Внутри трубы зонд представляет собой толстую медную проволоку, изогнутую под прямым углом по оси трубы. Вторые концы этой проволоки соединяются с электрометрами.



**Опыт.** В начале опыта все три электрометра **одинаково заряжают** стеклянной (или эбонитовой) палочкой. Затем ставят горящую спиртовку под трубу. В процессе опыта электрометры разряжаются и показывают разный заряд. Нижний электрометр разряжается сильнее всего. Верхний – меньше всех.

**Объяснение опыта.** В пламени горелки образуются ионы обоого знака. По мере поднятия кверху с током горячего воздуха часть ионов рекомбинирует.

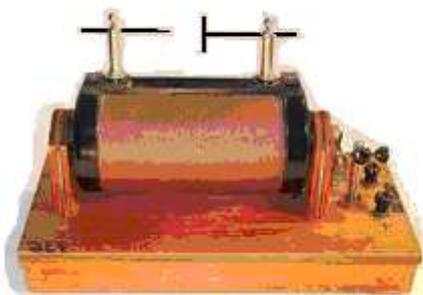
Поскольку до верхнего электрометра доходит воздух, в значительной степени состоящий из нейтральных молекул (ионы по пути наверх успели рекомбинировать), то такой газ не разряжает электрометр.

### 3.18. Катушка Румкорфа (высоковольтный индуктор). Искровой разряд в воздухе

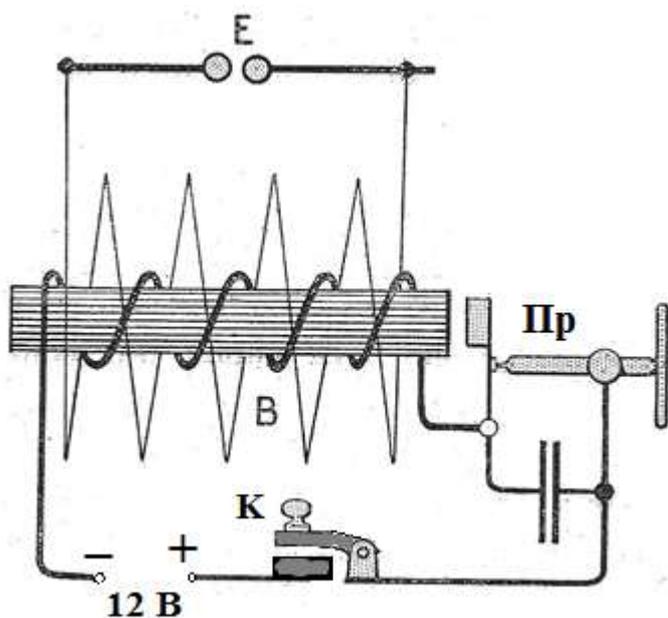
**Опыт.** Демонстрация электрических разрядов в воздухе при нормальных условиях - искрового разряда между верхними электродами (диск и острие).

Катушка подключается к источнику питания постоянного тока (розетка «=50 В» на демонстрационном столе), например, через малый рубильник (ключ) *К*. Учитывая, что на самой катушке тоже есть выключатель, можно исключить рубильник. На розетку подают от выпрямителя КЭФ -8 (в демонстрационной аудитории 2/33) **12 В**.

Верхние разрядники катушки при выключенном напряжении разводят примерно на 3-5 см. Затем включают катушку и наблюдают искровой разряд. Опыт лучше проводить в затененной аудитории. При правильном включении катушки на острие должен быть «плюс» и искра бьет в цент диска. При «минусе» на острие искра бьет в края диска.



## Конструкция и схема подключения



Катушка Румкорфа состоит из двух обмоток из изолированного медного провода вокруг общего железного сердечника (В). Первичная обмотка содержит относительно малое число (десятки, сотни) витков толстого провода. Вторичная обмотка содержит большое число (тысячи) витков тонкого провода. В состав катушки входит автоматический прерыватель (Пр) цепи первичной обмотки (вibrator), конденсатор, а также регулируемый разрядный промежуток (Е) в цепи вторичной обмотки. Молоточковый прерыватель

предназначен для быстрого попеременного размыкания и замыкания электрической цепи. Зазор между якорем прерывателя и сердечником катушки может регулироваться винтом.

### Принцип действия.

При замыкании ключом *К* цепи источника питания с первичной обмоткой в ней течёт нарастающий ток. Нарастание обусловлено индуктивным характером цепи. В магнитном поле катушки накапливается энергия.

Когда магнитный поток в сердечнике достигает определённой величины, якорь прерывателя притягивается к сердечнику, и электрическая цепь размыкается.

Размыкание электрической цепи приводит к резкому уменьшению тока первичной обмотки и к уменьшению магнитного потока. Якорь прерывателя под действием пружины возвращается в исходное положение, и электрическая цепь замыкается. Магнитный поток в сердечнике снова достигает определённой величины, и электрическая цепь размыкается. Процесс размыкания-замыкания продолжается непрерывно до тех пор, пока замкнут ключ *К*.

Напряжение на вторичной обмотке (вторичное напряжение,) примерно пропорционально скорости изменения тока в первичной обмотке (первичного тока,). При размыкании и замыкании прерывателя напряжение на вторичной обмотке имеет разную полярность. При замыкании ток нарастает (увеличивается) сравнительно медленно, причём скорость нарастания тока постепенно уменьшается из-за активного сопротивления цепи первичной обмотки и внутреннего сопротивления источника питания. При размыкании изменение тока в первичной обмотке более

резкое. Поэтому импульсное напряжение на вторичной обмотке при размыкании гораздо больше, чем при замыкании.

Таким образом, в каждом интервале разрыва цепи прерывателя, посредством **электромагнитной индукции** на вторичной обмотке наводятся импульсы высокого напряжения (десятки, сотни тысяч вольт). Каждый импульс, имеющий достаточную амплитуду, вызывает искровой разряд в разрядном промежутке.

### Назначение конденсатора.

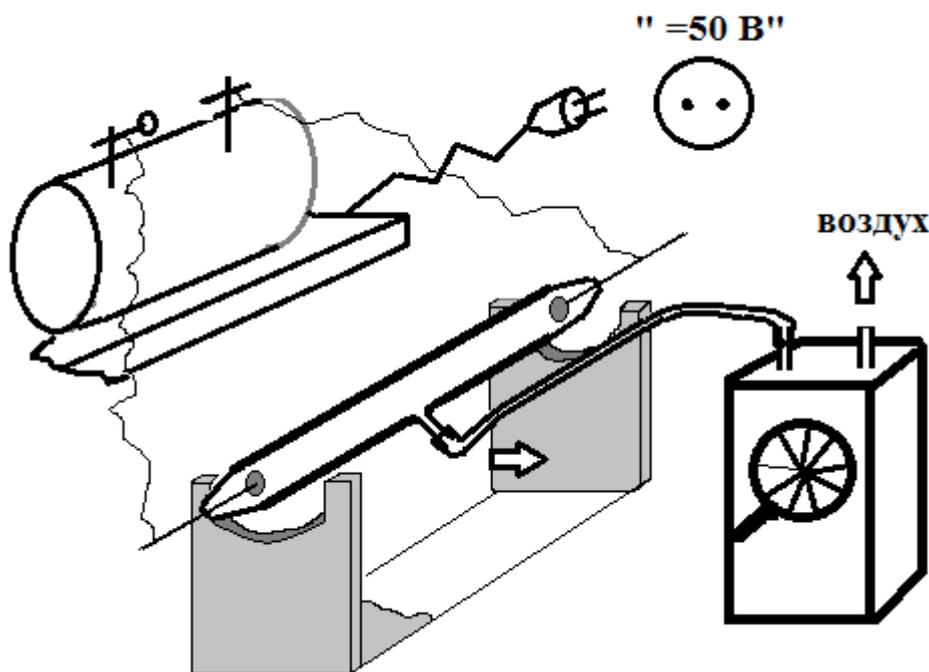
При отсутствии конденсатора размыкание прерывателя сопровождается появлением между его контактами значительной ЭДС самоиндукции. Это приводит к ионизации воздушного зазора между контактами и *образованию электрической дуги*, в которой расходуется энергия, запасённая в катушке. При этом скорость изменения (спада) первичного тока замедляется, и выходное напряжение уменьшается.

При наличии конденсатора (ёмкостью примерно от 0,5 до 15 мкФ) электрическое напряжение между контактами прерывателя в момент размыкания оказывается равным напряжению на конденсаторе, то есть близким к нулю. Поэтому электрическая дуга *не образуется*, и скорость изменения первичного тока при размыкании прерывателя значительно возрастает. Соответственно возрастает и наведённое напряжение на вторичной обмотке. Конденсатор и первичная обмотка в интервале времени разрыва образуют колебательный контур, поэтому в первичной обмотке протекает осциллирующий затухающий синусоидальный ток, вследствие чего наводится синусоидальное напряжение на вторичной обмотке.

Наличие конденсатора устраняет потери энергии при размыкании контактов прерывателя, однако при относительно большой частоте работы прерывателя потери могут появляться при замыкании контактов — если оно происходит в момент, когда напряжение на конденсаторе значительно отличается от нулевого.

## 3. 19. Наблюдение тлеющего разряда с эвакуацией воздуха

**Приборы:** двухэлектродная стеклянная трубка, из которой можно откачивать воздух, катушка Румкорфа (высоковольтный индуктор), ручной откачивающий насос (насос Камовского).



**Опыт.** В демонстрационной аудитории на выпрямителе КЭФ -8 устанавливается **напряжение от 10 до 12 В**. Катушка Румкорфа включается шнуром с вилкой в розетку с надписью «=50 В» на демонстрационном столе. Включение и выключение катушки Румкорфа осуществляется выключателем, расположенным на ней. Опыт проводят в затененной аудитории.

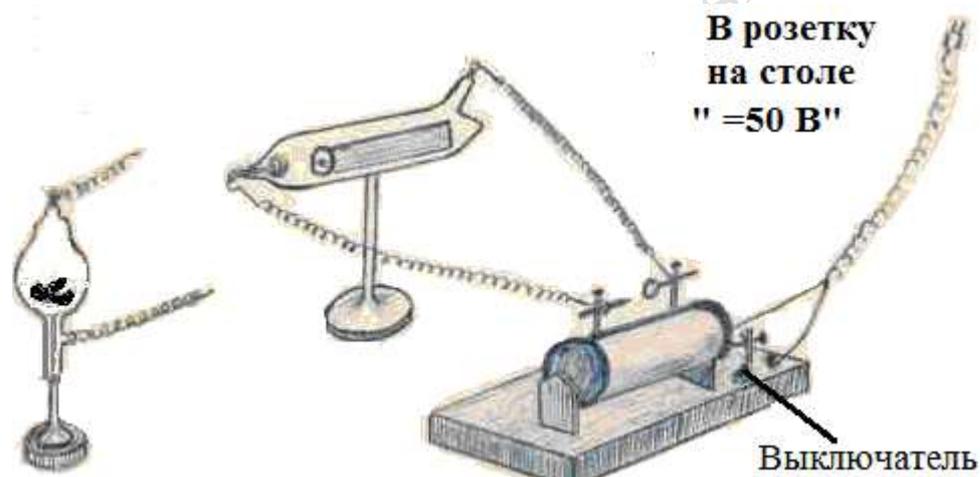
Разрядники катушки Румкорфа соединяют мягкими витыми проводниками с выводами на стеклянной трубке. Ручным насосом начинают выкачивать воздух из трубки. После десятка качаний включают катушку Румкорфа и продолжают откачивать воздух.

В начальный момент разряда в трубке не происходит. По мере выкачивания воздуха из трубки в ней возникает свечение. Вначале разряд имеет форму тонких перебегающих светящихся нитей, затем шнура малинового цвета, соединяющего оба электрода. При дальнейшем понижении давления светящийся шнур бледнеет, расширяется, занимает всю трубку. (Все описанное дальше не наблюдается – для этого нужен хороший форвакуумный насос. Далее должно происходить образование заметного темного катодного пространства и положительного анодного столба, а потом образование отдельных слоев – страт).

**Объяснение опыта.** Разряд в трубке возникает вследствие того, что в разряженном воздухе увеличивается длина свободного пробега электронов. Разгоняясь, электроны приобретают энергию, достаточную для ионизации нейтральных молекул. Источником электронов является катод, который бомбардируется положительными ионами. Эти ионы и выбивают из катода электроны (вторичная электронная эмиссия).

### 3.20. Катодные трубки (трубки Крукса)

**Приборы:** катушка Румкорфа, стеклянные трубки Крукса разной формы, магнит.



**Опыт.** В демонстрационной аудитории на выпрямителе КЭФ -8 устанавливается напряжение от 10 до 12 В. Катушка Румкорфа включается шнуром с вилкой в розетку с надписью «=50 В» на демонстрационном столе. Включение и выключение катушки Румкорфа осуществляется выключателем, расположенным на ней.

Разрядники катушки Румкорфа соединяют мягкими витыми проводниками с выводами на трубках Крукса. Включают катушку и наблюдают свечение в трубках. Опыт лучше проводить в полутемной аудитории.

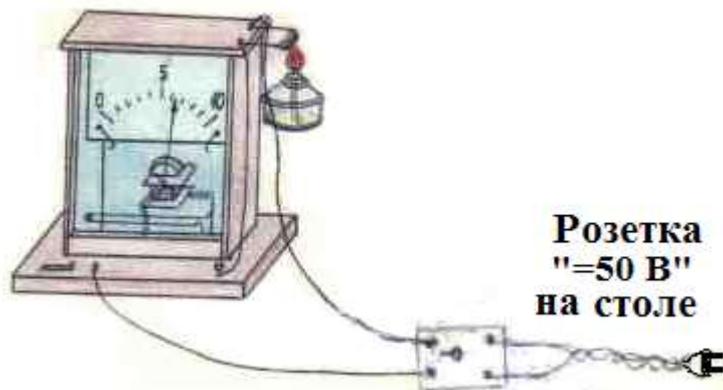
**Объяснение опыта.** При тлеющем разряде из катода вылетает большое число электронов, которые выбиваются положительными ионами. Электроны ускоряются в области катодного падения потенциала (см., например, [1] т. 2. §7.5).

При давлении воздуха 1,33 - 0,13 Па электроны в трубке движутся практически без столкновений. Такие пучки впервые обнаружил английский физико-химик У. Крукс. Электронная природа катодных лучей подтверждается их отклонением в электрическом и магнитном полях.

Катодные лучи могут вызвать флюоресценцию твердых тел. Поставленный по диагонали стеклянной трубки флюоресцирующий экран (покрытый слоем сульфида цинка) со щелью позволяет получить пучок электронов. Экран светится в тех местах, куда попадают электроны. На флюоресцирующем экране видна прямая полоса синеватого оттенка. Поднося к трубке магнит, можно отклонять пучок электронов. С этой целью используют подковообразный сильный магнит, поворот которого на 180° изменяет направление отклонения пучка.

Пучок электронов за счет собственного давления может также привести в движение легчайшее колесико с лопастями («мельница Крукса»), которая также флюоресцирует.

### 3.21. Влияние температуры на сопротивление металлов и полупроводников



Розетка  
"=50 В"  
на столе

надписью «=50 В» на демонстрационном столе.

**Приборы:** амперметр с прикрепленным к нему металлическим проводником в виде спирали. Гальванометр с нулем посередине. Полупроводник (терморезистор). Спиртовка. Соединительные провода.

**Опыт. 1 – я часть опыта.** Включают вилку в розетку с

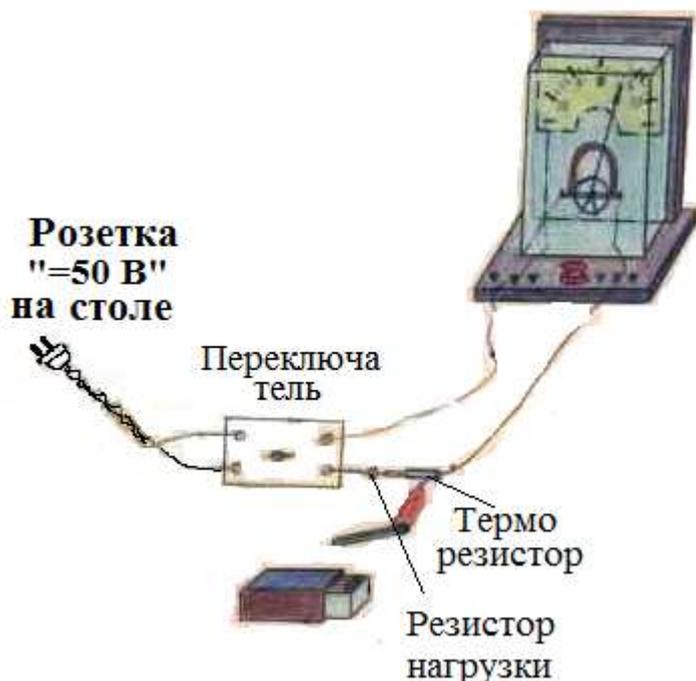
Меняя на выпрямителе КЭФ -8 (в демонстрационной аудитории 2/33) напряжение в пределах 0 – 4 В, добиваются отклонения стрелки амперметра на несколько делений (в пределах от 5 до 10 А).

Подносят горящую спиртовку (или горящие таблетки сухого спирта) к спирали. Слушатели видят, что спираль краснеет от нагрева. Сопротивление растёт, ток уменьшается.

**2 - я часть опыта.** На выпрямителе КЭФ -8 устанавливают напряжение  $\approx 2$  В, получают небольшой ток и добиваются отклонения стрелки гальванометра (с нулем посередине) от нуля на несколько делений. Нагревая полупроводник горячей спичкой, демонстрируют увеличение тока.

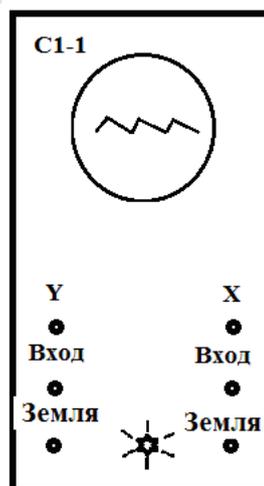
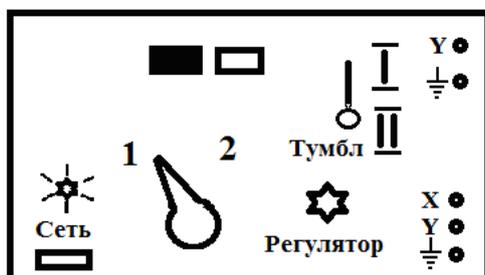
**Объяснение опыта.** При нагревании **проводника** концентрация свободных электронов в нем не изменяется, но ухудшаются условия ускорения их в электрическом поле. С ростом температуры увеличивается амплитуда колебаний атомов решетки относительно положения равновесия, что приводит к увеличению числа столкновений электронов с атомами, т.е. к уменьшению средней скорости их направленного движения и, следовательно, к росту удельного сопротивления.

В случае **полупроводников** уменьшение их электросопротивления связано с резким ростом концентрации свободных носителей при увеличении температуры.



### 3.22. Полупроводники. Выпрямляющее действие $p-n$ перехода

**Приборы:** специальный прибор (автор доцент А.С. Зайцев), осциллограф С1-1.



Ручки управления находятся в следующих положениях.

На осциллографе С1-1:

Диапазон частот – 7.

Синхронизация – внутренняя.

Амплитуда синхронизации – 4.

Частота плавно – 7.

Ослабление - 1:100

Усиление :по X -3, по Y – 2.

### Опыт: 1 часть. Выпрямление переменного тока.

Подключить прибор к сети переменного тока ( $\sim 220$  В). Соединить две верхние клеммы прибора (Y, земля) с соответствующими клеммами осциллографа. Черную и белую кнопки отжать. Тумблер и переключатель поставить в положение 1. На экране осциллографа наблюдается однополупериодное выпрямление (рис. 1).

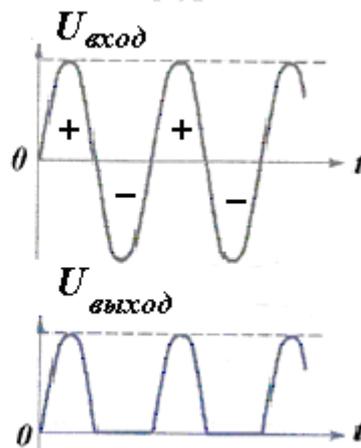
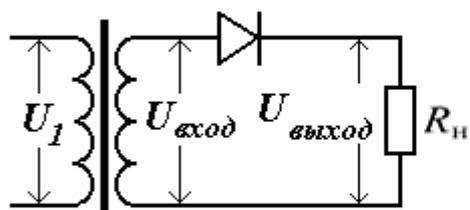


Рис. 1.

С помощью сглаживающего фильтра (перевести тумблер в положение II) можно получить сглаженные пульсации напряжения на выходе (рис. 2).

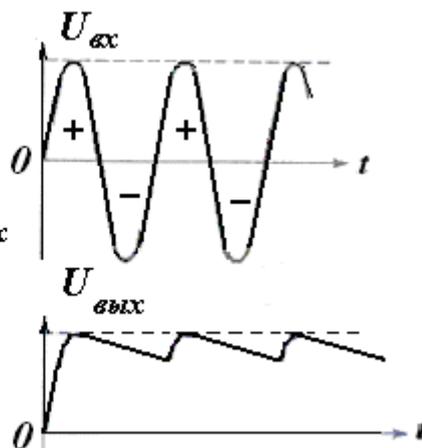
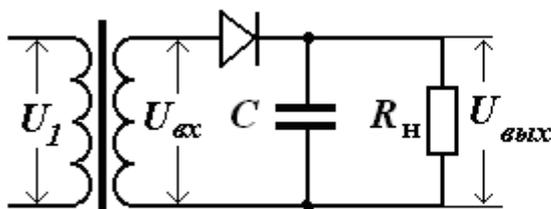


Рис. 2.

Нажать белую кнопку, тумблер перевести в положение I. Это двухполупериодное выпрямление без фильтра (рис. 3  $U_{\text{вх}}$  верхний рисунок). Перевести тумблер в положение II получим на экране результат сглаживающего фильтра (рис. 3  $U_{\text{вх}}$  нижний рисунок).

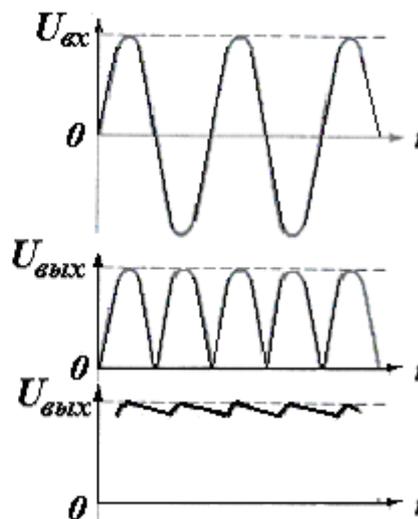
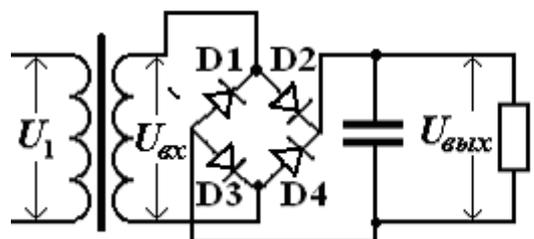


Рис. 3.

**Опыт: 2 часть. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода.**

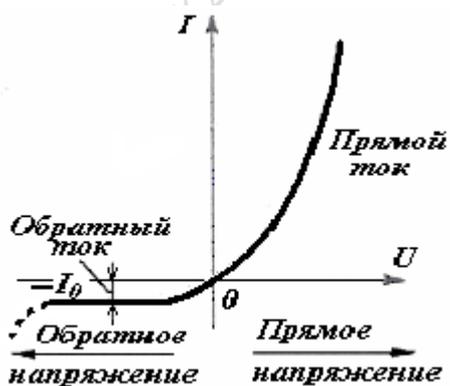


Рис. 4

Установочные данные. На осциллографе С1-1:

Диапазон частот – выкл.

Синхронизация от сети -выкл.

Амплитуда синхронизации – 0.

Частота плавно – 0.

Ослабление - 1:100

Усиление: по X - 5, по Y – 8.

Подсоединить нижние клеммы X, Y, земля прибора к соответственным клеммам осциллографа. Черную кнопку нажать. Переключатель поставить в положение 1. Вращая регулятор, наблюдают на экране осциллографа характеристику полупроводникового диода (нелинейное сопротивление, рис. 4).

Поставить переключатель в положение 2. На экране наблюдается ВАХ линейного сопротивления – прямая линия.

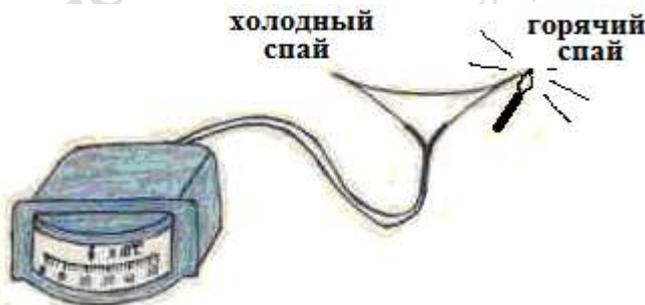
### 3.23. Термопара. Демонстрация промышленной термопары из доменной печи



### 3.24. Термопара со шкалой температур

**Приборы.** Промышленная термопара со шкалой в градусах Цельсия.

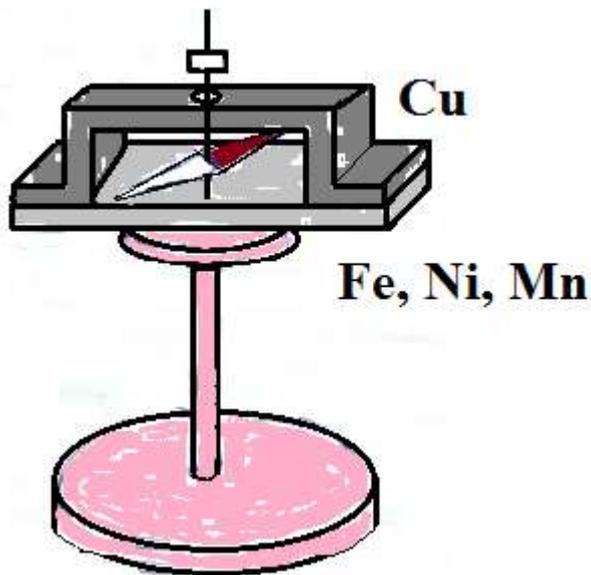
**Опыт.** Подогреваем горячей спичкой один из спаев термопары и наблюдаем отклонение указателя на шкале.



### 3.25. Явление Зеебека. Возникновение термоЭДС

**Приборы:** термопара с магнитной стрелкой и зеркальцем (прибор Зеебека), ЛАТР, лучевой осветитель, демонстрационный столик, спиртовка, спички.

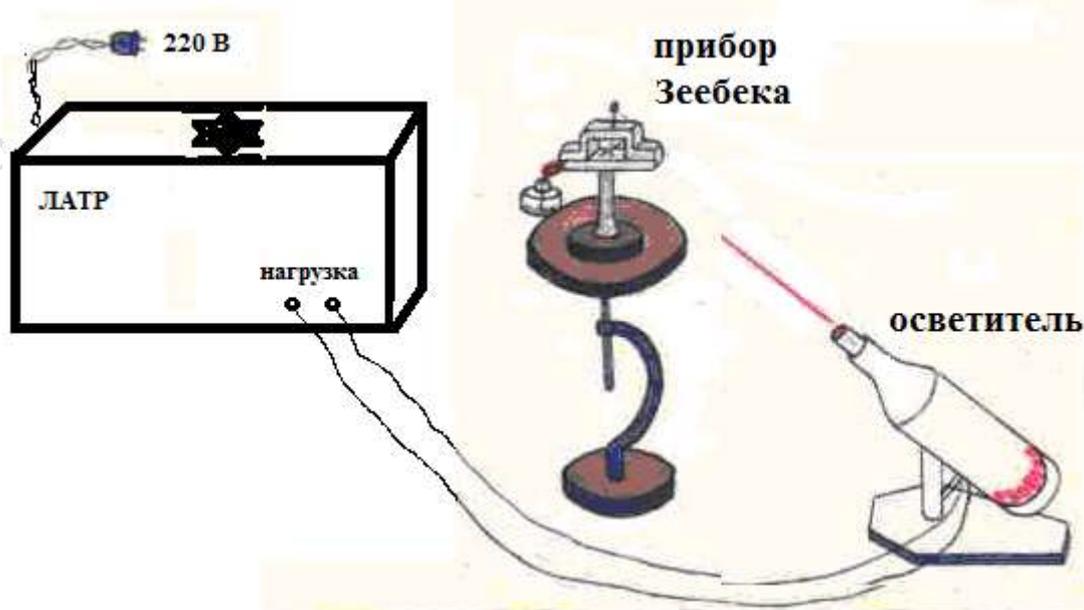
Прибор Зеебека: две толстых (6 мм толщиной) полоски – верхняя медная и нижняя из сплава железо - никель – марганец - соединены последовательно и образуют замкнутую цепь (см. рис.). Внутри образовавшегося контура на тонкой проволочной оси свободно подвешена магнитная стрелка. На этой же оси укреплено маленькое зеркальце.



**Опыт.** Лучевой фонарь соединяют с ЛАТРом. Направляют луч на зеркальце магнитной стрелки. Отраженный луч направляют на середину большого экрана, на котором появляется «зайчик».

Сначала нагревают на спиртовке один спай термопары, стрелка поворачивается и «зайчик» перемещается в одну сторону. Затем подогревают другой спай – «зайчик» перемещается в другую сторону.

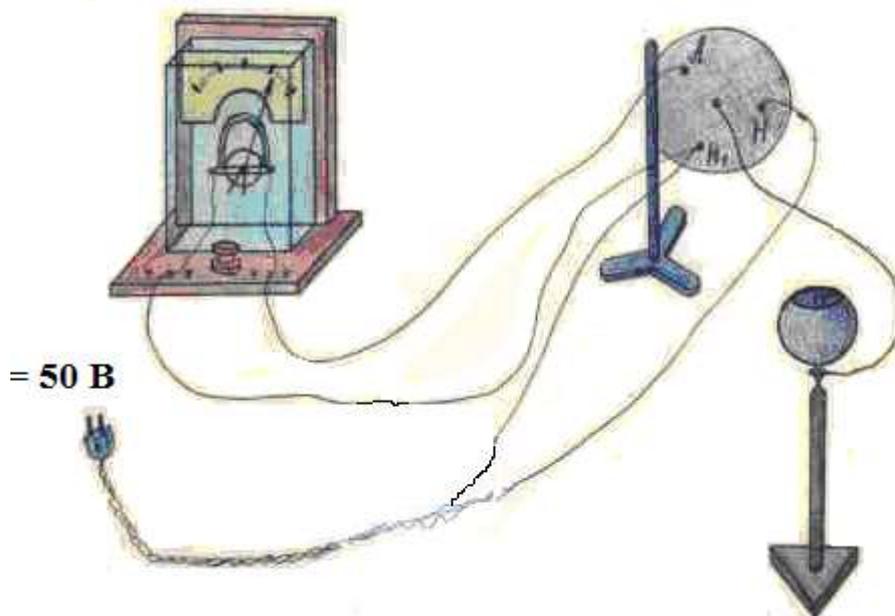
Напряжение на фонаре-осветителе – 8 В.



### Объяснение опыта.

Явление Зеебека состоит в том, что в замкнутой цепи, состоящей из последовательно соединенных разнородных проводников, возникает термо-ЭДС, если места контактов поддерживают при разных температурах. Цепь, которая состоит только из двух различных проводников, называется термоэлементом или термопарой. Поскольку каждый из проводников, образующих пару, здесь специально изготовлен из толстой полоски, возникающий термоток значителен и может создать магнитное поле, ориентирующее магнитную стрелку.

### 3.26. Термоэлектронная эмиссия. Работа электронной лампы-триода



**Приборы:** ламповый триод на демонстрационном щите, укрепленном на штативе. С обратной стороны круглого щита отмечены значения выводов лампы-триода. Полный металлический шар на изолирующей подставке, соединительные провода, амперметр. Стеклопалочка и пластмассовая палочка. Кусок резинового листа, кусок шерстяной ткани.

**Опыт.** Иллюстрирует применение термоэлектронной эмиссии. Исследуется влияние сетки на анодный ток лампы-триода.

Собирают схему согласно рисунку. Цепь подключают на демонстрационном столе к источнику питания «=50 В». Накал лампы подбирают на выпрямителе КЭФ-8 постепенно от нуля до 6 В, пока стрелка гальванометра не отклонится на 4-5 делений.

Подносят к шару, но не прикасаются, наэлектризованную эбонитовую (пластмассовую) палочку. Сетка лампы через влияние заряжается отрицательно. Этим на управляющую сетку лампы подается «минус», и лампа «закрывается». Это приводит к уменьшению анодного тока лампы до нуля.

Если теперь поднести к шару положительно заряженную стеклянную палочку, анодный ток резко возрастает (на сетке плюс).

**Примечание.** 1. Если действия индуцированного заряда шара оказывается недостаточным, можно к шару подсоединить один из полюсов электрофорной машины. Каков будет знак этого полюса - покажет поведение анодного тока.

2. Ламповые приборы больше не выпускаются промышленностью, электроника использует полупроводниковые приборы.

## Магнитное поле

### 3.27. Инклинатор и деклинатор. Магнитная стрелка в магнитном поле Земли

**Прибор.** (Нем.: *inklination* - «наклон», *deklination* - «склонение» (магнитное)).



На подставке укреплена круглая рамка. По диаметру рамки расположено крепление для магнитной стрелки.

Крепление позволяет устанавливать **ось, на которую насажена стрелка**, либо вертикально, либо горизонтально относительно поверхности Земли.

**Опыт.** Если ось магнитной стрелки установить вертикально, это будет стрелка компаса, указывающая направление Север-Юг.

Если ось магнитной стрелки установить горизонтально, стрелка покажет угол наклона к горизонту силовых линий магнитного поля Земли.

### 3.28. Магнитные силовые линии постоянных магнитов

Между стеклянными поверхностями в кюветах находятся прямые полосовые постоянные магниты и подковообразный магнит. Они по-разному ориентированы друг относительно друга. Сверху на стекло насыпают мелкие железные опилки, ставят на эпидиаскоп «Полилюкс» и проектируют на большой экран. Слегка постукивая карандашом по стеклу, чтобы помочь опилкам выстроиться, наблюдают картины магнитных полей.



### 3.29. Магнитное поле прямого тока. Опыт Эрстеда

**Приборы:** магнитная стрелка, провод большого сечения в изоляции, пропущенный через две деревянные ручки, в одной из ручек – кнопка включения тока. Питание прибора осуществляется от источника постоянного напряжения (розетка «=50 В» на демонстрационном столе).

**Опыт.** Демонстрационный провод с помощью вилки подключают напрямую в розетку, на которой написано «=50 В». В демонстрационной аудитории на выпрямителе КЭФ -8 устанавливают **8 В**, что соответствует силе тока **2 - 3 А**.



Ставят на стол магнитную стрелку на подставке и дают стрелке возможность полностью успокоиться. Над стрелкой параллельно ей располагают провод, снабженный двумя деревянными ручками, которые позволяют провод вытянуть в линию. Таким образом, провод находится в плоскости магнитного меридиана.

При нажатии демонстратором кнопки в одной из ручек (показывает кнопку аудитории!) по проводу пропускается большой ток. Под действием магнитного поля этого прямого тока магнитная стрелка поворачивается. Она устанавливается вдоль равнодействующей магнитного поля Земли и магнитного поля прямого тока,

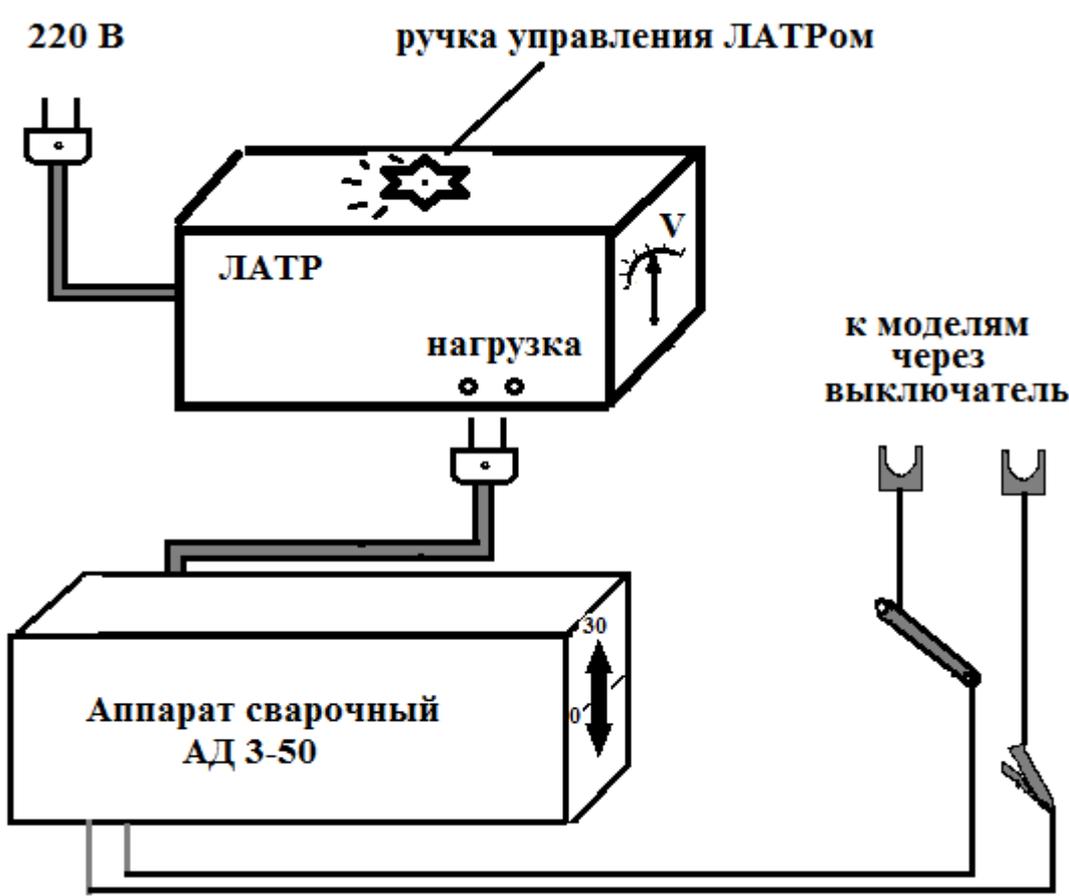
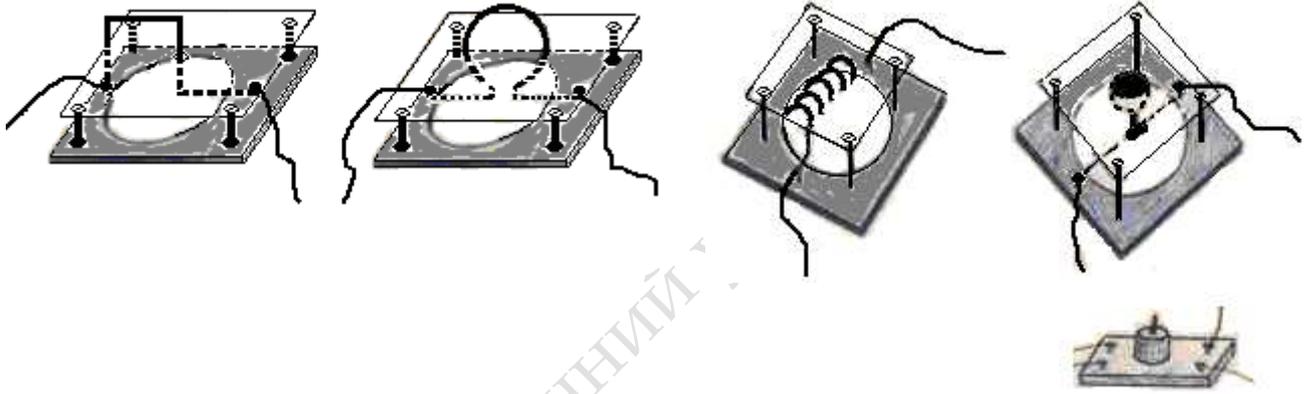
направленного перпендикулярно проводу с током (по правилу винта).

Если поменять местами деревянные ручки - держатели провода, ток над стрелкой будет проходить в противоположном направлении, и магнитная стрелка повернется на  $180^\circ$ .

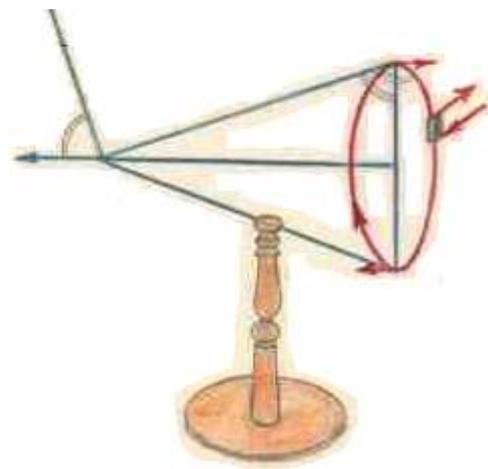
### 3.30. Магнитные поля различных проводников с током

**Приборы.** Специальные приборы (4 шт) – в плексигласовых пластинках просверлены отверстия, через которые пропущен медный провод без изоляции большого сечения. Моделируются проводники различной формы – прямой ток, круговой ток, соленоид и модель Земного шара. В основании каждой модели имеется круглое отверстие для получения с помощью эпидиаскопа теневой проекции. ЛАТР, сварочный аппарат как источник большого постоянного тока, эпидиаскоп «Полилюкс», выключатель, соединительные провода.

**Опыт.** Опыт показывают в теневой проекции, для чего модели по очереди устанавливают на эпидиаскоп. Из специальной коробочки с мелкими отверстиями сыплют на пластинки мелкие железные опилки. При замыкании цепи (пропускают кратковременно большой ток - на крышке ЛАТРа устанавливают переключатель возле цифры 100 для трех опытов с проводами и около нуля для модели Земного шара) и при постукивании по пластинке карандашом опилки выстраиваются по силовым линиям магнитного поля.

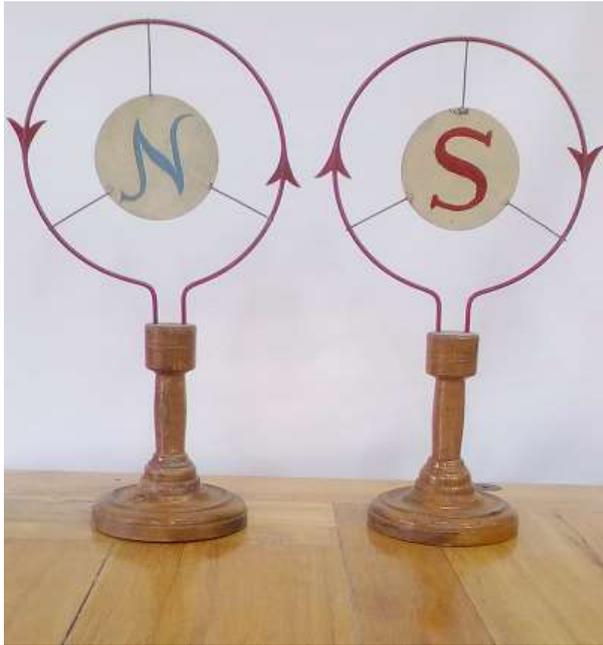


3.31. Неподвижные модели индукции магнитного поля в центре



и

## на оси кругового тока

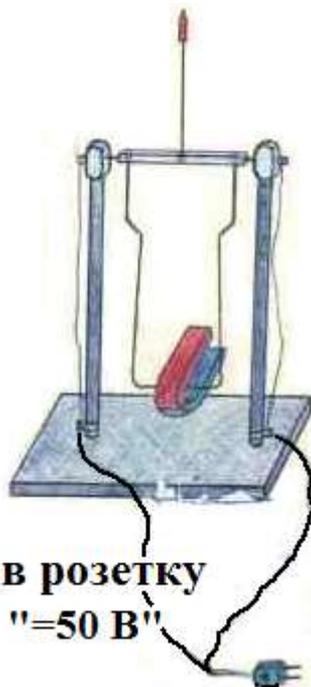


### 3.32. Действие магнитного поля на ток («качели»)

**Приборы.** На штативе в шарнирах, служащих одновременно токоподводящими устройствами, может вращаться вокруг горизонтальной оси свободно подвешенная проволочная рамка. Питание прибора осуществляется от источника постоянного напряжения (розетка «=50 В» на демонстрационном столе).

**Опыт.** В демонстрационной аудитории на выпрямителе КЭФ -8 устанавливают **6 В**.

Нижнюю горизонтальную часть рамки помещают между полюсами подковообразного постоянного магнита. При пропускании тока по проводнику, он либо втягивается, либо выталкивается из магнита. Это зависит от направления тока и магнитного поля. Чтобы движение рамки было заметно аудитории, сверху на оси укреплена стрелка. Изменив направление тока, меняют направление выталкивающей силы.



### 3.33. Действие магнитного поля на ток. Станок Ампера

**Приборы.** Два горизонтальных параллельных медных стержня на высоком штативе образуют «рельсы», отрезок алюминиевого провода без изоляции – «перемычка», подковообразный магнит, источник постоянного тока.

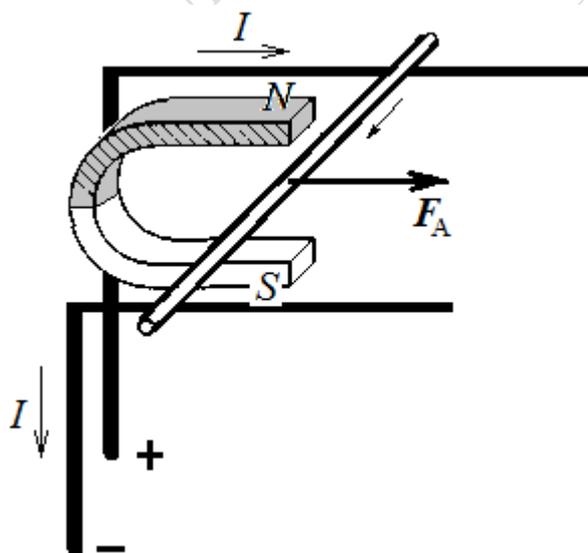
**Опыт.** Алюминиевый проводник круглого сечения – перемычка – кладется на рельсы. Сначала тока в рельсах нет. Подносится магнит. Перемычка не реагирует (т.к. алюминий – слабомагнитное вещество – парамагнетик).

Затем подают **напряжение 8 В** от выпрямителя КЭФ -8 в демонстрационной аудитории. Прибор включают в розетку «=50В». Снова подносят магнит. Перемычка выталкивается или втягивается в зависимости от положения полюсов магнита и направле-

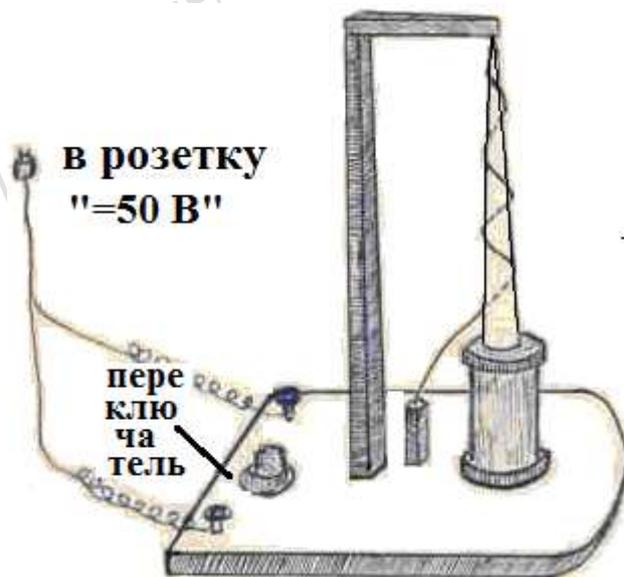


ния тока, под действием силы Ампера начинает перекашиваться по рельсам в ту или иную сторону.

**Рекомендация.** Перед опытом мелкой (нулевкой) наждачной бумагой зачищают перемычку и рельсы для лучшего контакта. Кроме того, перемычку выравнивают прокатыванием на плоской поверхности.



### 3.34. Действие магнитного поля на ток. Обвивание проводника с током вокруг сердечника электромагнита



**Приборы.** Электромагнит с сердечником в виде железного конусного стержня длиной около 50 см. Сердечник укреплен в вертикальном положении. Гибкий провод подвешен рядом с сердечником. Верхний конец провода закреплен на Г-образной стойке. Нижняя часть провода проходит через основание стойки. Питание прибора осуществляется от источника постоянного напряжения (розетка «=50 В» на демонстрационном столе).

**Опыт.** На выпрямителе КЭФ -8 устанавливают 18 В. Пропуская ток через провод и катушку, наблюдают обвивание провода вокруг сердечника электромагнита. При этом верхняя часть провода закручивается в одном направлении, а нижняя – в другом.

Можно изменить направление тока в проводе с помощью переключателя на панели прибора. Проводник при этом сначала раскручивается, затем навивается по-другому.

**Объяснение опыта.** Сила, которая действует на элемент тока, помещенный в данную точку магнитного поля, зависит от взаимной ориентации электрического тока и магнитного поля (закон Ампера) (см., например, [1]).

Верхний и нижний концы сердечника электромагнита имеют разноименные магнитные полюса. Поэтому направления сил Ампера, действующих на элементы тока, мысленно выделенных в гибком проводнике в верхней и нижней частях, противоположны. Это вызывает закручивание проводника с током вокруг намагниченного сердечника.

### 3.35. Рамка с током в магнитном поле. Модель электродвигателя постоянного тока



**Приборы.** Небольшая рамка из нескольких витков медного провода может свободно вращаться вокруг горизонтальной оси. К рамке посредством скользящих контактов – «щеток» - подводят постоянное напряжение. С помощью подковообразного магнита и полюсных наконечников рамка оказывается помещенной в магнитное поле.

**Опыт 1.** На выпрямителе КЭФ -8 в демонстрационной аудитории выставляют 14 В. Модель включают в розетку на демонстрационном столе с надписью «=50 В». Рамка вращается.

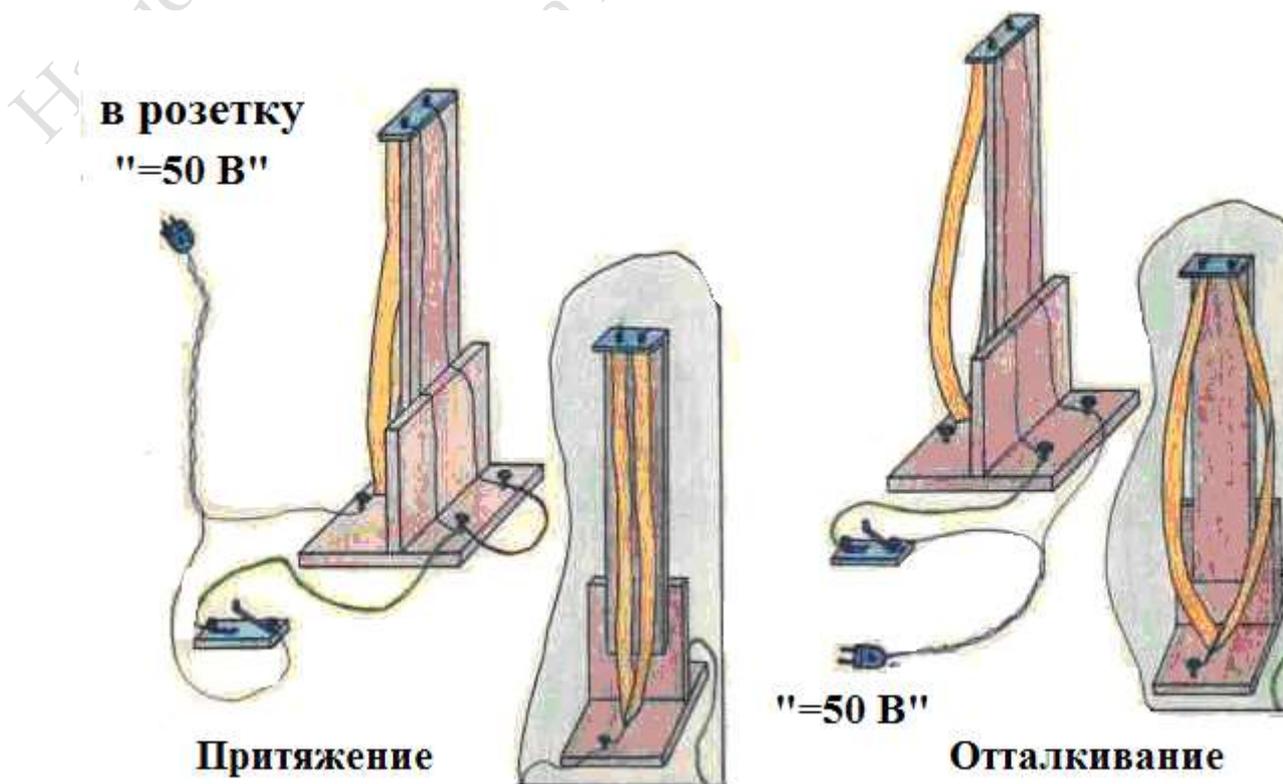
**Объяснение опыта.** При пропускании электрического тока рамка ориентируется так, чтобы вектор ее магнитного момента был направлен вдоль внешнего

магнитного поля. Рамка поворачивается. При дальнейшем вращении рамки по инерции зажимы источника тока соединяются с другими коллекторными пластинами. Направление тока в них изменяется на противоположное, и рамка продолжает дальнейшее вращение.

**Опыт 2.** Изменяем полярность напряжения, подаваемого на рамку (этого можно добиться, если вынуть штепсель из розетки «=50 В», повернуть его на 180° и снова вставить). Рамка вращается в противоположном первому опыту направлении.

**Объяснение опыта.** У электрических двигателей постоянного тока можно реверсировать (изменить на противоположное направление) вращения ротора. Для этого достаточно изменить направление тока в обмотке на противоположное.

### 3.36. Взаимодействие параллельных токов



**Приборы.** Два проводника из фольги (проводящие ленты вырезают из разобранного бумажного конденсатора) подвешены на штативе вертикально. Нижние концы проводников подведены к одной клемме, верхние – к двум отдельным клеммам.

**Опыт.** Постоянное напряжение **14 В** устанавливается в демонстрационной аудитории на выпрямителе КЭФ -8 с кратковременным включением. Если на задней панели прибора соединить проводом зажимы, то проводники включаются параллельно и токи по лентам фольги текут в одном направлении. Между ними происходит притяжение. Объяснение см., например, [1].

Если разъединить клеммы на задней панели прибора и подвести к ним оба провода от выпрямителя, то проводники таким образом соединяются последовательно, а токи в них будут течь в противоположных направлениях. Антипараллельные токи отталкиваются [1].

### 3.37. Катушка с током в неоднородном магнитном поле

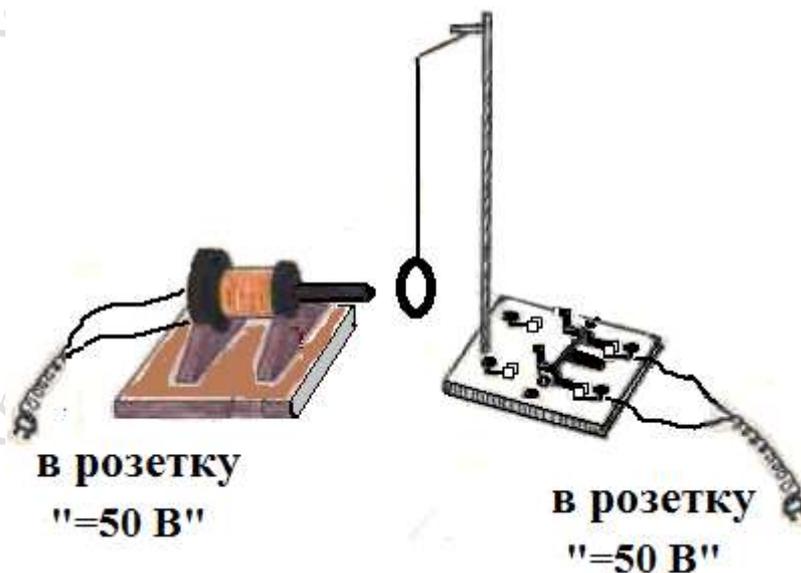
**Приборы.** Электромагнит с выступающим стальным сердечником, укрепленный на подставке горизонтально. Подвешенная на вертикальной стойке на гибких проводах плоская катушка медного провода. По проводам подвеса подводится ток в катушку. Выпрямитель КЭФ-8.

**Опыт.** Штатив с подвижной катушкой устанавливается так, чтобы подвижная катушка висела перед сердечником на расстоянии около 5 см. В демонстрационной аудитории подают на розетку напряжение **15 В** от КЭФ -8.

При включении тока в электромагнит подвижная катушка либо сразу притягивается к сердечнику и надевается на него, либо сначала отталкивается, переворачивается на  $180^\circ$  и затем надевается на сердечник.

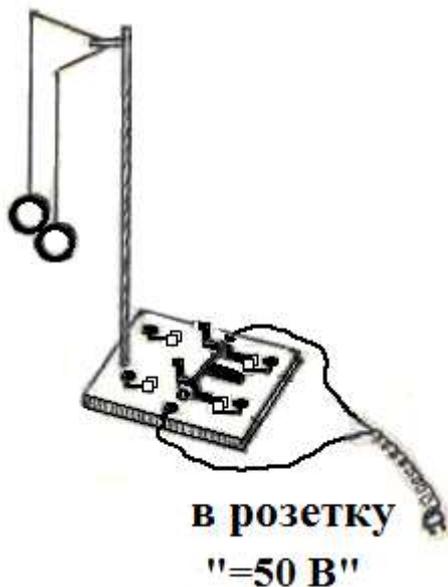
**Объяснение опыта.**

На плоский контур с током в неоднородном магнитном поле кроме сил вращения и деформации действуют дополнительные силы, которые обуславливают перемещение контура в сторону градиента индукции магнитного поля (в зависимости от направлений тока и поля). (См., например, [1]).



### 3.38. Взаимодействие двух катушек с током

**Приборы.** На вертикальной стойке подвешены две плоских катушки медного провода. Ток в катушки подводится по проводам подвеса. На основании стойки находится переключатель направления тока.



**Опыт.** Раздвигают держатели подвесов на штативе на некоторый угол так, чтобы катушки располагались параллельно друг другу.

В демонстрационной аудитории подают на розетку напряжение **15 В** от выпрямителя КЭФ -8.

Можно включать ток в катушках либо параллельно, либо последовательно.

При повороте переключателя тока катушки либо сразу притягиваются (если токи в них текут в одном направлении), либо сначала отталкиваются (токи в катушках противоположны), затем одна из катушек переворачивается на  $180^\circ$  и после этого катушки притягиваются.

**Объяснение опыта.** Каждая из катушек с током создает собственное магнитное поле и находится в магнитном поле соседней катушки. Эти поля явно неоднородные. В общем случае неоднородного поля на катушку с током будет действовать пара сил, стремящихся повернуть катушку, и сила, втягивающая (в случае токов в катушках одного направления) в область более сильного поля или выталкивающая (противоположные токи) и перемещающая катушку в область более слабого поля.

### 3.39. Отклонение пучка электронов магнитом. Сила Лоренца

**Приборы:** подковообразный магнит, катодная трубка со щелью и люминесцирующим экраном за щелью, высоковольтный индуктор (катушка Румкорфа).

**Опыт.** В демонстрационной аудитории на выпрямителе КЭФ -8 устанавливают 11 В. Полузатеняют аудиторию.

Вторичные выводы катушки Румкорфа соединяют гибкими проводами-пружинками с электродами трубки Крукса. Включают катушку в розетку на демонстрационном столе с надписью «U=50 В», а затем выключателем на панели катушки. Начинает работать высоковольтный индуктор (катушка Румкорфа) и в круксовой трубке появляется свечение. По диагонали трубки расположен флюоресцирующий экран, на котором виден прямолинейный след пучка электронов. Подносят к катодной трубке магнит (подковообразный магнит, как наиболее сильный из имеющихся магнитов). Наблюдается искривление следа пучка электронов на люминесцентном экране трубки. Поворачивая магнит на  $180^\circ$ , наблюдают отклонение пучка в противоположную сторону.

**Объяснение опыта.** На движущиеся электрические заряды со стороны магнитного поля действует сила Лоренца [1].

## Электромагнитная индукция

### 3.40. Основные опыты Фарадея

**Приборы:** две катушки – большого и малого диаметра, малая катушка может вставляться в большую, прямой полосовой магнит, демонстрационный гальванометр, стальной сердечник с рукояткой, провода соединительные, источник постоянного тока (от розетки на столе с надписью «=50 В», куда с помощью выпрямителя КЭФ -8 в демонстраторской аудитории подают **6 В**).

**Опыты.** Большую катушку соединяют с гальванометром.

1). Магнит резко вдвигают в катушку. Происходит отброс стрелки гальванометра. Когда магнит останавливается, стрелка гальванометра возвращается в исходное положение.

При выдвигании магнита отброс стрелки происходит в другую сторону. Изменяют вдвигаемый полюс магнита. Прodelьвают те же опыты. Быстро и медленно. Подчеркивают, что величина индуцируемого тока зависит от скорости изменения магнитного потока, а направление – от знака приращения магнитного потока.

2). Затем в большую катушку вставляют электромагнит – катушку меньшего диаметра со стальным сердечником, включенную в розетку «=50 В», на которую из демонстраторской аудитории подается **6 В**. Прodelьвая те же движения, что и в п. 1), наблюдают отклонение стрелки гальванометра. Эффект гораздо сильнее.

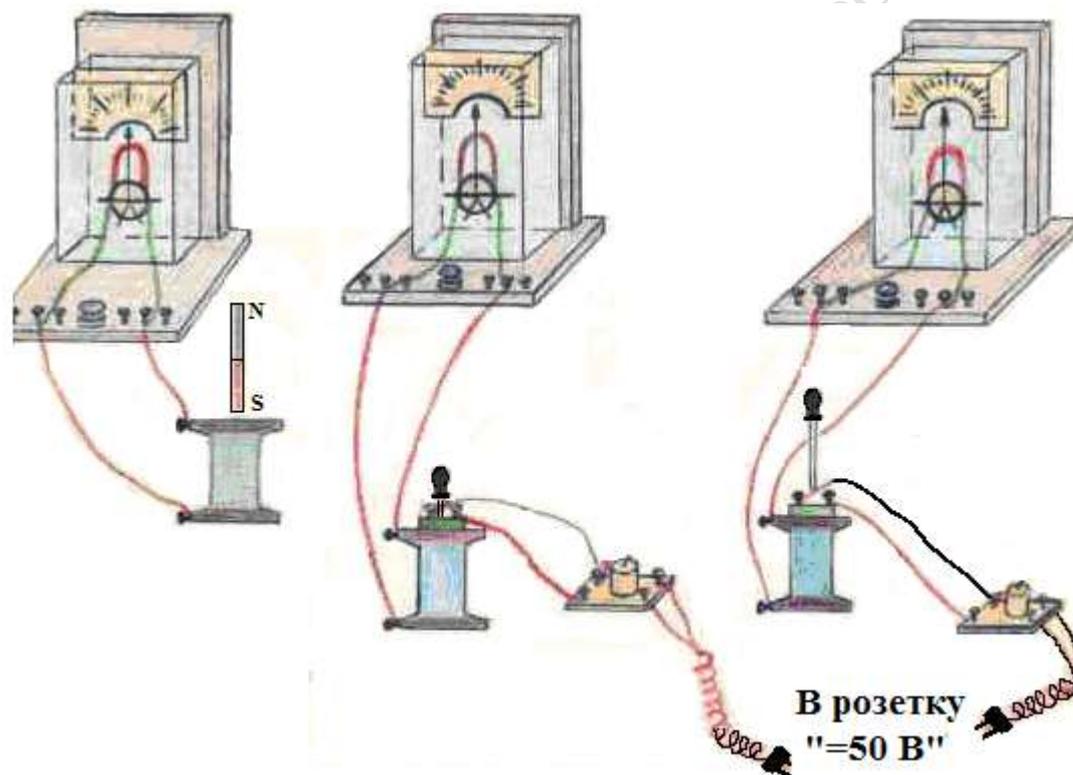
3). Вкладывают включенный электромагнит в большую катушку, соединенную с гальванометром. Выхватывают из вставленной катушки стальной сердечник. В момент вдвигания и выдвигания сердечника наблюдают значительное отклонение стрелки гальванометра.

4). Наконец, выключают из розетки питание вставленной катушки. Снова наблюдают отклонение стрелки гальванометра.

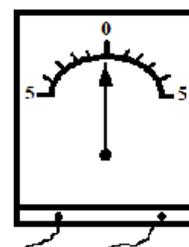
**Объяснение опыта.** ЭДС индукции возникает, если поток  $\Phi_B$  магнитной индукции  $B$  через поверхность, ограниченную замкнутым проводящим контуром, *изменяется по любым причинам* – либо контур перемещается, поворачивается, деформируется, вращается в постоянном магнитном поле, либо контур неподвижен, а поток  $\Phi_B$  изменяется за счет изменения магнитного поля  $B$ .

При этом ЭДС  $\varepsilon_i$  электромагнитной индукции в контуре пропорциональна скорости изменения потока, т.е. значению производной  $\frac{d\Phi_B}{dt}$

Во всех случаях 1) – 4) происходит изменение магнитного потока, пронизывающего контур большой катушки, и регистрируется ток индукции.



*Примечание.* Вместо большого демонстрационного гальванометра часто монстраторы используют школьный гальванометр с нулем посередине.

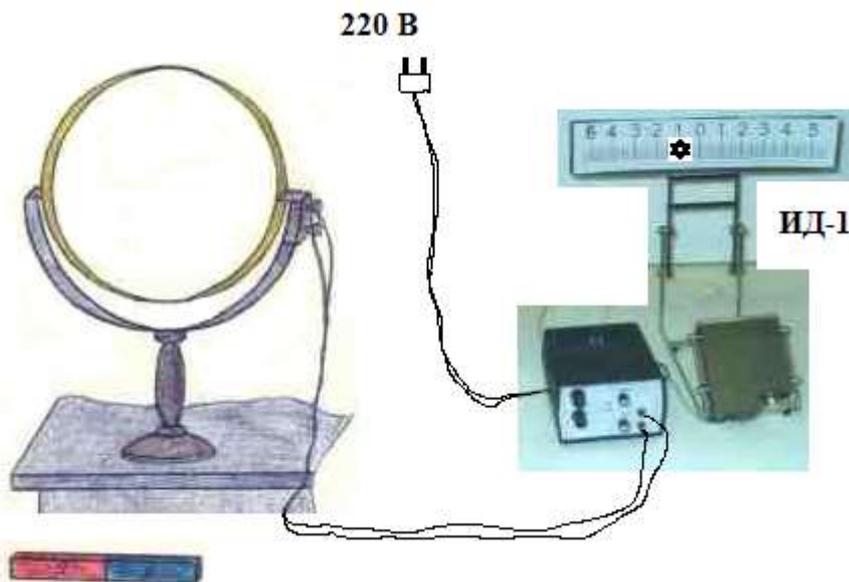


де-

### 3.41 Земной индуктор

**Приборы.** Земной индуктор, измеритель демонстрационный ИД-1, магнитная стрелка, постоянный магнит.

Индуктор представляет собой соленоид, выполненный в виде обруча, на который навито большое число витков провода. Индуктор мо-



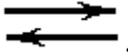
жет свободно вращаться вокруг горизонтальной оси в обе стороны. Возникающий в обмотке ток индукции снимается с проводов двумя скользящими контактами.

Идея опыта: воспользоваться магнитным полем Земли и, вращая проводящую рамку, получить ток индукции.

**Опыт.** Соленоид располагают на демонстрационном столе. С помощью магнитной стрелки определяют направление Север-Юг и т. о. положение плоскости земного меридиана. Ставят индуктор плоскостью перпендикулярно направлению Север-Юг. Тогда магнитное поле Земли будет направлено перпендикулярно плоскости индуктора.

Сначала «пробуют» чувствительность прибора, приближая и удаляя к индуктору постоянный магнит. Наблюдают за движением «зайчика» на шкале измерителя.

Затем медленно поворачивают обруч соленоида. «Зайчик» на шкале зеркального индикатора начинает двигаться. Вращают в другую сторону – «зайчик» движется в противоположном направлении.

*Положение кнопок* на передней панели ИД-1: переключатель левый верхний –  $V$ , нижний –  $0,01 V$ . Установка зайчика на середину – ручка .

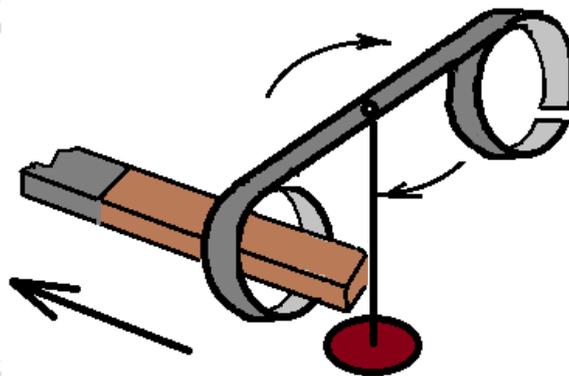
Примечание. Опыт получается более наглядным, если проектировать луч лазера не на шкалу измерителя, а на большой экран в аудитории.

### 3.42. Демонстрация правила Ленца при возникновении индукционного тока

**Приборы:** прибор для демонстрации правила Ленца, постоянный магнит.

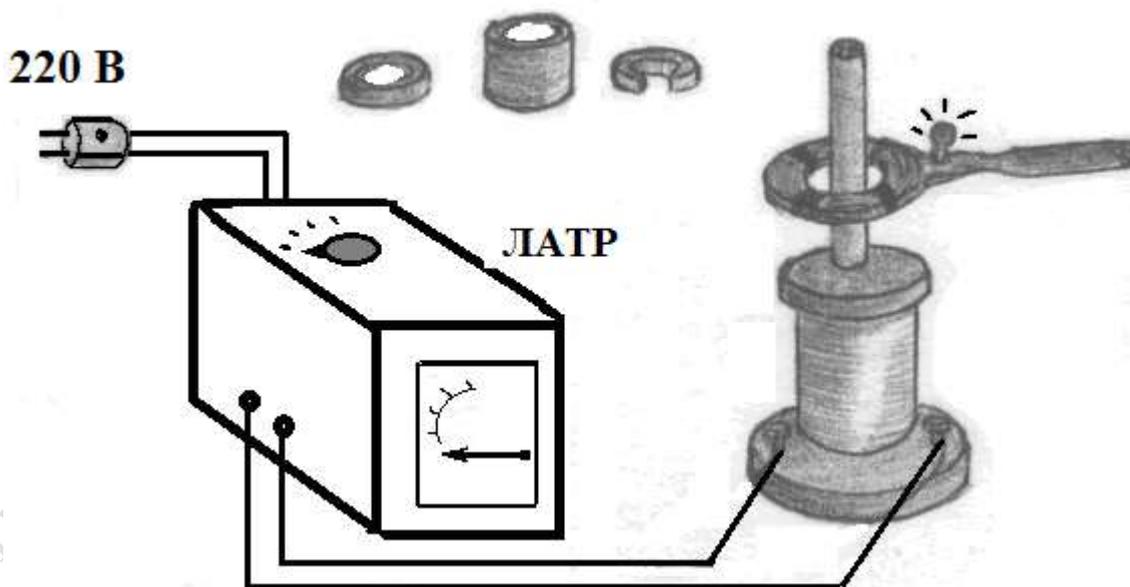
**Опыт.** При движении магнита в замкнутом кольце оно приходит в движение. При вдвигании магнита в сплошное кольцо оно отталкивается от магнита и коромысло поворачивается вокруг вертикальной оси на острие. При выдвигании магнита сплошное кольцо следует за ним. При движении магнита в незамкнутом кольце кольцо не движется.

**Объяснение опыта.** Во всяком замкнутом проводнике при изменении магнитного потока сквозь площадь, ограниченную этим проводником, возникает индукционный ток. Согласно правилу Ленца индукционный ток всегда имеет такое направление, чтобы противодействовать изменению магнитного потока, вызывающему этот ток.



### 3.43. Сбрасывание колец (Опыт американского изобретателя Элиу Томсона)

**Приборы.** Вертикально расположенный электромагнит в виде соленоида с сердечником. Концы соленоида подключаются к выходу ЛАТРа, который включается в осветительную сеть (220 В). Кольца алюминиевые и медные разной массы. Кольцо с разрезом. Рамка, снабженная ручкой, из нескольких витков провода с последовательно включенной лампочкой накаливания,



**Опыт.** На сердечник надевают широкое кольцо из лёгкого металла с малым удельным сопротивлением (из алюминия).

Постепенно увеличивают подаваемое от ЛАТРа напряжение (от нуля). Кольцо медленно поднимается и за висает на некоторой высоте.

На висящее кольцо сверху можно подвесить еще несколько колец. Отдельно показывают: кольцо с разрезом не поднимается.

Можно заранее надеть на сердечник кольцо. Установить на ЛАТРе некоторое напряжение (не более **100 В** по меткам на крышке ЛАТРа) и внезапно замкнуть цепь. Кольцо подбрасывается и слетает с сердечника. Можно «стрелять» несколькими кольцами. Если вместо алюминия взять более тяжёлую медь, то кольцо не будет подбрасываться вверх, даже если оно свободно, но при этом также будет наблюдаться разогрев металла.

Если массивное кольцо (имеется в наборе) надеть на сердечник, прижать двумя руками книзу и удерживать (приглашается студент), то оно сильно разогревается (через некоторое время студент уже не может удерживать горячее кольцо).

Возникновение индукционного тока демонстрируется рамкой с электрической лампочкой. Рамку постепенно надвигают сверху на сердечник, чем ниже опускается рамка, тем ярче горит лампочка.

**Объяснение опыта.** Суть опыта - демонстрация правила Ленца. При протекании переменного тока через обмотку соленоида в сердечнике возникает переменное магнитное поле, возбуждающее индукционные токи в кольце. Согласно

правилу Ленца, эти токи текут таким образом, чтобы уменьшить то поле, которое их создаёт, то есть они текут в сторону, противоположную току в обмотке соленоида.

Противоположные токи отталкиваются. В результате между током в соленоиде и током в кольце возникает отталкивающая сила Ампера.

Если сопротивление кольца невелико, то индукционный ток достигает значительной величины, и сила отталкивания способна подкинуть кольцо вверх. Если силы недостаточно, чтобы подкинуть кольцо, или если удерживать кольцо внешним воздействием, то возбуждаемые токи индукции приводят к разогреву кольца в соответствии с законом Джоуля — Ленца.

**Замечание.** (Его можно не приводить в «слабых» лекционных потоках, чтобы не затенять основного содержания. Это замечание – для лекторов).

Казалось бы, в переменном магнитном поле сила Ампера пол периода направлена вверх, пол периода – вниз. В среднем получается, что сила Ампера равна нулю. Что же заставляет кольцо слетать?

Кольцо имеет некоторую индуктивность  $L$ . Если магнитное поле меняется со временем как  $B \sim \cos \omega t$ , ЭДС индукции тогда меняется как  $-\sin \omega t$ , а ток индукции из-за наличия  $L$  меняется как  $\sin(\omega t + \alpha)$ , т.е. сдвинут по фазе на  $\alpha$ . В среднем сила Ампера  $|\langle F_A \rangle| \sim \sin \alpha$  отлична от нуля. Кольцо зависает.

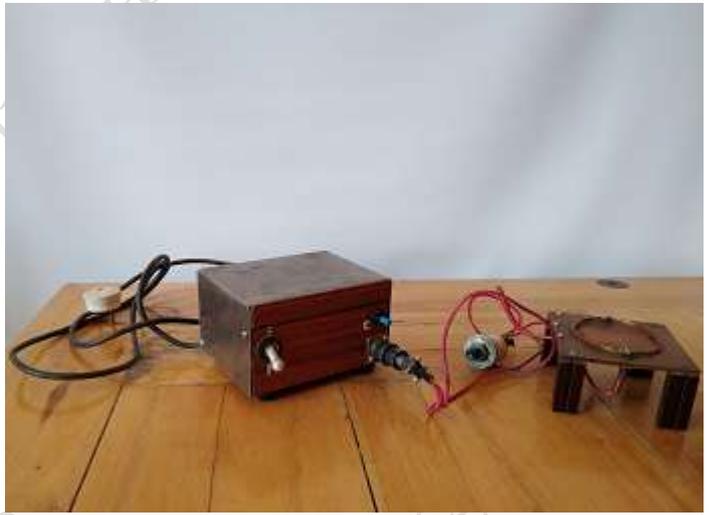
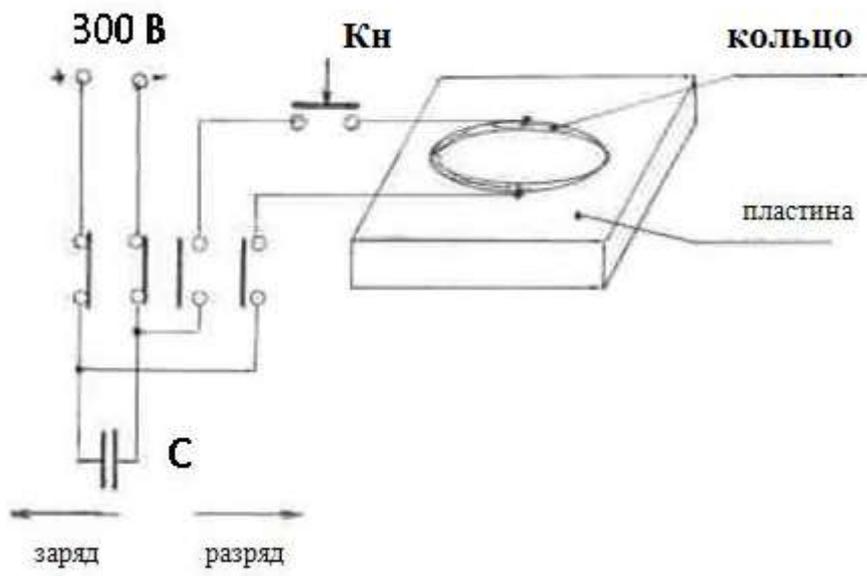
### 3.44. Прыгающее кольцо (опыт поставлен доцентом А.С.Зайцевым)

**Приборы.** Блок питания, дающий постоянное напряжение 300 В и содержащий конденсатор емкостью 800 мкФ. Медная пластина толщиной 4 мм, укрепленная горизонтально с помощью четырех ножек-изоляторов. На пластине лежит кольцо из 12 витков медного провода (диаметр кольца 10 см, диаметр провода 0,2 мм). По диаметру кольца расположены два контакта, входящие в отверстия пластины и одновременно фиксирующие кольцо на пластине.

**Опыт.** Фиксируют кольцо на пластине. Блок питания включают в сеть  $\sim 220$  В. Прибор включается кнопкой «ВКЛ». В положении тумблера «Заряд» заряжают конденсатор в течение нескольких секунд.

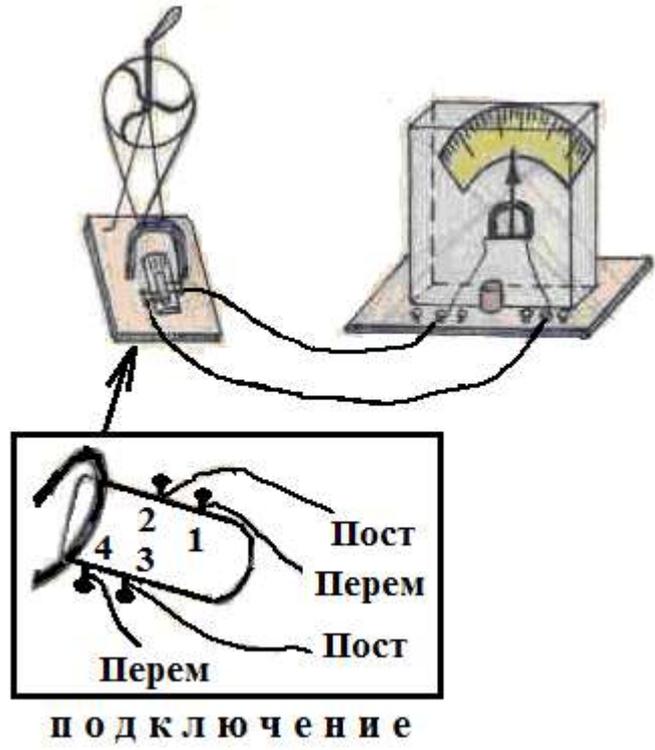
Затем переключают тумблер в положение «Разряд». Нажимают кнопку «Кн». Кольцо подскакивает на несколько десятков сантиметров.

**Объяснение опыта.** Разрядный ток в кольце индуцирует в медной пластине вихревой индукционный ток (ток Фуко). Этот ток по правилу Ленца имеет направление, антипараллельное току в кольце. Антипараллельные токи отталкиваются. Вследствие кратковременности процесса разряда конденсатора токи достигают значительной величины.



### 3.45. Получение переменного и постоянного тока

*Приборы.* Между полюсными наконечниками постоянного магнита может вращаться рамка из нескольких сот витков, насаженная на шкив. Шкив вращается с помощью ременной передачи от колеса, которое вращается вручную. Концы провода рамки выведены на коллектор. Клеммы с металлическими пружинами-щетками.



Можно, изменяя порядок соединения щеток с гальванометром, получать либо постоянный, либо переменный ток.

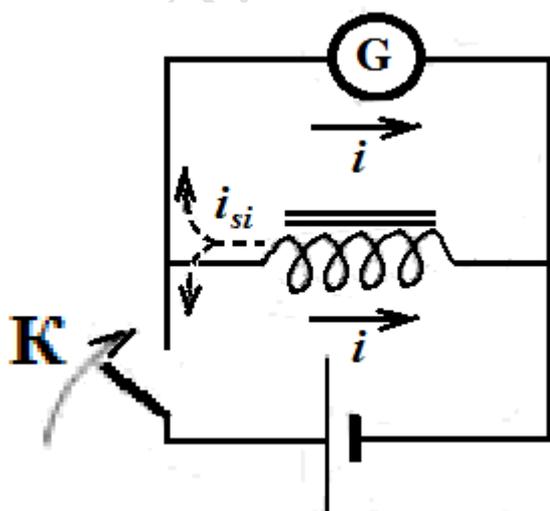
Если соединить с гальванометром щетки, касающиеся верхнего и нижнего колец коллектора (эти кольца сплошные), вращая ручку колеса, получают **переменный ток**. Стрелка гальванометра с нулем посередине будет при этом отклоняться вправо и влево. *Соединение:* на вход гальванометра подаются провода от клемм 1 и 4.

Если щетки соединить со средним разомкнутым кольцом коллектора, получают **постоянный ток**. Стрелка будет отклоняться в какую-либо одну сторону от нуля. Увеличивая скорость вращения, можно получать больший ток. *Соединение:* от клемм 2 и 3 подаются провода на вход гальванометра.

**Примечание.** В последнее время опыт *упрощен*. Вращая рамку, заставляют светиться светодиод.

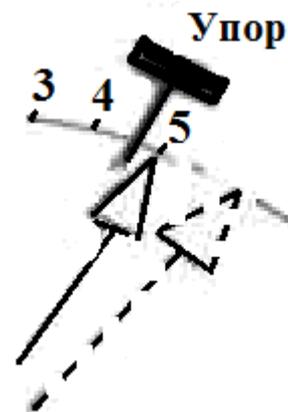
### 3.46. Токи самоиндукции при замыкании и размыкании цепи. (Опыт А. Эйхенвальда)

**Приборы.** Гальванометр с нулем посередине и с передвигаемым упором на шкале. В качестве индуктивности берется катушка с выступающим сердечником, либо школьный трансформатор с последовательно соединенными катушками. Источником постоянного напряжения является выпрямитель КЭФ -8, расположенный в демонстрационной аудитории. Напряжение от него (2 В) подается на розетку на столе с надписью «50 В».



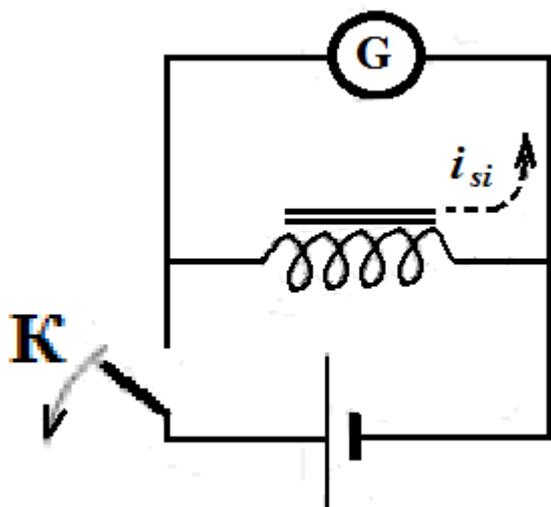
**Опыт.** Собирается схема согласно рисунку.

При замыкании ключа  $K$  ток от источника разветвляется: часть его проходит через гальванометр, нуль которого находится посередине шкалы, а часть – через катушку индуктивности. Магнитный поток в катушке начинает возрастать и возникает ЭДС самоиндукции, препятствующая возрастанию тока через катушку. Ток самоиндукции показан на схеме пунктирной стрелкой.



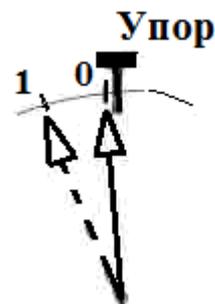
Ток самоиндукции тоже разветвляется: часть его идет обратно в источник, часть – через гальванометр. Но стрелка гальванометра уже идет от нуля вправо за счет основного тока.

Чтобы увидеть **только ток самоиндукции** (дополнительный к основному), мы вначале замыкаем цепь, стрелка отклоняется на некоторое число делений (например, 5). Устанавливаем упор, как показано на рисунке, т.е. **слева от стрелки в том положении**, которое она займет потом после исчезновения переходных процессов. Тогда *отброс стрелки вправо* от фиксированного положения регистрирует **только ток самоиндукции**.



Ток самоиндукции **при размыкании** цепи. При замкнутом ключе ток батареи разветвляется: часть его проходит через гальванометр, а часть – через катушку индуктивности. При размыкании цепи магнитный поток в катушке начинает убывать, и возникает ЭДС самоиндукции, препятствующая спаданию тока через катушку.

Но батарея уже отключена, поэтому ток вынужден идти через гальванометр, причем в направлении, противоположном первоначальному. Стрелка гальванометра должна отклониться в противоположную сторону – влево. Но стрелка уже идет влево к положению ноль, т.к. основной ток от батареи прекратился.



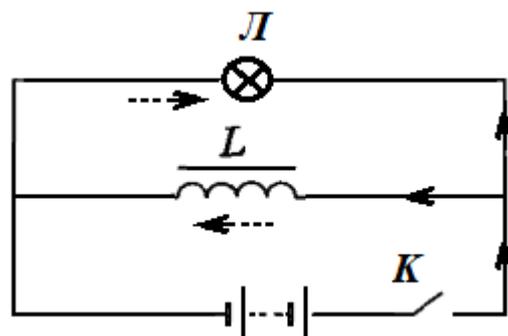
Чтобы увидеть **только ток самоиндукции**, мы заранее поставим ограничитель **в нуле справа от стрелки**, не давая ей возможности показывать основной ток в стационарном состоянии. *Отброс стрелки влево* при размыкании ключа и покажет наличие тока самоиндукции.

*Добавление.* Можно заменить гальванометр автомобильной лампочкой на 6-12 В. При замкнутой цепи лампочка еле горит, в момент размыкания цепи она ярко вспыхивает.

### 3.47. Явление самоиндукции. Экстраток размыкания

**Приборы.** Катушка большой индуктивности (около 0,5 Гн) с сердечником. Источник постоянного напряжения (9 В). Автомобильная лампочка с рабочим напряжением 13-16 В. Соединительные провода.

**Опыт.** Собирают хорошо известную схему согласно рисунку. Замыкают цепь ключом. При замкнутой цепи лампочка све-



тит тускло. При размыкании цепи лампочка ярко вспыхивает.

**Объяснение опыта.** После выключения источника постоянного напряжения в замкнутой цепи из последовательно соединенных лампочки  $L$  и катушки индуктивности  $L$  сила тока начинает падать. Спадает со временем и магнитный поток, пронизывающий витки катушки. В результате этого в витках катушки возникает ток самоиндукции (показан пунктирной стрелкой), направленный по правилу Ленца так, чтобы противодействовать изменениям тока в цепи, т.е. поддерживающий первоначальный ток (показан сплошной стрелкой).

В итоге в момент размыкания через лампочку течет ток, который направлен против начального тока до размыкания.

Ток самоиндукции, который возникает при размыкании электрической цепи, называется *экстратоком размыкания*.

При больших  $L$  экстратоки размыкания могут значительно превышать токи в цепи от источника.

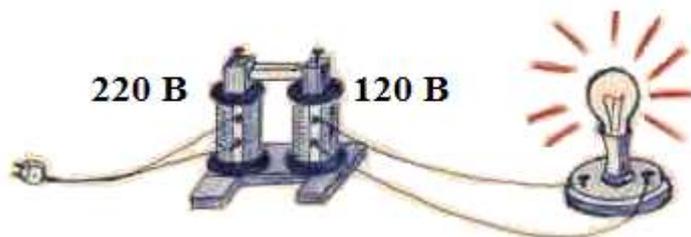
### 3.48. Трансформатор

**Приборы:** трансформатор школьный, лампа накаливания на 220 В на подставке, ЛАТР.

**Содержание опыта.** Трансформатор может работать как повышающий, так и понижающий напряжение.

**Опыт 1. Понижающий трансформатор.** К зажимам первичной катушки трансформатора (220 В) подсоединяют питание от сети 220 В., а к вторичной катушке (120 В) подсоединяют лампу накаливания, рассчитанную на 220 В. Лампа горит неярко, в полнакала.

**Опыт 2. Повышающий трансформатор.** Меняют местами лампу накаливания и входное питание. На вторичную катушку теперь подают 120 В с помощью ЛАТРа, а на первичной катушке получают напряжение 220 В. Лампа горит ярко, в полный накал.



**Опыт 3. Влияние сердечника на работу трансформатора.** В опыте 2 выдвигают из зажимов сердечник. При выдвигании сердечника яркость горения лампы уменьшается, при вдвижении – увеличивается.

*Замечание.* Перед демонстрацией снимают шунт, соединяющий катушки последовательно.

### 3.49. Увлечение проводника движущимся магнитным полем (опыт Араго)

**Приборы:** центробежная машина, подковообразный магнит, штатив с укрепленной пластиной стекла, медный диск с острием посередине, подставка с углублением, в которое вставляется ось медного диска.

**Опыт.** Постоянный подковообразный магнит укреплен на оси центробежной машины так, что ось вращения проходит через нейтральную линию магнита. Над магнитом на стеклянной пластине расположена подставка, в углубление которой вставляется острие медного диска.

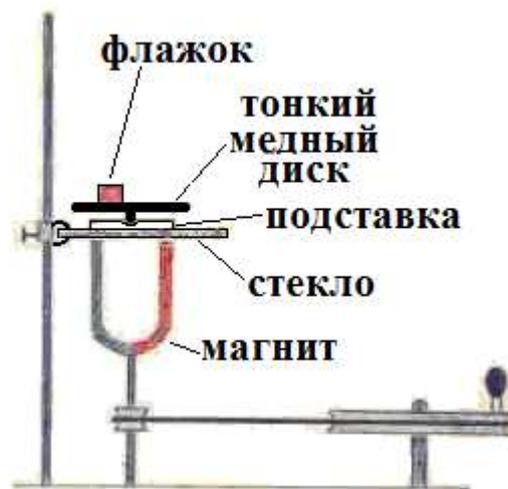
При вращении магнита медный диск поворачивается в сторону вращения.

**Объяснение опыта.** При вращении магнита в медном диске возникают индукционные вихревые токи. По закону Ленца они имеют такое направление, чтобы мешать причине своего возникновения.

Поэтому медный диск увлекается вращающимся магнитом за счет взаимодействия магнитного поля с вихревыми токами в диске.

Диск отделен от магнита стеклом, чтобы устранить воздушные потоки.

**Лектор добавляет:** этот опыт демонстрирует вращающееся магнитное поле и увлечение им ротора электродвигателя.



### 3.50. Вихревые токи в массивных проводниках (токи Фуко). Торможение колеблющегося маятника

**Приборы.** Электромагнит, мотор-генератор, набор маятников, стойка для маятников, алюминиевая пластина, выключатель, соединительные провода.

**Опыт.** 1. Демонстрируют пока не включенный электромагнит. Питание обмоток осуществляется через толстые медные провода очень большим постоянным током. Его получают с помощью мотор-генератора. В зазоре между полюсными наконечниками индукция магнитного поля  $B \approx 0,1$  Тл.

2. Имеется два маятника, изготовленных из толстой медной пластины. Один – сплошной, второй – с прорезями по всей длине (для демонстрации прорезей лектор вставляет в них лист белой бумаги). В маятнике с прорезями величина токов Фуко будет, естественно, меньшей, чем в сплошном маятнике.

3. Рядом с электромагнитом собирают стойку, в которую по очереди вставляют и закрепляют маятники. Плоскость качаний маятника **тщательно** регулируют так, чтобы маятник **не задевал** полюсные наконечники.

Вначале раскачивают маятник с разрезами между полюсами *не включенного электромагнита*. Маятник, приведенный в движение, колеблется с малым затуханием.

4. Затем включают ток *на короткое время* – 3 - 4 полных качаний маятника - (обмотки электромагнита питаются очень большим током, долго держать включенным нельзя!). Колебания маятника заметно тормозятся, он совершает несколько затухающих колебаний. Выключают ток.

5. Теперь очередь сплошного маятника. Меняют на подвесе маятник. Отводят его в сторону и отпускают. Снова на короткое время включают питание обмоток. Токи Фуко настолько большие, что колебания становятся аperiodическими – маятник подходит к положению равновесия и останавливается.

6. Демонстрируют пластину алюминия. Al – диамагнетик, слабомагнитный материал. Проводят несколько раз пластиной между полюсами отключенного магнита. Затем *на короткое время* включают магнит. Снова проводят пластиной между полюсами. Теперь движение пластины происходит так, как если бы она двигалась в очень вязкой среде.

Изловчившись, можно заставить пластину висеть в воздухе и вращаться между полюсами. Вызывают студента и просят его поводить пластиной при выключенном и включенном магните. Результат вызывает оживление в аудитории.

**Объяснение опыта.** Токи Фуко - индукционные токи, возникающие в сплошных массивных проводниках. Как и всякие индукционные токи, они направлены так, чтобы противодействовать причине, которая их вызвала. В данном случае такой причиной является колебание маятника в магнитном поле. Маятник с прорезями не сразу останавливается, а совершает несколько затухающих колебаний, так как из-за прорезей возникновение вихревых токов затруднено.

Когда алюминиевая проводящая пластина падает между полюсами магнита, за счет ее движения в ней возникают токи Фуко. По правилу Ленца токи направлены так, чтобы мешать причине, которая их вызвала. Т.е. амперовы силы будут тормозить падение пластины, и она зависает в воздухе.

#### **Указания для лекционного демонстратора.**

Мотор-генератор под столом в лекционной аудитории служит для получения постоянного тока из переменного. Он представляет собой электродвигатель, соединенный валом с электрическим генератором.

Мотор-генератор включается слева на большом демонстрационном столе в две розетки сразу (цифры 1,2,3 на вилке и на розетке) с помощью специальной трехштыревой колодки на конце провода, идущего от мотор - генератора.



Держать включенным электромагнит можно **не более 5-10 секунд.**

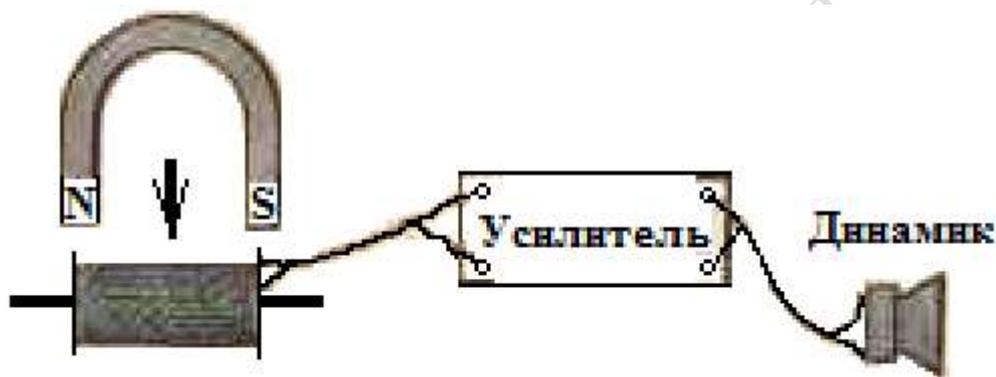
## *Магнитное поле в веществе*

### **3.51. Скачкообразное намагничивание. Эффект Баркгаузена**

**Приборы:** горизонтальная катушка на подставке, набор сердечников (пермаллоевый, никелевый, железный, медный, алюминиевый), усилительное устройство Трэмбита-101, звуковая колонка, постоянный подковообразный магнит.

**Теория и опыт.** При намагничивании ферромагнетика те домены, в которых направление магнитного момента энергетически выгодно, растут за счет соседей – тех доменов, в которых направления магнитных моментов не столь выгодно. Иными словами, происходит перестройка кристаллической решетки, перемещение границ доменов. Их можно услышать.

Для этого образец ферромагнетика (никелевый стерженек) закрепляют внутри проволочной катушки. Выводы катушки подают на усилитель, а с него - на динамик (см. рис.).



Подносят подковообразный постоянный магнит к катушке. По мере приближения магнита магнитное поле, действующее на стерженек, усиливается и начинается быстрый рост намагниченности никеля. В этот момент **в динамике слышны трески и шумы.**

Это подтверждает существование в ферромагнетике областей спонтанной намагниченности – доменов. Под действием магнитного поля происходит переориентация магнитных моментов доменов. Домены, магнитные моменты которых направлены вдоль внешнего поля, растут за счет соседних. Происходит смещение границ доменов. При движении граница между доменами задерживается на неоднородностях кристалла. При дальнейшем увеличении магнитного поля граница срывается и перемещается скачком. Это и определяет **скачкообразный характер намагниченности.**

Магнитный поток сквозь катушку, в которую вставлен ферромагнитный стерженек, изменяется также скачками, что вызывает появление в ней импульсов индукционного тока. Изменения тока в цепи катушки усиливаются и подаются на динамик. В динамике слышен звуковой сигнал в виде щелчка, от многих щелчков – треск, превращающийся в шум и даже в грохот.

Когда магнит приблизится почти вплотную к катушке, трески в динамике прекращаются. Стержень намагнитился до насыщения. Если теперь удалять магнит от катушки и двигать магнит поступательно, то щелчки в динамике не возникают или появляются, но более слабые. Это говорит об отсутствии изменений в намагниченности сердечника.

Удалив магнит на значительное расстояние, поворачивают его на  $180^\circ$  и снова приближают его к катушке. Грохот в динамике свидетельствует о перемагничивании сердечника катушки.

Возможен другой *вариант опыта*. Магнит приближают к катушке до исчезновения шумов, а затем медленно вращают его в руке. Грохот в динамике вызван лавинным перемагничиванием сердечника.

Опыт повторяют с железным стержнем (гвоздем). Шумы в динамике также возникают, но меньшие.

Если теперь заменить сердечник катушки рулончиком пермаллоя, то множество импульсов сливается в шум, похожий на шум морского прибора.

**Пермаллой** — сплав с магнитно-мягкими свойствами, состоящий из железа и никеля (45—82 % Ni).. Сплав обладает высокой магнитной проницаемостью ( $\mu \sim 100\,000$ ) и малой коэрцитивной силой (легко перемагничивается). В тонких плёнках поле, необходимое для поворота намагниченности, достаточно малое.

В заключение в катушку вставляют стерженьки Al или Cu - треска в динамике слышно не будет. Это говорит о том, что у диа (Cu) - и пара (Al) – магнетиков домены отсутствуют.

**Указания для лекционного демонстратора.**

Панель усилителя кнопки «ФНЧ», включены. Кнопки «вкл» «3» Ручка «Уровень» «3»

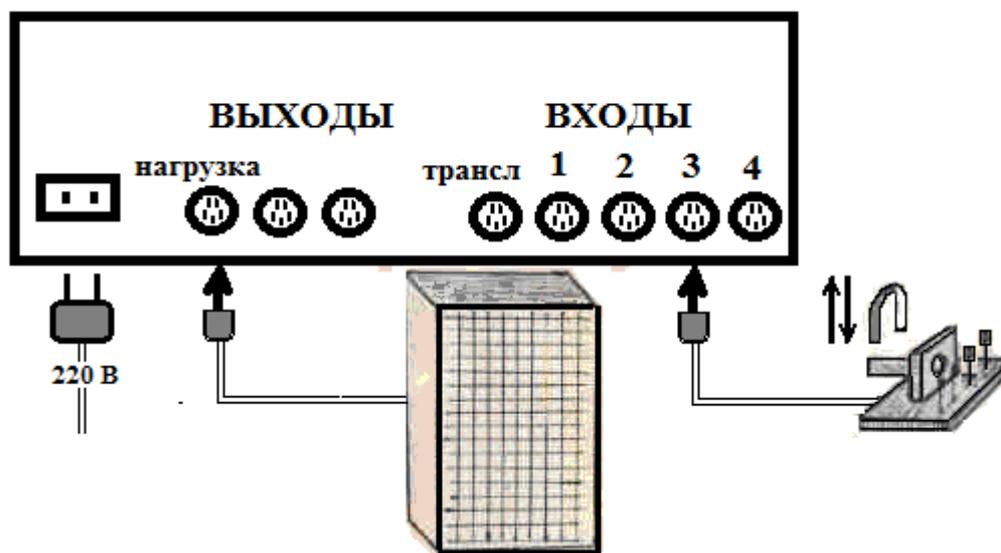


Задняя панель усилителя: кнопки «тембр», «ФВЧ» (нажаты). Кнопка «Входы» нажата. Ручка «уровень» повернута

до совмещения белых меток.

Ручки «низкая», «высокая», «громкость» повернуты до максимального значения – т.е. вправо по часовой стрелке до упора.

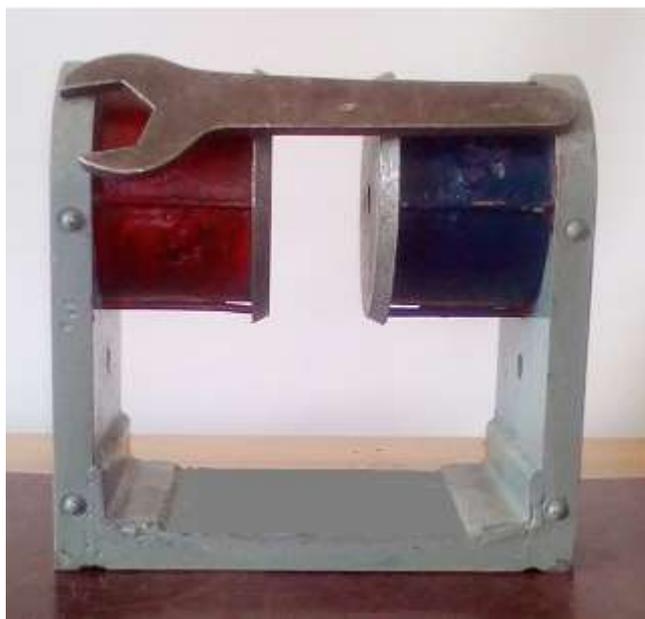
**Задняя панель усилителя.**



3.52.

Де-

**монстрация постоянного магнита ( $B \sim 0,01$  Тл), к которому подносят железный ключ**

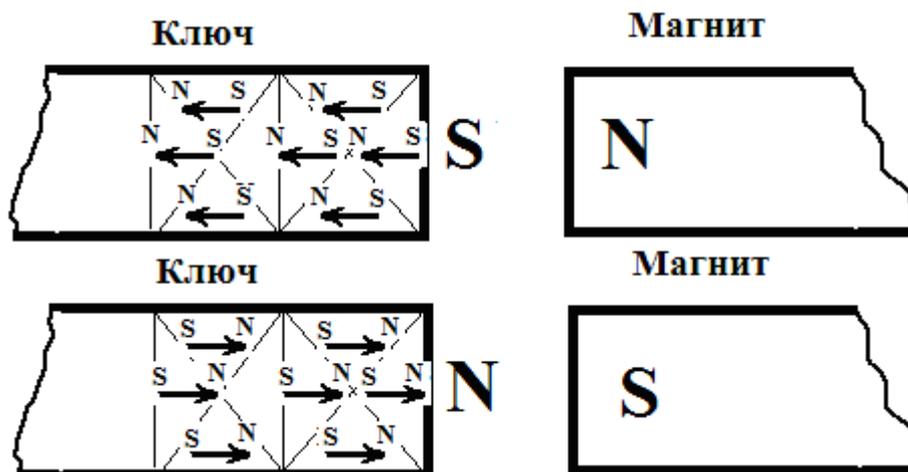


**Приборы:** уникальный постоянный магнит, железный ключ.

**Опыт.** Намагничивание железа таково, что железный *ключ всегда при-*

*тягивается к любому полюсу магнита* – N (синему) или S (красному). Если провести ключом между полюсами магнита – он обязательно притянется к тому полюсу, к которому находится ближе.

**Объяснение опыта.** При поднесении ключа к N – полюсу магнита в железе происходит смещение границ, рост доменов и вращение магнитных моментов вдоль энергетически выгодных направлений (так, чтобы их потенциальная энергия была бы минимальной), т.е. на ближнем конце ключа возникает S-полюс (см. рис.). Ключ притягивается. И наоборот (см. второй рис.). Ключ тоже притягивается.



### 3.53. Петля гистерезиса на электронном осциллографе

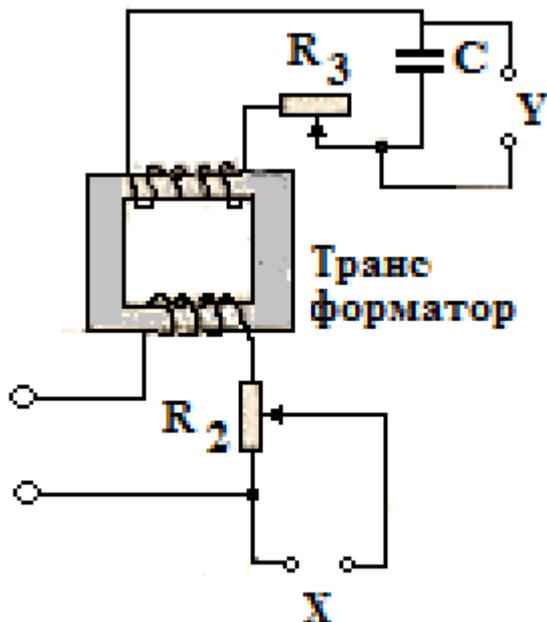
**Приборы:** осциллограф С1-1, реостаты на 4300 Ом и 40 Ом, ЛАТР, конденсатор 10 мкФ, универсальный школьный трансформатор 1:2 (120 x 220).

Существует два способа демонстрации петли гистерезиса на осциллографе: 1) метод магнитных смещающих полей и 2) метод электрических смещений.

Здесь используется *метод электрических смещающих полей*.

**Суть опыта.** Необходимо вызвать отклонение электронного луча осциллографа в двух взаимно перпендикулярных электрических полях. Первое отклонение должно быть пропорционально *напряженности* магнитного поля, намагничивающего ферромагнетик, а второе – пропорционально его *индукции*.

В этом случае результирующее отклонение электронного луча будет соответствовать кривой изменения индукции в ферромагнетике при изменении напряженности намагничивающего его магнитного поля, т.е. петле гистерезиса.



**Опыт.** Трансформатор с отношением витков 1:2 включают в сеть. В первичную цепь трансформатора включают сопротивление  $R_2$ .

На концах сопротивления  $R_2$  возникает переменная ЭДС, величина которой пропорциональна напряженности магнитного поля, намагничивающего сердечник.

Эту ЭДС подают на пластины осциллографа, вызывающие горизонтальное отклонение электронного луча (X).

Вторичную обмотку трансформатора замыкают через сопротивление  $R_3$  и емкость  $C$ . Переменное напряжение,

возникающее на конденсаторе  $C$ , подают на вертикально отклоняющие пластины осциллографа (Y). Если реактивное сопротивление конденсатора много меньше сопротивления  $R_3$ , то переменное напряжение на конденсаторе будет пропорционально изменению индукции в сердечнике трансформатора.

В результате светящаяся точка на экране рисует петлю гистерезиса.

Подбирают такие параметры работы осциллографа, чтобы на экране хорошо был виден участок петли гистерезиса, соответствующий полям насыщения.

Ручки управления на осциллографе С1-1 находятся в следующих положениях:

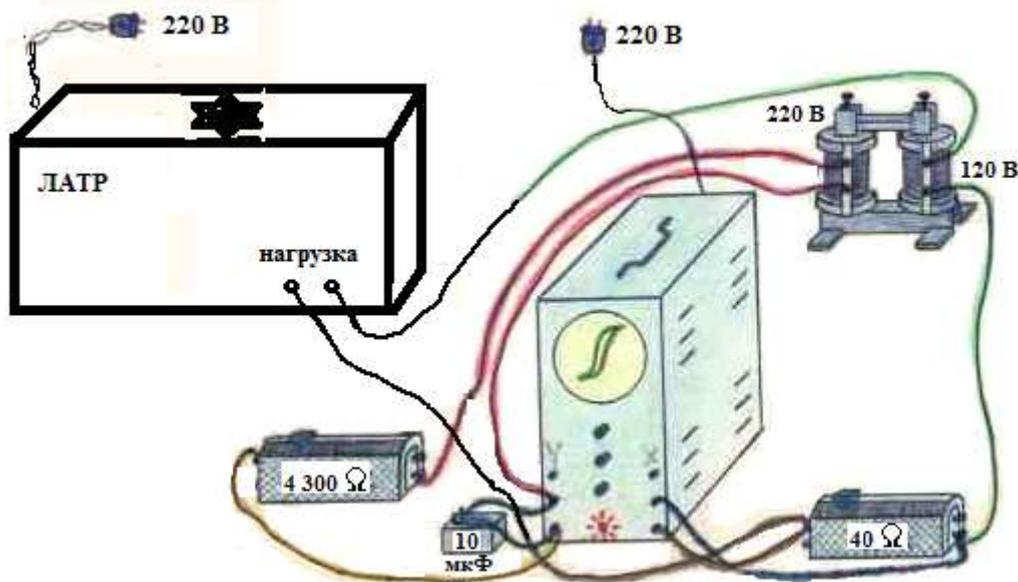
Диапазон частот – выкл.

Синхронизация – внутренняя.

Ослабление по оси Y: 1:100

Усиление: по X - 1, по Y – 0,4.

Амплитуда синхронизации за 10



**Объяснение опыта** см., например, [1].

### 3.54. Точка Кюри ферромагнетика

**Приборы.** Никелевый стерженек, подвешенный на штативе на металлической нити. Катушка с выступающим железным сердечником. Спиртовка. Экран.

**Опыт.** Опыт иллюстрирует явление перехода ферромагнетика в парамагнитное состояние при некоторой температуре, которая называется точкой Кюри. Для железа эта температура  $769^\circ$ , для никеля  $355^\circ\text{C}$ .

Вблизи подвешенного стерженька на расстоянии 2-3 см располагается сердечник электромагнита. При включении постоянного тока в обмотку электромагнита стерженек намагничивается и притягивается к магниту. Затем подносят зажженную горелку так, чтобы образец оказался в наиболее горячей части пламени. При достижении точки Кюри, стерженек потеряет ферромагнитные свойства, превратится в парамагнетик и отпадет от полюса электромагнита.

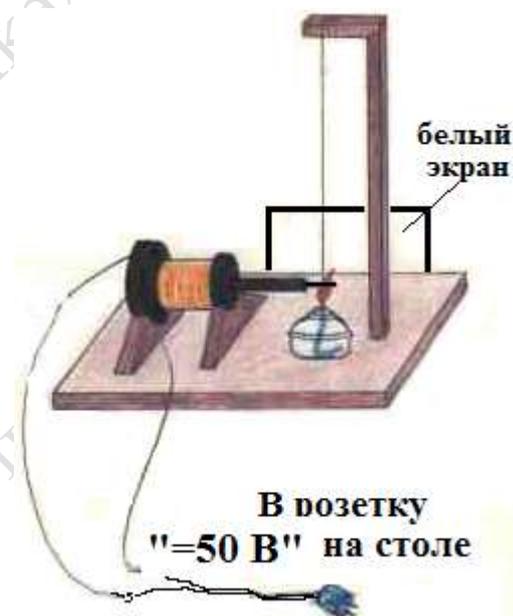
Если прекратить нагрев и дать образцу остыть, он снова станет ферромагнитным и притянется к полюсу электромагнита.

**Замечание.** Спиртовка заменяется таблетками сухого спирта. Чтобы всем было лучше видно, как отходит стерженек от полюса электромагнита, сзади подставляют белый экран.

Подвес осуществляется металлической проволокой, чтобы он не сгорел в пламени.

Напряжение **10 В** от выпрямителя КЭФ -8 подается на розетку «=50 В».

**Объяснение опыта.** С повышением температуры вследствие тепловых колебаний атомов параллельность их магнитных моментов нарушается и при некоторой температуре, которая называется **точкой Кюри**, домены исчезают - ферромагнетик переходит в парамагнитное состояние, а его магнитная восприимчивость уменьшается на 8 - 9 порядков. После остывания образца в нём вновь формируются домены, он опять становится ферромагнитным.



### 3.55. Намагничивание железного стержня ударом в магнитном поле Земли



**Приборы:** железный стержень, молоток, стрелка магнитная.

**Опыт.** Подносим к магнитной стрелке железный стержень. Стрелка притягивается к любому концу стержня (объяснение дано в опыте 3.52 с большим магнитом).

Далее располагаем стержень в магнитном поле Земли в плоскости магнитного меридиана (используя показания стрелки компаса). Держа стержень за середину левой рукой, совершаем правой рукой несколько сильных ударов в один из его торцов молотком.

Чтобы убедиться, что стержень намагнитился, подносим его концы по очереди к магнитной стрелке. Север от севера отталкивается, север к югу притягивается. (В случае не намагниченого стержня оба его конца будут притягиваться).

Причина намагничивания – облегчение поворота доменов во время удара в магнитном поле Земли.

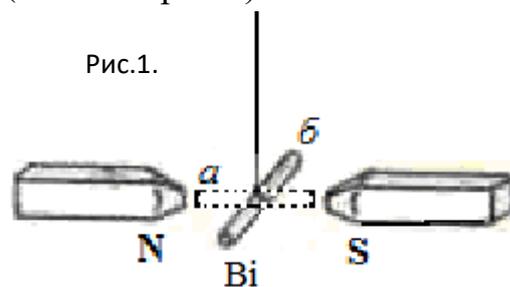
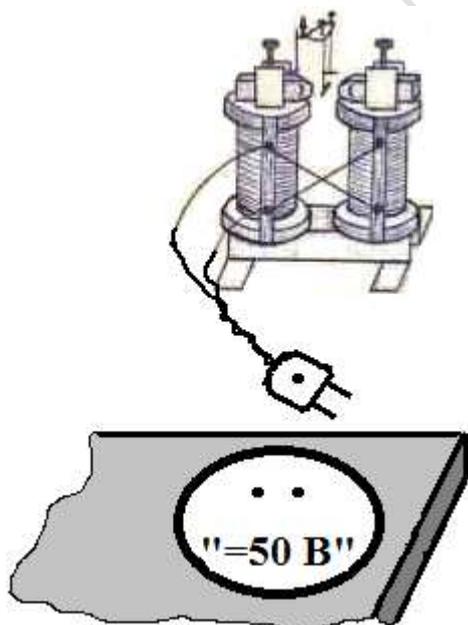
### 3.56. Свойства диа- и пара- магнетиков

**Приборы.** Осветитель «Свитель Авто», проекционный объектив, поворотная призма, разборный трансформатор с вынутой верхней частью сердечника, обмотки которого соединены как у электромагнита, 2 полюсных сердечника - наконечника, штатив с тонкими нитями подвеса, образцы диа- и парамагнетиков, набор деревянных подставок.

**Опыт.** Между полюсами электромагнита по очереди располагаются образцы (маленькие стерженьки, подвешенные на упругих нитях) диа (висмут  $Bi$ ) и пара - (магний  $Mg$ ) магнетиков. Поскольку наблюдается поведение слабомагнитных тел, все тела имеют микроскопические размеры и картина проектируется на большой экран аудитории.

**Подготовка опыта.** В демонстрационной аудитории на выпрямителе КЭФ -8 устанавливается **40 В**.

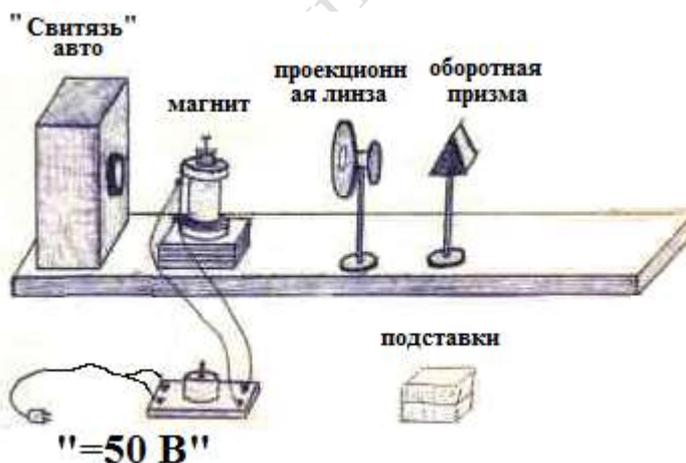
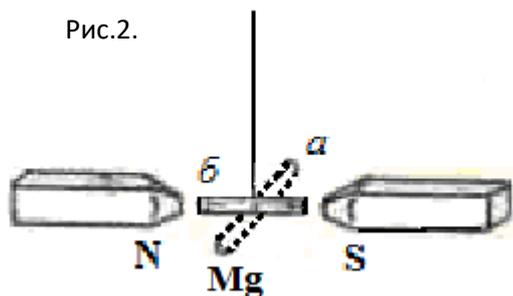
**Первый опыт** – поведение *диамагнетика*. Цилиндр **висмута** располагается демонстратором *вдоль поля* (поз. *a* на рис.1). Затем включается питание электромагнита и создается магнитное поле между коническими полюс-



ными наконечниками. Образец висмута поворачивается на нити подвеса и устанавливается поперек поля (б). Тем самым демонстрируется выталкивание диамагнетика из внешнего поля. Выключают ток – и образец поворачивается в исходное положение.

**Второй опыт** - поведение *парамагнетика*. Цилиндрик **магния** располагается демонстратором *поперек поля* (поз. *a* на рис.2). Затем включается внешнее магнитное поле между коническими полюсными наконечниками. Образец магния поворачивается на нити подвеса и устанавливается вдоль поля (б) и, более того, притягивается к ближайшему к нему полюсу магнита. Тем самым демонстрируется втягивание парамагнетика в область внешнего поля.

*Примечания.* При опущенном поперечном демонстрационном столе магнит устанавливают на 2 больших, 1 малую подставки., проекционный объектив - на среднюю, оборотную призму – на 2 средних, 1 малую подставку.



## Часть 4

# КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

*Механические колебания и волны*

## **4.1. Гармонические колебания. Движение тени от вращающегося шарика**

**Приборы.** На приставном демонстрационном столе выставляется центробежная машина, на малом диске которой закреплен коленчатый держатель с шариком на конце (см. рис. 1). Проекционный фонарь. Заслонка. Экран.

**Опыт.** Освещают шарик проекционным осветителем (например, диапроектором «Свитель-Авто») так, чтобы тень от шарика попадала на экран. Поднимая или опуская заслонку, избегают попадания на экран ненужных проекций крепления шарика и центробежной машины. Медленно вращая ручку центробежной

машины, наблюдают на экране возвратно-поступательные движения – гармонические колебания - шарика вдоль горизонтальной прямой.

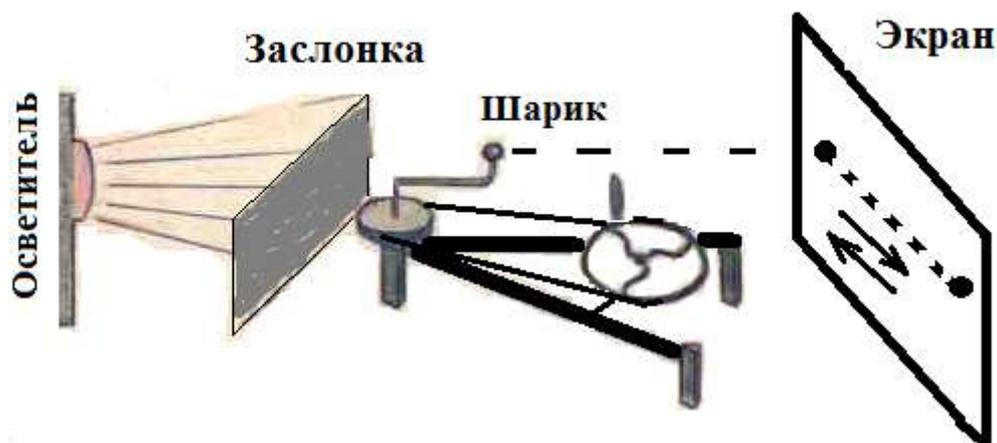


Рис.1.

**Объяснение опыта.** На рис. 2 приведен вид сверху на эту установку. Шарик, обозначенный буквой  $K$ , находится на конце радиуса  $OK$ . Будем вращать радиус  $OK$  с угловой скоростью  $\omega_0$  против часовой стрелки и проследим за движением тени от шарика  $K'$  на экране. Если в начальный момент времени радиус  $OK$  был перпендикулярен экрану, то тень от шарика находилась в центре экрана в точке  $O'$ . Через время  $t$  радиус повернется на угол  $\omega_0 t$ . Если же начальный угол отличен от нуля и равен  $\alpha$ , то угол поворота будет равен  $\omega_0 t + \alpha$ . Обозначим длину радиуса через  $A$ . Тогда проекция радиуса  $OK$  на ось  $O'x$  равна

$$x = O'K' = A \sin (\omega_0 t + \alpha).$$

Здесь через  $x$  мы обозначили *отклонение (смещение)* точки  $K'$  от положения равновесия  $O'$ .

По мере вращения радиуса  $OK$  изменяется величина проекции, и точка  $K'$  будет совершать гармонические колебания относительно точки  $O'$ - влево, вправо и т.д. За один оборот точки  $K$  по окружности ее проекция совершит одно полное колебание и вернется в исходную точку.

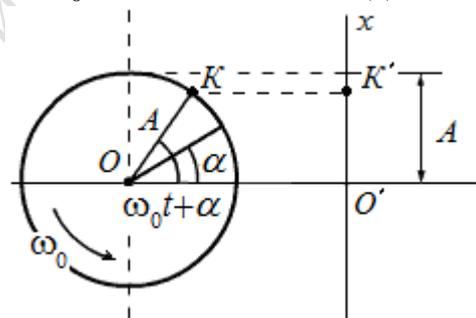


Рис. 2.

## 4.2. Механическая запись колебаний

**Приборы.** Запись колебаний ветви камертона на бумаге производится с помощью прибора, изображенного на фото. Наклонная плоскость, угол наклона которой регулируется. Тележка, съезжающая на колесах по рельсам с наклонной плоскости. Камертон, закрепленный на вершине наклонной плоскости ветвями параллельно наклонной плоскости. К одной ножке камертона прикреплен пишущий узел. Молоточек. Лист бумаги.

**Опыт.** Укрепляют бумагу на тележке. Поднимают тележку на вершину наклонной плоскости и фиксируют ее положение специальной защелкой. Ударом молоточка заставляют камертон звучать.

Вначале записывают след ветви камертона при неподвижной тележке. Получают на бумаге прямую линию.

Затем снова заставляют звучать камертон. Нажимают пусковую кнопку, и тележка съезжает с наклонной плоскости под ветвями камертона.

Пишущий узел оставляет на бумаге, лежащей на тележке, **след в виде синусоиды**. Степень растянутости синусоиды меняется от начала движения до его конца.

**Объяснение опыта.** При движении тележки пишущий узел будет пересекать прямую линию, параллельную наклонной плоскости, через одинаковые промежутки времени, равные половине периода. Так как тележка движется с ускорением, путь, проходимый за равные промежутки времени, растет. Синусоида растягивается по мере спуска тележки.



### 4.3. Маятник пружинный

**Приборы:** штатив универсальный, набор пружин и грузов, секундомер.

**Опыт.** Вертикальные упругие колебания демонстрируют, наблюдая зависимость периода колебаний от массы груза и жесткости пружины. Жесткость изменяют, используя разные пружины, а массу – различное число грузов. Период колебаний регистрируют качественно, либо по секундомеру.



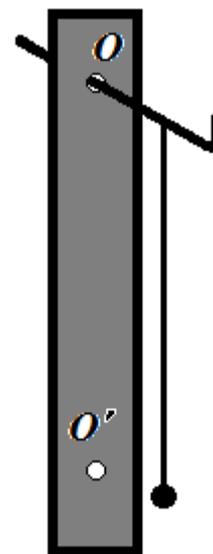
Используются варианты:

1. Одинаковые массы, разные пружины (жесткости). Отмечают разные частоты.
2. Одинаковые жесткости, разные массы. Частоты разные.
3. Одинаковые массы, одинаковые жесткости, одинаковые частоты.
4. Соединение последовательное пружинных маятников. Масса та же, а период становится меньше. Следовательно, согласно  $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$  жесткости двух последовательно соединенных пружин складываются.

#### 4.4. Физический маятник

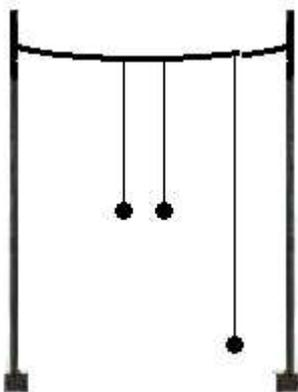
**Приборы:** Доска, на которой отмечены точка подвеса  $O$  и центр качания  $O'$ . Математический маятник. Секундомер.

**Опыт.** Подвешивают доску в точке  $O$  на крюк, вбитый рядом с аудиторной доской, затем снимают, переворачивают и подвешивают в точке  $O'$ . С помощью секундомера убеждаются, что периоды колебаний в обоих случаях одинаковы. Расстояние  $OO'$  – приведенная длина физического маятника. Рядом на том же стержне, вбитом в аудиторную доску, подвешивают математический маятник с длиной нити, равной приведенной длине. Оба маятника качаются синхронно.



#### 4.5. Связанные маятники

**Приборы.** Между двумя вертикальными металлическими стойками натянута тонкая веревка. К ней подвешено 2 маятника одинаковой длины и один с более длинной нитью подвеса.



**Опыт.** Вначале отклоняют один из двух одинаковых маятников. Он возбуждает колебания такого же маятника, второй маятник постепенно раскачивается. Амплитуда колебаний первого маятника уменьшается и, наконец, первый маятник перестает колебаться, а колеблется только второй. После этого картина повторяется в обратном порядке. Длинный маятник при этом едва раскачивается.

Затем отклоняют сразу два одинаковых маятника. Вскоре начнет колебаться длинный маятник. Длинный маятник периодически останавливается и снова раскачивается.

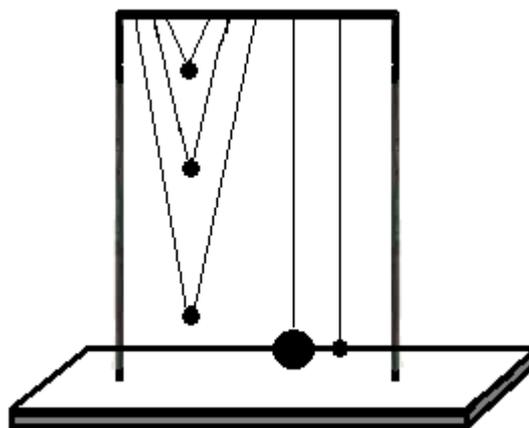
А два одинаковых маятника качаются без остановки.

**Объяснение опыта.** Маятники могут обмениваться энергией («связанные системы»). Происходит «перекачка» энергии от одного маятника к другому. Взаимодействие маятников осуществляется через их подвес и натянутую веревку. Оно носит резонансный характер. Откликается второй маятник той же длины, имеющий ту же собственную частоту колебаний.

**Приборы.** На деревянной стойке подвешены маятники: два маятника одинаковой длины, но разных масс; три маятника одинаковой массы, но разных длин.

**Опыт.** Убеждаются, что математические маятники одинаковой длины, независимо от массы шариков, колеблются синхронно. Останавливают маятники.

Выводят маятник большой массы из положения равновесия. Колебания этого маятника передадутся стойке, которая будет действовать на другие маятники с частотой, равной частоте маятника большой массы. Раскачиваться будет только маятник, длина которого равна длине маятника с большой массой. Он находится в резонансе. Остальные маятники будут раскачиваться с очень малой амплитудой. Их частоты далеки от резонансной.



#### 4.6. Вынужденные колебания. Резонанс на пружинном маятнике

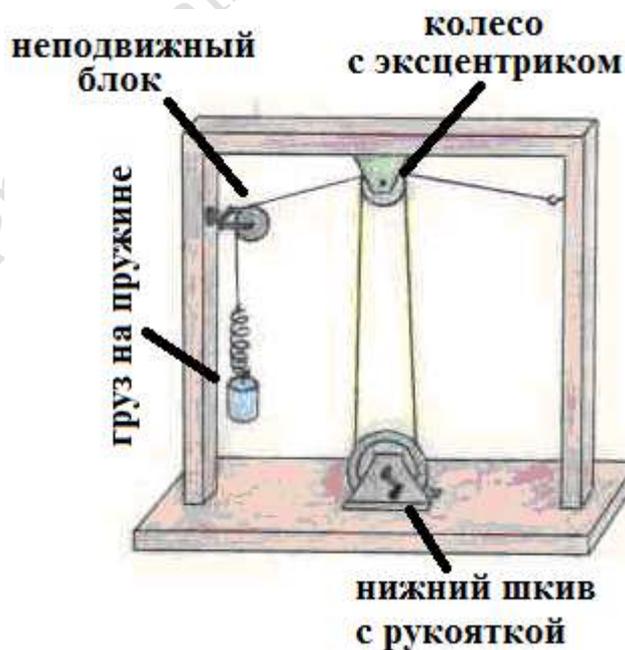
**Приборы.** Специальная установка с эксцентрической передачей. Груз на пружине. Эксцентриком служит штифт, укрепленный на верхнем колесике веревочной передачи на расстоянии половины радиуса от центра колесика. При вращении колесика штифт-эксцентрик (буквально – «прибитый не по центру») периодически поднимает горизонтальную нить, воздействуя на точку подвеса пружинного маятника.

**Опыт.** Вначале лектор поясняет устройство экспериментальной установки.

Зажимая пальцем одной руки нить на неподвижном блоке, отводят другой рукой вниз от положения равновесия пружинный маятник, отпускают его и вслух считают частоту колебаний.

Затем говорят: «Если с такой же частотой подталкивать точку закрепления этого маятника, может наступить резонанс. Это можно сделать с помощью веревочной передачи с эксцентриком».

Демонстратор начинает вращать эксцентрик **очень медленно**, призывая всех



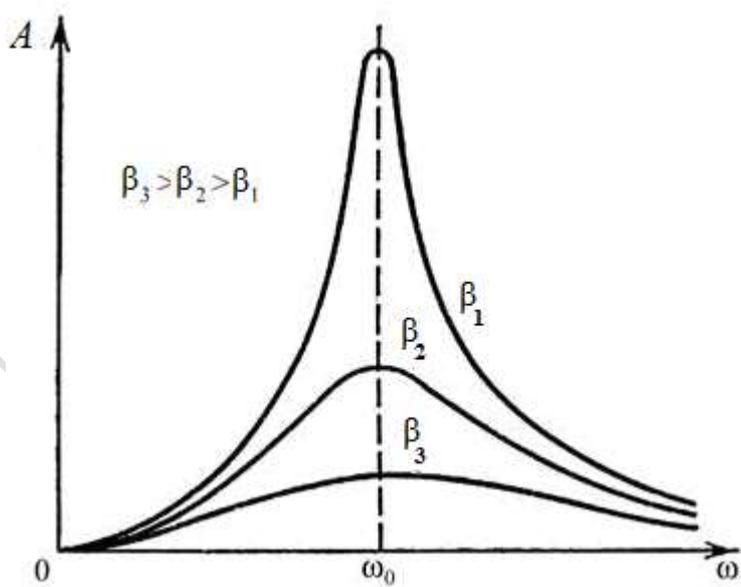
наблюдать за поведением пружинного маятника. Маятник практически не реагирует на толчки.

Затем наоборот, вращают нижний шкив **очень быстро**. Эффект тот же.

Наконец «ловят» нужную частоту подталкивания. Пружинный маятник сильно раскачивается, груз может сорваться с грохотом – наступает резонанс. *Полезный совет.* Перед опытом слегка смачивается нить передачи с эксцентриком.

### Объяснение опыта.

Резкое увеличение амплитуды вынужденных колебаний при приближении частоты  $\omega$  вынуждающей силы к собственной частоте  $\omega_0$  осциллятора называется **резонансом**. Как видно из хода резонансной кривой отклик колебательной системы на периодическое внешнее воздействие достаточно малый для частот  $\omega < \omega_0$  и  $\omega > \omega_0$ . Отклик резко возрастает при  $\omega \rightarrow \omega_0$ .



## 4.7. Механический резонанс.

### Резонатор Фрама

**Приборы:** резонатор Фрама; кодоскоп; экран.

Основным элементом резонатора Фрама является массивный металлический диск на оси, закрепленный в металлическом кольце так, что он может вращаться внутри кольца.

На краю диска просверлено отверстие. Это приводит при его вращении к вибрациям с частотой, совпадающей с частотой вращения диска.

На кольце установлена обойма отдельных резонаторов в виде пластинчатых пружин различной длины (см. рис).

**Опыт.** Гирискоскоп приводят во вращение с помощью тонкого капронового шнура. Для этого один конец шнура вставляют в отверстие, которое имеется в оси гирискоскопа, и наматывают шнур на



ось. Обхватив левой рукой кольцо так, чтобы диск не касался ладони, правой резко выдергивают шнур за его свободный конец.

С помощью проекционного аппарата наблюдают в теневой проекции на экране, как резонируют те или иные пластинки. Когда пластинка резонирует, её изображение становится размытым.

**Объяснение опыта.** После достижения максимальной угловой скорости вращения начинается постепенное торможение диска.

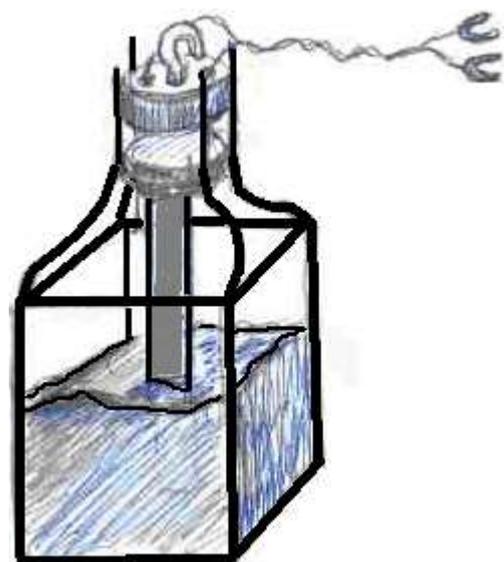
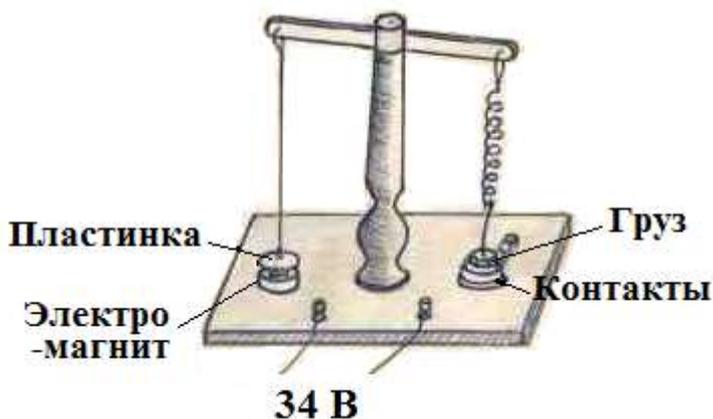
При совпадении собственных частот колебаний пластинок с частотой возмущающих сил от несбалансированного диска отдельные резонаторы- пластинки начинают интенсивно колебаться. По мере снижения угловой скорости вращения последовательно фиксируются моменты резонанса отдельных пластинок.

#### 4.8. Автоколебания (коромысло)

**Приборы:** коромысло, на одном плече которого находится груз на пружине, замыкающий контакты. На другом конце подвешена круглая железная пластинка, притягиваемая к сердечнику электромагнита. От выпрямителя КЭФ устанавливают постоянное напряжение 34 В.

**Опыт.** Под действием груза контакты замкнуты. При прохождении тока сердечник электромагнита намагничивается, пластинка притягивается к нему, поворачивая коромысло и разрывая контакты. Ток исчезает и все повторяется сначала. В итоге груз и пластинка совершают незатухающие колебания.

**Объяснение опыта.** Незатухающие колебания, при которых убыль энергии автоматически пополняется из какого-либо источника энергии, называются *автоколебаниями*. В данном опыте система работает за счет энергии источника постоянного тока. В частности, опыт демонстрирует принцип действия электрического звонка.



**Примечание.** Во избежание залипания электромагнита между пластинкой и сердечником электромагнита лучше проложить круглый листок бумаги.

#### 4.9. Автоколебания. Забивка свай

**Приборы.** В стеклянный четырехгранный сосуд насыпан песок. В песок вертикально входит так называемая «свая». Свая заканчивается

наверху железной площадкой. Сверху на эту площадку опускается электромагнит.

**Опыт.** Обмотку электромагнита соединяют с выходом ЛАТРа. На выходе устанавливают 25-30 В. Если через обмотку электромагнита пропускать переменный ток, то железная площадка «сваи» будет периодически притягиваться к сердечнику электромагнита и поэтому будет вибрировать. За счет таких вибраций под действием веса электромагнита «свая» постепенно заходит в грунт.

#### 4.10. Двойной маятник (маятник Айри). Сложение 2-х взаимно перпендикулярных колебаний

**Приборы.** Двойной маятник. Воронка. Стакан с просеянным песком. Картонка, обтянутая темным сукном.

Верхняя часть двойного маятника благодаря двум подвесам может колебаться только в плоскости, перпендикулярной стойкам прибора (Демонстратор показывает, как будет колебаться маятник).

Нижняя часть, благодаря перетяжке, может колебаться как перпендикулярно стойкам, так и параллельно им. (Демонстратор придерживает на месте перетяжку и показывает возможные движения нижней части маятника). Нижняя часть имеет меньшую длину. Следовательно, частоты обоих колебаний разные.

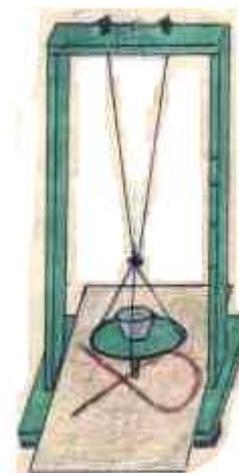
**Опыт.** Если пускать маятник из угла площадки (картонки, обтянутой черным сукном) между стойками, то будут осуществляться и те, и другие колебания одновременно. Струйка песка, вытекающая из воронки, будет рисовать траекторию результирующего колебания.

Траектории называются фигурами Лиссажу (показывают заготовленную заранее фигуру, нарисованную струей песка на черном фоне при отношении частот 2:3).

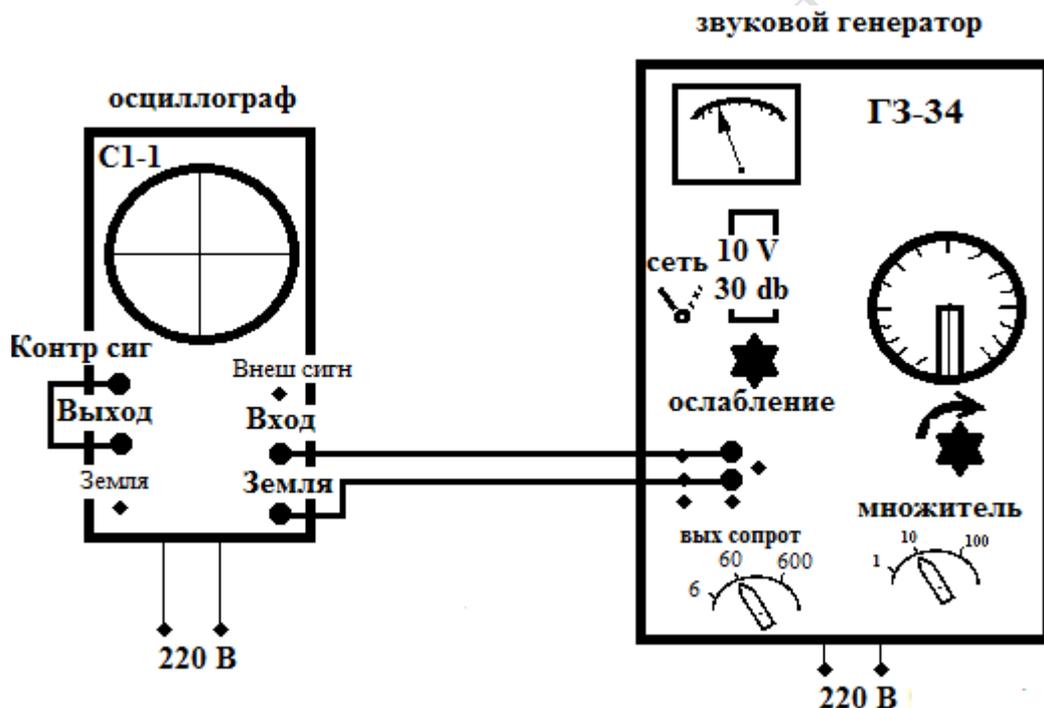
Если отношение частот есть рациональное число, фигура замкнута. Стряхивают и собирают песок, ударяя торцом площадки по листу ватмана. Песок просеян и очень мелкий, его следует тщательно собрать. Таким образом, площадка очищена для нового рисунка. Устанавливают другое соотношение частот, изменяя положение перетяжки (на стойке отмечено, где должна быть перетяжка для разных соотношений частот) и пускают из угла площадки между стойками воронку. Новый рисунок показывают аудитории.

**Указание.** Чтобы картина, получаемая на площадке, не смазывалась при повторном ходе маятника, следует насыпать в воронку количество песка, необходимое только для одного цикла движения.

**Объяснение опыта** см., например, [1].



#### 4.11. Фигуры Лиссажу на экране осциллографа



**Приборы.** Генератор ГЗ-34. Осциллограф С1-1. Соединительные провода.

**Опыт.** Складываются электрические взаимно перпендикулярные колебания. На вертикально (по оси Y) отклоняющие пластины осциллографа подаются синусоидальные колебания звуковой частоты от генератора стандартных сигналов ГЗ-34.

На горизонтально (по оси X) отклоняющие пластины подается контрольный синусоидальный сигнал с самого осциллографа частотой 50 Гц. Таким образом, частота колебаний по оси X всегда 50 Гц, а по оси Y целенаправленно изменяется в опыте.

*Ручки управления* приборов находятся в следующих положениях.

**На осциллографе С1-1:**

Диапазон частот – выкл.

Синхронизация – внутренняя.

Ослабление - 1:100

Усиление :по X -2, по Y – 6,5.

**На звуковом генераторе ГЗ-34:**

Шкала прибора x2,

Множитель x1,

Вых сопротивл -600,

Расстройка – 0,

Регулировка выхода 0,6 (по шкале слева),

Пределы шкал Ослабление 10 V, 30 dB

При изменении частоты генератора электронный луч выписывает на экране осциллографа различные фигуры Лиссажу.

При подаче от звукового генератора сигнала частотой 50 Гц, соотношение частот складываемых взаимно перпендикулярных сигналов составляет 1:1, траек-

тория – эллипс, окружность, прямая. Превращения этих фигур друг в друга объясняется тем, что частоты складываемых колебаний могут очень незначительно отличаться. Тогда разность фаз складываемых колебаний не будет оставаться постоянной, а будет непрерывно очень незначительно изменяться в пределах от 0 до  $2\pi$ . При этом эллипс вырождается в прямую, окружность, снова в прямую и т.д.

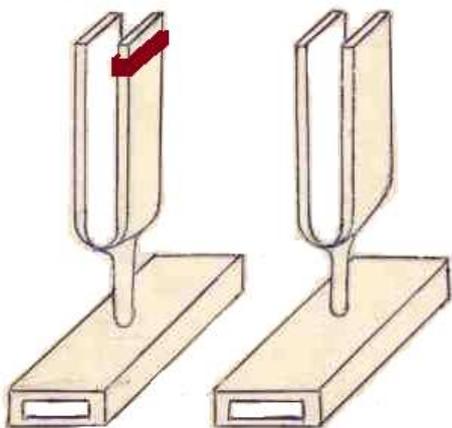
Далее, соответственно: при подаче сигнала частотой 100 Гц соотношение частот становится равным 1:2, 150 Гц – 1:3, 75 Гц – 2:3, 25 Гц – 2:1, 16,7 Гц – 3:1, 33,3 Гц – 3:2, 66,7 Гц – 3:4, 37,5 Гц – 4:3 и т.д.

## 4.12. Камертоны. Сложение колебаний. Биения

**Приборы:** два одинаковых камертона, молоточек с резиновой прокладкой.

**Опыт.** Молоточком ударяют по каждому камертону в отдельности. Они звучат мелодично и одинаково. Сообщают аудитории: так звучит нота «до» первой октавы. Частота 256 Гц.

1. Можно показать передачу энергии акустической волной и акустический резонанс. Для этого резонаторные ящики направляют навстречу друг другу отверстиями, на небольшом расстоянии. Ударяют по одному камертону. Затем ладонью гасят колебания того камертона, по которому ударили. Слышно, как звучит второй. Чтобы убедиться в этом, гасят, накрывая ладонью, и второй. Звук явно исчезает.



2. Теперь демонстрируют биения. На ножку одного камертона одевают перегрузок. Это дополнительная масса, которая уменьшает частоту колебаний ( $\nu = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ). Снова заставляют звучать оба камертона. Теперь частоты камертонов слегка отличаются. При сложении получается звуковая волна с модулированной амплитудой. Возникают биения. Частота биений – это разность частот складываемых колебаний.

Опыт повторяют несколько раз, начинают с положения «насадка внизу», каждый раз передвигая насадку снизу вверх на некоторое расстояние. Когда насадка окажется примерно в середине ножки камертона, биения становятся отчетливо слышными.

## 4.13. Образование бегущего волнового импульса на резиновом шланге. Стоячие волны на резиновом шланге

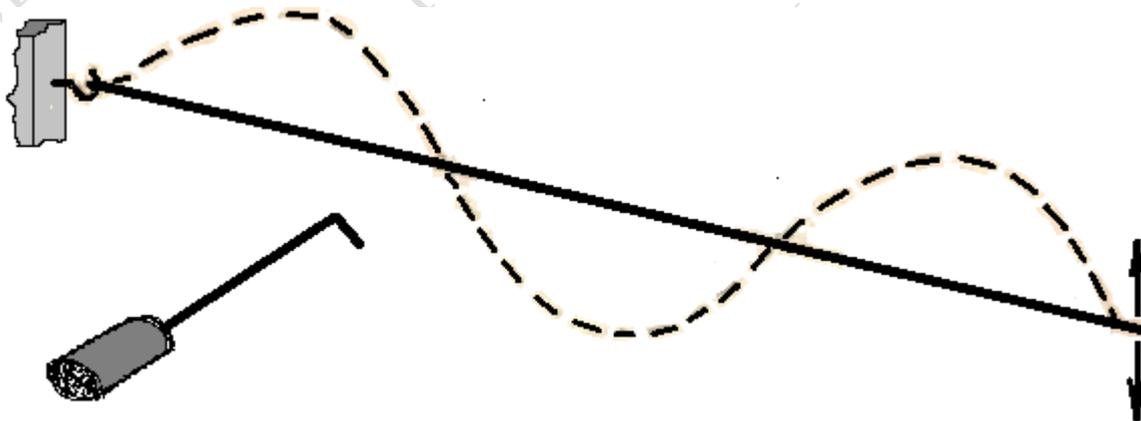
**Приборы:** резиновый шнур длиной 4 – 6 м, анкерный крючок, заделанный в лутку входной двери в аудиторию, железный стержень с деревянной ручкой, которым опускают доску в аудитории.

**Опыт.** Шнур, привязанный одним концом к крючку, позволяет продемонстрировать отдельный поперечный импульс, бегущий по шнуру, отражение импульса, а также стоячую волну.

Для получения *отдельного импульса* шнур слегка натягивают одной рукой и резко ударяют один раз по нему металлическим стержнем (например, крючком для опускания доски) рядом с держащей его рукой. От места удара бежит упругий импульс. От закрепленного на двери конца шнура бежит отраженный импульс. Лектор обращает внимание на потерю полволны при отражении, т.е. отставание отраженной волны от бегущей по фазе на  $180^\circ$ .

Для получения *стоячей волны* демонстратор берет шнур за непривязанный конец, слегка натягивает и приводит в колебание в вертикальной плоскости, слегка подкручивая, как детскую скакалку. Меняя частоту колебаний руки и натяжение шнура, можно получать разные стоячие волны – с одной пучностью посередине «скакалки», с одним или двумя узлами между рукой и крючком в двери и т.д.

В опыте наглядно показана связь между длиной волны и частотой колебаний.



#### 4.14. Волны на поверхности воды. Наблюдение интерференции волн от двух когерентных источников

**Приборы.** Установка для изучения волновых явлений на поверхности воды. Экран.



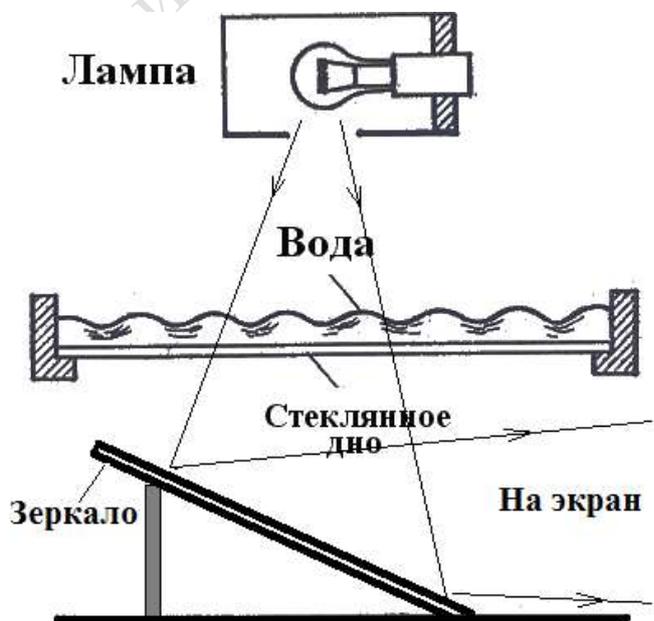
### **Опыт.**

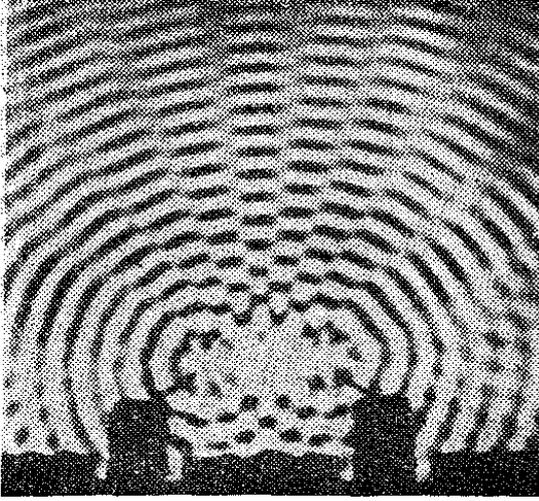
Наливают воду в плоскую ванночку (кювету) с прозрачным стеклянным дном. Закрепляют на кончике двигателя насадку с двумя стерженьками, которые будут одновременно касаться поверхности воды.

Таким образом, через каждую точку поверхности воды будут проходить волны от двух когерентных источников.

Освещают эти волны лампой, расположенной сверху над кюветой. Свет, проходя толщу воды, попадает на зеркало, расположенное снизу под кюветой, а от него на экран. На экране возникает теневая движущаяся картина волн.

**Объяснение опыта.** Картину бегущих волн можно сделать *застывшей*, неподвижной. Если вспышки лампы будут следовать через промежуток времени, за который каждый гребень переместится в положение, которое занимал предшествующий гребень в момент предыдущей вспышки, т.е. точно через период волны, то при каждой вспышке мы будем видеть одну и ту же картину – как бы неподвижную (*остановившуюся, застывшую*) волновую картину.





Такой метод наблюдения движущихся предметов называется *стробоскопическим*. В данной установке частота прерываний светового потока совпадает с частотой колебаний вибратора, который возбуждает волны.

Что происходит, когда волны от двух источников перекрываются?

Там, где пересекаются два гребня, должен образоваться «удвоенный гребень». На

экране волновой кюветы подобные «удвоенные гребни» должны образовывать яркие участки.

Там, где гребень от одного источника пересекает впадину от другого, вода остается практически невозмущенной и на экране получается серое изображение. Наконец, там, где пересекаются две впадины, на экране образуются самые темные места.

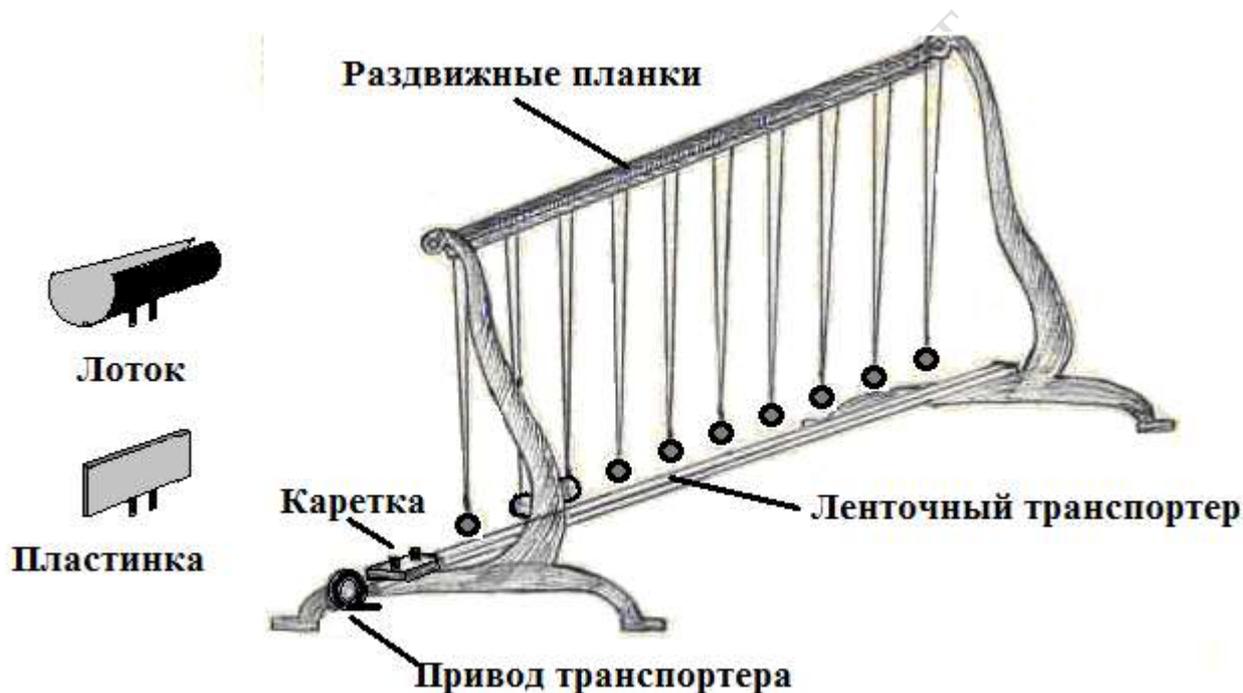
На серых участках гребни все время располагаются над впадинами и поверхность воды здесь гладкая, не волнистая. Эти симметрично расходящиеся линии невозмущенной воды (узловые линии) видны на экране.

#### **4.15. Модель бегущей упругой волны – продольной и поперечной.**

(Волновая машина Э. Маха)

**Приборы.** Машина Э.Маха – механическая модель возникновения и распространения волн. Шарики на бифилярных подвесах, которые позволяют шарикам колебаться только в одном направлении – либо вдоль, либо поперек «бегущей волны». Вариант подвеса можно изменять, размыкая или смыкая планки, к которым прикреплены нити шариков. Хлопчатобумажная лента транспортера приводится в движение шкивом с ручкой. На ленте перемещается каретка, в которую вставляют либо лоток, либо пластинку.

**Опыт.** Если планки сомкнуть, а в каретку вставить пластинку, то при вращении ручки шкива и протягивании каретки пластинка заставляет шарики качаться поперек транспортера и возникает картина поперечной волны.



Если планки разомкнуть (при этом бифилярный подвес позволяет шарикам колебаться только вдоль транспортера), и в каретку вставить лоток с желобом, то при протягивании лотка каждый шарик заходит в желоб, а затем соскальзывает с него вдоль цепочки шариков. В цепочке шариков возникает картина бегущих сгущений и разрежений – картина продольной волны.

**Объяснение опыта.** В этой модели, как в реальной волне, за счет протягивания транспортером источника колебаний искусственно создается одно из главных свойств бегущей волны - отставание по фазе колебаний последующих шариков, имитирующих частицы среды.

**Указание.** Чтобы лента не проскальзывала при вращении шкива, ее можно слегка смочить ваткой по всей длине перед опытом.

#### 4.16. Предел слышимости звуков

**Приборы.** Звуковой генератор ГЗ-34, усилитель 10 УП 2 -100 -102 «Электроакустика», смонтированный в ближней к окну части демонстрационного стола, 4 звуковые колонки на стенах большой физической аудитории.

##### **Опыт.**

Перед началом опыта подают напряжение на розетку  $\sim 220$  В в нижней части демонстрационного стола нажатием белой кнопки автоматического выключателя на щитке справа от входной двери из демонстраторской комнаты 2/33 в лекционную аудиторию 2/30.

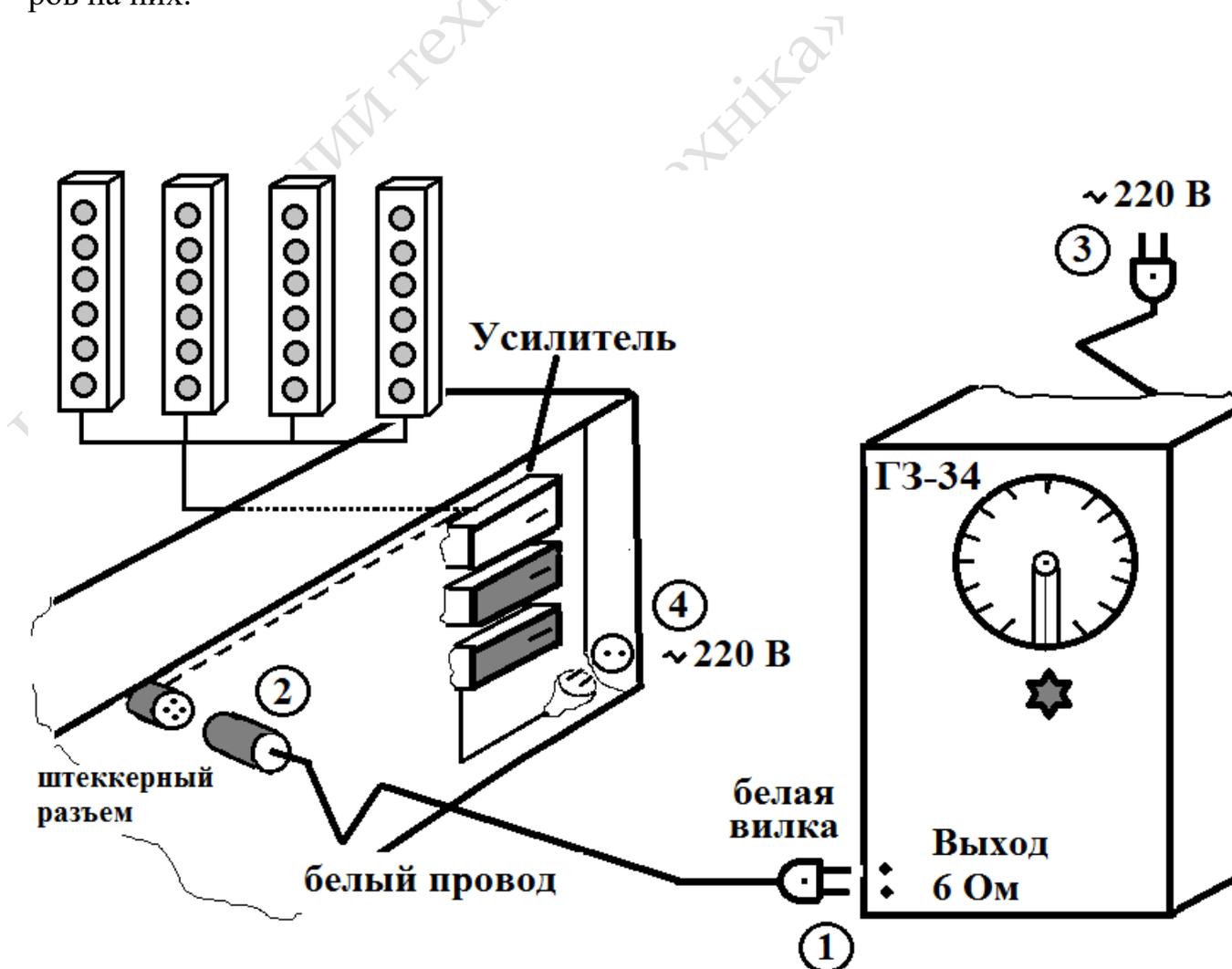
*Обозначения на рисунке и последовательность операций:*

- 1 Соединение звукового генератора с усилителем. Включение специального

провода белого цвета и белой вилки в звуковой генератор ГЗ-34.

2. Соединение разъема под крышкой демонстрационного стола примерно в его середине. Вставляют штеккерную часть разъема в ответную часть.
3. Включение звукового генератора ГЗ-34 в сеть переменного тока  $\sim 220$  В в розетку в нише «окна» между аудиториями 33/30, после чего тумблером «Сеть».
4. Включение усилителя в сеть переменного тока  $\sim 220$  В в розетку, смонтированную на ближней к окну внутренней стороне демонстрационного стола внизу.

Одновременно включают два нижних ящика усилителя с помощью тумблеров на них.



На звуковом генераторе устанавливают:

- Шкала прибора X 2,
- Пределы шкал 10 В, 30 дВ,
- Выходное сопротивление - 60,
- Множитель X 1, X10, ...
- Расстройка 0.

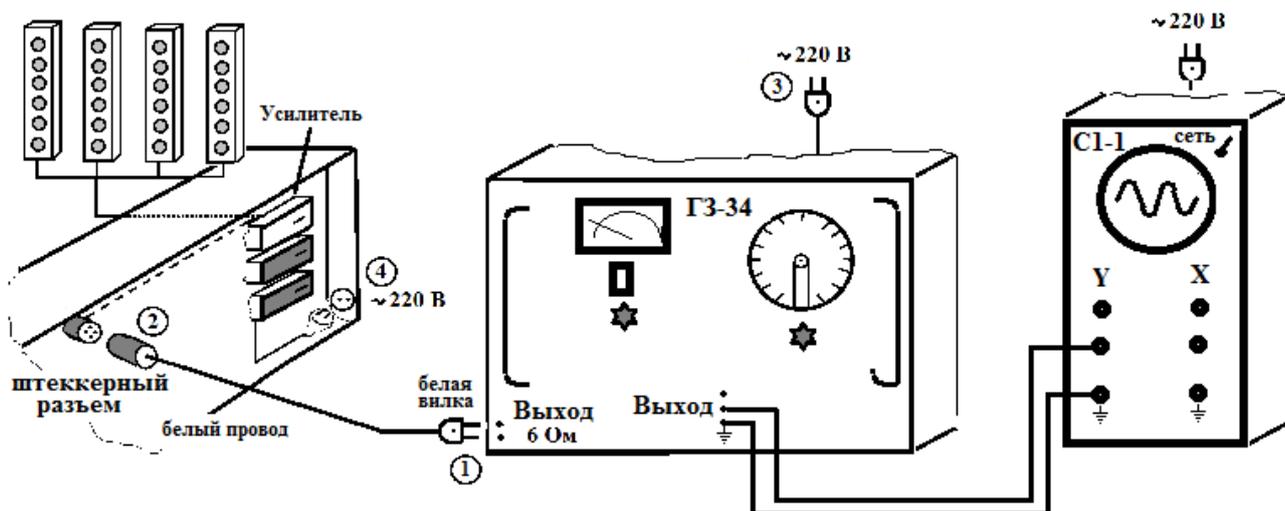
5. В динамиках появляется звук низкой частоты. Вращая ручку «Частота Hz» под шкалой частот звукового генератора, медленно увеличивают частоту зву-

чания звуковых колонок. Когда шкала частот заканчивается, переходят на следующую шкалу, увеличенную в 10 раз. Так доходят до частоты, которая как тонкий писк не воспринимается ухом.

#### 4.17. Анализ звуковых колебаний с помощью осциллографа

**Приборы:** звуковой генератор ГЗ-34, усилитель 10 УП 2 - 100 -102 «Электроакустика», смонтированный в ближней к окну части демонстрационного стола, 4 звуковые колонки на стенах большой физической аудитории, осциллограф С1-1.

**Опыт.** Порядок включения приборов тот же, что в опыте 4.16. Затем с выхода звукового генератора сигнал подается на вход «У» осциллографа. Наблюдается синусоида, изменяющая форму в зависимости от частоты звука, слышимого



из динамиков.

*Установочные данные:*

**ГЗ-34:**

Шкала прибора X 2,  
 Пределы шкал 10 В, 30 дВ,  
 Выходное сопротивление- 60 Ω,  
 Множитель X 1, X10, X100...  
 Расстройка 0.

**С1-1:**

Диапазон частот – 7.  
 Синхронизация – внутренняя.  
 Амплитуда синхронизации – 10.  
 Частота плавно – 7,4.  
 Ослабление - 1:100  
 Усиление :по X – 1,5, по Y – 1.

## 4.18. Явление Доплера в акустике

**Опыт.** Демонстратор ударом молоточка заставляет звучать один из камертонов на резонаторном ящике.

Затем берется рукой за резонаторный ящик камертона, поворачивая его отверстием к аудитории.

Вытянув прямо руку и встав боком к аудитории, демонстратор начинает делать махи камертоном по направлению к рядам слушателей и обратно. Частота махов примерно 1 мах в секунду. Слушатели должны услышать периодические изменения высоты тона звука - явление Доплера.

**Замечание.** Опыт требует значительных усилий, поэтому в женском исполнении лучше не показывать.

## Электромагнитные колебания

### 4.19. Затухающие колебания в колебательном контуре

**Приборы.** Специальное устройство – демонстрационный электрический колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности с вынимающимся железным сердечником, воздушного конденсатора переменной емкости и декадного магазина сопротивлений. Осциллограф С1-1.

**Опыт.** Соединяют клеммы «У» и «Земля» на панели колебательного контура с соответствующими клеммами на лицевой части осциллографа. Клемма «Х» соединяется с гнездом «Х» в задней части осциллографа. Установкой указанных ниже параметров осциллографа добиваются на экране осциллографа картинка затухающей синусоиды.

#### Установочные параметры осциллографа.

Амплитуда синхр. – нуль.

Диапазон частот 130.

Частота плавно 8.

Ослабление 1:10

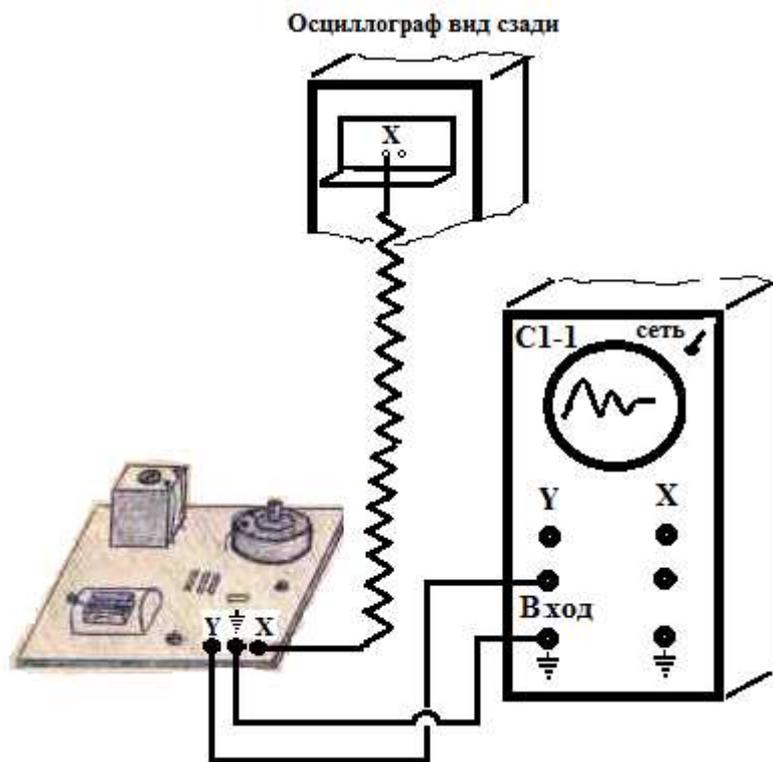
Усиление 1,5.

Синхр. – внутр.

Усиление по Х – 1.5

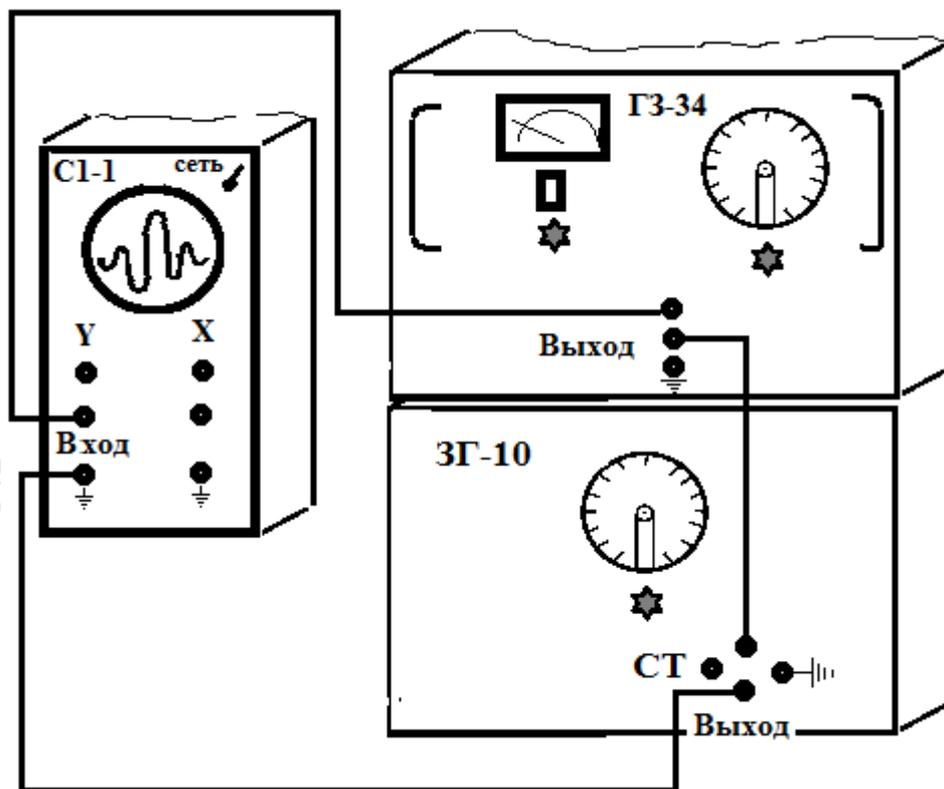
Усиление по У – 1.5

Далее исследуют влияние каждого из параметров на быстроту затухания. Слушатели следят за тем, как де-



монстратор изменяет по очереди все три параметра:  $L$  (вынимая и вставляя сердечник в катушку),  $C$  (поворачивая ручку конденсатора переменной емкости) и  $R$  (набором на декадном реостате разных сопротивлений). При этом наблюдают за изменением вида затухающей синусоиды.

#### 4.20. Биения электрических сигналов на осциллографе



**Приборы:** осциллограф С1-1, генератор ГЗ-34, генератор ЗГ-10.

**Опыт.** Собирают схему согласно рисунку. Складываются электрические колебания одного направления и близких звуковых частот. Колебания создаются двумя генераторами и подаются на осциллограф. На экране наблюдают результат сложения колебаний - биения.

**Установочные данные на приборах.**

**На осциллографе:** ослабление - 1:100, диапазон частот – 7, частота синхр. – 5, частота плавно – 3, синхрон. – внутр, усилен по X – 7,6, усилен по Y – 7.5.

**На генераторе ГЗ-34:** шкала прибора - вольты  $\times 2$ , множитель  $\times 10$ , частота - 60 – 62 Гц, расстройка – 0, вых. сопр. – 60  $\Omega$ , регул. выхода напр. по вольтметру – 0.4 В, внутр нагр. – выкл, пределы шкал-10 V, 30 dB.

**На генераторе ЗГ-10:** множитель  $\times 10$ , частота - 1,5 деления шкалы, вых. сопр. – 50  $\Omega$ , регул. выхода по вольтметру – 50-60, внутр нагр. – выкл, ручки «Затух dB» не переключать.

## 4.21. Релаксационные колебания в схеме с неоновой лампой

**Приборы:** ламповый выпрямитель - источник постоянного высокого напряжения, генератор релаксационных колебаний, осциллограф.

**Опыт.** Собирают схему согласно рисунку.

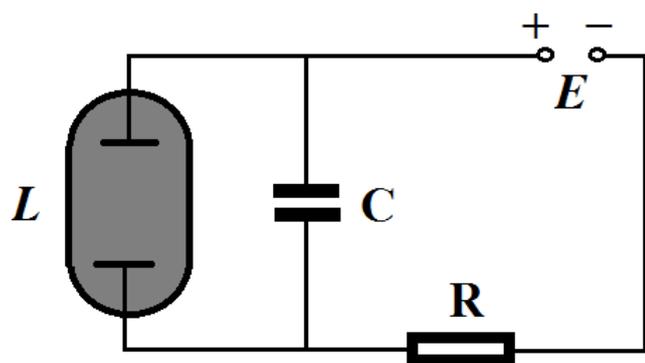
**Установочные данные на осциллографе:** Ослабление 1:100, Диапазон частот 30; Частота плавно 0; Усиление по Y -1, по X - 3; амплитуда синхронизации -4, Синхронизация внутренняя.

Картину на осциллографе можно изменять с помощью регулировочных ручек R и C на генераторе



**Объяснение опыта.** Релаксационные колебания – это автоколебания, для которых характерно постепенное накопление энергии, а затем быстрый ее спад.

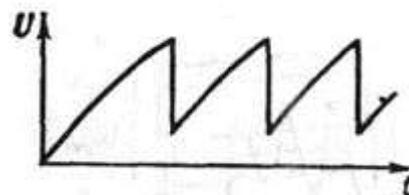
Поэтому такие колебания «сброса» по форме резко отличаются от гармонических колебаний.



Релаксационные колебания в данном опыте возникают в схеме с неоновой лампой (см. рис.), которая обладает свойством зажигаться при некотором напряжении  $U_3$  и гаснуть при более низком напряжении  $U_Г$ . Неоновая лампа L включена параллельно конденсатору. В этой схеме периодически осуществляется зарядка конден-

сатора  $C$  от источника тока  $E$  через сопротивление  $R$  до напряжения зажигания лампы, после чего лампа зажигается.

При этом внутреннее сопротивление неоновой лампы скачком становится малым и через нее начинает идти ток. Конденсатор быстро разряжается через лампу до напряжения гашения лампы. В этот момент лампа гаснет, и процесс зарядки конденсатора начинается вновь.



Форму кривых получающихся колебаний напряжения на конденсаторе показывают на осциллографе.

## 4.22. Трансформатор Н. Теслы

**Приборы:** трансформатор Н. Теслы, газоразрядные трубки, неоновая лампа, люминесцентная лампа.

**Опыт.** Собирают трансформатор, для чего выносят на демонстрационный стол основание трансформатора с укрепленным на нем первым контуром, вставляют в гнездо вторичную катушку. При этом в это же гнездо вставляется т.н. «противовес» – кусок провода, второй конец которого свободно падает на пол аудитории.

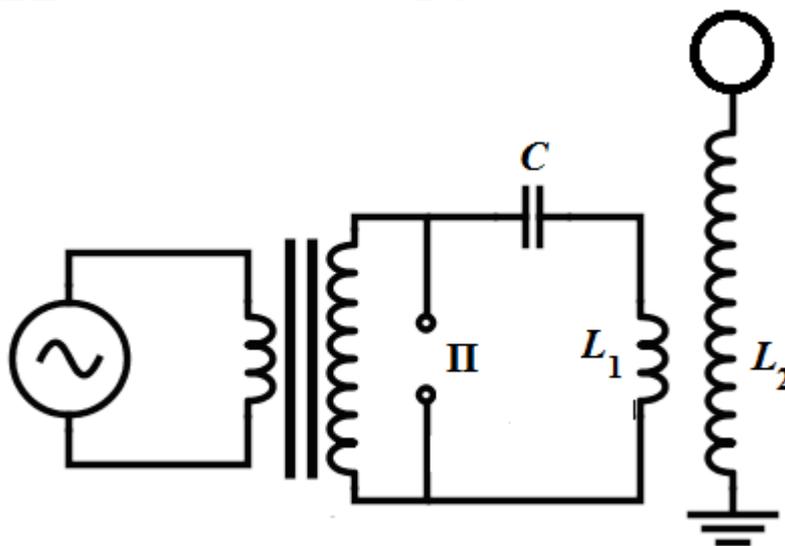
Затем аудиторию. Включают прибор в сеть  $\sim 220$  В через розетку на столе. Раздается характерный треск и вокруг верхнего конца вторичной катушки возникает коронный разряд.

Демонстрируют свечение безэлектродных трубок, заполненных неоном и водородом. Безэлектродные трубки помещают в высокочастотное поле трансформатора Теслы и наблюдают их свечение. Затем наблюдают свечение трубок с электродами и свечение неоновых ламп. Люминесцентная лампа светится в руках демонстратора. Ватка, смоченная в эфире (спирте), и поднесенная к шартику вторичной катушки, загорается.

### Объяснение опыта.

Трансформатор Н. Теслы является резонансным трансформатором, производящим высокое напряжение высокой частоты. Он основан на использовании резонансных стоячих электромагнитных волн в катушках.

Его первичная обмотка  $L_1$  имеет небольшое число витков и входит в состав ис-



крово́го колебательного контура, содержащего конденсатор  $C$  и искровой промежуток  $П$ . Вторичной обмоткой служит прямая катушка  $L_2$ .

Первичная обмотка обычно содержит всего несколько витков медного провода большого сечения, а вторичная – около 1000 витков провода меньшего сечения.

Первичная катушка вместе с конденсатором образует колебательный контур, в который включён разрядник  $П$ . Газовый разрядник представляет собой два массивных электрода с регулируемым зазором.

Трансформатор Теслы, показанный на схеме, работает в импульсном режиме. *Первая фаза* – это зарядка конденсатора  $C$  до напряжения пробоя разрядника  $П$ .

*Вторая фаза* – генерация высокочастотных колебаний в первичном контуре. Дуга в разряднике – хороший проводник, поэтому конденсатор  $C$  и катушка  $L_1$  оказываются соединёнными, образуя колебательный контур и в нём возникают высокочастотные колебания.

Кроме того, замыкая источник питания (трансформатор), разрядник исключает его из контура, иначе источник питания вносит потери в первичный контур.

Благодаря энергии, которая содержалась в конденсаторе, в этом контуре происходят колебания. Во время этих колебаний, конденсатор и катушка обмениваются энергией, часть которой рассеивается в виде тепла в обмотке  $L_1$ , а часть создает светошумовые эффекты в разряднике.

Вторичная катушка  $L_2$  также образует колебательный контур, где роль конденсатора выполняет собственная межвитковая ёмкость самой катушки.

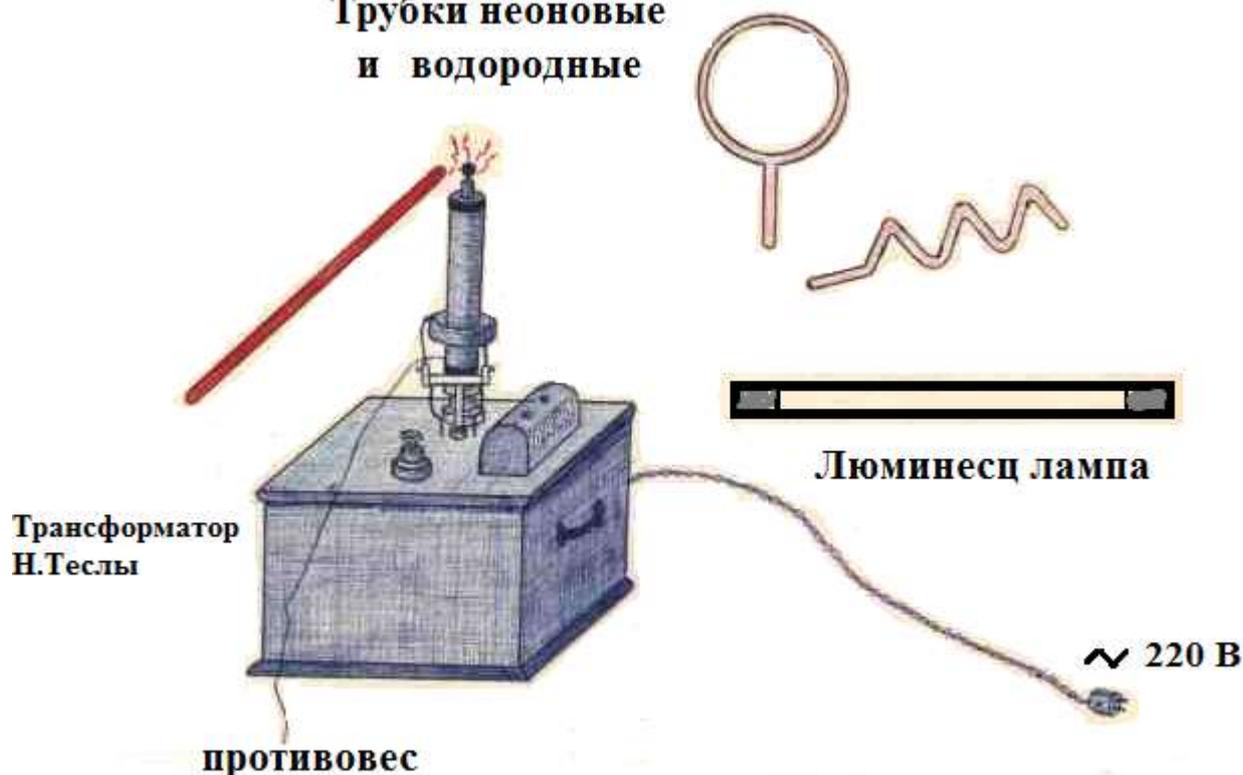
Первичная и вторичная обмотки расположены рядом и поэтому, между ними существует индуктивная связь: колебания тока в первичной обмотке возбуждают ЭДС и ток во вторичной обмотке.

При совпадении частоты колебаний колебательного контура первичной обмотки с частотой одного из собственных колебаний (стоячих волн) вторичной обмотки вследствие явления резонанса во вторичной обмотке возникнет стоячая электромагнитная волна и между концами катушки появится высокое переменное напряжение.

Таким образом, трансформатор Теслы представляет собой два связанных колебательных контура, что и определяет его замечательные свойства и является главным его отличием от обычных трансформаторов. Для полноценной работы трансформатора эти два колебательных контура должны быть настроены на одну резонансную частоту.

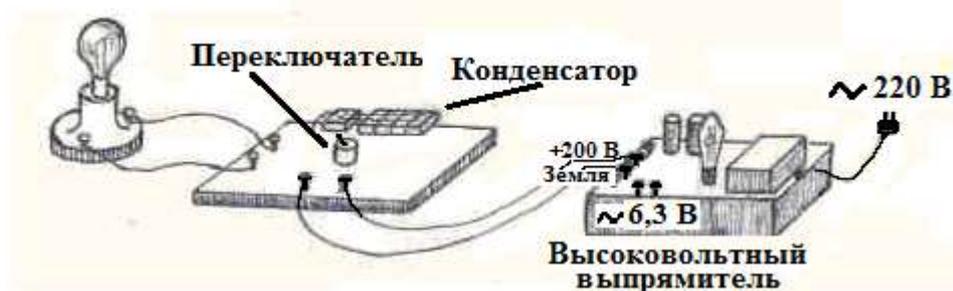
При резонансе из концов вторичной катушки можно извлекать длинные искры, а электрическое поле вблизи катушки настолько сильно, что вызывает свечение газоразрядных трубок.

## Трубки неоновые и водородные



### 4.23. Конденсатор в цепи переменного тока. Ток смещения

Лампа накаливания



**Приборы:** ламповый высоковольтный выпрямитель, панель с укрепленной на ней батареей конденсаторов и переключателем, лампа накаливания на подставке, соединительные провода.

**Опыт.** Собирают схему, как указано на рисунке. Объявляют аудитории: «Лампа накаливания, рассчитанная на 220 В, включена в цепь постоянного тока последовательно с конденсатором. Питание лампы осуществляется от выпрямителя, который дает 200 В, но постоянного напряжения».

Затем включают выпрямитель в сеть 220 В. Лампа на мгновение вспыхивает и гаснет. Это естественно, так как постоянный ток через конденсатор не проходит, и лампа не светится.

Объявляют аудитории: «Переключаем направление постоянного тока через конденсатор и лампу» (щелкают переключателем на панели приборов). Лампа снова на мгновение вспыхивает.

Объявляют аудитории: «Снова изменим направление тока через конденсатор и лампу» (щелкают так, чтобы видели все, переключателем на панели приборов). Лампа снова на мгновение вспыхивает.

Выключают высоковольтный выпрямитель из розетки  $\approx 220$  В. Закорачивают изолированным проводом клеммы  $+200$  В и  $-200$  В. Отсоединяют панель от выпрямителя.

С помощью соединительных проводов включают панель с батареей конденсаторов и лампой накаливания в розетку  $\approx 220$  В. Лампа, включенная последовательно с батареей конденсаторов, горит непрерывно. Объявляют: «Конденсатор в цепи переменного тока не является разрывом цепи».

**Объяснение опыта.** В момент включения или переключения тока происходит зарядка и разрядка конденсатора. При этом заряды натекают на обкладки конденсатора и стекают с них, не проникая внутрь конденсатора. Ток, идущий через лампу при перезарядке конденсатора, нагревает нить лампы.

Чтобы упростить расчеты, Максвелл ввел понятие «тока смещения», якобы текущего через конденсатор и являющегося продолжением настоящего тока проводимости в подводящих элементах. По сути, ток смещения – это переменное электрическое поле, которое реально существует между обкладками конденсатора.

**Примечание.** После отключения от осветительной сети высоковольтного выпрямителя нельзя брать за клеммы на нем и разбирать цепь. Это опасно! Может быть электрический удар!

Сначала необходимо выключить выпрямитель из розетки, затем, выждав, чем дольше, тем лучше, закоротить изолированным проводом клеммы на выходе выпрямителя и тем самым разрядить его конденсатор. Только после этого можно разбирать схему.

#### 4.24. Стоячие электромагнитные волны в двухпроводной линии (система Лехера)

**Приборы.** Двухпроводная система Лехера (провода натянута поперек большой физической аудитории рядом с доской). Ламповый генератор незатухающих колебаний (укреплен на стене аудитории). Каретки с лампой накаливания и неоновой лампой.

**Опыт.** 1. Подается напряжение на генератор системы Лехера (включается автоматический выключатель в демонстрационной аудитории 2/33),.

2. Ставятся на провода две каретки-ползунка - с неоновой лампочкой и лампочкой накаливания.

3. Включается тумблером на стене генератор.

4. С помощью специальной указки с крючком по очереди медленно перетаскивают каретки вдоль двухпроводной линии. Тянуть следует строго параллельно проводам. Если тянуть неряшливо и быстро, возможны перекосы кареток, их заклинивание и падение. Отмечают каким-либо способом (например, мелом на доске) места загорания лампочек. Подсчитывают длину бегущей волны, равную удвоенному расстоянию между соседними максимумами загорания лампочек ( $\lambda \approx 2,4 \text{ м}$  X  $2 \approx 4,8 \text{ м}$ ).

5. Лектор сообщает аудитории частоту генератора  $\nu = 62 \text{ МГц}$  и предлагает найти скорость электромагнитной волны.  $c = \lambda \nu = 4,8 \cdot 62 \cdot 10^6 = 2,976 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ .

**Объяснение опыта.** Если в некоторой области свободного пространства возбудить переменное электрическое поле, то, согласно теории Максвелла, в этой области возникает переменное магнитное поле, в свою очередь порождающее переменное вихревое электрическое поле, и т.д. Эти взаимосвязанные электрические и магнитные поля образуют единое электромагнитное поле, распространяющееся в вакууме со скоростью  $\approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ .

От способа возбуждения электромагнитных волн зависит форма волнового фронта и волновых поверхностей. В простейшем случае волновой фронт – плоскость, и волна распространяется в одном направлении.

Структура плоской волны не изменится, если в свободном пространстве, в котором она распространяется, поместить две идеально проводящие плоскости, параллельные друг другу и направлению распространения волны и перпендикулярные вектору  $E$ . Поле между плоскостями останется таким же поперечным, как и в свободном пространстве (рис. 1,а).

Можно произвести деформацию этих плоскостей так, как показано на рис. 1,б и 1,в. В результате плоскости обратятся в бесконечные цилиндры, а поперечный характер электромагнитного поля при этом сохранится. Система двух параллельных проводящих цилиндров образует **двухпроводную линию**. В проводах линии возникают переменные токи проводимости, которые замыкают линии токов смещения, совпадающих с линиями электромагнитного поля, существующего в пространстве вне проводов.

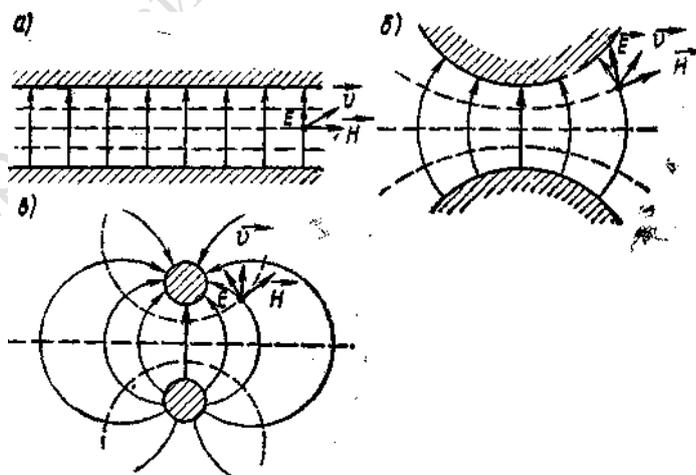


Рис. 1.

Две медные проволоки диаметром  $\approx 1,8 \text{ мм}$  натянуты поперек аудитории возле демонстрационного стола. Расстояние между проволоками 10 - 15 см и длина  $\approx 9 \text{ м}$ .

Проволоки прикреплены к стенам аудитории антенными орешковыми изоляторами. Такие провода называют **системой Лехера**.

Возле начала системы помещен генератор УКВ диапазона (сохранился еще ламповый), частота которого 62 МГц. Колебательный контур генератора связан с лехеровой системой индуктивно.

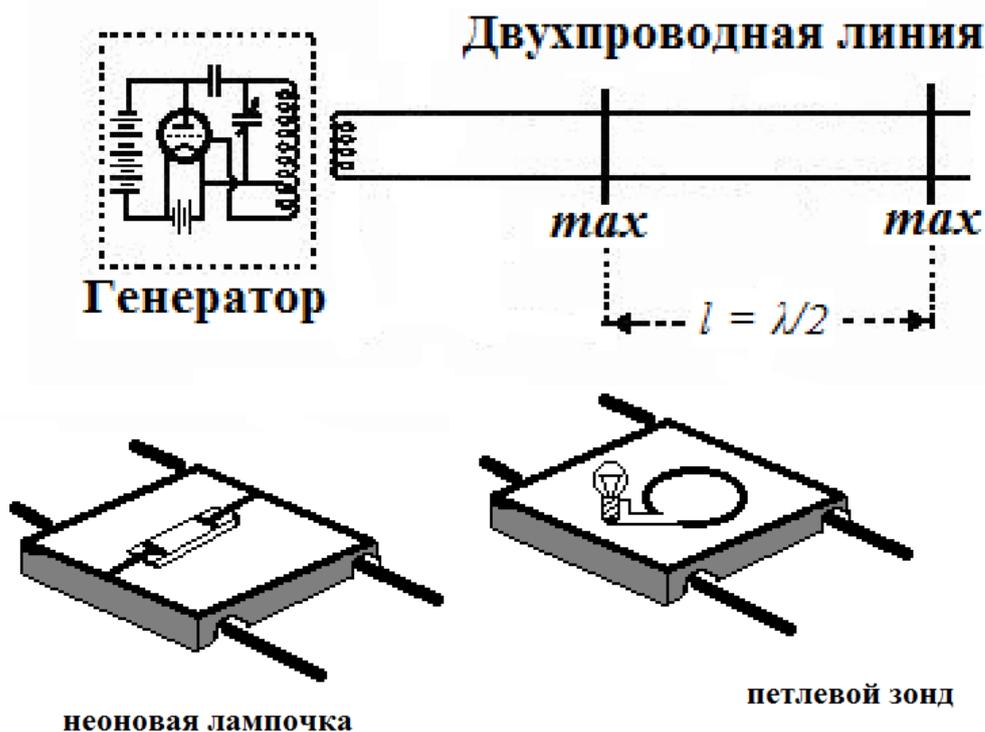
Если линия замкнута на конце проводящим мостиком, то происходит отражение электромагнитных волн. Отраженные волны, складываясь с падающей волной, создают **стоячие электромагнитные волны**.

Если линия на конце коротко замкнута, то напряжение на конце линии будет всегда равно нулю, т. е. электрическое поле там будет отсутствовать. В закорачивающем линию сопротивлении будет наибольшая амплитуда тока и наибольшее магнитное поле. Следовательно, в проводящем мостике образуется пучность тока. Здесь же будет и пучность магнитного поля.

Электрическое поле в отраженной волне изменяет фазу на  $\pi$ , т. е. на конце образуется узел напряжения и напряженности электрического поля.

Если в бегущей волне векторы  $E$  и  $H$  изменяются синфазно, то в стоячей электромагнитной волне узлы электрического поля (напряжения) совпадают с пучностями магнитного поля (тока) и наоборот.

Для обнаружения колебаний электрического и магнитного полей пользуются специальными каретками-ползунками, которые могут перемещаться вдоль линии.



На одной из кареток укреплен **петлевой зонд**, реагирующий на магнитную составляющую электромагнитного поля. Это замкнутый проволочный контур, расположенный в плоскости двухпроводной линии, в который включена лампочка накаливания. В пучностях магнитного поля в контуре возникает ЭДС индукции и лампочка загорается.

На другой каретке укреплена **неоновая**

**лампочка**, включенная между проводами. Она загорается в местах пучностей напряжения, т. е. электрического поля.

## 4.25. Свойства электромагнитных волн

**Приборы** (см. фото).

Генератор прибора (1 на рис.1) генерирует радиоволны сантиметрового диапазона и собран на электровакуумной лампе – отражательном клистроне, нагрузкой которого является прямоугольный волновод.

Питание генератора осуществляется от блока питания (2).

С помощью рупорной антенны получают направленный пучок электромагнитных волн.

Принятые приемником радиоволны детектируются в постоянный ток, напряжение которого подается на вход усилителя (3), а от него на гальванометр (4). Стрелка гальванометра отклоняется пропорционально величине проходящего сигнала.

**Опыт.** Включают клистронный генератор и прогревают его на протяжении 2 - 3 мин. Устанавливают рупоры передающей и приемной антенн друг против друга на расстоянии 0,5 - 0,8 м. Регулятором напряжения на аноде лампы добиваются максимального отклонения стрелки гальванометра.

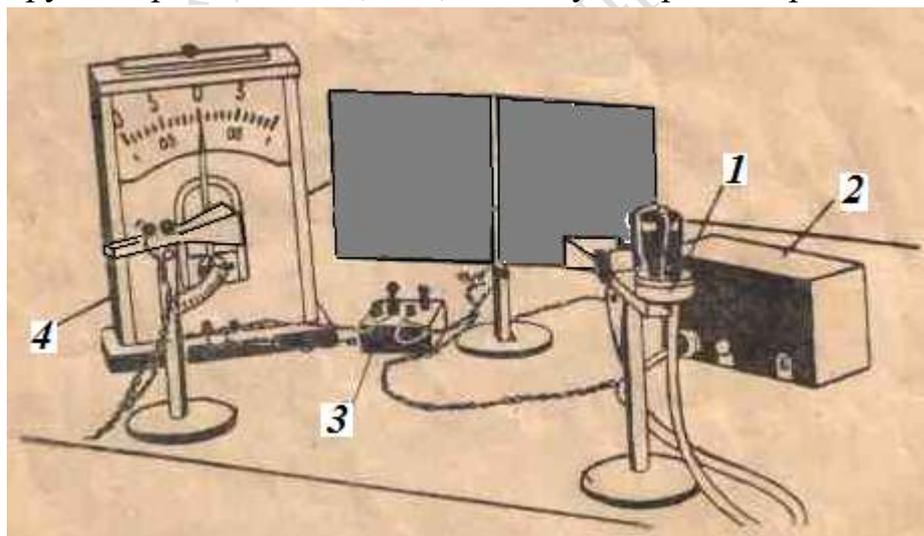


Рис. 1.

**Опыт № 1. Демонстрация направленного излучения и направленного приема электромагнитных волн.**

Наблюдает отчетливый прием электромагнитных волн. Поворачивая вокруг вертикальной оси рупорную антенну генератора, наблюдают сначала ослабление, а затем полное ис-

чезновение приема по отклонению стрелки гальванометра. Убеждаются в том, что прием является направленным. Опыт повторяют и с антенной приемника.

### **Опыт № 2. Демонстрация экранирующего действия проводников**

Включив генератор, наблюдают отчетливый прием излучаемых им электромагнитных волн. Медленно вносят между генератором и приемником металлический экран (отражатель) и наблюдают постепенное уменьшение отклонения стрелки гальванометра. Когда экран полностью закроет рупор генератора, приема не будет.

Повторяют опыт с экраном из изолирующего материала (лист стекла, пластика и т.д.). Убеждаются в том, что он не вызывает экранирующего действия.

### **Опыт № 3. Отражение электромагнитных волн**

Располагают генератор и приемник так, чтобы оси их волноводов пересекались в плоскости металлического листа (рис.1). Наблюдают прием электромагнитных волн. Убирают отражатель и убеждаются, что приема нет. Заменяют проводящий экран изолирующим и убеждаются, что отражение волн происходит хуже.

Этим опытом показано, что электромагнитные волны хорошо отражаются от проводящих и хуже от изолирующих поверхностей.

Устанавливают антенны генератора и приемника под углом  $30^\circ$  от перпендикуляра к плоскости отражателя и наблюдают явление отражения электромагнитных волн. Изменив угол одной из антенн, убеждаются, что приема нет.

Повторяют опыт при угле антенн  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ .

На основании опыта делают вывод о том, что электромагнитные волны отражаются по тому же принципу, что и волны света: угол падения равен углу отражения, причем направления падающей и отраженной волн и нормали к зеркалу лежат в одной плоскости.

### **Опыт № 4. Преломление электромагнитных волн**

Устанавливают рупоры передающей и приемной антенн друг против друга и наблюдают отчетливый прием электромагнитных волн.

Вносят между рупорами треугольную призму из парафина. Наблюдают прекращение приема. Сдвинув рупор приемника в сторону основания призмы, находят точку, в которой наблюдают уверенный прием.

Опыт свидетельствует о том, что электромагнитные волны, проходя через призму, преломляются, отклоняясь от первоначального направления в сторону основания призмы.

### **Опыт № 5. Фокусировка электромагнитных волн**

Между рупорами устанавливают линзу из парафина. Расстояние между рупорами генератора и приемника должно быть равным 140 - 160 см.

Линзу необходимо поставить так, чтобы рупор приемника оказался в фокусе линзы. Включают генератор и убеждаются, что прием есть.

Передвигая приемник по дуге постоянного радиуса относительно линзы, убеждаются, что есть одно положение, в котором величина отклонения стрелки максимальная, а в других положениях она резко уменьшается. Убирают линзу и, передвигая приемник по той же дуге, убеждаются, что отклонение стрелки не меняется.

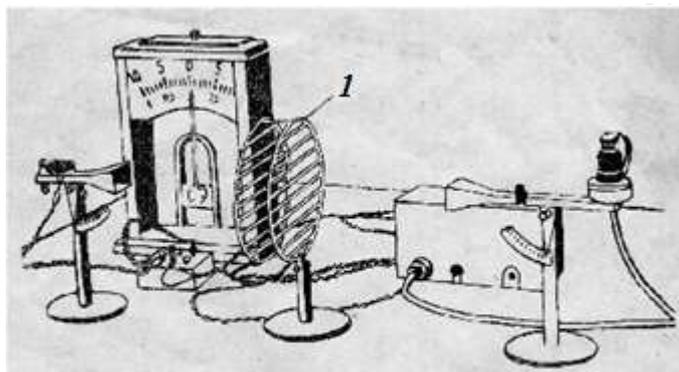


Рис. 2.

### Опыт № 6. Наблюдение поляризации электромагнитных волн

Излучаемые рупорной антенной электромагнитные волны являются плоско поляризованными. Для анализа плоскости их поляризации используется анализатор (1 на рис.2), состоящий из набора параллельных металлических проволок, ориентацию которых

можно изменять

Устанавливают генератор и приемник на расстоянии 50 – 70 см, между ними располагают поляризационные решетки так, чтобы проводники решетки были параллельны между собой и параллельны горизонтальной плоскости. Включают генератор и наблюдают прием.

Затем одну из решеток медленно поворачивают до положения, перпендикулярного положению второй решетки.

Наблюдают медленное уменьшение отклонения стрелки гальванометра. При взаимно перпендикулярном положении проводов решеток волны не проходят и сигнал не принимается.

Убирают одну из решеток и повторяют опыт. Убеждаются, что волны, излучаемые генератором, поляризованы.

**Объяснение опыта.** Когда проволоки обеих решеток горизонтальны, то волны проходят через решетки, практически не ослабляясь.

Это происходит потому, что электрическое поле волны направлено перпендикулярно к проволокам решеток и не вызывает в них быстропеременных токов. Поэтому в решетках не происходит никаких электрических явлений и наличие решеток не проявляется.

Если же повернуть одну из решеток на  $90^\circ$ , то электромагнитные волны не проходят через решетки. В этом случае электрическое поле волны параллельно проволокам и вызывает в них сильные быстропеременные токи. Поэтому решетка действует так же, как и металлическая пластина и электромагнитные волны от нее отражаются.

**Вывод.** Электромагнитная волна, идущая из рупора, поляризована в вертикальной плоскости.

### Опыт № 7. Наблюдение дифракции электромагнитных волн

Между генератором и приемником, находящимися на расстоянии 50-70 см, помещают узкую ширму, состоящую из двух полос. Перемещают приемник по дуге постоянного радиуса относительно оси ширмы. Наблюдают прием сигналов за ширмой. Опыт свидетельствует о «загибании» волн за края ширмы.

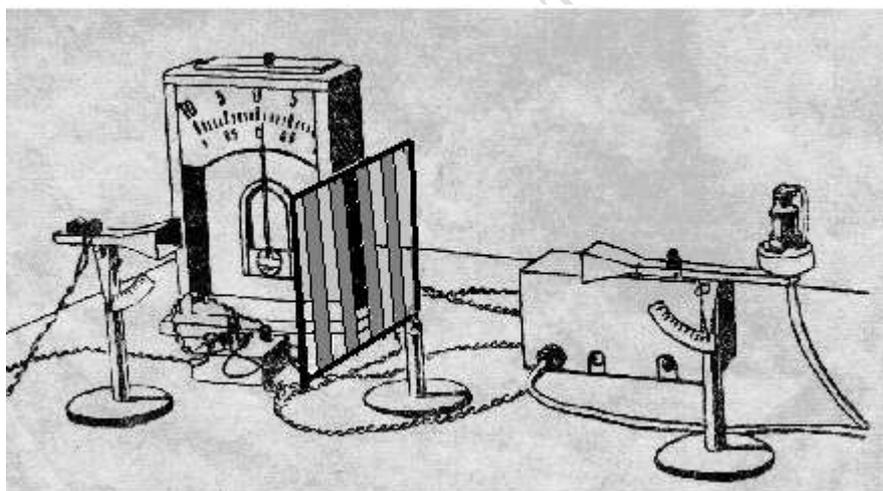


Рис. 3

Вставляют еще две полосы на контур решетки. Раздвигают полосы так, чтобы между ними образовалась щель 3,5-4 см. Ширины щелей по всей длине должны быть одинаковыми (рис. 3). Медленно передвигая приемник по дуге вокруг узкой ширмы, наблюдают участки сильного отклонения стрелки гальванометра, разделенные участками, где приема почти нет. На среднем участке величина отклонения несколько больше, чем на соседних участках.

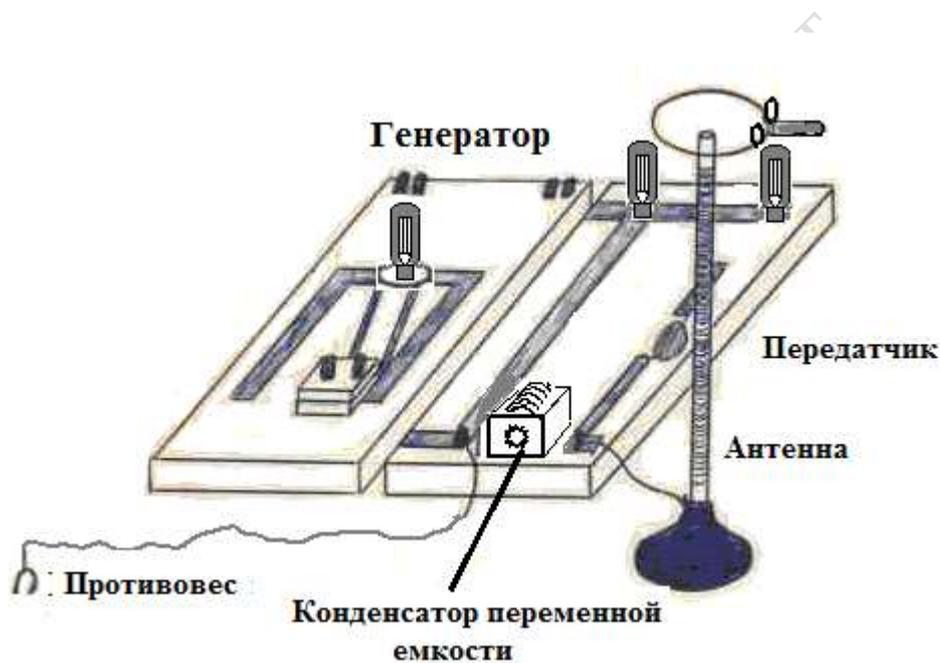
⚡ *Замечание.* Необходимое размещение приборов должно быть отмечено на демонстрационном столе.

## 4.26. Стоячие электромагнитные волны

**Приборы:** генератор, передатчик, антенна, выполненная в виде длинной катушки, намотанной в один слой на изолирующем каркасе, пробник в виде проводящего кольца на изолирующей ручке, лампа накаливания и неоновая лампа включены в цепь пробника.

**Опыт.** Электромагнитные волны, распространяясь вдоль антенны - катушки, отражаются от ее концов и образуют стоячие электромагнитные волны.

При помощи специальных разъемов соединяют генератор с передатчиком. К передатчику подключают антенну - катушку. Включают схему в сеть ~ 220 В. Пробник с лампами проносят сверху вниз вдоль антенны и при помощи конденсатора переменной емкости добиваются того, чтобы у верхнего края антенны была пучность напряжения, т. е. загорелась неоновая лампа. Опуская пробник вниз вдоль антенны, наблюдают, что неоновая лампа периодически загорается. В тех местах, где загорается неоновая лампа, имеются пучности напряжения электромагнитной стоячей волны. Между двумя пучностями напряжения находится пучность тока – здесь загорается лампочка накаливания.

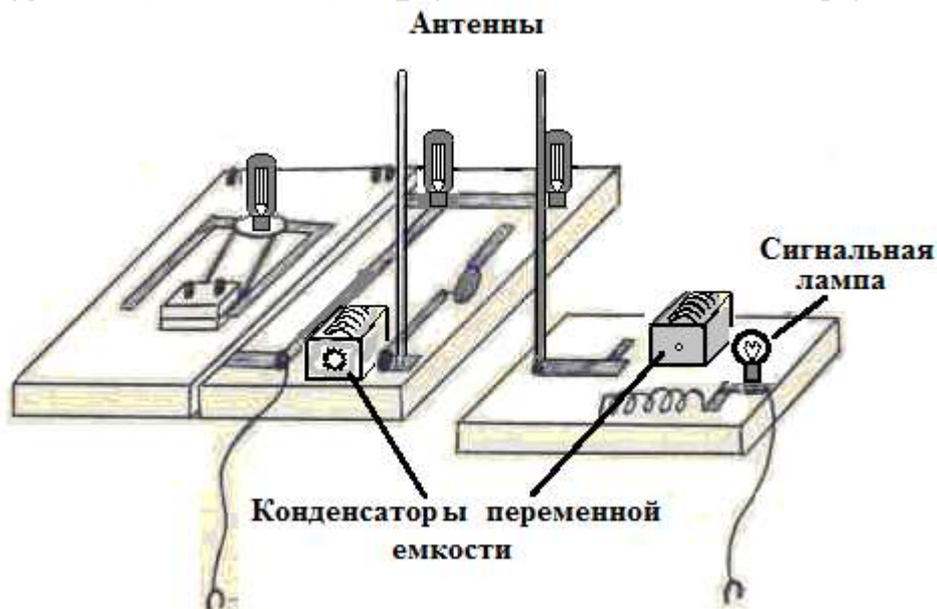


#### 4.27. Передача и прием электромагнитных волн

**Приборы:** генератор, передатчик, две штыревых антенны, приемная панель с лампой накаливания.

**Опыт.** При помощи специальных гнезд и штырей соединяют генератор и передатчик. На передатчике и приемнике укрепляют антенны и располагают их недалеко друг от друга параллельно. Включают в сеть. Затем при помощи конденсаторов переменной емкости, установленных на платах генератора и приемника, добиваются максимального накала нити лампочки, установленной на плате приемника.

При удалении приемника принятый сигнал ослабевает.



## **Часть 5**

# **ВОЛНОВАЯ ОПТИКА**

Національний технічний університет  
«Дніпровська політехніка»

кафедра фізики

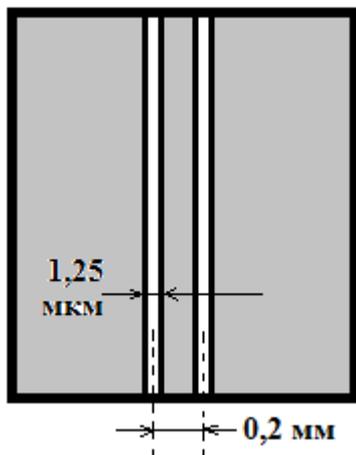
<http://physics.ntu.org.ua>

## 5.1. Интерференция света. Опыт Юнга

**Приборы:** блок лазерного излучателя ( $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$ ) из учебного прибора ЭСФЭ-1 «Оптика», блок линз, двойная щель Юнга, экран.

**Опыт.** Т. Юнг – выдающийся английский физик, один из создателей волновой теории света. Ему принадлежит термин «интерференция света» (1802).

В опыте Юнга свет от Солнца падал на экран с узкой щелью, дифрагировавший свет шел ко второму экрану с двумя узкими щелями. Образовывались два расходящихся пучка, которые были когерентными ввиду общности происхождения. С использованием лазеров, генерирующих когерентный свет, первая щель в опыте Юнга оказалась не нужной.



Блок лазерного излучателя устанавливается на демонстрационном столе так, чтобы лазерный пучок был направлен вдоль стола в сторону от наблюдателей.

Затемняют аудиторию. Включают лазер. На механической оси блока лазерного излучателя устанавливается блок линз в положение 13 Ц (цилиндрическая линза), чем получают линейный источник света. Устанавливают в лазерный пучок щели Юнга (демонстрационный элемент 2.1 из интерференционного набора), закрепленные на рейтере вертикально - параллельно линейному источнику света.

В конце стола в направлении лазерного пучка устанавливают отражающий экран. Получают на экране интерференционную картину – типичные параллельные интерференционные полосы, которые получаются при наложении двух пучков, прошедших через обе щели и расширившихся в результате дифракции.

Щели Юнга в данном опыте представляют собой две узкие параллельные щели в непрозрачном экране, расстояние между которыми гораздо меньше расстояния до экрана,  $d \ll l$ .

В приборе ЭСФЭ-1 щели Юнга имеют такие параметры (см. рис.):

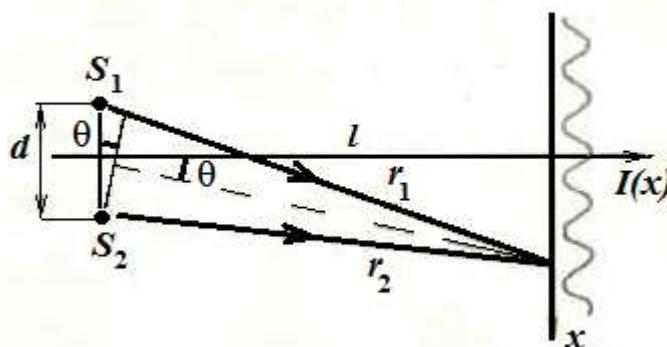
$$d = 0,2 \text{ мм}, l \approx 1,5 - 2 \text{ м}.$$



Расчет показывает, что для этих значений  $d$  и  $l$  расстояние между интерференционными полосами

$$h \approx \frac{\lambda l}{d} = \frac{0,63 \cdot 10^{-6} \cdot 1,5}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 4,725 \text{ мм}, \text{ которое хорошо}$$

наблюдается на экране.



## 5.2. Интерференция света. Бипризма Френеля

**Приборы:** блок лазерного излучателя ( $\lambda = 0,63$  мкм) из учебного прибора ЭСФЭ-1 «Оптика», блок линз, бипризма Френеля, рейтеры, экран.

**Опыт.** Блок лазерного излучателя устанавливается на демонстрационном столе так, чтобы лазерный пучок был направлен вдоль стола в сторону от наблюдателей. Переносной экран, закрепленный в рейтере, располагают на противоположном конце демонстрационного стола перпендикулярно к оси падающего пучка.



Затемняют аудиторию. Включают лазер. На механической оси блока лазерного излучателя поворачивают блок линз в положение 13 Ц (цилиндрическая линза Л1), чем получают линейный источник света. На экране наблюдают вертикальную щель ярко-красного цвета.

После этого на расстоянии 10-15 см от лазера устанавливают в рейтере рассеивающую линзу Л9-2 с фокусным расстоянием - 6 см (Л2) из набора линз прибора «ЭСФЭ-1». Линзу закрепляют так, чтобы вертикальная светящаяся щель проектировалась на оптический центр линзы. При этом размеры поперечного сечения пучка на экране существенно увеличиваются.

Наконец, на расстоянии  $\approx 25$  см от лазера в рейтере ставится бипризма Френеля, преломляющее ребро которой устанавливается тоже вертикально.

Образованная на экране интерференционная картина имеет вид вертикальных светлых и темных полос (красного цвета).

Переносной экран ориентируют так, чтобы пучок скользил по его поверхности. При этом картина интерференции «растягивается» на экране и становится лучше видимой.

## 5.3. Интерференция света в тонких пленках. Мыльный клин

**Приборы:** проекционный аппарат «Свитязь-Авто», проволочный треугольный каркас на штативе, проекционный объектив для получения изображения пленки на экране, обратная призма, экран, стакан с мыльным раствором.

**Опыт** следует проводить в затемненной аудитории. Проволочный треугольник укрепляют в штативе в вертикальной плоскости. Перемещая проекционный объектив, получают резкое изображение проволочного каркаса на экране. Сосуд с мыльным раствором подводят к треугольнику снизу и поднимают его так, чтобы треугольник затянулся пленкой. Убирают сосуд.

Пленку проектируют на экран в отраженном свете. Объектив устанавливают на пути светового пучка, отраженного от мыльной пленки.

С помощью объектива получают на экране четкое изображение мыльной пленки с цветными полосами.

Однако изображение перевернутое. Тогда ставят еще оборотную призму. Картина интерференции представляет собой ряд горизонтальных цветных полос, которые постепенно перемещаются вниз.

Цвета интерференции появляются прежде всего в верхней части пленки, так как вследствие стекания жидкости эта часть становится тоньше.

**Объяснение опыта.** Лучи, отраженные от двух поверхностей тонкой пленки, являясь когерентными, могут интерферировать. Из условия максимумов интерференции следует, что для разных длин волн максимумы будут наблюдаться при разной толщине мыльного клина, возрастающей книзу проволочного каркаса (полосы равной толщины). Интерференционные полосы будут смещаться вниз по мере утончения пленки из-за стекания жидкости.

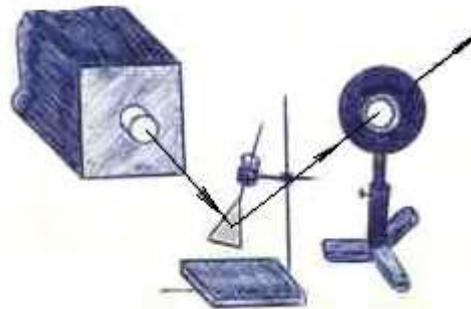
Перед тем, как пленка лопнет, ее верхняя часть становится черной. Когда толщина пленки стремится к нулю, оптическая разность хода лучей возникает только за счет разных условий отражения: один луч отражается от оптически более плотной среды, фаза волны меняется на  $\pi$ , другой – от оптически менее плотной, изменения фазы не происходит. В результате между лучами возникает разность фаз, равная  $\pi$ , и они гасят друг друга. В отраженном свете пленка будет черной.

**Примечание.** Успех опыта зависит также от качества мыльного раствора. Лучше всего использовать обычное хозяйственное мыло. 100 г мыла нарезают тонкими стружками и заливают водой на 6-8 часов. Затем, помешивая, доливают стакан воды и получают густой и прозрачный раствор. Можно использовать раствор шампуня 3-5 % концентрации.

## 5.4. Интерференция света в тонких пленках. Застывшие твердые пленки

**Приборы:** проекционный аппарат «Свитязь-Авто», проволочные каркасы с застывшими тонкими пленками, проекционный объектив для получения изображения пленки на экране, экран.

**Опыт** демонстрируют точно по схеме опыта 5.3 с мыльной пленкой, которую заменяют застывшими пленками.



Для изготовления застывших пленок (см. [3]) используют ацетон и клей (АК-20, АК-88) или лак для ногтей в соотношении 1:3. В кювету с водой помещают круглый проволочный каркас диаметром 5-6 см из медной проволоки толщиной 1-1,5 мм со спаянными концами, образующими ручку. Конец ручки должен быть отогнут в плоскости, перпендикулярной плоскости самого кольца, и выступать за пределы сосуда.

На поверхность воды (кипяченной) наливают несколько капель раствора (в зависимости от площади сосуда и пленки, которую хотят создать).

Когда растворитель полностью испарится, на пленке появляются цвета интерференции, и примерно через 1 мин пленка застывает.

Подведя кольцо под пленку, его следует поднять и таким образом отделить пленку от воды. Края пленки обрезают вокруг кольца ножницами, а затем высушивают в сушильном шкафу при  $t^{\circ} \approx 60^{\circ} \text{C}$  в течение 5-10 мин.

Чтобы увеличить срок хранения пленки, ее целесообразно закрепить на стеклянной пластинке размером 45 x 60 мм. На промытую и протертую тампоном со спиртом поверхность стекла опускают с высоты 1-2 см несколько капель раствора, который растекается, образуя тонкую пленку. Затем пленка высыхает.

Еще один вариант изготовления тонких полиэтиленовых пленок. Полиэтилен растворяют в теплом толуоле, после чего выливают на стеклянную пластинку. После испарения толуола пленку отделяют водой.

## 5.5. Интерференция света. Кольца Ньютона. (Плоская и плоско-выпуклая стеклянные пластинки)

**Приборы.** Прибор на штативе для получения и демонстрации колец Ньютона, проекционный аппарат «Святязь-Авто», проекционный объектив для получения изображения колец на экране, экран.

**Опыт.** Схема опыта полностью аналогична схеме опыта 5.3, в которой вместо проволочного треугольника ставится прибор для демонстрации колец Ньютона. Явление наблюдают в отраженном свете. Обратную призму можно не ставить.



Устройство прибора: в нем соприкасаются две стеклянные пластинки - плоская и плоско-выпуклая, между их поверхностями образуется воздушный клин. Пластинки заключены в оправу, снабженную винтами, которые позволяют плавно изменять расстояние между пластинками. С помощью шести регулирующих винтов показывают расширение или сжатие колец при сближении или удалении стеклянных пластинок. Опыт производится в затемненной аудитории.

**Объяснение опыта.** Интерференционные кольца являются частным случаем линий равной толщины. Интерферируют пучки света, отраженные от двух поверхностей воздушного клина, возникшего между плоской стеклянной пластинкой и положенной на нее плоско-выпуклой стеклянной пластинкой.

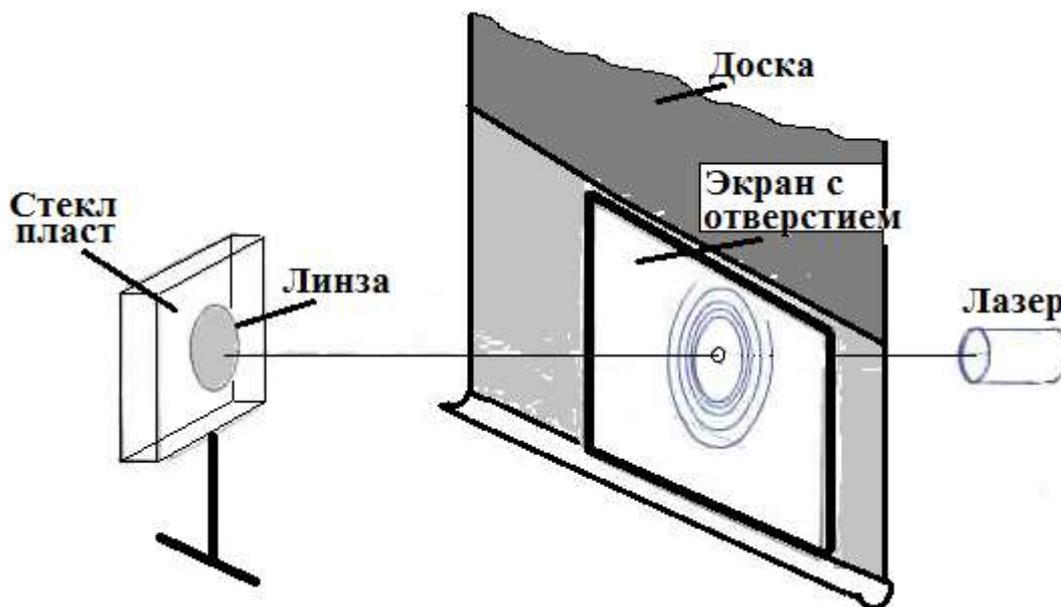
**Второй вариант опыта** проще – наблюдение ведут в проходящем свете. Прибор для демонстрации колец Ньютона вынимают из штатива и кладут на предметный столик диапроектора «Полилюкс». На большой экран проектируют поверхность соприкосновения пластинок прибора. Показывают расширение, сжатие и перемещение колец Ньютона при сближении или удалении стеклянных пластинок с помощью регулировочных винтов.

## 5.6. Интерференция света. Кольца Ньютона. (Стеклянная пластинка и плоско-выпуклая линза)

**Приборы:** Плоско-выпуклая линза, зажатая между двумя плоско-параллельными стеклянными пластинками, гелий-неоновый лазер, переносной небольшой экран из белой ватманской бумаги в деревянной рамке с малым отверстием посередине экрана. Опыт проводят в затененной аудитории.

**Опыт.** Опыт создан доцентом А.И. Лютым.

Переносной экран устанавливают в ложбину для мела аудиторной доски и опускают верхнюю доску так, чтобы она поддерживала переносной экран и закрывала все ненужные детали обстановки. Луч лазера, установленного в демонстрационной аудитории, пропускают через малое отверстие в переносном экране так, чтобы он падал точно посередине установленной на большом демонстрационном столе линзы. Слегка перемещая пластинку с линзой, добиваются того, чтобы отраженные обратно лучи попадали на переносной экран. Вокруг отверстия в экране появляется интерференционная картина, имеющая вид кольцевых полос.



На экране можно наблюдать множество ярко видимых концентрических колец Ньютона.

## 5. 7. Дифракция лазерного света на дифракционной решетке

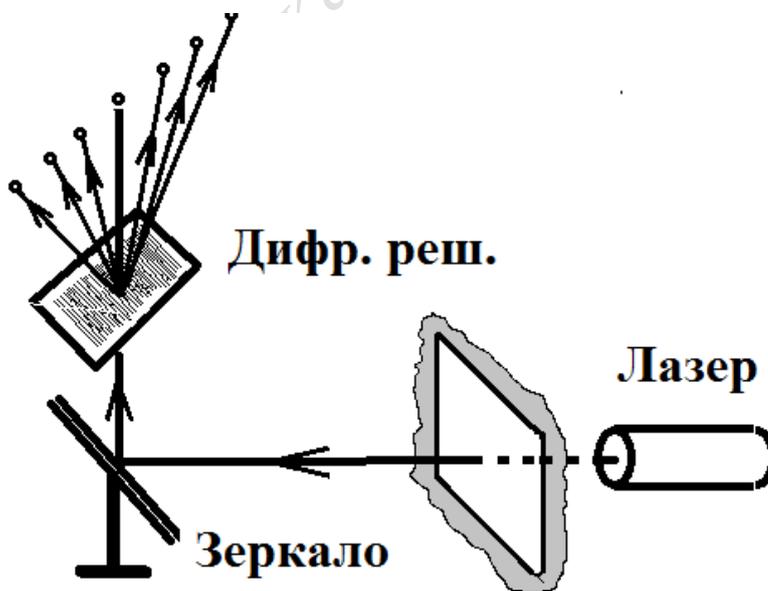
**Приборы:** гелий-неоновый лазер, генерирующий свет на длине волны  $\lambda = 632,8$  нм (красная часть видимого спектра), поворотное зеркало на подставке, набор дифракционных решеток. Опыт проводится в затененной аудитории.

**Цель опыта:** наблюдение дифракции монохроматического света на дифракционной решетке и зависимости положения дифракционных максимумов от периода (постоянной) дифракционной решетки.

**Опыт.** Свет от лазера, стоящего в демонстрационной аудитории, через «окно» попадает в лекционную аудиторию на поворотное зеркало, а от него на потолок аудитории (см. рис.). Слушатели наблюдают яркое пятно на потолке.

Затем демонстратор ставит на пути светового отраженного от зеркала луча по очереди дифракционные решетки с разным числом штрихов на 1 мм.

На потолке наблюдается система дифракционных максимумов разного порядка. Легким вращением решетки вокруг луча показывают, что центральное пятно остается при этом на месте. Лектор обращает внимание на изменение расстояния между максимумами в дифракционных картинах при изменении периода решеток.



Эффектная картина дифрагировавших лучей наблюдается, если использовать дым от сигареты, которым можно обозначить ход лучей.

Затем лектор поворачивает решетку на  $90^\circ$  вокруг луча. Теперь дифракционные пятна идут не поперек потолка аудитории, а вдоль него. Следует вопрос, адресованный слушателям. «А что будет наблюдаться, если наложить две решетки друг на друга?» Ответ всегда правильный: «Периодическая плоская система световых пятен».

Для опыта берут две одинаковые решетки. Показывают спектры от каждой решетки отдельно. Затем решетки накладывают друг на друга, постепенно поворачивая от параллельного направления щелей до перпендикулярного и наблюдают дифракцию.

Лектор: «Своеобразной дифракционной решеткой является капроновая ткань, волокна которой идут правильными рядами вдоль и поперек». На пути луча лазера ставится кусок капроновой ткани. На потолке наблюдают дифракционный «крест».

Наконец, на пути луча ставится стекло, покрытое специальным образом густо нанесенными на него рассеивающими частицами. Моделируется оптический феномен в природе - «гало», светящееся кольцо вокруг источника света. Это дифракционное явление в природе вызвано ледяными кристаллами в облаках.

**Объяснение опыта.** Дифракция на дифракционной решетке объясняется интерференцией лучей от различных щелей решетки. Формула максимумов интерференции  $d \sin \varphi = k \lambda$ , где  $d$  - период (постоянная) решетки,  $\varphi$  - угол, под которым наблюдается максимум,  $k$  - порядок максимума,  $\lambda$  - длина волны света. На основании формулы лектор объясняет, почему с увеличением числа штрихов на единицу длины (т.е. с уменьшением периода решетки) максимумы расходятся больше.

*Указание.* Лазер надо включить заранее перед лекцией и закрыть выход луча чехлом.

## 5.8. Дифракция лазерного света на круглом экране. Пятно Пуассона

**Приборы:** He-Ne лазер (1), проекционный объектив, расширяющий лазерный пучок (2), прозрачная пластинка с укрепленным на ней шариком (3), полупрозрачный экран из матированного стекла (4). Опыт следует проводить в затемненной аудитории.

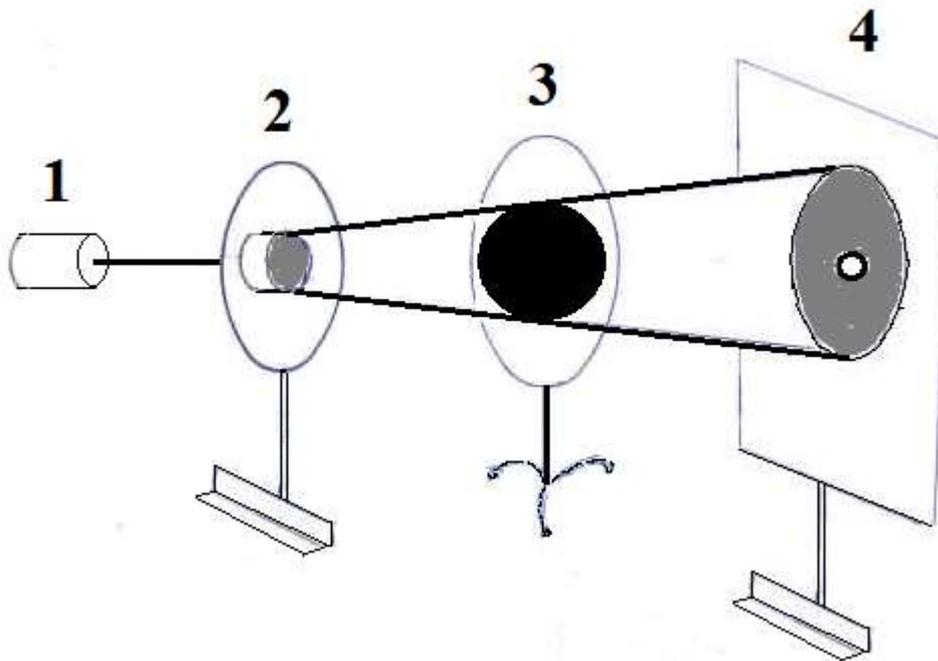
Опыт создан доцентом А.И. Лютым.

**Опыт:** пучок света от лазера, попадая на проекционный объектив, расширяется в виде узкого конуса, падает на пластинку с шариком от подшипника. В результате дифракции на шаре (здесь он играет роль круглого препятствия) в центре тени от шара всегда будет светлое пятно, которое называется пятном Пуассона. Наблюдение ведут со стороны аудитории, тень и светлое пятно видимы через полупрозрачный экран.

**Объяснение опыта.** Если между точечным источником света и точкой наблюдения поместить круглый диск, то он закроет несколько, например,  $m$  центральных зон Френеля. Тогда амплитуда света в центре дифракционной картины будет равна

$$A = A_{m+1} - A_{m+2} + A_{m+3} - \dots = \frac{A_{m+1}}{2} + \left( \frac{A_{m+1}}{2} - A_{m+2} + \frac{A_{m+3}}{2} \right) + \dots \approx \frac{A_{m+1}}{2}.$$

Таким образом, в центре дифракционной картины при любом  $m$  всегда получается светлое пятно, интенсивность которого зависит от номера первой открытой зоны Френеля.



### 5.9. Дифракция на дифракционной решетке в белом свете

**Приборы.** Диапроектор «Пеленг» 500-А. Слайд со щелью. Набор дифракционных решеток. Экран.

**Опыт.** Включают диапроектор в сеть. Перемещая объектив диапроектора с помощью регулировочного винта красного цвета, добиваются резкого изображения на экране узкой щели от вставленного в проектор слайда.

Затем перед объективом проектора помещают дифракционную решетку. Ее держат в руке так, чтобы пучок света, выходящего из объектива, по возможности полностью покрывал решетку. На экране получается изображение щели, по обе стороны от которого (центральной белой полосы) располагаются дифракционные полосы спектральных цветов – максимумы 1-го, 2-го и так далее порядков, разделенные неосвещенными промежутками.

Заменяют дифракционную решетку другой, с меньшим периодом. Количество наблюдаемых порядков спектров и ширина наблюдаемых цветных полос спектров зависит от числа штрихов на 1 мм решетки. При уменьшении периода решетки полосы становятся шире.

### 5.10. Опыт с зонной пластинкой

**Приборы.** Зонная пластинка для акустических волн 1 состоит из последовательно чередующихся прозрачных и непрозрачных колец. Диаметр всей пластинки около 90 см. Пластинка изготовлена из проволочного каркаса, четные зоны закрыты звуконепропускаемым материалом (бархатом). Источник звука - электродинамический излучатель 2, питаемый током от звукового генератора ГЗ-34 (3). Излучатель помещен в деревянный ящик с внутренней звукоизоляцией. Выходное

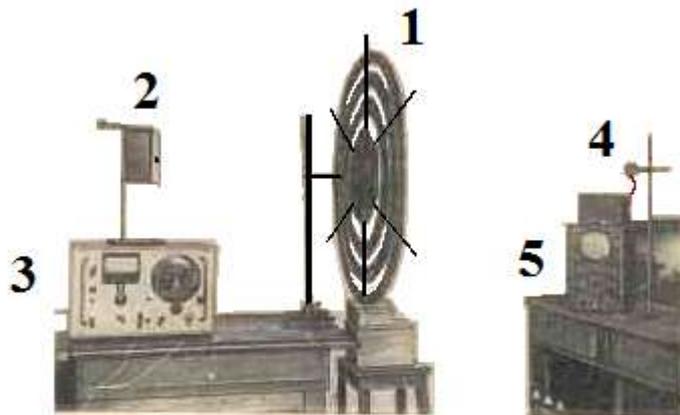
отверстие диаметром 1,5 см. Приемником звука является пьезотелефон 4, сигнал от которого подается на осциллограф 5.

**Опыт.** Включают излучатель звука и приемник. На экране осциллографа наблюдают синусоиду. Размещают на подставке зонную пластинку между источником и приемником звука. Амплитуда синусоидальных колебаний возрастает в 2-3 раза.

**Объяснение опыта.**

Зонной пластинкой называется экран, который перекрывает все зоны Френеля одинаковой четности. Это приводит к увеличению интенсивности принимаемого сигнала (см., например, [1]).

Применение зонных пластинок для световых волн в условиях лекционных демонстраций затруднено. Поэтому зонная пластинка создана для акустических волн. Выбор закрытых зон производился с учетом того, что наибольшая убедительность опыта будет в том случае, когда закрыта центральная зона. Расчет радиусов зон производился по известным формулам. Данная зонная пластинка содержит семь зон Френеля, перекрыты четные зоны, главное фокусное расстояние пластинки  $F = 100$  см. В опыте используются звуковые волны с частотой 9 кГц.



### 5.11. Понятие о спектральном анализе. Демонстрация фотографии спектров

**Приборы:** диапроектор «Полилюкс», фотопластинка с фотографиями спектров. Опыт следует проводить в затемненной аудитории.

**Опыт.** На большой экран проектируются фотографии спектров Zn, Cu и латуни. Они расположены специально рядом так, чтобы видно было, какие характерные линии цинка и меди повторяются в спектре латуни (цинк + медь = латунь). Затем отдельно демонстрируется сложный спектр железа.

### 5.12. Голограмма

**Приборы:** фотопластинка с голограммой, гелий-неоновый лазер, проекционный объектив на подставке. Опыт следует проводить в затемненной аудитории.

**Опыт.** Свет от He-Ne лазера, стоящего в демонстраторской аудитории, через «окно» попадает на проекционный объектив. Проекционный объектив на подставке устанавливают на т.н. «перпендикулярном» демонстрационном столе. Формируется расходящийся лазерный пучок.

Демонстратор поднимается по средним ступенькам аудитории, держа в руках голограмму. Примерно в середине подъема голограмма освещается полностью расходящимся лазерным пучком.

Студентов приглашают по очереди заглянуть в голограмму со стороны падающего лазерного пучка. (При этом надо стараться не перекрывать собой пучок света).

Глядя в голограмму, все видят с другой стороны как бы висящий в воздухе трехмерный объект.

**Объяснение опыта.** Демонстрация основана на явлении дифракции света на двумерной структуре, возникшей в слое фотоэмульсии в результате интерференции двух когерентных световых пучков: опорного и рассеянного предметом, изображение которого записывалось на голограмме на стадии её изготовления.

**Указание.** Категорически недопустимо ориентировать лазер так, чтобы его прямой свет мог попасть в глаза присутствующих в аудитории.

### (\* ) 5.13. Поляризация света при отражении от поверхности диэлектрика

**Приборы:** Источник света – диапроектор ЛЭТИ-60 М. Малая оптическая скамья. Диафрагма. Собирающая линза. Стопа Столетова. 2 черных зеркала – на низкой и высокой подставках. Малый поляроид. Модель поляризации света при отражении.

**Опыт.** Опыт следует проводить в затемненной аудитории.

А). Черное диэлектрическое зеркало устанавливают на пути светового пучка. Отраженный луч направляют на потолок или стену аудитории. Пользуясь малым поляроидом как анализатором, исследуют отраженный луч. Вращая поляроид вокруг луча, наблюдают изменение яркости светового потока вплоть до гашения луча. Это означает, что отраженный от поверхности диэлектрика свет поляризован.

Б) Если сложить вместе 8-10 стеклянных пластинок (т.н. «стопа Столетова»), то при падении на них света под углом Брюстера и прошедший, и отраженный лучи окажутся практически полностью поляризованными. Поэтому стопа Столетова может служить в качестве поляризатора и анализатора, как в отраженном, так и в проходящем свете.

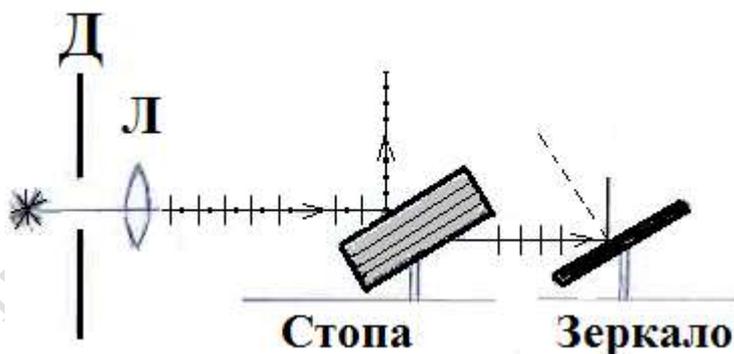
Оправа стопы Столетова служит для установки ее под углом Брюстера.

На оптической скамье устанавливают стопу Столетова, которая делит луч на два – преломленный и отраженный. Показывают, что отраженный и преломленный лучи поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях. Для этого снова используют в качестве анализатора малый поляроид в оправе. Действия аналогичны случаю А).

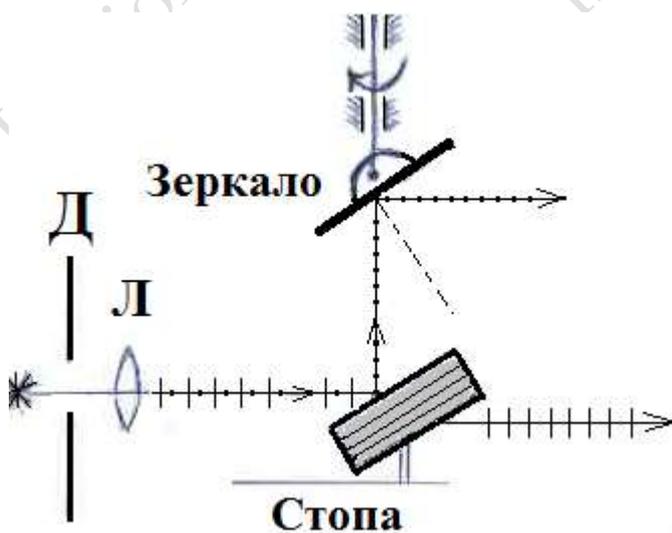
В). Более сложный вариант опыта – в качестве анализатора используется черное диэлектрическое зеркало. Первая часть опыта – исследование преломлен-

ного стопой света. Устанавливают черное зеркало на низкой подставке так, чтобы на него падал *преломленный стопой* луч.

Отраженный от черного зеркала луч направляют на стену или потолок аудитории (см. рис). На них образуется светлое пятно. Отраженный от стопы луч закрывают картонкой, чтобы не мешал. Ось вращения зеркала служит направление падающего на него светового пучка. Поворачивая зеркало влево и вправо вокруг оси, наблюдают изменение яркости пятна. Максимум на стенах аудитории, минимум - на потолке (на рисунке видно, что в отраженном от зеркала на потолок луче нет колебаний, перпендикулярных плоскости падения).



Вторая часть опыта – исследование отраженного от стопы света. Устанавливают черное зеркало на высокой подставке так, чтобы на него падал *отраженный от стопы* луч. Преломленный луч закрывают картонкой. Вращая зеркало, видим, что интенсивность отраженного луча изменяется – максимум на стене, минимум – на потолке аудитории.



**Объяснение опыта.** Прошедший через стопу свет поляризован так, что колебания светового вектора происходят в плоскости падения.

Отраженный от поверхности диэлектрика (стеклянной пластинки стопы или поверхности черного диэлектрического зеркала) свет поляризован так, что колебания светового вектора происходят перпендикулярно плоскости падения.

Зеркало, поставленное под углом

Брюстера, отражает только те колебания, которые перпендикулярны плоскости падения света на зеркало.

Это обстоятельство объясняет оба варианта опыта.

**Примечание.** Опыт со стопой Столетова и черным диэлектриче-



ским зеркалом сопровождается демонстрацией *модели*, на которой показана поляризация лучей до и после отражения.

### (\* ) 5.14. Двойное лучепреломление в кристаллах исландского шпата

**Приборы:** оптическая скамья, проекционный фонарь, два кристалла исландского шпата в оправках, малый поляроид, николю, экран.

**Опыт.** Опыт следует проводить в затемненной аудитории. На специальную (малую) оптическую скамью устанавливается кристалл исландского шпата в оправе. При прохождении через него света от проекционного фонаря происходит расщепление светового луча на два - обыкновенный и необыкновенный, которые поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Лучи падают на большой экран, установленный за лекционной доской. На экране видны два световых пятна. Это следы обыкновенного и необыкновенного лучей.

Затем вращают кристалл шпата в оправе вокруг луча. Кристалл шпата ориентирован и закреплён в оправе таким образом, что при вращении оправы один из лучей остается на месте (обыкновенный), другой движется по окружности вокруг него (необыкновенный).



**Первый вариант опыта.** Поляризацию лучей можно проверить. Демонстратор (или лектор) подходит вплотную к большому экрану и исследует каждое из световых пятен поворотом малого поляризатора. Малый поляризатор держат на вытянутой руке близко к экрану настолько, чтобы его проекция была четко видна на экране. Оба луча можно погасить. Следовательно, оба они поляризованы, причем во взаимно перпендикулярных направлениях.

**Второй вариант опыта.** На скамью дополнительно ставится николю. Здесь он играет роль анализатора и заменяет малый поляроид предыдущего опыта. Вращая николю в оправе, гасят по очереди оба луча и приходят к тому же выводу, что и в первом варианте опыта.

### (\* ) **ЗАМЕЧАНИЕ.**

Этот и ряд других опытов, обозначенных звездочкой, интересны в чисто историческом плане. Современная техника физического эксперимента вместо николей использует более совершенные приборы и поляроиды. Кристаллы шпата яв-

ляются раритетами, сохранившимися, например, в НТУ «Днепровская политехника». Полагаем, что опыты с кристаллами шпата и николями можно показывать только при наличии большого учебного времени и соответствующего учебного плана (трехсеместровый университетский курс).

### (\* ) 5.15. Модель призмы Николя

Демонстрируется большая стеклянная модель призмы Николя. Первая поляризационная призма была изобретена У. Николем в 1828 г. Она изготавливается из двух призм из исландского шпата, склеенных канадским бальзамом вдоль диагональной плоскости. Модель дает пространственное представление о расположении сечения в призме Николя, о ходе обыкновенного и необыкновенного лучей и их поляризации.

Физические принципы работы призмы описаны в учебниках, например, [1], т.3, стр. 162.



### (\* ) 5.16. Поляризация света. Проверка закона Малюса с помощью двух николей

**Приборы.** Малая оптическая скамья. Два николя в оправках. Рейтеры. Осветитель. Экран.

**Опыт.** Опыт следует проводить в затемненной аудитории. На оптическую скамью ставят один за другим два николя (см. рис. к 5.14). Они играют роль поляризатора и анализатора. Включают осветитель. На экране наблюдают светлое пятно. При вращении одного из николей вокруг луча в соответствии с законом Малюса поле зрения постепенно

затемняется до полной темноты при скрещенных николях.

## 5.17. Свойства поляризованного света. Проверка закона Малюса с помощью двух поляроидов

**Приборы:** диапроектор «Полилюкс», большой и малый поляроиды, специальный держатель малого поляроида, экран. Опыт поводят в затемненной аудитории.

**Опыт.** Вначале на большой экран аудитории, расположенный за доской, проектируют естественный свет от проектора «Полилюкс». Демонстратор берет в руку малый поляроид, подходит к экрану и приближает малый поляроид к экрану настолько, чтобы получить его четкую проекцию. Свет, прошедший через малый поляроид на экран, имеет зеленоватый оттенок за счет селективного частичного поглощения света пленкой поляроида.

Демонстратор вращает малый поляроид вокруг направления светового потока. Аудитория видит, что изменения интенсивности света *не происходит*.

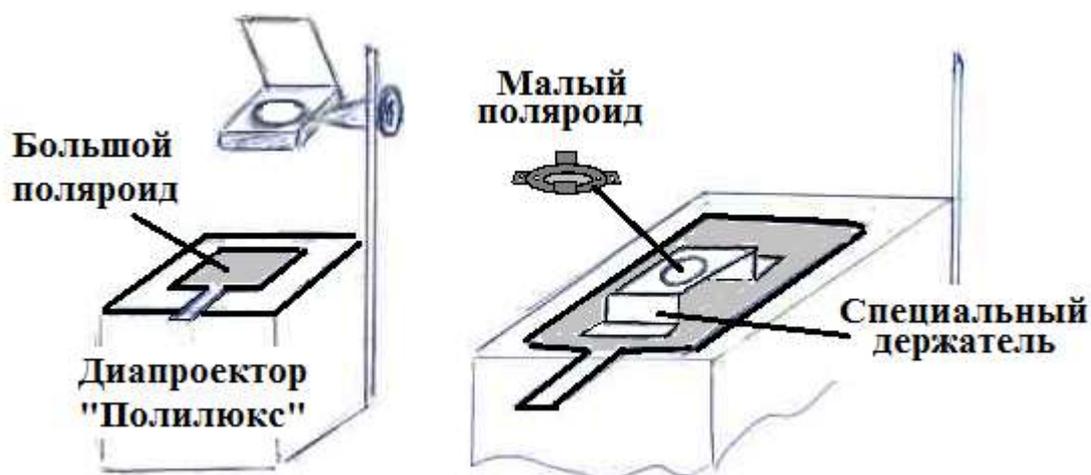
Затем на экран проектируют поляризованный свет. Для этого на предметный столик проектора «Полилюкс» кладут пластину поляроида **размером 20 X 30 см** от поляризационного микроскопа.

Демонстратор повторяет те же исследования света малым поляроидом. Слушатели видят, что поляризованный свет можно потушить вторым поляроидом.

## 5.18. Интерференция поляризованных лучей

**Приборы:** диапроектор «Полилюкс», большой и малый поляроиды, специальный держатель малого поляроида, слюдяные кружки, бабочка из слюды, экран.

**Опыт.** Опыт поводят в затемненной аудитории. На предметный столик

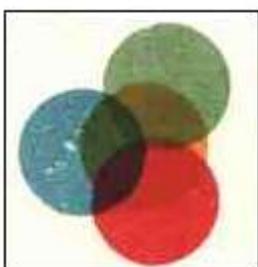
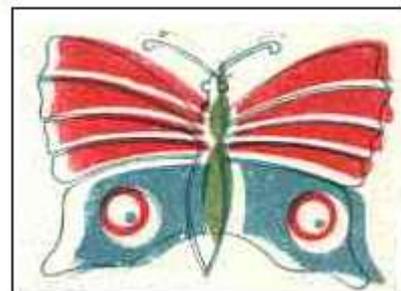


диапроектора кладут большую пластину поляроида, сверху которого ставят держатель малого поляроида. На пластину

большого поляроида под держатель помещают по очереди: **кусочек минерала слюды**; стеклянную пластинку с наклеенными **слюдяными кружками**, **фигурку бабочки**, вырезанную из слюды.

С помощью объектива диапроектора настраивают четкое изображение слюдяных кружков на большом экране.

Затем вставляют в отверстие держателя малый поляроид. На экране появляется цветное изображение слюдяных кружков. Поворачивая малый поляроид на  $90^\circ$ , наблюдают, как окраска кружков слюды изменяется на дополнительную (дополнительными являются цвета, при смешении которых возникает белый цвет).



**Объяснение опыта.** Поляризованный при помощи большого поляроида белый свет, проходя слюдяные слои, испытывает двойное лучепреломление, разделяясь на две компоненты - обыкновенную и необыкновенную. Малый поляроид, играющий роль анализатора, выделяет из каждой компоненты те составляющие, вектора  $E$  которых параллельны плоскости анализатора; результат интерференции этих компонент и

наблюдается на экране. Цвета интерференции зависят от толщины слюдяного слоя, разности показателей преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей, а также длины волны падающего света. Толщина **слюдяных кружков** в разных местах пластинки разная, поэтому на экране наблюдается система полос равной толщины. Минимум в интерференции на одной из длин волн, входящих в состав белого света, означает максимум освещенности в цвете, дополняющем первую волну до белого. Поэтому при освещении слюдяных кружков белым светом на экране наблюдаются цветная картина.

### 5.19. Искусственная анизотропия. опыты с пластинками и моделями, помещенными между скрещенными поляроидами

**Приборы:** диапроектор «Полилюкс», большой и малый поляроиды, специальный держатель малого поляроида, набор прозрачных моделей из плексигласа и эпоксидной смолы (балка, пластинка, ферма моста), экран. Опыт поводят в затемненной аудитории.

**Цель опыта.** Показать, как в изотропных прозрачных телах под действием механических напряжений возникает двойное лучепреломление.

**Опыт.** Опыт поводят в затемненной аудитории. Включают диапроектор, кладут на его предметный столик большой поляроид, а на него – специальный держатель. В окошко держателя помещают малый поляроид. Таким образом, на экран проектируется свет, прошедший через два поляроида. Схема расположения приборов показана на рисунке к опыту 5.17.

Между специальным держателем и большим поляридом можно помещать различные пластинки и другие прозрачные предметы.

1. На большой поляриод под держатель помещают пластинку из чувствительной оптической пластмассы (два варианта – плексиглас белого цвета и эпоксидная смола желтого цвета), концы которой закреплены в обоймы с хвостовиками.

Предварительно убирают малый поляриод и с помощью объектива на экране получают четкое изображение пластинки. Ставят на место малый поляриод и, поворачивая его, добиваются минимума освещенности изображения на экране.

Затем хвостовики постепенно сжимают пальцами. Пластинка при этом растягивается в верхней части и сжимается в нижней части (изгиб). Недеформированной остается средняя часть. При изгибе кромки пластинки светлеют, а средняя часть остается затемненной.

В случае белой пластинки механически деформированные области изображения образца на экране просветляются. В случае желтой пластинки становятся видными цветные линии равных напряжений.

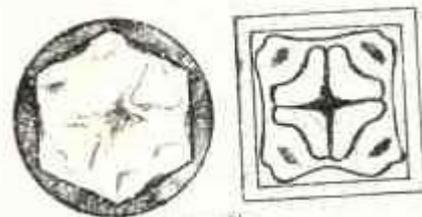


2. Теперь между скрещенными поляридами помещают круглую прозрачную пластинку в тисках, деформация которой происходит при завинчивании винта (шутливое название – средневековый «башмак инквизиции»). Имеются пластинки белого цвета из обычного плексигласа, и желтого цвета – из эпоксидной смолы. Завинчивая тиски и отпуская винт, наблюдают на экране движение полос равных напряжений.



3. Затем демонстрируется набор закаленных стекол в оправках. Видны картины распределения остаточных напряжений, возникших при остывании стекла. Поворотом малого поляриода изменяют цвета прошедшего света на дополнительные – черные места становятся белыми и наоборот.

**Объяснение опыта.** Оптически изотропное тело под действием механических деформаций становится оптически анизотропным. Возникает искусственная анизотропия, т.е. свойства среды в различных направлениях становятся неодинаковыми. В случае одностороннего сжатия или растяжения направление деформации играет роль оптической оси.

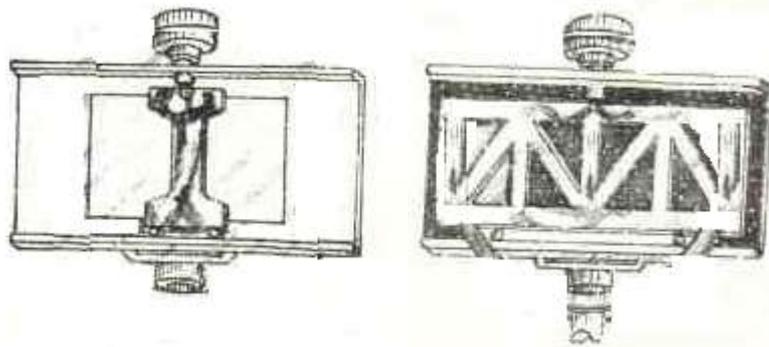


По характеру интерференционной картины судят о распределении деформаций. Это используется для оптического исследования напряжений в прозрачных моделях (метод фотоупругости). Изготовив модели реальных конструкций – балок, швеллеров, рельсов и т.д. – из прозрачной пластмассы, можно изучать картину распределения в них механических напряжений при различных видах нагрузки и давать рекомендации по совершенствованию их конструкции.

4. Для демонстрации оптического метода исследования напряжений изготовлена модель фермы железнодорожного моста из органического стекла, которая

нагружается завинчиванием винта. Скрещивают поляриды. Поле зрения становится темным. Вращая головку винта от руки, в местах концентрации напряжений наблюдают просветление поля зрения.

Постепенно ослабляют винт пресса. Картина распределения механических напряжений исчезает. Поле на экране снова становится затемненным.



5. В заключение демонстрируются специальные модели с «застывшими» напряжениями: крюк подъемного крана, своды тоннелей метро – треугольной и овальной формы.

## 5.20. Дисперсия света. Дисперсионные призмы и призма прямого зрения????????

**Приборы.** Осветитель (например, диапроектор «Пеленг» 500-А). Диафрагма с вертикальной щелью. Набор стеклянных призм. Экран.

**Опыт.** Включают диапроектор в сеть. Перемещая объектив диапроектора с помощью регулировочного винта, добиваются резкого изображения на экране узкой щели от вставленного в проектор слайда.

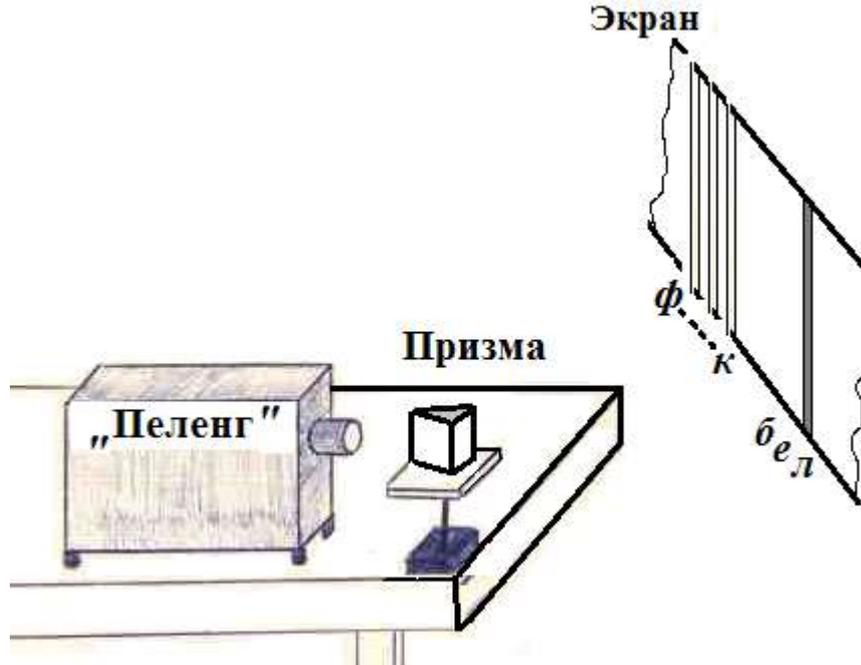
Затем перед объективом проектора помещают на предметном столике призму. Одна из граней призмы должна быть параллельна направлению распространения луча света.

На экране получается изображение щели, по одну сторону от которого (центральной белой полосы) располагается дисперсионный спектр.

В отличие от дифракционного спектра, ближняя к центру линия - красная.

Затем на предметный столик помещают по очереди призмы с различными показателями преломления - из стекла сорта «крон» и стекла сорта «флинт».

Для призмы из стекла «тяжелый флинт» отклонение луча больше и дисперсия больше, чем для призмы из стекла «легкий крон». Это объясняется тем, что для «флинта»  $n \approx 1,66$  (от красного до фиолетового цвета), а для «крона»  $n \approx 1,52$ .



## 5.21. Демонстрация световода

**Приборы:** блок лазерного излучателя ( $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$ ) из учебного прибора ЭСФЭ-1 «Оптика», световод, переносной экран.

**Опыт.** Блок лазерного излучателя устанавливается на демонстрационном столе так, чтобы лазерный пучок был направлен вдоль стола в сторону от наблюдателей. Переносной экран, закрепленный в рейтере, располагают на небольшом удалении под небольшим углом к оси падающего пучка.

На механической оси блока лазерного излучателя устанавливается блок линз в положение «Л», чем получают точечный источник света.

Затемняют аудиторию. Включают лазер.

Получают на экране яркое пятно от лазерного пучка света. Если есть возможность, задымляют путь лазерного луча, демонстрируя его прямолинейность. Устанавливают и закрепляют на механической оси блока лазерного излучателя согласователь с световодом. Вращая сначала одну из эксцентрических втулок согласователя, добиваются максимально яркого пучка на выходе световода. Затем, отпустив ручку-винт, освобождают вторую эксцентрическую втулку согласователя. Поворачивая ее, добиваются равномерной освещенности светового пятна на экране от пучка, выходящего из световода. Зажимают ручку-винт.

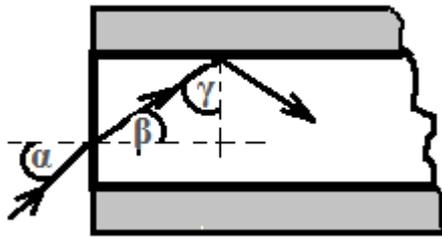
Концом оголенной части световода водят по переносному экрану, демонстрируя перемещение светового пятна.

Осторожно сгибают гибкую стеклянную жилу световода. Обращают внимание на возросшее рассеяние света в месте изгиба.

### Объяснение опыта.

Когда световой пучок распространяется в атмосфере, он частично расходится, поглощается и рассеивается. Можно значительно уменьшить потери световой энергии, а также передавать свет по криволинейным траекториям с помощью световода.





Направим световой луч на торец тонкого стеклянного цилиндрического стержня, покрытого оболочкой с меньшим, чем у стекла показателем преломления.

Лучи, входящие в сердцевину даже под достаточно большими углами к оси стержня будут испытывать *полное внутреннее отражение* на границе раздела сердцевины и оболочки и будут распространяться только вдоль сердцевины. Такое устройство называется световодом.

Световоды представляют собой тонкие, гибкие и длинные цилиндрические прозрачные стеклянные волокна, покрытые оболочкой с показателем преломления  $n_2 < n_1$ . Доказывается, что показатель преломления волокон должен удовлетворять условию  $n_1 \geq \sqrt{2}$ .

Волокна объединяют в жгуты. Если один конец жгута привести в контакт со светящимся предметом, то на другом его конце образуется изображение. При определенном изгибе световода нарушается условие полного внутреннего отражения – часть луча рассеивается, выходя наружу.

Световоды находят применение в системах оптической связи, в вычислительной технике, для передачи мощного лазерного излучения по криволинейным каналам для медицинских и технологических целей и др.

**Примечание.** Во время перерыва между лекциями прибор доступен для близкого осмотра.



## **Часть 6**

# **КВАНТОВАЯ ФИЗИКА**

Національний технічний університет  
«Дніпровська політехніка»

кафедра фізики

<http://physics.ntu.org.ua>

## 6.1. Тепловое излучение. Демонстрация закона Кирхгофа

**Приборы.** Специальный сосуд – плоская металлическая фляга. Одна боковая поверхность этой фляги покрашена черной краской, а другая – зеркальная. Демонстрационный столик. Электрический чайник с кипятком. Термостолбик. Измеритель демонстрационный ИД-1. Экран.

**Опыт.** Собирают схему с ИД-1. Фиксируют световую точку посередине шкалы. Клеммы термостолбика соединяют с входом ИД-1. Вначале поворачивают термостолбик приемным рупором к зеркальной и черной поверхностям пустой фляги. Показания одинаковые («зайчик» на середине шкалы). Это естественно, т.к. фляга пустая и холодная.

Затем на глазах аудитории наливают во флягу кипятком, и флягу заворачивают крышкой. Обе поверхности фляги, таким образом, приобретают одинаковую температуру (полагают, около  $100^{\circ}\text{C}$  – чайник недавно кипел).



Флягу по очереди обращают черной и зеркальной сторонами к термостолбику, соединенному с измерителем. Отклонение зайчика на шкале прибора (проще направлять световую точку лазерного излучения не на шкалу прибора, а прямо на большой экран в аудитории) будет явно больше в том случае, когда излучает черная поверхность.

Если возникают проблемы с термостолбиком, можно поступать проще.

В качестве простейшего регистрационного прибора можно использовать органы чувств человека – ощущение тепла тыльной стороной ладони или кожей лица. Приглашается студент, которого просят закрыть глаза и к щеке которого по очереди подносят флягу с кипятком черной и зеркальной сторонами.

Аудитория видит, какой стороной обращен к щеке студента излучатель. Студент с закрытыми глазами определяет, что черная сторона греет сильнее.

**Объяснение опыта.** Согласно закону Кирхгофа, черная поверхность при той же температуре, что и зеркальная, должна излучать инфракрасные электромагнитные волны сильнее.

**Указание для демонстратора.** Чтобы налить кипятком через узкое отверстие в верхней части сосуда и не допустить образования воздушных пробок, в отверстие при наливке вставляется стеклянная лейка, а проще, отрезок толстой медной проволоки.

## 6.2. Модель абсолютно черного тела

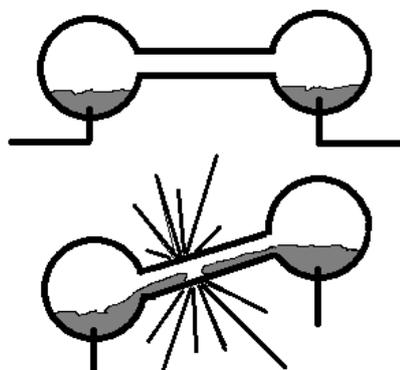
Покрашенная черной краской сферическая оболочка (обычно для этих целей переделывают школьный глобус). На поверхности сферы проделано небольшое круглое отверстие, диаметром примерно 1 см. Отверстие имитирует черное тело – на фоне черной поверхности сферы отчетливо выделяется еще более черное отверстие.



## 6.3. Внешний фотоэффект

**Приборы.** Ртутная лампа, трансформатор ртутной лампы, цинковая пластина, укрепленная на изолирующей подставке, электроскоп, палочки: стеклянная и лист резины, пластмассовая и кусок шерстяной ткани, лист оконного стекла, соединительные провода.

**Схема опыта.** Свет от ртутной дуговой лампы попадает на цинковую пластину. Пластина соединена проволокой с электроскопом. Пластину заряжают либо положительно, либо отрицательно и наблюдают выбивание светом электронов с поверхности пластины.



А

Б

Вначале зажигают ртутную дуговую лампу. Собирают схему: трансформатор для ртутной лампы (находится внизу левой части демонстрационного стола) соединяют трехразъемным штекером с ртутной лампой. Двухразъемным концом трансформатор включают в розетку на столе с надписью «120 В».

Главная часть ртутной лампы - колба с ртутью и двумя электродами (см. рис.).

В исходном положении А колба расположена горизонтально, цепь разорвана и ток через лампу не идет.

Затем правой рукой давят на пусковую кнопку сверху трансформатора, а левой рукой медленно поворачивают ручку на тыльной стороне лампы – ртутную колбу – так, чтобы ртуть переливалась из одного конца колбы в другой (ситуация Б на рисунке).

Ручку ртутной лампы поворачивают резко на себя, а затем плавно от себя пока не возникнет разряд в лампе.



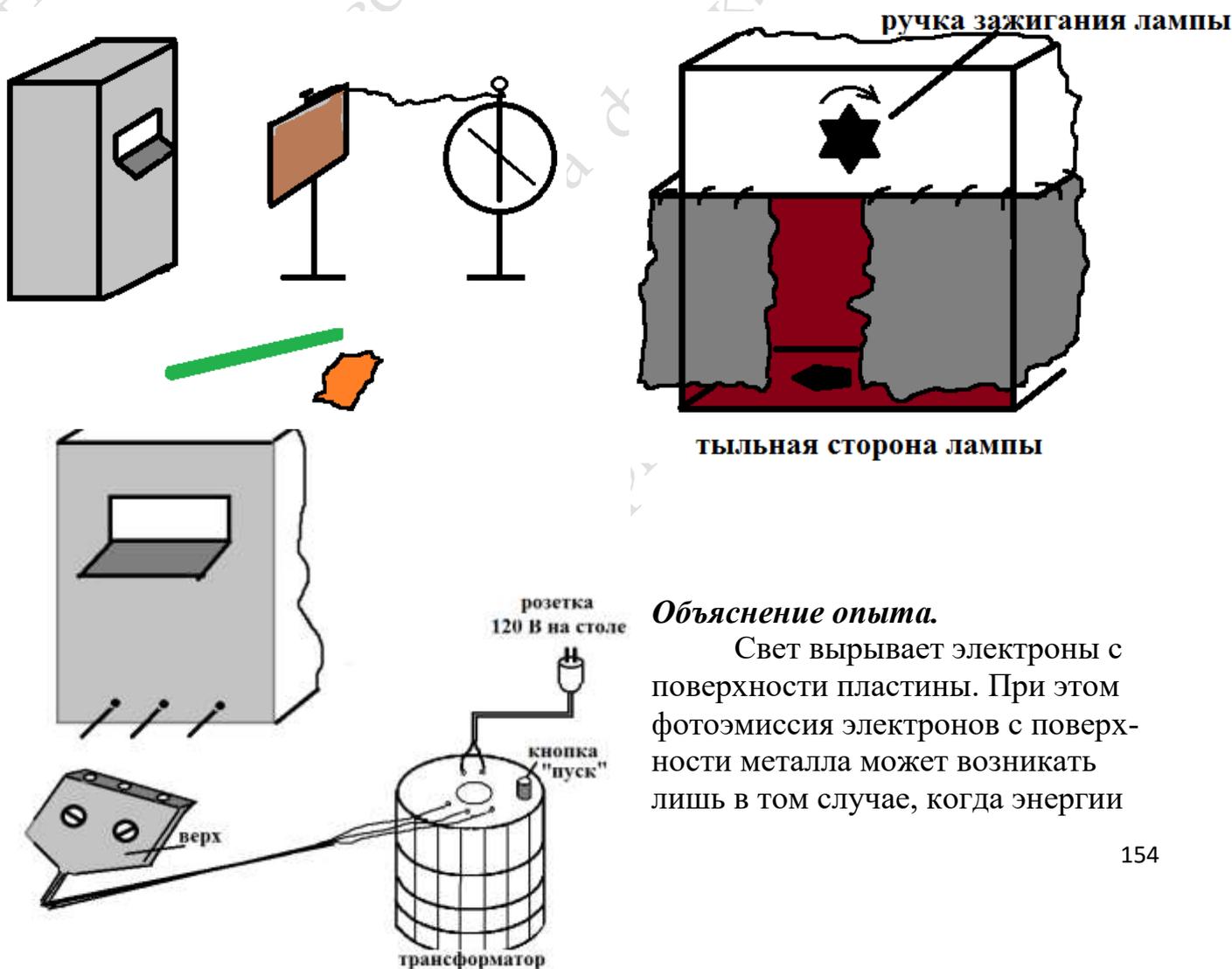
В месте разрыва ртути при наклоне загорается дуговой разряд, который продолжает гореть в парах ртути и при возвращении колбы в горизонтальное положение. Окошко лампы закрывают из-за очень яркого видимого света и ультрафиолета.

**Опыт.** Затем начинается собственно опыт. Сначала заряжают цинковую пластину положительно от стеклянной палочки, потертой о резину. Электроскоп показывает наличие определенного заряда. Открывают окошко ртутной лампы и наблюдают за показаниями электроскопа. Уменьшение заряда практически не происходит. Закрывают окошко.

После этого разряжают электроскоп прикосновением руки и снова заряжают, но теперь отрицательно. Открывают окошко лампы. При освещении пластинки стрелка электроскопа показывает быстрое уменьшение заряда.

Повторяют последний вариант опыта, но на пути света из окошка ставят пластину из оконного стекла. Стекло задерживает ультрафиолет и пропускает видимый свет. Отрицательный заряд не уменьшается, стрелка электроскопа не движется. Убирают стекло – фотоэффект происходит. Если попеременно ставить и удалять стекло, можно то останавливать стрелку электроскопа, то заставлять ее двигаться.

**Примечание.** Перед показом опыта цинковую пластинку зачищают мелкой наждачной бумагой («шкуркой») для снятия окислов.



**Объяснение опыта.**

Свет вырывает электроны с поверхности пластины. При этом фотоэмиссия электронов с поверхности металла может возникать лишь в том случае, когда энергии

падающего кванта достаточно для совершения работы выхода, что в данном эксперименте соответствует ультрафиолетовому свету.

При положительном заряде цинковой пластины возникает дополнительное кулоновское притяжение вырванных светом электронов к ее поверхности. Вырванные светом электроны притягиваются к пластине и снова оседают на ней, что приводит к сохранению заряда металлической пластины.

Отрицательное зарядание этой пластины приводит к отталкиванию эмитированных электронов от её поверхности и электроскоп разряжается.

Стекло сильно поглощает ультрафиолетовые лучи – при установке стеклянной пластины на пути светового пучка фотоэмиссия прекращается.

## 6.4. Фотореле

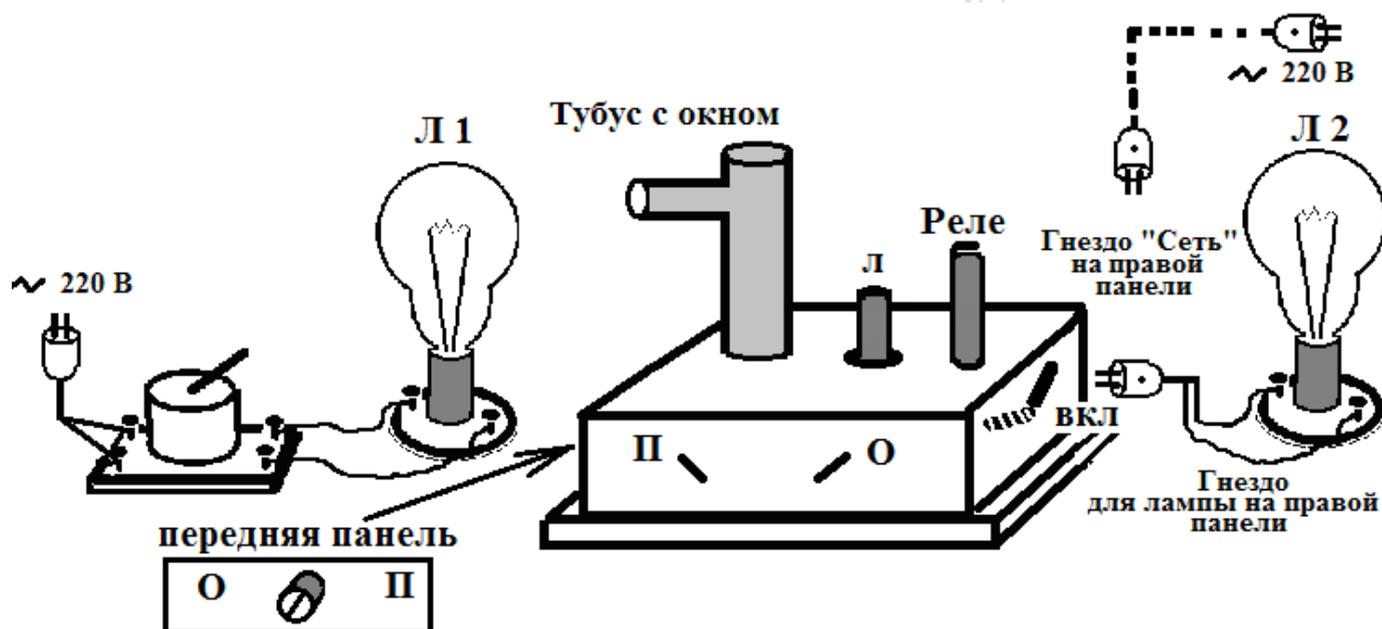
**Приборы.** Фотореле с вакуумным фотоэлементом. Фотореле с фототранзистором. Лампы накаливания на подставках. Выключатель. Соединительные провода.

**Опыт.** Есть два варианта опыта.

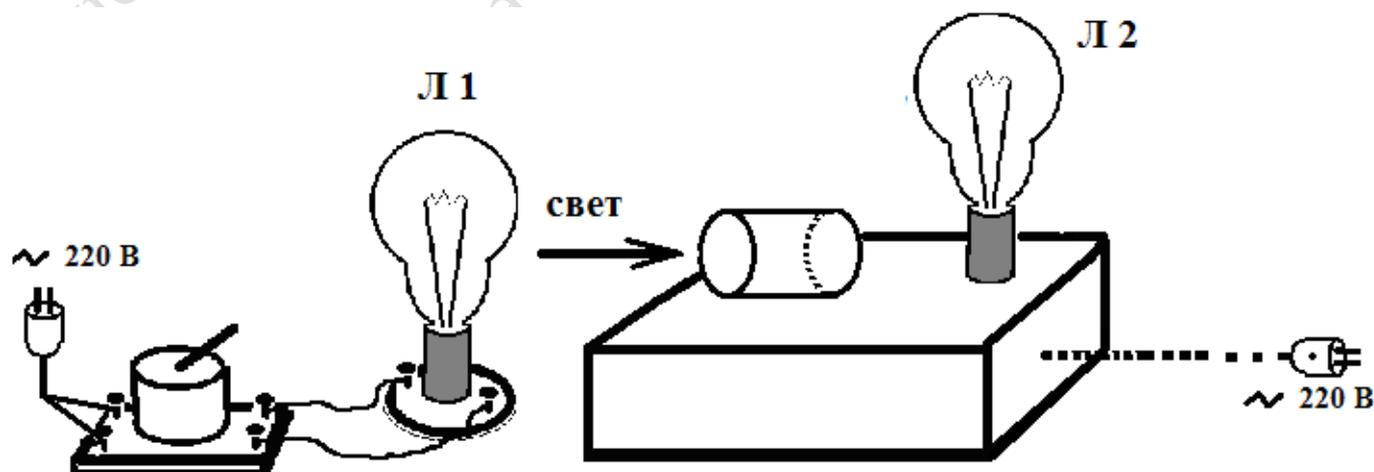
**Первый вариант** – на основе стеклянного вакуумного фотоэлемента (опыт морально устарел и демонстрируется редко).

Вакуумный фотоэлемент установлен на панели лампового усилителя. (Демонстратор снимает защитный чехол-тубус, и фотоэлемент становится виден аудитории).

Свет от лампы накаливания попадает в окошко тубуса и далее на фотоэлемент. Фототок усиливается ламповым усилителем, усиленный ток приводит в действие электромагнитное реле. Если фотоэлемент срабатывает, загорается вторая лампа, включенная в гнездо на правой панели. Можно настроить прибор поворотом регулировочного винта на передней панели прибора таким образом, чтобы при срабатывании фотоэлемента вторая лампа, наоборот, гасла. (П - прямое включение, О - обратное). Последнее моделирует ситуацию автоматического выключения уличного освещения (вторая лампа) при восходе солнца (первая лампа).



*Второй вариант* использует более современную полупроводниковую схему с фототранзистором. Свет от лампы Л 1 направляют в пластиковый цилиндр, в заднем торце которого расположен фотоприемник.



Перекрывая ладонью свет от лампы Л 1 , демонстратор зажигает (или гасит) лампу Л 2. Если ладонь растопырить, можно «считать пальцы» на руке.

## 6.5. Фотолюминесценция. Флуоресценция и фосфоресценция

*Приборы.* Набор трубок с флюоресцирующими жидкостями, порошкообразными люминофорами. Ртутная лампа.

*Опыт.* Этот опыт всегда является продолжением опыта 6.3 «Внешний фотоэффект», поскольку используется зажженная ртутная лампа - мощный источник ультрафиолета.

Тыльная часть ртутной лампы специально изготовлена в виде своеобразной «сцены», закрытой шторками (см. рис.). Это зона ультрафиолетового излучения ртутной лампы. Аудиторию затемняют и на «сцену» по очереди выставляют:

- кусок мела на ладони – в УФ мел имеет коричневый цвет;
- нефть в пробирке;
- минерал флюорит, в УФ минерал светится голубыми и фиолетовыми оттенками;
- наборы жидких и порошкообразных веществ. Особенно эффектно т.н. «послесвечение», когда вынесенный за пределы лампы набор порошков продолжает светиться в темноте;
- наибольший интерес аудитории вызывают денежные купюры – гривни и доллары – в ультрафиолетовом освещении видна защитная люминесцирующая краска.

**Объяснение опыта.** Фотолюминесценция – разновидность люминесценции, которая возникает при облучении вещества светом.

При облучении вещества светом происходит переход электронов на более высокий энергетический уровень.

$$E_2 - E_1 = h\nu$$

После поглощения света часть полученной энергии расходуется в результате релаксации. Оставшаяся часть может быть испущена в виде фотона. Поэтому при люминесценции излучаются, как правило, фотоны с меньшими частотами (большими длинами волн, стоксово излучение).

По длительности люминесценции ее подразделяют на флуоресценцию (малое время послесвечения) и фосфоресценцию (длительное свечение).

Опыт иллюстрирует явления флуоресценции жидкостей и фосфоресценции порошкообразных люминофоров, возбуждаемых ультрафиолетовым светом.

## 6.6. Дозиметрические приборы

Для измерения бета- и гамма-излучения используют различного рода радиометры, дозиметры и другие приборы.

В качестве детектора ионизирующего излучения часто применяют газоразрядные **счетчики Гейгера-Мюллера (рис.1)**.

Счетчик Гейгера-Мюллера состоит из металлизированной изнутри стеклянной трубки (в других радиометрах из металлической тонкостенной трубки), вдоль оси которой протянута тонкая металлическая нить (рис.2).



Рис.1.

Принципиальная схема любого газоразрядного дозиметрического прибора показана на рис. 2.

Трубка служит катодом, нить – анодом. Между нитью и стенками трубки приложено напряжение в несколько сотен вольт. Герметический резервуар заполняется инертным газом при пониженном давлении 100 — 200 мм рт. ст. Это

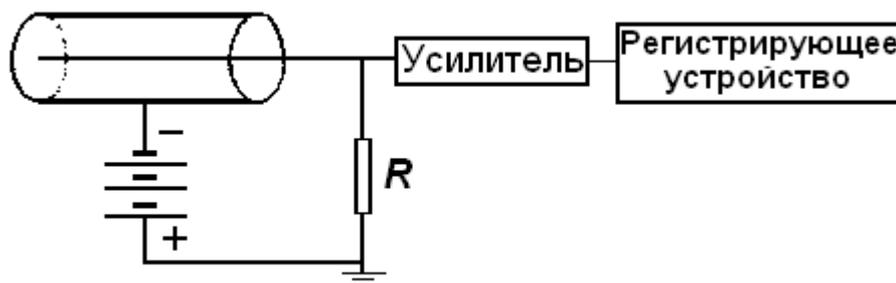


Рис. 2.

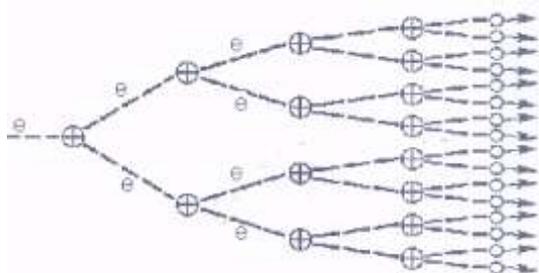


Рис. 3.

делается для увеличения длины свободного пробега и облегчения ударной ионизации газа.

Проникая внутрь трубки,  $\gamma$ -излучение ионизует атомы газа на своем пути. Возникающие свободные электроны движутся к нити.

Вблизи нити напряжённость электрического поля велика, и электроны ускоряются настолько, что начинают в свою очередь ионизовать газ. По мере приближения к нити число электронов лавинообразно нарастает (рис. 3).

За счет ударной ионизации возникает коронный разряд, распространяющийся вдоль нити, и ток через счетчик резко возрастает. Импульс напряжения с резистора  $R$  усиливается и регистрируется.

Пока длится разряд, счетчик не может регистрировать другие частицы. Чтобы счетчик мог регистрировать новую частицу, необходимо погасить лавинный разряд. Для этого в цепь счетчика включают резистор с большим сопротивлением порядка  $10^8$  —  $10^9$  Ом. При прохождении тока на этом резисторе возникает большое падение напряжения, вследствие чего резко уменьшается напряжение между трубкой и нитью (катодом и анодом), что приводит к прекращению разряда.

Для уменьшения длительности разряда счетчик заполняется аргоном с примесью метана или паров спирта. Положительные ионы на пути к катоду при столкновении с массивными молекулами метана или спирта нейтрализуются и уже не могут выбить из катода электроны, необходимые для поддержания разряда. Время восстановления чувствительности счетчика определяется временем дрейфа ионов к катоду и составляет около  $10^{-4}$  с.



Рис. 4.

Для оперативного дозиметрического контроля радиационной обстановки применяется *дозиметр ДРГ-05* (рис. 4)

Измерение МЭД в нем основано на измерении интенсивности сцинтилляций в органическом сцинтиляторе на основе полистирола. Вспышки сцинтилятора регистрируются ФЭУ, ток в котором преобразуется в импульсы напряжения.

*Геологоразведочный радиометр СРП-08-01* (рис. 5,6) также является сцинтилляционным прибором. Детектором здесь служит кристалл иодистого натрия. Прибор применяется для поиска радиоактивных руд и для дозиметрического контроля карьеров и горных выработок.



Рис. 5.



Рис. 6.

### **Элементы дозиметрии.**

**Поглощенная доза** ионизирующего излучения – энергия, поглощенная единицей массы облучаемого объекта  $D = \frac{W}{m}$ ,  $[D] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = \text{Гр}(\text{грей})$ . Используется также внесистемная единица — **рад**:

$$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Дж/кг}, \text{ т. е. } 1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}.$$

Для отражения опасности облучения для живого организма вводят понятие **эквивалентной дозы**. Чтобы получить значение эквивалентной дозы, надо величину поглощенной дозы умножить на «коэффициент качества излучения»  $Q$ . Биологическое влияние излучения принято сравнивать с эффектами от рентгеновского и  $\gamma$ -излучения, которое берется за эталон. Для него по определению полагают  $Q = 1$ . Единицей измерения эквивалентной дозы в СИ служит **зиверт (Зв)**:

$$1 \text{ Зв} = 1 \text{ Гр} \cdot Q.$$

Используют также внесистемную единицу — **бэр** (биологический эквивалент рентгена):  $1 \text{ бэр} = 1 \text{ рад} \cdot Q$ , т. е.

$$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}.$$

Для характеристики радиационной обстановки на местности и в помещениях используют понятие **экспозиционной дозы**: количество рентгеновского или  $\gamma$ -излучения, выраженное в единицах заряда одного знака, порожденного им в единице массы сухого воздуха в данной точке пространства. Единицей измерения в СИ является **Кл/кг**. На практике часто используют внесистемную единицу — **рентген (Р)**:

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}.$$

Доза ионизирующего излучения тем больше, чем больше время облучения. Поэтому используют также понятие **мощности дозы**: это соответствующая (экспозиционная, поглощенная или эквивалентная) доза, отнесенная к единице времени: 1 Р/ч, 1 Зв/ч и т. п.

Для предупреждения гамма- и бета-радиационной опасности служит бытовой **дозиметр-радиометр МКС-05 «Терра-П»**. Он создан на базе современного профессионального дозиметра, состоящего на вооружении силовых структур Украины. «Терра-П» экспортируется во многие страны.

Порядок работы с дозиметром «Терра».

1. Для **включения** дозиметра необходимо **кратковременно нажать кнопку РЕЖИМ**.

На цифровом индикаторе при этом высвечивается информация. Для **выключения**

дозиметр нужно опять нажать кнопку РЕЖИМ и удерживать ее в нажатом состоянии 4 с.

2. После включения дозиметр автоматически переходит в режим измерения мощности эквивалентной дозы (МЭД)  $\gamma$  - излучения. Признаками этого режима есть **высвечивание символа  $\mu\text{Sv/h}$  (мкЗв/ч)** на цифровом индикаторе и кратковременные слабые звуковые сигналы (каждый звуковой сигнал - это зафиксированный квант  $\gamma$  - излучения). При этом на индикаторе уже на первых секундах будут высвечиваться результаты измерений. Так как в дозиметре предусмотрено постоянное усреднение результатов измерения, то с каждым последующим обновлением значения на цифровом индикаторе происходит процесс его уточнения. Таким образом, **примерно через минуту** после начала измерений на индикаторе **можно получить результат**.

Для измерения мощности эквивалентной дозы (МЭД)  $\gamma$  - излучения необходимо дозиметр ориентировать меткой «+» на нижней крышке прибора в направлении к изучаемому объекту.



Рис. 7.

## Литература

1. Кучерук І. М., Горбачук І.Т, Луцик П.П. Загальний курс фізики. У 3 т. Т.1: Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.; «Техніка», 1999, – 536 с. Т.2: Електрика і магнетизм. – К.; «Техніка», 2006, – 452 с. Т.3: Оптика. Квантова фізика. – К.; «Техніка», 2006, – 518 с.
2. <https://web.kpi.kharkov.ua/tef/> НТУ Харківський політехнічний інститут, кафедра фізики. Учебный процесс, демонстрационный практикум.
3. Грабовский М.А. Лекционные демонстрации по физике / М.А. Грабовский, А.Б. Млодзеевский, Р.В. Телеснин, М.П. Шаскольская, И.А. Яковлев / под ред. В.И. Ивероновой. - М.: Наука, 1972. - 640 с.
4. Физика в лекционных демонстрациях : учеб. пособие /А. Ф. Галкин [и др.]; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2012. – 130 с.
5. МИИТ Учебно-методическое издание Лекционные демонстрации по физике. Методические указания. Физика твердого тела. Под ред. Е. А. Серова. Москва, А 55. ул. Образцова 15. Типография МИИТ.
6. Москалев В.А., Постникова Е.И. Физика. Лекционные демонстрации. Механика. Молекулярная физика. Термодинамика: учебное пособие - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. - 82 с.
7. Кияновский А.М. Лекционный эксперимент – неотъемлемая часть курса общей физики в высших учебных заведениях. Херсонский гос. аграрный ун-т. Сборник научных трудов Sworld.–Иваново: МАРКОВА АД, № 3, с. 36 2014