

**А. Ф. ГАЛКИН Л. В. ГРУНСКАЯ В. В. ДОРОЖКОВ**



**МЕХАНИКА**

**МОЛЕКУЛЯРНАЯ  
ФИЗИКА**

**ЭЛЕКТРИЧЕСТВО**

**МАГНЕТИЗМ**

**КОЛЕБАНИЯ  
И ВОЛНЫ**

**ОПТИКА**

**Учебно-  
методическое  
пособие**

**ФИЗИКА В ЛЕКЦИОННЫХ ДЕМОСТРАЦИЯХ**



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

А. Ф. ГАЛКИН    Л. В. ГРУНСКАЯ    В. В. ДОРОЖКОВ

# ФИЗИКА В ЛЕКЦИОННЫХ ДЕМОНСТРАЦИЯХ

Учебно-методическое пособие

*Электронное издание*



Владимир 2019

© ВлГУ, 2019  
© Галкин А. Ф., Грунская Л. В.,  
Дорожков В. В., 2019

ISBN 978-5-9984-0957-8

УДК 53(07)  
ББК 22.3я73

Рецензенты:

Доктор физико-математических наук, профессор  
профессор кафедры информационных технологий  
Российской академии народного хозяйства и государственной службы  
при Президенте Российской Федерации (Владимирский филиал)  
*В. Г. Рау*

Доктор физико-математических наук, профессор  
профессор кафедры физики и прикладной математики  
Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
*О. Я. Бутковский*

**Галкин, А. Ф.** Физика в лекционных демонстрациях : учеб.-метод. пособие [Электронный ресурс] / А. Ф. Галкин, Л. В. Грунская, В. В. Дорожков ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2019. – 171 с. – ISBN 978-5-9984-0957-8. – Системные требования: Intel от 1,3 ГГц ; Windows XP/7/8/10 ; Adobe Acrobat Reader ; дисковод CD-ROM ; 5,67 Мб. – Загл. с титул. экрана.

Отражает опыт создания современной высокотехнологичной специализированной физической аудитории в условиях университета и имеет своей основой картотеку лекционных демонстраций с рекомендациями по их изготовлению и проведению. Картотека содержит более 500 демонстраций и в том числе демонстраций, рекомендованных методическим советом в качестве обязательного минимума. Приводится описание оборудования аудитории и рекомендации по его изготовлению и монтажу.

Предназначено для преподавателей физики вузов с целью оказания помощи в обеспечении курса физики современным, квалифицированно осуществленным лекционным экспериментом, а также для студентов-бакалавров дневной формы обучения Института прикладной математики, физики и информатики по направлениям подготовки 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» и 12.03.05 «Лазерная техника и лазерные технологии».

Ил. 128. Библиогр.: 31 назв.

УДК 53(07)  
ББК 22.3я73

ISBN 978-5-9984-0957-8

© ВлГУ, 2019  
© Галкин А. Ф., Грунская Л. В.,  
Дорожков В. В., 2019

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	9
<b>РАЗДЕЛ I</b>	
<b>МЕХАНИКА.....</b>	<b>32</b>
<b>1.1. Элементы кинематики материальной точки.....</b>	<b>33</b>
1.1.1. Демонстрация векторного характера скорости.....	33
1.1.2. Сложение движений.....	33
1.1.3. Поступательное и вращательное движения.....	34
<b>1.2. Законы динамики материальной точки и системы материальных точек.....</b>	<b>36</b>
1.2.1. Свободное падение тел в вакууме.....	36
1.2.2. Уменьшение и увеличение веса при движении тела с ускорением.....	36
1.2.3. Третий закон Ньютона.....	37
1.2.4. Инерция покоя груза на нити.....	38
1.2.5. Инерция покоя груза на горизонтальной поверхности.....	39
1.2.6. Демонстрация инертности тел.....	40
1.2.7. Инерция покоя и движения.....	40
<b>1.3. Закон сохранения импульса.....</b>	<b>41</b>
1.3.1. Полет ракеты (закон сохранения импульса).....	41
<b>1.4. Поле центральных сил.....</b>	<b>43</b>
1.4.1. Движение тела в поле центральных сил.....	43
<b>1.5. Закон сохранения механической энергии.....</b>	<b>44</b>
1.5.1. Закон сохранения механической энергии.....	44
1.5.2. Маятник Максвелла.....	45
1.5.3. «Мертвая петля».....	46
<b>1.6. Абсолютно упругое и неупругое соударения тел.....</b>	<b>46</b>
1.6.1. Упругий и неупругий удары.....	46
<b>1.7. Момент инерции тела относительно неподвижной оси.....</b>	<b>48</b>
1.7.1. Зависимость момента инерции от распределения массы.....	48
1.7.2. Момент инерции при вращении как аналог массы при поступательном движении.....	50
<b>1.8. Угловое ускорение и силы инерции при вращательном движении....</b>	<b>51</b>
1.8.1. Зависимость центробежной силы от массы тела и радиуса вращения.....	51
1.8.2. Центрифуга.....	51
<b>1.9. Уравнение вращательного движения абсолютно твёрдого тела относительно неподвижной оси.....</b>	<b>52</b>
1.9.1. Маятник Обербека, проверка уравнения вращательного движения абсолютно твёрдого тела относительно неподвижной оси.....	52
<b>1.10. Момент импульса тела, уравнение моментов.....</b>	<b>53</b>
1.10.1. Наблюдение прецессии оси гироскопа.....	53
1.10.2. Иллюстрация основного закона динамики вращательного движения.....	54
1.10.3. Прецессия вращающегося колеса.....	55
1.10.4. Иллюстрация закона сохранения момента импульса на скамье Жуковского.....	55
1.10.5. Гироскопическая монорельсовая дорога.....	57

1.10.6. Свободные оси вращения .....	58
1.10.7. Вращение спичечного коробка вокруг свободных осей.....	59
1.10.8. Как поставить яйцо на острый конец .....	60
<b>1.11. Механика жидкостей и газов .....</b>	<b>61</b>
1.11.1. Давление в потоке воды, протекающей по трубе переменного сечения.....	61
1.11.2. Давление в газе, движущемся с большой скоростью .....	62
1.11.3. Шарик в струе газа .....	62
1.11.4. Прибор для демонстрации ламинарного и турбулентного движения жидкости.....	63
1.11.5. Распределение скоростей при течении вязкой жидкости.....	64
1.11.6. Кольцевые вихри в воздухе .....	64
1.11.7. Эффект Магнуса .....	65
1.11.8. Демонстрация теоремы Жуковского .....	66
1.11.9. Связь подъёмной силы с циркуляцией скорости .....	67
1.11.10. Измерение скорости газового потока с помощью трубки Пито – Прандтля .....	67
<b>Выводы .....</b>	<b>68</b>
<b>Контрольные вопросы.....</b>	<b>68</b>

## РАЗДЕЛ II

<b>МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА.....</b>	<b>70</b>
<b>2.1. Идеальный газ.....</b>	<b>71</b>
2.1.1. Модель идеального газа .....	71
2.1.2. Движение молекул .....	71
2.1.3. Давление газа на стенку .....	72
2.1.4. Броуновское движение.....	72
2.1.5. Зависимость давления газа от объема .....	73
2.1.6. Модель трёхмерного фазового пространства .....	73
2.1.7. Модели молекул идеального газа .....	74
2.1.8. Получение статистического среднего значения.....	74
<b>2.2. ТЕРМОДИНАМИКА .....</b>	<b>75</b>
2.2.1. Получение «сухого льда» .....	75
2.2.2. Охлаждение газа при адиабатическом расширении .....	76
2.2.3. Воздушное огниво .....	76
<b>2.3. ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА .....</b>	<b>79</b>
2.3.1. Диффузия газов.....	79
2.3.2. Диффузия газов через пористую стенку .....	79
2.3.3. Теплопроводность газов .....	80
2.3.4. Теплопроводность бумаги .....	81
2.3.5. Теплопроводность воды и стекла .....	81
2.3.6. Теплопроводность металла и стекла .....	82
2.3.7. Внутреннее трение в газе.....	82
<b>2.4. Фазовые переходы.....</b>	<b>84</b>
2.4.1. Кристаллизация переохлажденной жидкости .....	84
2.4.2. Рост кристаллов гипосульфита в поляризованном свете .....	85
2.4.3. Силы поверхностного натяжения .....	85
<b>2.5. Реальные газы.....</b>	<b>86</b>

2.5.1. Критическое состояние эфира.....	86
2.5.2. Опыты с жидким кислородом. Кислород как реальная жидкость.....	87
2.5.3. Механические свойства веществ при низких температурах.....	87
<b>Выводы.....</b>	<b>88</b>
<b>Контрольные вопросы.....</b>	<b>89</b>

### **РАЗДЕЛ III**

<b>ЭЛЕКТРИЧЕСТВО .....</b>	<b>90</b>
3.1. Наблюдение электрических сил.....	91
3.2. Взаимодействие разноименных и одноименных зарядов .....	92
3.3. Разделение зарядов при электризации тел.....	92
3.4. Силовые линии электрического поля.....	93
3.5. Механическое действие катодных лучей.....	94
3.6. Зависимость ионной проводимости от концентрации электролита.....	95
3.7. Зависимость ионной проводимости от температуры.....	95
3.8. Проверка закона Джоуля – Ленца.....	95
3.10. Распределение зарядов на конденсаторах при их параллельном соединении.....	96
3.11. Зависимость емкости конденсатора от расстояния между пластинами и проницаемости диэлектрика.....	96
3.12. Зависимость емкости проводника от его размеров.....	97
3.13. Реактивные силы при истечении заряда с острия .....	97
3.14. Зависимость поверхностной плотности электрических зарядов от кривизны поверхности проводника.....	97
3.15. Поверхность проводника и его объем эквипотенциальны.....	98
3.16. Экранирующее действие проводников .....	98
3.17. Вещества-проводники тока и вещества-изоляторы .....	99
3.18. Работа электрических сил.....	100
3.19. Влияние сетки на анодный ток лампы .....	100
3.20. Наблюдение тихого разряда в газе .....	100
3.21. Зависимость электропроводности от температуры .....	101
3.22. Появление разности потенциалов при прохождении тока.....	101
3.23. Ионная проводимость стекла при нагревании .....	101
3.24. Истечение заряда с проводника .....	102
3.25. Передача заряда проводнику нанесением его на внешнюю поверхность проводника.....	102
3.26. Передача заряда проводнику, внесение его внутрь проводника .....	103
3.27. Измерение разности потенциалов с помощью пламенного зонда.....	103
3.28. Разделение зарядов в процессе электрической индукции .....	104
3.29. Определение знака заряда на электрометре, используя явление электрической индукции.....	104
3.30. Демонстрация поляризации диэлектрика .....	105
3.31. Принцип действия электрического фильтра.....	105

3.32. Наблюдение тлеющего разряда .....	105
3.33. Свечение неоновой лампы.....	106
3.34. Наблюдение дугового разряда .....	107
3.35. Свечение спектральных трубок .....	107
3.36. Наблюдение безэлектродного разряда .....	107
<b>Выводы.....</b>	<b>108</b>
<b>Контрольные вопросы.....</b>	<b>108</b>

## **РАЗДЕЛ IV**

<b>МАГНЕТИЗМ .....</b>	<b>110</b>
4.1. Магнитное поле тока.....	111
4.2. Магнитные силовые линии постоянных магнитов .....	111
4.3. Действие магнитного поля на ток.....	112
4.4. Действие магнитного поля на контур с током.....	113
4.5. Катушка с током в неоднородном магнитном поле.....	114
4.6. Взаимодействие токов через их магнитные поля.....	114
4.7. «Прыгающие катушки» .....	115
4.8. Изменение магнитного поля ферромагнетиком .....	116
4.9. Изучение гистерезиса ферромагнитных материалов.....	116
4.10. Превращение ферромагнетика в парамагнетик в точке Кюри.....	116
4.11. Наблюдение ЭДС индукции при относительном движении магнита и катушки.....	116
4.12. Наблюдение ЭДС индукции при включении и изменении тока.....	117
4.13. Наблюдение ЭДС индукции при изменении магнитного потока.....	117
4.14. Наблюдение ЭДС индукции при изменении магнитного поля катушки с помощью железного сердечника .....	117
4.15. Обратимость электродвигателя и генератора.....	118
4.16. Демонстрация правила Ленца при возникновении индукционного тока..	118
4.17. Индукция в сплошных проводниках (токи Фуко).....	119
4.18. Демонстрация возникновения вихревых токов, правила Ленца.....	120
4.19. Взаимодействие вихревых токов и магнита .....	120
4.20. Увлечение проводника бегущим магнитным полем.....	121
4.21. Возникновение противоэдс при работе электромотора .....	121
4.22. Наблюдение ЭДС самоиндукции при размыкании цепи.....	121
4.23. Наблюдение ЭДС самоиндукции при размыкании и изменении тока.....	122
4.24. Изменение индуктивности катушки введением железного сердечника....	122
4.25. Изучение явления взаимной индукции.....	122
4.26. Зависимость взаимной индукции катушек трансформатора от магнитного сопротивления сердечника.....	123
4.27. Демонстрация разветвления магнитного потока.....	123
4.28. Зависимость магнитного потока от магнитного сопротивления .....	123
4.29. Движение электронного пучка в магнитном поле катушки с током.....	124
4.30. Отклонение катодных лучей в магнитном поле .....	124

4.31. Наблюдение сил, действующих на ток в магнитном поле .....	124
<b>Выводы</b> .....	125
<b>Контрольные вопросы</b> .....	125

## **РАЗДЕЛ V**

<b>КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ</b> .....	128
5.1. Вертикальные упругие колебания .....	129
5.2. Вертикальные и крутильные упругие колебания .....	129
5.3. Механическая запись колебательного движения .....	130
5.4. Демонстрация распределения вероятности нахождения классического маятника в различных точках траектории.....	131
5.5. Затухающие колебания .....	132
5.6. Вынужденные колебания и резонанс .....	132
5.7. Механический резонанс.....	133
5.8. Демонстрация резонанса и сдвига фаз при механическом резонансе.....	133
5.9. Акустический резонанс.....	134
5.10. Параметрический резонанс .....	134
5.11. Сложение колебаний.....	135
5.12. Акустические колебания и биения .....	135
5.13. Связанные маятники .....	136
5.14. Проволочная пружина для демонстраций продольных волн.....	136
5.15. Возникновение стоячих волн .....	136
5.16. Резонанс воздушного столба .....	137
5.17. Наблюдение эффекта Доплера .....	137
5.18. Модель демонстрации групповой скорости распространения волн .....	138
5.19. Волновая ванна .....	138
5.20. Волны на воде .....	139
5.21. Релаксационный генератор.....	139
5.22. Наблюдение резонанса напряжений и токов .....	139
5.23. Исследование затухающих колебаний .....	140
5.24. Изучение вынужденных колебаний.....	140
5.25. Резонанс на высокой частоте .....	140
5.26. Прибор для демонстрации скин-эффекта .....	141
5.27. Трансформатор Тесла.....	141
5.28. Опыты с демонстрационным генератором электромагнитных волн .....	141
5.29. Комплект приборов для изучения электромагнитных волн.....	142
<b>Выводы</b> .....	145
<b>Контрольные вопросы</b> .....	145
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ</b> .....	147
<b>Современное демонстрационное и техническое обеспечение, используемое в курсе «Колебания и волны»</b> .....	147



## **РАЗДЕЛ VI**

<b>ОПТИКА</b> .....	<b>150</b>
6.1. Явление полного внутреннего отражения .....	<b>151</b>
6.2. Сложение цветов спектра .....	<b>151</b>
6.3. Дисперсия (опыт со скрещенными призмами) .....	<b>151</b>
6.4. Интерференция волн .....	<b>152</b>
6.5. Полосы интерференции от бипризмы Френеля.....	<b>152</b>
6.6. Дифракция от одной щели.....	<b>152</b>
6.7. Интерференция света в тонких пленках.....	<b>153</b>
6.8. Дифракция волн.....	<b>154</b>
6.9. Дифракция на диске. Пятно Пуассона .....	<b>154</b>
6.10. Исследование деформаций с помощью поляризованного света .....	<b>154</b>
6.11. Рост кристаллов гипосульфита в поляризованном свете .....	<b>155</b>
6.12. Поляризация света поляроидами. Проверка закона Малюса.....	<b>156</b>
6.13. Двойное лучепреломление и поляризация света в кристалле исландского шпата.....	<b>156</b>
6.14. Дифракция на дифракционной решетке.....	<b>157</b>
6.15. Интерферометр Майкельсона .....	<b>157</b>
6.16. Наблюдение явления интерференции и дифракции на щелях Юнга .....	<b>158</b>
<b>Выводы</b> .....	<b>159</b>
<b>Контрольные вопросы</b> .....	<b>159</b>
<b>ПЕРЕЧЕНЬ ДЕМОНСТРАЦИОННЫХ ОПЫТОВ</b> .....	<b>161</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	<b>167</b>
<b>ПОСЛЕСЛОВИЕ</b> .....	<b>168</b>
<b>РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК</b> .....	<b>169</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В подготовке инженерных кадров любого профиля курс физики является одним из основополагающих. Он формирует у будущих специалистов физический метод мышления. Можно сказать, что курс физики – это физические основы грамотности инженера. Несмотря на то что круг физических явлений, на которых базируется современная техника, неуклонно расширяется, число часов, выделяемых учебными планами на курс физики, сокращается. Названная причина требует максимальной эффективности методики чтения лекций по физике при активизации всех элементов процесса познания. Важное условие этого требования – обеспечение лекции глубоко продуманным и квалифицированно осуществленным лекционным экспериментом. Данное обстоятельство на сегодняшний день общепризнано. Между тем далеко не во всех вузах лекционный эксперимент применяется в должной степени. Это объясняется следующими причинами. Во-первых, большинство вузов не имеет специализированных физических аудиторий. Во-вторых, в настоящее время финансовые возможности многих вузов по оснащению аудиторий современным демонстрационным оборудованием крайне ограничены. В-третьих, объем выпуска демонстрационного оборудования охватывает лишь небольшой круг физических явлений.

Учебно-наглядное пособие разработано на кафедре общей и прикладной физики Владимирского государственного университета (ВлГУ), содержит описание более 200 лекционных демонстраций с методическими указаниями к их изготовлению и осуществлению. Картотека лекционных демонстраций (в настоящее время – более пятисот единиц) начала формироваться более 30 лет тому назад и постоянно дополняется и обновляется современным оборудованием, содержит большое число оригинальных демонстраций.

В создании специализированной физической аудитории и разработке демонстрационного комплекса особая заслуга принадлежит профессору В. Н. Кунину.

### **Физическая аудитория**

Современная физическая аудитория – это глубоко механизированное, оснащённое целым рядом специфических технических устройств помещение, пригодное для чтения курса физики с приме-

нением лекционного эксперимента и лекционных демонстраций, отвечающих современному уровню педагогического процесса в вузе. Требования к физической аудитории настолько серьёзны, что выполнение их возможно лишь при строительстве физической аудитории по заранее запланированному специальному проекту.

В настоящее время физические аудитории в стране проектируются для современных вузов, есть и специальные организации для проектирования аудиторий. Однако большинство вузов имеет в качестве физической аудитории обычного типа, и кафедры физики вынуждены оборудовать их собственными силами. Опыт ВлГУ по созданию современной физической аудитории на базе обычной аудитории отражён в данном пособии.

В физической лекционной аудитории 120 мест, расположенных в виде амфитеатра (рис. 1). Следует отметить, что аудитория по количеству мест близка к оптимальной, так как вмещает достаточно большие потоки, что позволяет кафедре физики при малом штате демонстраторов обеспечивать лекции квалифицированным и тщательно подготовленным физическим экспериментом.

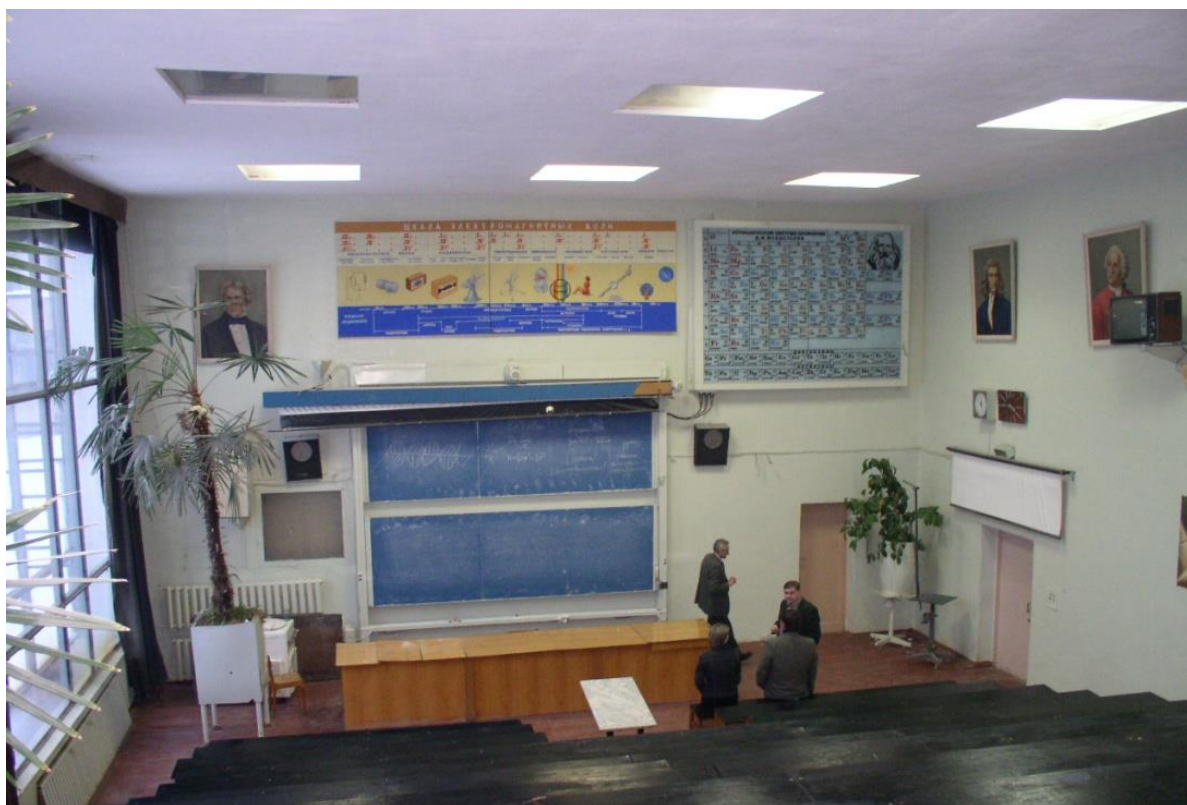


Рис. 1

К физической аудитории предъявляются требования по механическому, электрическому, проекционному электронному оборудованию, а также ряд специфических требований. К ним относятся: акустическое обеспечение лекций, обеспечение связи между лектором и демонстраторами и ряд других, на которых мы остановимся далее. Перечисленные ниже требования по оборудованию и оборудование физической аудитории – это фактическое описание специализированной физической лекционной аудитории кафедры общей и прикладной физики ВлГУ.

Рассмотрим основное оборудование и оснащение физической аудитории. В каждой физической аудитории следует размещать демонстрационный стол, поверхность которого должна быть хорошо видна с любого места аудитории, а площадь – достаточной для проведения экспериментов по движению различных тел. Большая поверхность стола необходима для перемещения части оборудования во внутрь стола. Именно так сделано в лекционной аудитории ВлГУ. Демонстрационный стол располагает пультом управления физической аудиторией. В аудитории желателен дополнительный подвижный стол для демонстрации опытов, требующих перемещения тяжёлого оборудования. В этом случае опыт готовится заранее на столе, и стол вкатывается из демонстраторской в аудиторию по сигналу лектора.

Некоторые демонстрационные опыты требуют затемнения аудитории, поэтому в ней должны быть шторы. Наиболее практичны шторы из тёмного сукна. Очень удачная конструкция механизма зашторивания – движение штор на кольцах по натянутой струне. Шторы движутся с помощью троса, натянутого на ролики, приводимые в движение электрическим мотором, имеющим концевые выключатели. Таким образом, на пульте управления должны быть три кнопки: пуска затемнения, возврата движения штор в другую сторону и остановки штор. В верхний край шторы вшит гибкий тросик, исключаяющий их повреждение при натяжении тянущего троса. Кроме того, этот тросик позволяет чётко фиксировать шторы в закрытом состоянии и обеспечивать полное затемнение. Шторы должны двигаться вверху между двумя непрозрачными экранами, которые вместе со шторами образуют в верхней части лабиринт, непроницаемый для света. Экраны желательно выполнить из того же материала, что и шторы; это не портит эстетический вид помещения. Для штор лучше использовать ворсистый материал, так как такой материал – хороший звукопоглотитель, существенно снижающий время реверберации. Замечено, что приме-

нение подобного материала заметно снижает утомляемость студентов.

Обычно современная аудитория представляет собой параллелепипед, в котором стены – довольно большие плоскости, поэтому возникает акустический резонанс: стоячая волна между передней и задней, левой и правой стенами аудитории, а также полом и потолком. Для обеспечения хорошей акустики на стенах аудитории необходимы достаточно большие поверхности звукопоглощающих материалов. Снижают время реверберации и портреты, написанные на холсте. Это могут быть портреты великих известных ученых-физиков (рис. 2).

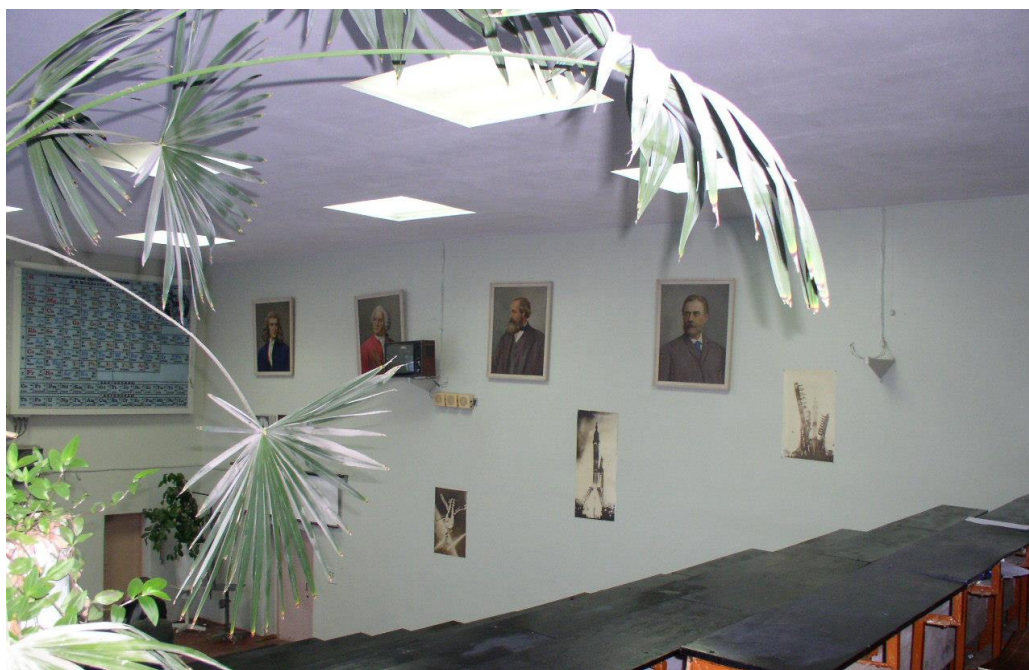


Рис. 2

Кроме того, можно использовать различного рода таблицы или другие наглядные пособия, выполненные также из мягких материалов. В частности, в физической аудитории ВлГУ на передней стене расположена большая шкала электромагнитных волн, красочно оформленная масляными красками на холсте (см. рис. 1). Существенную роль в улучшении качества звучания и эстетического вида аудитории играют комнатные растения – большие, с развитой кроной (например, пальмы, лимонное дерево). Неплохой результат получается при размещении цветов на пристенных полках.

При оформлении физической аудитории необходимо помнить и о тонах красок. Цвет доски, стен и пола имеет весьма существенное

значение. В частности, доска необязательно должна быть чёрной. Сине-голубой цвет в сочетании со светлыми стенами оказался наиболее приемлемым. Доска должна быть достаточно большой. В настоящее время конструкции их чрезвычайно разнообразны. В физической аудитории две доски, которые двигаются по вертикальным направляющим механически. Для включения с каждой стороны имеются кнопки, расположенные по обе стороны доски. Однако такая конструкция весьма сложна. Для изготовления собственными силами можно рекомендовать доску с неподвижным центральным полем и двумя крыльями по бокам, причём эти крылья должны быть сделаны на петлях для поворота на  $180^\circ$ . В закрытом состоянии они покрывают центральное поле, а в открытом дают дополнительную площадь.

Очень удобны доски, выполненные из матового стекла (см. рис. 1). В этом случае цвет создаётся краской, нанесенной на тыльной стороне стекла, а запись ведётся по матированному стеклу, причём качество записи оказывается достаточно высоким при использовании любого мела.

На передней стене аудитории должен быть киноэкран, расположенный либо стационарно выше доски, либо механизированный и легко механически разворачивающийся и убирающийся. Видимо, последний вариант удобнее, так как экран не занимает площади на лицевой стороне аудитории. В физической аудитории есть также полупрозрачный экран из матового стекла. Он расположен на передней стене, отделяющей аудиторию от демонстрационной. При затемнении в демонстрационной этот экран может быть использован как экран дневного кино, но основное назначение его заключается в том, что на него могут проектироваться опыты, не выполнимые по каким-либо причинам непосредственно в аудитории, например демонстрация вольтовой дуги.

Физическая аудитория должна быть хорошо освещена с помощью целого ряда ламп, причём лектор должен иметь возможность легко включить и выключить их.

Возможность включения слабого освещения в области доски позволяет проводить целый ряд экспериментов, требующих наблюдения за несветящимися приборами, а также экранами, например, при одновременном наблюдении экрана и эксперимента на демонстрационном столе. Аудитория должна иметь хорошую вентиляцию.

Наряду с использованием мультимедийных технологий современная физическая аудитория должна располагать возможностью ки-

нопроекции. Для этого необходима установка кинобудки либо в аудитории, либо в помещении, граничащем с задней стенкой аудитории. Очень удобным оказывается расположение в кинобудке лазера, луч которого направлен на демонстрационный стол над головами студентов. Это позволяет провести эксперименты с лучом, имеющим длину, равную длине аудитории. Луч должен идти достаточно высоко, чтобы студенты не могли хотя бы случайно испортить себе зрение. При демонстрациях, требующих лазерного луча, направленного поперёк аудитории, достаточно воспользоваться зеркалом, установленным на демонстрационном столе.

Хорошая акустика в аудитории обеспечивается не только мощными громкоговорителями на передней стене аудитории, но и расположенными соответствующим образом по стенам всей аудитории. Эти акустические системы используются при чтении лекции с помощью радиомикрофона, что создаёт значительные удобства для лектора – лекции читаются естественно, без напряжения голоса; обеспечивается связь с демонстраторской; при необходимости лекции записываются на магнитофон и т.д.

Исследование звуковых полей физической аудитории почти обязательно. Такое исследование в ВлГУ проводилось студентами в качестве научной работы, в результате которой было найдено оптимальное расположение звукоизлучателей.

В физической аудитории должна быть таблица Менделеева достаточно большого размера, чтобы она была видна с любого места аудитории. В нашей аудитории таблица Менделеева (см. рис. 2) выполнена цветными красками на матовом стекле размерами  $3 \times 4$  м. С обратной стороны таблицы есть ячейки, выполненные из текстолита, в каждой ячейке – лампа, которая может быть включена с пульта управления таблицей. Таким образом, каждый элемент таблицы Менделеева может быть выделен включением его подсветки. Для включения одновременно целой группы элементов можно использовать шаблоны. Постепенно количество шаблонов увеличивается, что позволяет заметно экономить время на лекции. Шаблон представляет собой лист пластика, имеющий размеры пульта управления таблицей и отверстия против тех тумблеров, которые должны быть включены. Наложение шаблона на пульт управления позволяет очень быстро включить группу элементов, например, диамагнетики, парамагнетики и т.д. Для удобства обслуживания (замены перегоревших ламп и т.д.) таблица Менделеева подвешивается к стене на специальных петлях.

Для чтения лекций по разделу «Электричество» демонстрационный стол оснащен энергопитанием – трёхфазным током напряжением 380 – 220 В и постоянным током. Причём постоянный ток напряжением 12 В должен быть получен от источников питания, обеспечивающих ток порядка 500 А. Такие токи нужны при целом ряде демонстраций. Кроме того, необходим источник регулируемого слаботочного постоянного напряжения от 0 до 250 В и источник регулируемого переменного напряжения от 0 до 250 В.

В демонстрационном столе удобно расположить вакуумный насос с выходом на поверхность стола. Необходимы и раковина с кранами холодной и горячей воды, а также воздушная магистраль, обеспечивающая подвод воздуха при давлении до 2 – 3 атмосфер.

На демонстрационном столе должно быть устройство связи с демонстраторской, например, в простейшем случае – кнопка включения лампочки и звонка вызова демонстратора. В качестве ответного элемента связи можно рекомендовать лампу, покрашенную каким-либо цветом и расположенную под демонстрационным столом так, чтобы её видел только лектор. Обычно она используется в случаях, когда демонстратор сообщает о наступлении времени готовности той или иной демонстрации – при демонстрации кинофильма так, чтобы окончание кинопоказа совпало со звонком об окончании лекции; лампочка может быть включена за минуту до окончания лекции, чтобы лектору было удобно вовремя завершить лекцию, и в целом ряде других случаев. Пульт управления должен содержать также тумблеры включения проекционной аппаратуры.

Современная аудитория оснащается электронным оборудованием сопровождения лекций – это мультимедийные доски и экраны, электронные проекторы, радиомикрофоны и т.д. В нашей аудитории имеются два электронных проектора, стационарный и переносимый, управляемые от ноутбуков, высококачественные переносные радиомикрофоны.

### **Лекционный эксперимент**

Основная задача лекционных экспериментов и демонстраций состоит в обеспечении важного этапа процесса познания – живого созерцания. Следует различать лекционные демонстрации и лекционные эксперименты.

Лекционные демонстрации предназначены для иллюстрации тех или иных явлений лишь качественно. По Дж. Максвеллу, «целью иллюстративных опытов является освещение некоторых научных идей



для того, чтобы сделать их понятными студенту. Условия опыта должны быть подобраны так, чтобы явления, которые мы хотим наблюдать или показывать, выступали на первый план, а не заменялись или запутывались явлениями, как это имеет место, когда явление происходит в обычных условиях. Чем проще материалы иллюстративного опыта и чем более они привычны учащимся, тем глубже он поймет идею, которую должен иллюстрировать этот опыт. Воспитательная ценность таких опытов часто обратно пропорциональна сложности приборов».

Здесь идет речь о воспитании естественнонаучного образа мышления студента.

Лекционный эксперимент представляет собой количественный опыт, выполненный лектором или демонстратором для подтверждения или получения количественных соотношений. В лекционном эксперименте можно вычислить соответствующую ошибку опыта.

Эксперимент предполагает использование измерительных приборов, с помощью которых получают численные величины значений физических величин, причем таких приборов, чтобы каждый студент потока мог контролировать демонстратора, самостоятельно считывая показания приборов.

Однако лекционным экспериментом следует считать и такие опыты, в которых не используются какие-либо измерительные приборы, но количественный результат тем не менее получают соответствующей количественной статистической обработкой результатов наблюдений.

Наиболее полезны с педагогической точки зрения лекционные демонстрации и эксперименты, которые:

- 1) прямым образом демонстрируют изучаемое явление;
- 2) хорошо воспринимаются и усваиваются студентами;
- 3) хорошо видны с любого места большой физической аудитории;
- 4) не требуют больших затрат времени и материалов при подготовке к лекции;
- 5) могут быть выполнены без применения уникального оборудования.

Опыты, вошедшие в картотеку настоящего издания, отобраны на основе учета всех этих требований.

Наибольшую ценность представляют опыты, которые удовлетворяют всем этим требованиям, и меньшую – удовлетворяют ча-

стично. Например, применение телевидения и видеозаписи легко выполняет третье требование, однако входит в противоречие с первым требованием. С позиций второго требования следует отдавать предпочтение тем опытам, в которых иллюстрируемое явление воздействует на несколько органов чувств. Например, иллюстрация колебаний с наблюдением их на осциллографе с прослушиванием; иллюстрация биений; доплеровского эффекта и т.д.

При подготовке лекции следует продумывать возможность сочетания лекционных экспериментов с использованием технических средств обучения и особенно тех, которые экономят время. С помощью кино, телевидения и видеозаписи показывается лишь то, что нельзя воспроизвести в аудитории. Это в первую очередь натурные физические эксперименты, проводимые при выполнении НИР или на установках, расположенных в лабораториях, экспериментальных базах, на промышленных предприятиях. Учебному кино и телевидению присуще большее количество органических недостатков и прежде всего невозможность организации обратной связи. Поэтому излишнее увлечение кинофикацией и видеопроекциями лекций вряд ли целесообразно.

Вышеперечисленные требования к лекционным экспериментам вытекают из рабочей программы, оснащенности лекционной аудитории и обширности демонстрационного фонда, возможностей кафедры по материальному обеспечению лекционной аудитории демонстрационного фонда, а также по обеспечению этого важного участка кадрами – лаборантами и демонстраторами.

Однако вне зависимости от условий лекционный эксперимент может быть полезным лишь при наличии следующих признаков: наглядности, воспроизводимости, масштабности, длительности, количественности, стационарности, эстетичности и трансформируемости решаемых педагогических задач.

Воспроизводимость и количественность – признаки любого научного эксперимента, поэтому их выполнение автоматически означает, что в лекции не может быть места любым имитациям и подменам явления. Явление следует воспроизводить на научной основе, и студент должен воспринимать лекционный эксперимент как научный опыт, а не как цирковой фокус.

Требование наглядности представляется очевидным. Под эстетичностью лекционного эксперимента следует понимать не только внешний вид установки, т.е. своеобразный физический дизайн; эсте-

тичность предусматривает прежде всего внутреннюю гармонию основных элементов установки, связанную с максимально возможной целесообразностью осуществления физического явления на лекции в наиболее выпуклом и препарированном виде. Физическая же установка, как и другой механизм, должна быть отлажена и отрегулирована, т.е. должна быть надежной в работе, и своим внешним видом привлекать внимание студентов.

Понятие масштабности включает в себя два аспекта. Во-первых, используемые приборы должны быть достаточно большими, чтобы студенты могли считывать их показания с любого места аудитории. Само явление должно происходить в таких масштабах, чтобы оно могло наблюдаться с любого места. В случае демонстрации микроявлений должны быть хорошо видны манипуляции демонстратора, а явление спроектировано крупно на экран с помощью телевидения или оптических устройств. Во-вторых, интенсивность явлений должна быть сравнимой с наблюдаемой на практике. Так, например, закон Ампера демонстрировался ранее притяжением или отталкиванием двух полосок фольги при пропускании через них тока в единицы ампер. Однако энергичное взаимодействие двух параллельных толстых проводов длиной в несколько метров при пропускании через них тока в несколько сот ампер демонстрирует явление более чисто, нагляднее и надолго запоминается. Отметим, что такая демонстрация увеличивает существенно затраты времени по сравнению с первым случаем.

Требование стационарности вытекает из следующих причин. Специализированная физическая аудитория является настолько сложным хозяйством, требующим постоянного ухода и заботы, что институты, как правило, могут иметь лишь одну такую аудиторию. Сказанное определяет значительную нагрузку и высокие требования к оперативности подготовки лекционных экспериментов, поэтому демонстрационные установки должны быть либо стационарными, либо легко монтируемыми из готовых блоков. В последнем случае решаются сразу две задачи: экономится время и появляется возможность трансформации установок с целью расширения круга решаемых задач. Агрегатный способ может опираться на передовые методы современного промышленного производства, разработанные для формирования технологической оснастки. Наконец, о длительности экспериментов. Признавая большую важность активного наблюдения физических явлений, тем не менее следует иметь в виду, что основой лекции является теория, а эксперимент иллюстрирует её.

Опыт кафедры общей и прикладной физики ВлГУ показывает, что оптимальные затраты времени на лекционный эксперимент лежат в пределах 10 – 15 мин.

*Кратко о методике проведения лекционного эксперимента.* В соответствии с единым методическим комплексом кафедры лекционные эксперименты регламентируются картотеккой, согласованной с рабочей программой обучения. Демонстрации проводятся при четком согласовании действий лектора и демонстратора. Лектором совместно с демонстратором разрабатывается как бы краткий сценарий экспериментальной части лекции. Имея возможность слушать лекцию благодаря применению радиомикрофона, демонстратор появляется в аудитории в нужный момент без специального приглашения или включает в нужный момент проекционную аппаратуру. В случае каких-либо отклонений от заранее разработанного плана лектор имеет возможность связаться с демонстратором с помощью кнопки сигнализации, расположенной на обратной стороне столешницы демонстраторского стола.

Как уже указывалось, даже хорошо отработанные демонстрации следует репетировать перед каждой лекцией. Действия лектора и демонстратора должны быть согласованными и профессиональными.

Необходимо всегда помнить, что подготовка и проведение эксперимента вне зависимости от его масштаба должны осуществляться при неукоснительном соблюдении правил техники безопасности. Большое скопление людей может усугубить неприятные последствия.

**Демонстраторская** представляет собой лабораторию, где хранится оборудование лекционного обеспечения, готовятся демонстрации, а также ведутся демонстрации с их проекцией в лекционную аудиторию. Кроме того, здесь же расположено работающее оборудование электрического, акустического, оптического, пневмо-, гидро- и других видов обеспечения лекционной аудитории. Ясно, что площадь демонстраторской должна быть достаточно большой, и кафедрам физики необходимо проявлять настойчивость в получении площадей и систематической работе по оборудованию демонстраторской. Ниже приводится описание демонстраторской кафедры общей и прикладной физики ВлГУ.

Наиболее рационально расположение демонстраторской за передней стеной физической аудитории (см. рис. 1), что позволяет легко транспортировать оборудование прямо к аудиторному столу, иметь удобный для обзора экран для проекции непосредственно из демон-

страторской, существенно сократить длину коммуникаций от оборудования до аудитории и т. д.

*Остановимся на устройстве демонстраторской.* Стол для подготовки лекционных демонстраций желателен по форме, размерам и техническому обеспечению такой же, как в аудитории. При расположении стола посередине помещения можно быстро и легко взять со стеллажа или шкафа оборудование и поставить его обратно, он доступен с любой стороны. Оборудование общего назначения (демонстрационные электроизмерительные приборы, источники питания и т. д.) должно располагаться наиболее близко к столу на открытых стеллажах. Стеллажи, изготовленные специально с учетом геометрии помещения, стоят вдоль стен, негромоздки, а оборудование на них легкодоступно. Специализированное оборудование используется реже и хранить его следует в застеклённых шкафах, концентрируя по разделам рабочей программы. Демонстраторская непременно должна иметь письменный стол для работы с документами.

Полупрозрачный экран (рис. 3) врезан в стену между аудиторией и демонстраторской. Это весьма удобно, так как в демонстраторской располагается целый ряд проекционного оборудования.

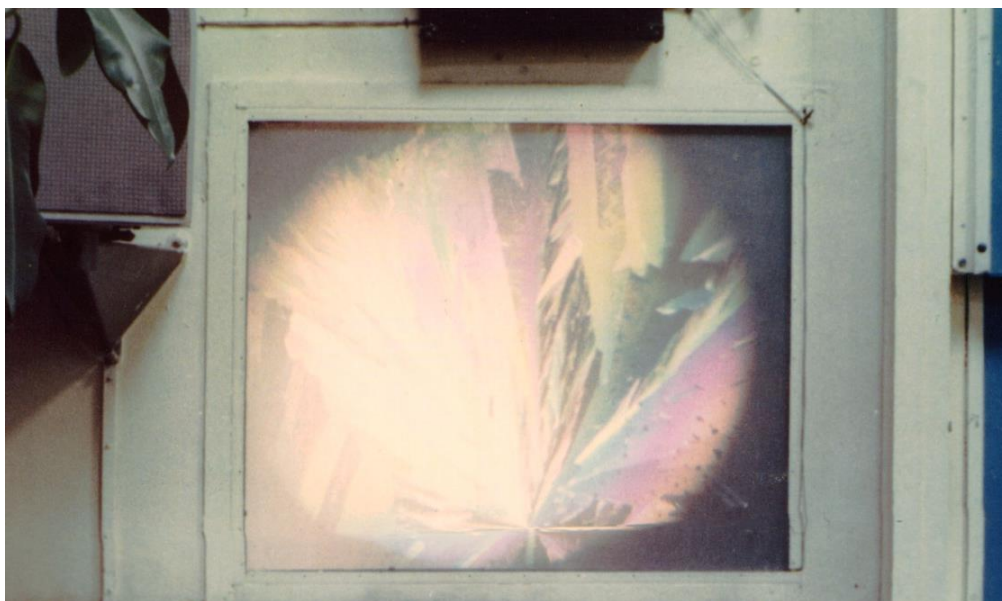


Рис. 3

Применяется картотека лекционных демонстраций. Она находится в специальном шкафу, который имеет ящики, содержащие 500 карточек по тематике демонстрационных опытов, а также каталог ки-

нофильмов, диафильмов, диапозитивов и плакатов. На карточках из плотной бумаги размерами 200×300 мм записан номер лекционной демонстрации, включающий номер раздела программы и темы самой демонстрации, а также подробное её описание. В описании указывается необходимое оборудование по подготовке демонстрации и её осуществлению на лекции. Кроме того, карточки содержат фотографию демонстрации, на которой хорошо видно взаимное расположение элементов установки, что существенно облегчает её постановку в сжатый срок перерыва между лекциями.

Рассмотрим технологический процесс появления демонстрации на лекции. Эта технология была отработана в результате многолетнего опыта кафедры физики. У каждого лектора имеется на руках брошюра, изданная в ВлГУ, с кратким описанием лекционных демонстраций. В ней содержатся по каждой демонстрации название, аннотация и рисунок, а также номер, соответствующий картотеке в демонстраторской. Роль лекторской картотеки может играть настоящее издание. Лектор при подготовке к лекции отбирает по данной теме нужные ему демонстрации и оценивает время, которое он затратит на демонстрации. Номера демонстраций вписываются в журнал заказов демонстраций, имеющийся в демонстраторской. Демонстратор в свободное время знакомится с заказами по записанным номерам и готовит демонстрации. Лектор перед лекцией совместно с демонстратором окончательно репетирует демонстрации, уточняет время, когда они нужны, и затраты времени на них. После этого демонстратору остается только оттранспортировать в перерыв демонстрации в аудиторию. Правда, и этот процесс может привести к непредвиденным сбоям, но тем не менее описанная технология весьма хорошо зарекомендовала себя в условиях большой нагрузки лекционной аудитории, когда демонстрация не может быть собрана и отлажена заранее на демонстрационном столе аудитории, а подобные условия типичны для большинства вузов.

Отметим, что технология появления на лекции других вспомогательных материалов: плакатов, видеофильмов, слайдов, диапозитивов и так далее аналогична. Все они должны быть расположены в определенных заранее местах, плакаты – на специальных приспособлениях так, чтобы демонстратор без затрат времени мог их легко найти по номерам, вписанным в журнал заказов лектором. Необходимо помнить, что демонстраторская представляет собой одну из наиболее сложных лабораторий чрезвычайно широкого профиля, с

развитым хозяйством из современного оборудования и приборов, требующую непрерывных методических усилий всего коллектива кафедры для поддержания её высокой работоспособности, органического единства с лекционной аудиторией и совершенствования с целью повышения качества учебного процесса.

Физическая лекционная аудитория кафедры общей и прикладной физики с комплектом лекционных демонстраций в 1981 году была представлена в качестве экспоната на ВДНХ, а в 1996 году экспонировалась на Нижегородской ярмарке «Учебные технологии-96». Разработки комплекта лекционных демонстраций и лекционных экспериментов представляются на конференциях «Современный физический практикум», проводимых Министерством образования и науки РФ.

Авторы выражают большую благодарность В. Н. Кунину, А. А. Кулишу, В. П. Кондакову, О. Г. Мизоновой, Л. И. Пичужкиной, В. С. Плешивцеву, А. А. Шишелову за участие в подготовке и создании комплекта лекционных демонстраций с методическими указаниями по курсу общей физики.

# ПРОГРАММА ПО ФИЗИКЕ

## I. Механика

1. Введение. Предмет физики. Методы физического исследования: опыт, гипотеза, эксперимент, теория. Диалектический материализм и физика. Важнейшие этапы истории физики. Роль физики в развитии техники и влияние техники на развитие физики. Физика как культура моделирования. Компьютеры в современной физике. Роль физики в становлении инженера. Связь физики с другими науками. Успехи современной физики.

2. Некоторые сведения из математики. Роль математики в изучении физики. Функции и их производные. Интегрирование. О смысле производной и интеграла в приложении к физическим задачам. Элементы векторной алгебры: определение вектора, сложение векторов, умножение векторов, дифференцирование векторных величин. Дифференциальные уравнения. Элементарные сведения из теории вероятности.

3. Кинематика поступательного движения. Кинематика как раздел механики. Механическое движение как простейшая форма движения материи. Материальная точка (частица). Система отсчета. Инерциальные системы отсчета. Радиус-вектор. Принцип относительности Галилея. Траектория. Радиус кривизны траектории. Линейная скорость и линейное ускорение. Тангенциальное и нормальное ускорения. Связь между линейными и угловыми кинематическими величинами. Поступательное движение твердого тела.

4. Динамика поступательного движения. Динамика как раздел механики. Первый закон Ньютона и понятие инерциальной системы отсчета. Второй закон Ньютона и понятие силы, массы и импульса. Уравнение движения. Третий закон Ньютона и предел его применимости. Неинерциальные системы отсчета. Абсолютные и относительные скорость и ускорение. Силы инерции. Система материальных точек. Центр инерции (центр масс). Теорема о движении центра инерции.

5. Вращательное движение твердого тела. Понятие абсолютного твердого тела. Момент силы. Момент импульса. Момент инерции. Теорема Штейнера. Основной закон динамики вращательного движения. Уравнение вращательного движения твердого тела относительно



неподвижной оси (уравнение моментов). Кинетическая энергия вращающегося твердого тела. Гироскопический эффект. Свободные оси.

6. Законы сохранения. Значение и содержание законов сохранения в механике. Закон сохранения импульса. Однородность пространства. Реактивное движение. Закон сохранения момента импульса. Изотропия пространства. Работа, энергия, мощность. Связь между потенциальной энергией и силой. Понятие силового поля. Связь между кинетическими энергиями в различных системах отсчета. Консервативные и неконсервативные силы. Закон сохранения энергии в механике. Однородность времени. Консервативная и диссипативная системы. Внутренняя потенциальная энергия.

7. Элемент механики жидкостей и газов. Общие свойства жидкостей и газов. Задачи механики жидкостей и газов. Идеальная и вязкая жидкости. Уравнение Эйлера. Уравнение неразрывности. Уравнение Бернулли. Системы уравнений газодинамики. Формула Пуазеля. Формула Стокса. Ламинарный и турбулентный режимы течения. Циркуляция скорости. Потенциальное и вихревое движения. Движение тел в жидкостях и газах. Теорема Жуковского.

8. Элементы специальной теории относительности. Принцип относительности Эйнштейна. Роль скорости света. Постулат постоянства скорости света. Преобразование Лоренца. Пространство и время в специальной теории относительности. Инварианты преобразования. Лоренцово сокращение длины и замедление времени. Релятивистский импульс. Взаимосвязь массы и энергии. Столкновение и распад частиц. Дефект масс. Энергия связи. Соотношение между полной энергией и импульсом частицы. Понятие об общей теории относительности. Границы применимости классической (ньютоновской) механики. Философское толкование пространственно-временных отношений.

## **II. Основы молекулярной физики и термодинамики.**

9. Молекулярно-кинетическая теория идеального газа. Основные положения молекулярно-кинетической теории вещества. Микро- и макросостояния системы. Макроскопические параметры. Понятие идеального газа. Молекулярно-кинетическое толкование температуры. Число степеней свободы молекулы. Внутренняя энергия идеального газа. Закон равнораспределения энергии. Давление газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Основное уравнение моле-

кулярно-кинетической теории. Уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона - Менделеева).

10. Элементы классической статистики. Динамические и статические закономерности в физике. Статистический метод исследования системы. Фазовое пространство, фазовая точка, фазовая ячейка. Понятие о функции распределения. Статистическое усреднение. Флуктуация и вероятность. Распределение Максвелла. Распределение молекул по абсолютным значениям скорости. Средние скорости молекул. Эффузия газа и молекулярные пучки. Распределение Больцмана. Барометрическая формула. Распределение Максвелла - Больцмана. Распределение Гиббса.

11. Реальные газы. Силы межмолекулярного взаимодействия в газах. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Изотермы реального газа. Метастабильные состояния. Критическое состояние. Внутренняя энергия реального газа. Эффект Джоуля - Томсона. Сжижение газов и получение низких температур.

12. Свойства жидкостей. Характеристика жидкого состояния. Объёмные свойства жидкостей. Строение жидкостей. Ближний порядок. Поверхностное натяжение. Силы, возникающие на кривой поверхности жидкости. Формула Лапласа. Условия равновесия на границе двух сред. Краевой угол. Смачивание. Капиллярные явления.

13. Свойства твердых тел. Амфорные и кристаллические тела. Упругая и пластическая деформации. Закон Гука. Кристаллическая решетка. Дальний порядок. Дефекты в кристаллах.

14. Фазовые равновесия и фазовые переходы. Фазы вещества. Условия равновесия фаз. Испарение и конденсация. Плавление и кристаллизация. Уравнение Клапейрона - Клаузиуса. Фазовая диаграмма (диаграмма состояния). Тройная точка. Полиморфизм. Фазовые переходы первого и второго рода.

15. Элементы теории столкновений. Понятие столкновения. Упругое и неупругое столкновения. Прицельное расстояние. Рассеяние частиц. Эффективное сечение рассеяния. Средняя длина свободного пробега. Принцип детального равновесия.

16. Элементы физической кинетики. Понятие о физической кинетике. Неравновесные системы. Время релаксации. Явления переноса. Диффузия. Коэффициент диффузии. Теплопроводность. Температуропроводность. Коэффициент теплопроводности. Вязкость (внутреннее трение). Коэффициент вязкости. Динамическая и кинематическая вязкость.

17. Первое начало термодинамики. Статистический и термодинамический методы. Термодинамическая система. Термодинамический процесс. Основные термодинамические понятия: внутренняя энергия, работа, теплота. Формулировки первого начала термодинамики. Уравнение первого начала термодинамики. Теплоёмкость. Зависимость теплоёмкости идеального газа от вида процесса. Формула Майера. Работа, совершаемая газом при изопроцессах. Энтальпия (тепловая функция). Адиабатический процесс. Теплоёмкость твердых тел. Недостаточность классической теории теплоёмкостей газов.

18. Второе начало термодинамики. Равновесные и неравновесные состояния системы. Обратимые и необратимые процессы. Круговой процесс (цикл). Формулировки второго начала термодинамики. Цикл Карно и его КПД для идеального газа. Тепловые двигатели и холодильные машины. Максимальный КПД теплового двигателя. Энтропия. Статистический вес (термодинамическая вероятность). Закон возрастания энтропии. Термодинамические потенциалы и условия равновесия. Статистическое толкование второго начала термодинамики.

### **III. Электричество и магнетизм**

19. Элементы теории поля. Скалярные и векторные поля в физике. Градиент скалярного поля. Дивергенция векторного поля. Ротор векторного поля. Оператор Гамильтона (оператор набла). Оператор Лапласа (лапласиан). Некоторые интегральные теоремы.

20. Электрический заряд. Сохранение заряда. Дискретность заряда. Закон Кулона. Понятие электростатического поля. Силовые линии (линии напряженности). Концепции близко- и дальнего действия. Принцип суперпозиции электростатических полей. Поток вектора напряженности. Теорема Гаусса для электростатического поля в вакууме и её связь с законом Кулона. Дифференциальная форма теоремы Гаусса. Применение теоремы Гаусса для расчета полей.

21. Потенциал электростатического поля в вакууме. Работа сил электростатического поля. Циркуляция напряженности электростатического поля. Ротор напряженности электростатического поля. Потенциальность (консервативность) электростатического поля. Потенциал. Разность потенциалов. Связь между потенциалом и напряжённостью электростатического поля. Уравнение Лапласа. Электрический диполь. Электрический момент диполя (дипольный момент).

Потенциал и напряженность поля диполя. Момент сил, действующий на диполь во внешнем электрическом поле. Энергия диполя в электрическом поле.

22. Электрическое поле в диэлектриках. Свободные и связанные заряды в веществе. Сторонние заряды. Полярные и неполярные молекулы. Типы диэлектриков. Ионная, электронная и ориентационная поляризация. Поляризуемость молекулы. Поляризованность (вектор поляризации). Однородная и неоднородная поляризации. Связь поляризованности с поверхностной плотностью поляризационного заряда. Диэлектрическая восприимчивость вещества и её зависимость от температуры. Теорема Гаусса для электрического поля в диэлектрике. Электрическое смещение (электрическая индукция) в диэлектрике. Диэлектрическая проницаемость среды. Вычисление напряженности электрического поля в диэлектрике. Граничные условия для электрического поля на границе раздела “диэлектрик – диэлектрик”. Сегнетоэлектрики.

23. Электрическое поле проводников. Распределение зарядов в проводнике. Идеальный проводник. Электростатическое поле внутри и снаружи проводника. Граничные условия на границе “проводник - вакуум”. Электрические свойства проводящей оболочки. Электростатическая защита. Метод изображений. Граничные условия на границе “проводник - диэлектрик”. Электроёмкость удлиненного проводника, системы проводников и конденсатора. Электрическая энергия системы точечных зарядов. Энергия заряженного проводника, системы проводников и конденсатора. Энергия электростатического поля. Объёмная плотность энергии электростатического поля.

24. Постоянный электрический ток. Характеристики электрического тока: плотность тока, сила тока. Условие существования электрического тока. Сторонние силы. Разность потенциалов, напряжение, электродвижущая сила (ЭДС). ЭДС гальванического элемента. Классическая электронная теория электропроводности металлов. Законы Ома и Джоуля-Ленца в дифференциальной и интегральной форме. Закон Ома для неоднородного участка цепи. Правила Кирхгофа. Электрический ток в сплошной среде. Заземление линий электропередач. Квazистационарные токи. Разрядка и зарядка конденсатора. Недостаточность классической электронной теории электропроводности. Границы применимости закона Ома.

25. Элементы физической электроники. Электрический ток в вакууме. Электронная эмиссия. Работа выхода электронов из металла.

Виртуальный катод. Первоначальный электронный пучок. Электрический ток в газе. Процессы ионизации и рекомбинации. Работа ионизации. Потенциал ионизации. Ударная ионизация. Несамостоятельный газовый разряд. Самостоятельный газовый разряд. Вольт-амперная характеристика газового разряда. Виды разрядов.

26. Плазма. Понятие о плазме. Способы создания плазмы. Квазинейтральность плазмы. Электропроводность плазмы. Дебаевский радиус (дебаевская длина) экранирования. Плазменная частота. Низкотемпературная плазма. МГД-преобразование энергии. Высокотемпературная плазма. Перспектива осуществления управляемого термоядерного синтеза. Вклады ученых разных стран в изучение проблемы управляемого термоядерного синтеза.

27. Магнитное поле в вакууме. Закон Ампера. Магнитная индукция. Закон Био и Савара (закон Био – Савара – Лапласа). Понятие магнитного поля. Принцип суперпозиции магнитных полей. Сила Лоренца и сила Ампера. Магнитное поле прямолинейного и кругового токов. Циркуляция вектора магнитной индукции. Закон полного тока (теорема о циркуляции магнитного поля) в вакууме. Применение закона полного тока для расчета магнитных полей. Магнитное поле длинного соленоида и тороида. Определение единицы силы тока - ампера. Вихревое поле движущегося заряда. Инвариантность электрического заряда. Магнитное поле как релятивистский эффект. Виток с током в магнитном поле. Магнитный момент. Потенциальная энергия витка с током во внешнем магнитном поле. Момент сил, действующий на рамку с током во внешнем магнитном поле.

28. Движение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях. Движение заряженной частицы в электрическом поле. Движение заряженной частицы в совместном электрическом и магнитных полях. Эффект Холла. МГД-генератор. Масс – спектрограф и масс – спектрометр. Ускорители заряженных частиц.

29. Магнитное поле в веществе. Понятие магнитного момента атома. Микро- и макроток. Молекулярные токи. Намагниченность (вектор намагничивания). Однородное и неоднородное намагничивание. Связь намагниченности с линейной плотностью поверхностного молекулярного тока. Магнитная восприимчивость вещества и её зависимость от температуры. Закон полного тока (теорема о циркуляции магнитного поля) в веществе. Напряжённость магнитного поля в веществе. Магнитная проницаемость среды. Индукция магнитного поля в веществе. Граничные условия для магнитного поля на границе раз-

дела двух сред. Типы магнетиков. Точка Кюри. Домены. Кривая намагничивания.

30. Электромагнитная индукция. Опыт Фарадея. Магнитный поток. ЭДС индукции. Основной закон электромагнитной индукции (закон Фарадея). Вывод основного закона электромагнитной индукции из закона сохранения энергии, а также на основе электронной теории. Правило Ленца (закон Ленца). Явление самоиндукции. Индуктивность. Индуктивность длинного соленоида. Токи замыкания и размыкания цепи. Явление взаимной индукции. Взаимная индуктивность. Энергия магнитного поля. Объёмная плотность энергии магнитного поля. Флюксметр.

#### **IV. Колебания и волны.**

31. Механические колебания. Свободные (собственные) и вынужденные колебания. Дифференциальное уравнение гармонических колебаний и его решение. Характеристики гармонических колебаний. Понятие о гармоническом осцилляторе. Энергия гармонических колебаний. Сложение одинаково направленных (скалярных) гармонических колебаний. Метод векторной диаграммы. Биения. Сложение взаимно перпендикулярных (векторных) гармонических колебаний. Фигуры Лиссажу. Дифференциальное уравнение затухающих колебаний и его решение. Аперриодический процесс. Частота и коэффициент затухания. Логарифмический декремент затухания и добротность колебательной системы. Изохронность колебаний. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний и его решение. Амплитуда и фаза при вынужденных механических колебаниях. Механический резонанс. Резонансные кривые. Соотношение между фазами вынуждающей силы и скорости при механическом резонансе.

32. Механические волны. Механизм образования механических волн в упругой среде. Продольные и поперечные волны. Волновое уравнение и его решение. Гармонические волны и их характеристики. Ударные волны. Принцип суперпозиции волн и граница его применимости. Фазовая скорость и дисперсия волн. Волновой пакет и групповая скорость. Понятие о когерентности. Интерференция волн. Стоячие волны. Энергия и поток энергии упругой волны. Вектор Умова. Эффект Доплера для звуковых волн. Ультразвук.

33. Электромагнитные колебания. Дифференциальное уравнение колебаний в колебательном контуре и его решение. Дифферен-

циальное уравнение затухающих электромагнитных колебаний и его решение. Частота и коэффициент затухания электромагнитного колебания. Логарифмический декремент затухания и добротность контура. Дифференциальное уравнение вынужденных электромагнитных колебаний и его решение. Амплитуда и фаза при вынужденных электромагнитных колебаниях. Резонанс в колебательном контуре. Резонансные кривые для напряжения и силы тока. Переменный ток.

34. Электромагнитные волны. Фарадеевская и максвелловская трактовки явления электромагнитной индукции. Ток смещения. Электромагнитное поле. Система уравнений Максвелла. Волновое уравнение для электромагнитного поля и его решение. Скорость распространения электромагнитных волн в средах. Основные свойства электромагнитных волн. Энергия и поток энергии электромагнитных волн. Вектор Пойнтинга. Импульс электромагнитного поля. Излучение диполя. Диаграмма направленности. Эффект Доплера для электромагнитных волн. Шкала электромагнитных волн.

## **V. Оптика**

35. Распространение света через границу двух сред. Электромагнитная природа света. Принцип Гюйгенса. Закон отражения и преломления. Абсолютный и относительный показатели преломления. Полное внутреннее отражение. Световоды. Геометрическая оптика как предельный случай волновой оптики. Оптические инструменты.

36. Интерференция света. Монохроматические и немонахроматические волны. Понятие о разложении Фурье. Принцип суперпозиции и интенсивность при сложении световых волн. Когерентность световых волн. Время и длина когерентности. Оптическая длина пути. Оптическая разность хода. Расчет интерференционной картины от двух когерентных источников. Полосы равной толщины и равного наклона. Многолучевая интерференция. Способы получения когерентных лучей. Интерферометры. Излучение Вавилова-Черенкова.

37. Дифракция света. Принцип Гюйгенса-Френеля. Метод зон Френеля. Прямолинейное распространение света. Дифракция Френеля. Дифракция Френеля от круглого отверстия и круглого диска. Дифракция Френеля от края полуплоскости. Спирал Корню. Дифракция Фраунгофера от бесконечно длинной прямой щели. Дифракция от одномерной дифракционной решетки. Дифракция от двухмерной ди-

фракционной решетки. Разрешающая способность оптических инструментов. Дифракция на трехмерной дифракционной решетки. Понятие о голографии.

38. Поляризация света. Естественный и поляризованный свет. Степень поляризации. Поляризация света при преломлении и отражении. Закон Брюстера. Поляризация при двойном лучепреломлении. Обыкновенный и необыкновенный лучи. Оптическая ось кристалла. Поляроиды и поляризационные призмы. Поляризаторы и анализаторы. Закон Малюса. Полуволновые и четвертьволновые пластинки. Искусственная оптическая анизотропия. Оптическая активность вещества. Эффект Фарадея.

39. Дисперсия света. Затруднения в электромагнитной теории Максвелла. Нормальная и аномальная дисперсии. Методы наблюдения дисперсии. Призматический и дифракционный спектры. Электронная теория дисперсии света. Поглощение света. Закон Бугера. Цвета тел и спектры поглощения.



**РАЗДЕЛ I**

**МЕХАНИКА**

## 1.1. ЭЛЕМЕНТЫ КИНЕМАТИКИ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

### 1.1.1. Демонстрация векторного характера скорости

**Оборудование:** точило ручное, напильник.

**Порядок проведения опыта.** Чтобы показать, как направлена линейная скорость при вращательном движении, приводят в быстрое вращение наждачный круг ручного или электрического точила и прижимают к нему какой-либо стержень из закаленной стали, например напильник. Тонкий пучок искр, вырывающийся из под стержня, направлен по касательной к окружности. Направление движения сгорающих в воздухе частиц стали и есть направление их мгновенной скорости (рис. 1.1).

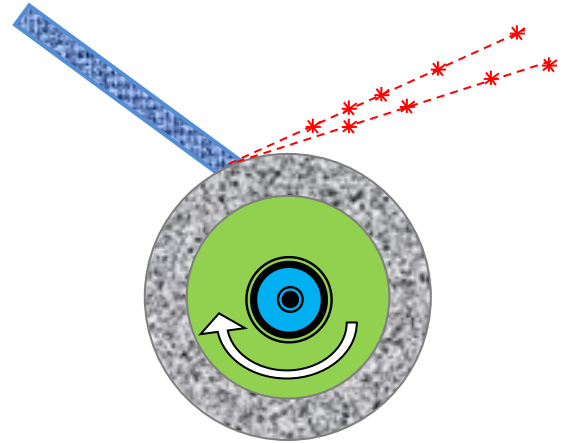


Рис. 1.1

### 1.1.2. Сложение движений

**Оборудование:** диск на горизонтальной оси, кисточка, тушь.

**Порядок проведения опыта.** Демонстрируется результат сложения равномерного вращения и равномерного поступательного движения. По равномерно вращающемуся диску, укрепленному на горизонтальной оси, равномерно двигают по радиусу от центра к краю диска кисточкой, смоченной тушью (рис. 1.2). При этом на плоскости диска получается траектория движения точки (кисточки) в виде архимедовой спирали.

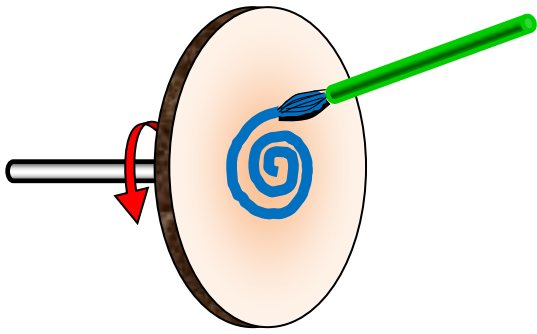


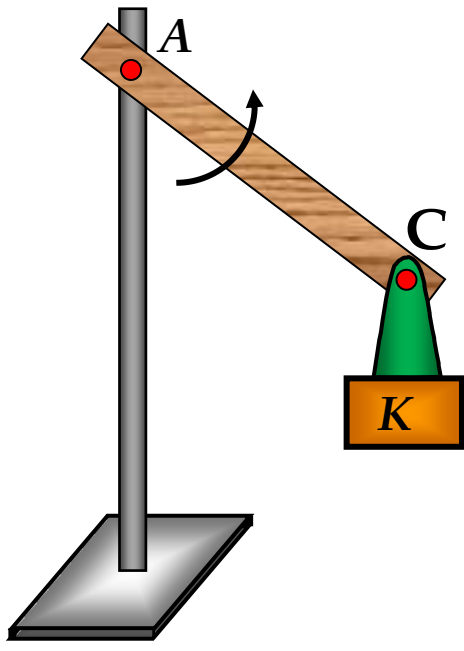
Рис. 1.2

### 1.1.3. Поступательное и вращательное движения

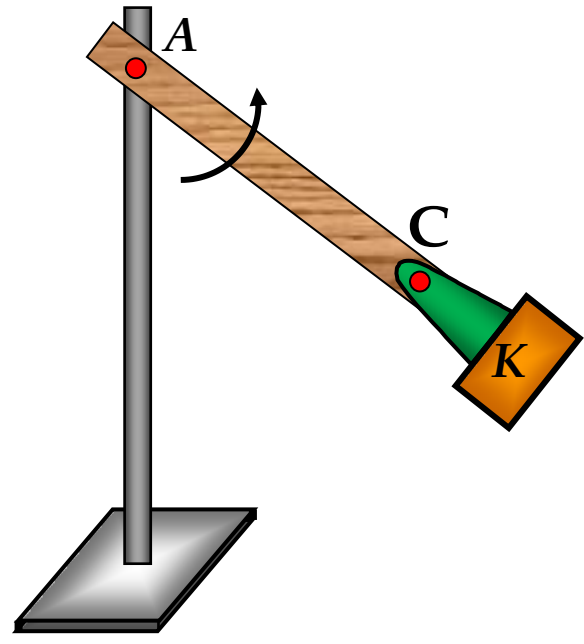
**Оборудование:** штатив с шарнирным узлом  $A$ , линейка с шарнирными узлами в точках  $A$  и  $C$ , кабинка  $K$  с шарнирной подвеской.

**Порядок проведения опыта.** Демонстрируются поступательное и вращательное движения. Установка собирается, как показано на рис. 1.3.

1. Шарниры в незакрепленном состоянии (рис. 1.3, а). При повороте линейки в направлении стрелки видно, что линии контура кабинки  $K$  не меняют своей ориентации в пространстве, т.е. кабинка движется поступательно.
2. Шарнир в точке  $C$  жестко закреплен относительно линейки и кабинки (рис. 1.3, б). При повороте линейки в направлении стрелки видно, что кабинка вращается.



a)



б)

Рис. 1.3

## 1.2. ЗАКОНЫ ДИНАМИКИ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ И СИСТЕМЫ МАТЕРИАЛЬНЫХ ТОЧЕК

### 1.2.1. Свободное падение тел в вакууме

**Оборудование:** насос вакуумный, трубка Ньютона.

**Порядок проведения опыта.** У трубки Ньютона открывают кран и, держа ее в вертикальном положении, обращают внимание на птичье перышко, пробку и кусок свинца, лежащие на дне прибора. При быстром перевертывании трубки краном вниз (это надо сделать 2 – 3 раза) слышен удар свинцового груза, затем видно, как падает пробка и медленно опускается перышко. Далее соединяют вакуумным шлангом вакуумный насос с трубкой Ньютона и откачивают из нее воздух. Когда манометр покажет 5 – 6 мм ртутного столба, кран трубки Ньютона закрывают. Сняв резиновую трубку, снова перевертывают трубку 2 – 3 раза. Перышко, кусочки пробки и свинца, не испытывая сопротивления воздуха, падают в трубке с одинаковым ускорением (рис. 1.4) (двигаясь рядом друг с другом).

### 1.2.2. Уменьшение и увеличение веса при движении тела с ускорением

**Оборудование:** тело, динамометр, грузик.

**Порядок проведения опыта.** Тело весом  $P$ , подвешенное к динамометру, опускается или поднимается ускоренно вместе с динамометром под действием груза  $Q$  (рис. 1.5).

Рассказать о перегрузках организма при катапультировании летчика из самолета, терпящего аварию.



Рис. 1.4

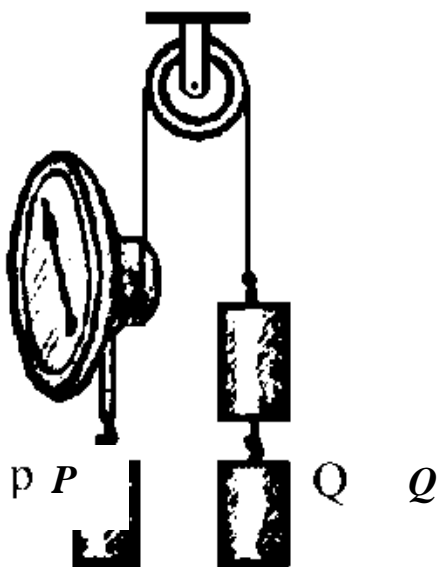


Рис. 1.5

### 1.2.3. Третий закон Ньютона

#### Опыт № 1

**Оборудование:** две тележки, пружина, два груза (рис. 1.6).

**Порядок проведения опыта.** На две тележки, расположенные посередине рельсов, ставят одинаковые грузы (100 – 200 г); сближают их так, чтобы находящаяся между ними пружина сжалась.

В сжатом положении тележки удерживаются нитью, накинутой на крючки тележек. При пережигании нити сжатая пружина сообщает тележкам ускорения. При равенстве масс грузов ускорения тележек одинаковы, при большой разнице масс хорошо видна разница ускорений. Для изменения соотношения масс тележек следует брать грузы, имеющие вес, равный весу пустой тележки. Наилучшие результаты могут быть получены при применении тележки на воздушной подушке. Аналог этого опыта – отдача орудия при выстреле.

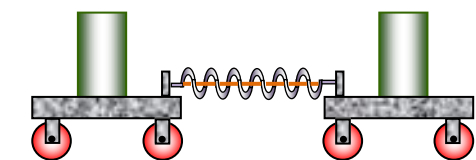


Рис. 1.6

## Опыт № 2

**Оборудование:** два динамометра.

**Порядок проведения опыта.**

Верхний динамометр показывает вес нижнего, а нижний – свой вес, т.е. показания динамометров одинаковые (рис. 1.7).



Рис. 1.7

### 1.2.4. Инерция покоя груза на нити

**Оборудование:** штатив универсальный (2 шт.); массивный груз (гиря массой 5 кг) с двумя крючками; металлический стержень диаметром не менее 14 мм

(2 шт.); несколько одинаковых нитяных петелек (можно использовать тонкий шпагат), молоток, металлический крючок.

**Порядок проведения опыта.**

Установка собирается, как показано на рис. 1.8.



Рис. 1.8

Тяжелый груз подвесим к крючку на перекладине на одной тонкой петле. Внизу к грузу нужно подвесить такую же петлю. В нижнюю петлю вставляется металлический стержень (на рис. 1.8 он лежит рядом с молотком). Если медленно тянуть за нижнюю петлю, нажимая сверху рукой на стержень, то оборвется верхняя петля. Если же резко дернуть за нижнюю петлю, ударив молотком по стержню, то оборвется нижняя петля, а груз останется висеть на верхней петле. Для того чтобы убедиться, что верхняя петля не крепче нижней, опыт повторяют, прикрепив верхнюю петлю к нижней части груза, а сверху груз

подвешивают на новую петлю. При достаточном навыке в проведении опыта удастся порвать снизу одновременно несколько петелек при одной петле, висящей сверху. Для того чтобы все петли были одинаковой длины, необходимо их завязывать на одном и том же шаблоне. Опыт можно подкрепить количественным расчетом, исходя из предположения, что разрыв петель происходит при их удлинении на несколько миллиметров.

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

**Указание:** чтобы груз при падении не травмировал руку, нажимать стержень надо на некотором расстоянии от места падения груза. Для амортизации удара на стол кладут резиновый или пенопластовый коврик.

### 1.2.5. Инерция покоя груза на горизонтальной поверхности

**Оборудование:** деревянный цилиндр (высота 30 см, радиус 4,0 см), демонстрационный столик, листы бумаги (желательно из кальки) (рис. 1.9).

**Порядок проведения опыта.**

1. При медленном вытягивании бумаги цилиндр падает.

2. При резком рывке цилиндр остается на месте.

Результат действия силы, ускоряющей тело, зависит от времени ее действия.

На полосу бумаги (лучше кальки или стеклоткани), положенную на стол, ставят деревянный цилиндр. Если медленно потянуть за край бумаги, то время действия окажется большим, и вместе с бумагой будет двигаться и цилиндр. При резком ударе указкой или рукой по бумаге лист бумаги придет в движение с большим ускорением, а вертикально стоящий цилиндр останется на прежнем месте.



Рис. 1.9



### 1.2.6. Демонстрация инертности тел

**Оборудование:** штативы, два бумажных кольца, рейка, металлический прут (длиной 70 см, диаметром 1 см) (рис. 1.10).

**Порядок проведения опыта.** Нажим металлическим прутком на рейку приводит к разрыву одного из колец; резкий удар – ломается рейка. Бумажные кольца изготавливают шириной 3 см. Рейка деревянная длиной 70 см.

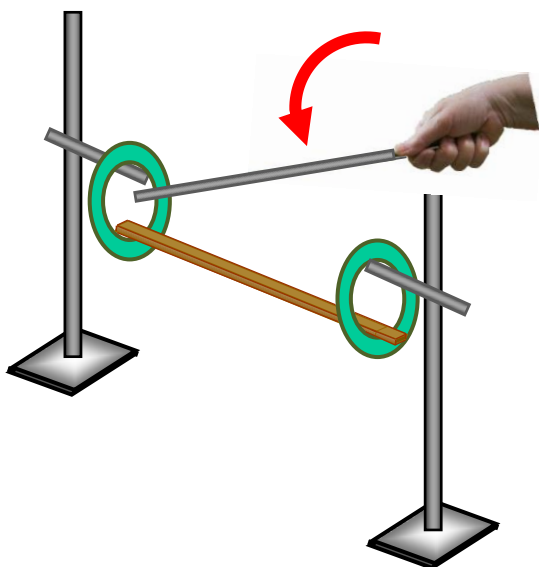


Рис. 1.10

### 1.2.7. Инерция покоя и движения

**Оборудование:** тележка, стойка с горизонтальной осью, шар на ни-

ти, чашка для груза, набор грузов, шкив.

**Порядок проведения опыта.** Демонстрируется инерция покоя и движения.

Под действием груза  $P$  тележка с грузом  $P_1$  и шаром на нити получает ускорение (рис. 1.11).

При ударе колес о препятствие  $R$  груз  $P_1$  падает вперед, шар также отклоняется вперед (положение 2). Тележку следует отпускать одновременно с маятником, отклоненным заранее на угол  $\alpha$ . Тогда при движении с ускорением шарик маятника остается неподвижным, т.е. маятник будет находиться в положении равновесия, возникшего при сложении двух постоянных сил: тяжести и инерции.

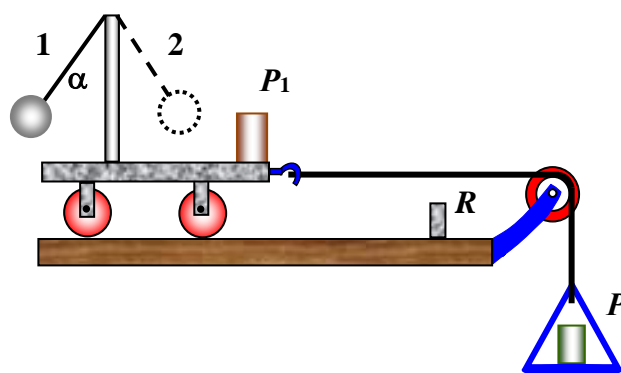


Рис. 1.11

## 1.3. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

### 1.3.1. Полет ракеты (закон сохранения импульса)

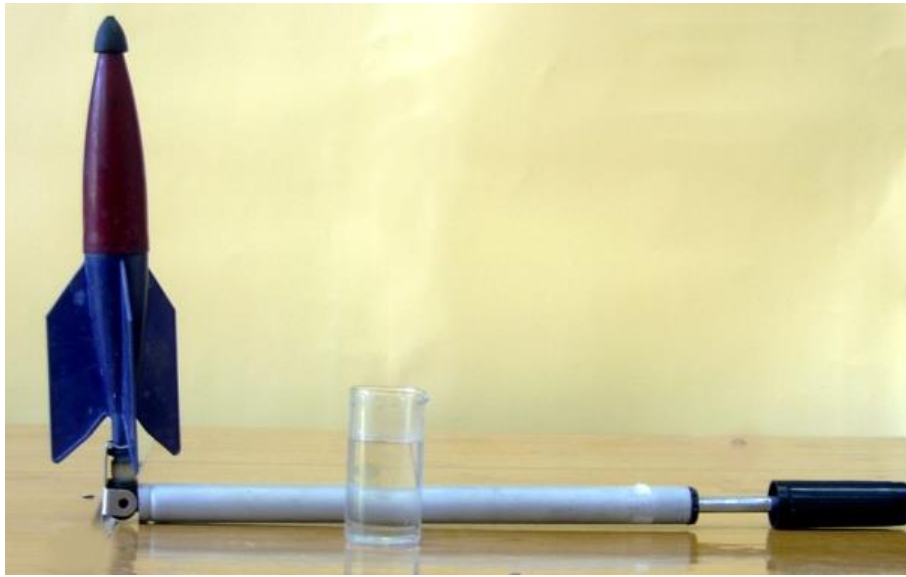
**Оборудование:** модель ракеты с пусковым приспособлением и воронкой, насос воздушный ручной.

**Порядок проведения опыта.** В ракету (рис. 1.12) через воронку наливают около 60 мл воды. Соединяют насос с пускателем и, придерживая спусковую скобу, накачивают в корпус ракеты воздух до такого давления, когда будет заметно ощущаться сопротивление движению поршня насоса. После закачивания воздуха ракету поворачивают головной частью вверх или под некоторым углом к горизонту (в зависимости от задаваемого направления траектории полета). Удерживая насос левой рукой, правой рукой с помощью шнурка освобождают спусковой крючок. При срабатывании спускового механизма вода сильной струей выбрасывается сжатым воздухом из сопла, а

освобожденная ракета устремляется в сторону, противоположную направлению истечения воды.

Можно произвести два запуска: при первом пуске вода в ракету не заливается, при втором – заливается, таким образом, демонстрируется полет при разном отношении масс вытекающей струи и ракеты.

**Указание:** в целях безопасности не направлять ракету на аудиторию, при демонстрации опыта рекомендуется направлять движение ракеты вдоль проволоки. Для этого к ракете прикрепляют два проволочных кольца, сквозь которые пропущена направляющая проволока длиной 10 – 15 м (в зависимости от размеров аудитории). Один конец проволоки прикрепляют к верхней части стены аудитории (к предполагаемому месту полета ракеты), второй конец закрепляют у демонстрационного стола.



**Рис. 1.12**

## 1.4. ПОЛЕ ЦЕНТРАЛЬНЫХ СИЛ

### 1.4.1. Движение тела в поле центральных сил

**Оборудование:** постоянный магнит (или электромагнит), металлический шарик.

**Порядок проведения опыта.** Центральное поле сил притяжения, действующих на стальной шар, создается полюсом постоянного магнита или электромагнита, расположенного под горизонтальной крышкой демонстрационного стола. Напряженность поля сил может быть изменена приближением или удалением полюса постоянного магнита к крышке или изменением силы тока в катушке электромагнита.

Этим опытом можно демонстрировать:

1. Зависимость траектории от прицельного расстояния  $R$  (рис. 1.13, а).

2. Зависимость радиуса траектории от напряженности поля центральных сил  $f$  (рис. 1.13, б) демонстрируется при различных расстояниях от крышки стола полюса постоянного магнита или при различной силе тока в катушке электромагнита.

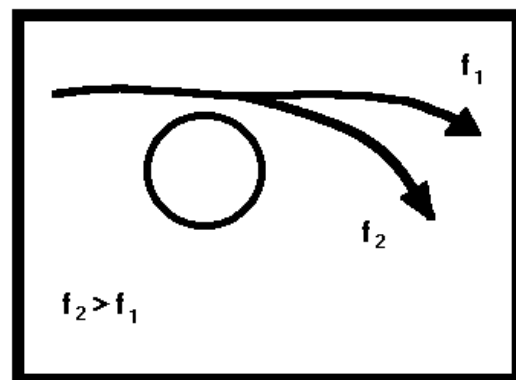
3. Зависимость радиуса траектории тела в поле центральных сил от скорости (рис. 1.13, в).

4. Неустойчивость планетарной модели атома с точки зрения классической механики (рис. 1.13, г).

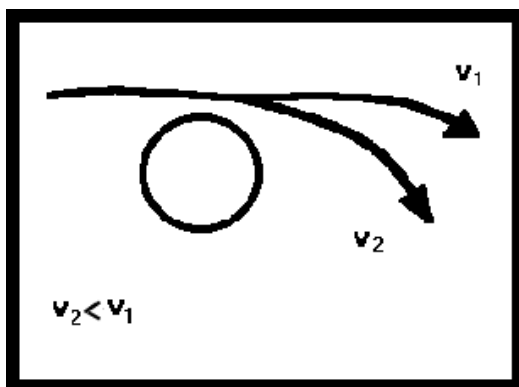
Стекло на столе улучшает качество демонстрации.



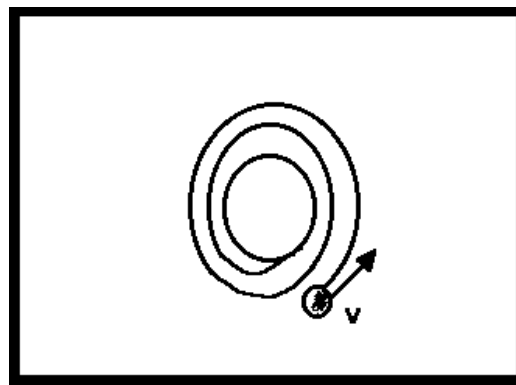
а)



б)



В)



Г)

Рис.1.13

## 1.5. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

### 1.5.1. Закон сохранения механической энергии

**Оборудование:** стальной шарик, стеклянная плита.

**Порядок проведения опыта.** Стальной шарик, падающий с некоторой высоты на стеклянную плиту и ударившийся об нее, подскакивает почти на ту же высоту, с которой упал (рис. 1.14).

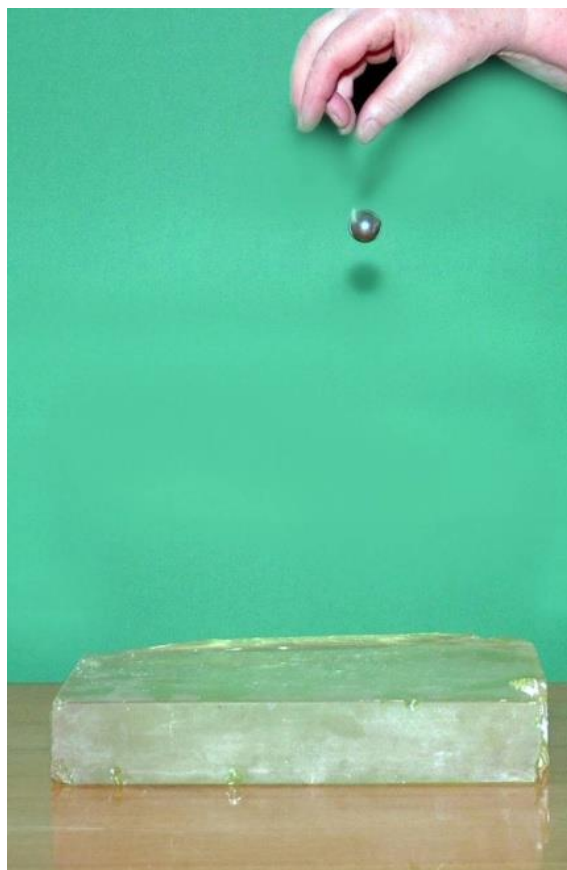


Рис. 1.14

Во время движения шарика происходит целый ряд превращений энергии. При падении потенциальная энергия тяготения переходит в кинетическую энергию шарика. Когда шарик коснется плиты, он и плита начинают деформироваться. Кинетическая энергия превращается в потенциальную энергию упругой деформации шарика и плиты, причем этот процесс продолжается до тех пор, пока шарик не остановится; затем потенциальная энергия упругой деформации стекла и стали переходит в кинетическую энергию подсакающего шарика.

В качестве примера из техники можно рассказать о сортировке шариков для шарикоподшипников по твердости: шарики скатываются по наклонной плоскости и после падения отскакивают от закаленной стальной плиты в ячейки. Чем выше твердость шарика, тем выше он подскочит.

### 1.5.2. Маятник Максвелла Опыт № 1

**Оборудование:** маятник, весы.

**Порядок проведения опыта.** Маятник Максвелла служит иллюстрацией превращения потенциальной энергии в кинетическую энергию поступательного движения и вращения (рис. 1.15).

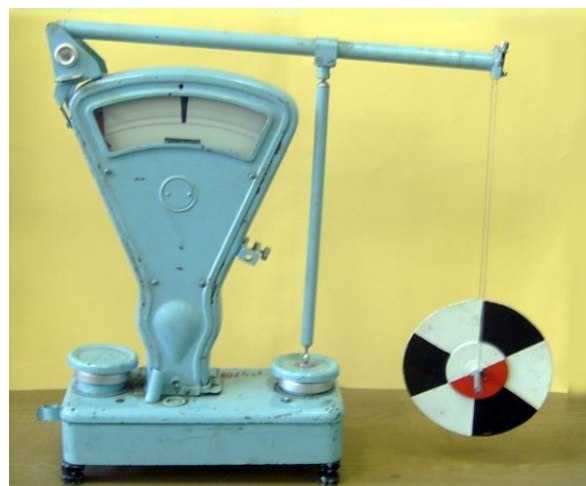


Рис. 1.15

Так как движение маятника равноускоренное, то при подъеме и опускании происходит изменение веса, что можно видеть по отклонению стрелки весов (маятник установлен на весах).

### Опыт № 2

**Оборудование:** электронная установка ФРМ-03 «Маятник Максвелла» (рис. 1.16).

**Порядок проведения опыта.** Демонстрируется одновременное плоскопараллельное и вращательное движение абсолютно твердого тела, а также зависимости кинематических величин от момента инерции. Последовательно накладываются на диск кольца различной массы и обращают внимание на изменение ускорения движения при изменении момента инерции диска с кольцом. Возможно измерение момента инерции

диска и силы натяжения нити с использованием авто-матической регистрации времени движения цифровым миллисекундомером.



Рис. 1.16

### 1.5.3. «Мертвая петля»

**Оборудование:** желоб с петлёй, шарик (рис. 1.17).

**Порядок проведения опыта.**

"Мертвая петля" применяется для демонстрации перехода потенциальной энергии в кинетическую, понятия веса. С верхней точки желоба спускают шарик, наблюдая скорость его движения в различных точках желоба. Для иллюстрации можно рассказать о "мертвой петле" Нестерова.

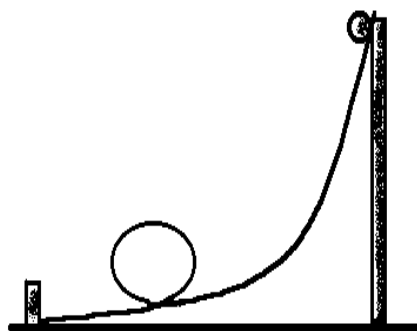


Рис. 1.17

## 1.6. АБСОЛЮТНО УПРУГОЕ И НЕУПРУГОЕ СОУДАРЕНИЯ ТЕЛ

### 1.6.1. Упругий и неупругий удары

**Оборудование:** стальные или косяные шары, пластилиновые шары.

**Порядок проведения опыта.**

1. Неупругий удар шаров.

Для этой демонстрации

подвешивают бифилярно на двух поставленных рядом штативах два пластилиновых шара диаметром 4 – 5 см каждый. Подвешивают их на нитях, привязанных к небольшим проволочным крючкам, вставленным в шары (рис. 1.18). В положении равновесия шары

должны слегка касаться один другого. Один шар отводят в сторону на 10 – 20 см и отпускают; после удара оба шара движутся совместно с одинаковой скоростью.

## 2. Упругий удар шаров:

Два шара подвешивают бифилярно и так, чтобы шары в положении равновесия

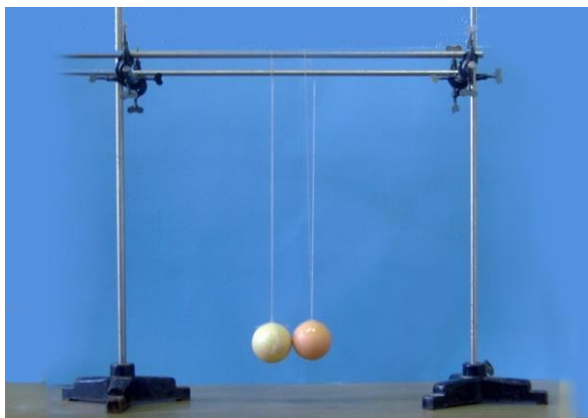


Рис. 1.18

касались друг друга (см. рис. 1.18). Отклонив один шар на 15 – 20 см, отпускают его. Ударившись о второй шар, первый останавливается, а второй отклоняется почти на такое же расстояние, на какое был отклонен первый. Затем второй шар ударяется о первый и остается на месте, а первый отклоняется и так далее, после двух-трех ударов шары следует остановить, так как вследствие не вполне упругого удара они оба приходят в движение. Вместо двух шаров можно использовать несколько (рис. 1.19).



Рис. 1.19



## 1.7. МОМЕНТ ИНЕРЦИИ ТЕЛА ОТНОСИТЕЛЬНО НЕПОДВИЖНОЙ ОСИ

### 1.7.1. Зависимость момента инерции от распределения массы

#### Опыт № 1

**Оборудование:** кольцо и колесо одинакового радиуса и одинаковой массы; наклонная плоскость; у кольца масса распределена на периферии относительно его центра (рис. 1.20, слева), а у колеса масса преимущественно сосредоточена вблизи центра, где установлен свинцовый вкладыш (рис. 1.20, справа и рис. 1.21).

**Порядок проведения опыта.** С одинаковой высоты наклонной плоскости одновременно начнут скатываться оба тела. В процессе их движения хорошо видно, что колесо обгоняет кольцо, так как момент инерции колеса меньше, чем момент инерции кольца.

Опыт будет нагляднее, если вместо колеса взять диск из пенопласта и утяжелить его свинцовым цилиндром, расположенным в центре диска.

**Обсуждение опыта.** Моменты сил, действующих на кольцо и диск, установленные на наклонной плоскости, одинаковые, так как у них одинаковые массы и

внешние радиусы. Из основного уравнения динамики вращательного движения твердого тела (рис. 1.22) следует:  $I_1\varepsilon_1 = I_2\varepsilon_2$ , где  $I_1, I_2$  – моменты инерции;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – угловые ускорения кольца и колеса соответственно. Поскольку  $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$  (колесо обгоняет кольцо), то  $I_1 > I_2$ , то есть момент инерции тела зависит от распределения массы относительно оси вращения этого тела.



Рис. 1.20

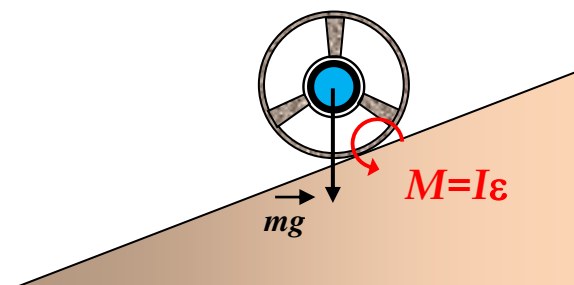


Рис. 1.21

## Опыт № 2

**Оборудование:** диск, пружина, демонстрационный секундомер.

**Порядок проведения опыта.** Осуществим количественный опыт, приводя в крутильные колебания диск, подвешенный на пружине двумя способами, как показано на рис. 1.22, а; б, и в каждом случае будем измерять период колебаний системы. Сравнивая периоды колебаний, обнаружим, что период колебания диска в варианте “б” будет больше, чем в опыте с вариантом “а”.

В первом случае момент инерции диска относительно оси вращения

$$I_a = \frac{1}{4}mr^2,$$

где  $m$  – масса диска,  $r$  – его ради-

ус. Во втором случае  $I_{\dot{a}} = \frac{1}{2}mr^2$ .

Поскольку период колебаний зависит от момента инерции диска и физических свойств пружины:

$$T = \sqrt{\frac{I}{D}},$$

где  $D$  – модуль кручения пружины, то во втором случае период колебаний будет больше, или  $T_b/T_a = \sqrt{2}$ .

Эксперимент проводится с помощью демонстрационного секундомера. Для того чтобы колебания диска во втором случае были хорошо видны, часть диска закрасить яркой краской. Диск необходимо брать не очень тонкий, чтобы колебания в варианте “а” не слишком быстро затухали вследствие демпфирующего действия воздуха.

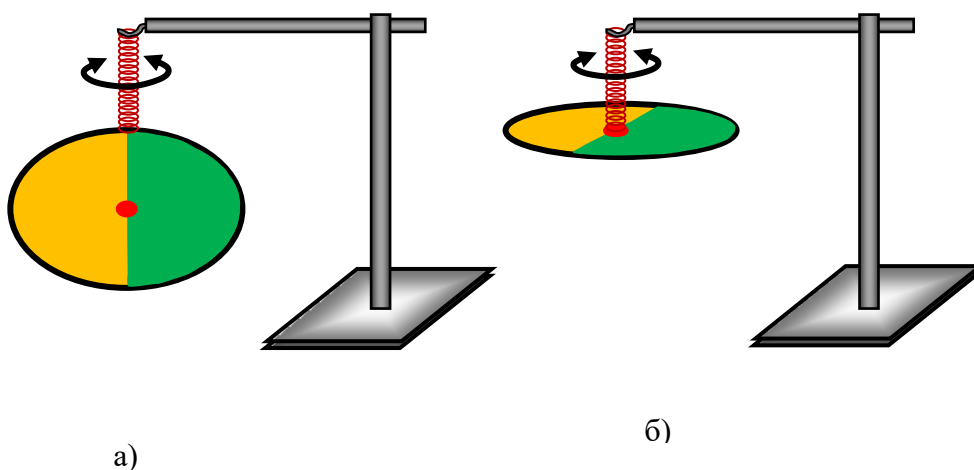


Рис. 1.22

### 1.7.2. Момент инерции при вращении как аналог массы при поступательном движении

**Оборудование:** штатив, цилиндр, пружина.

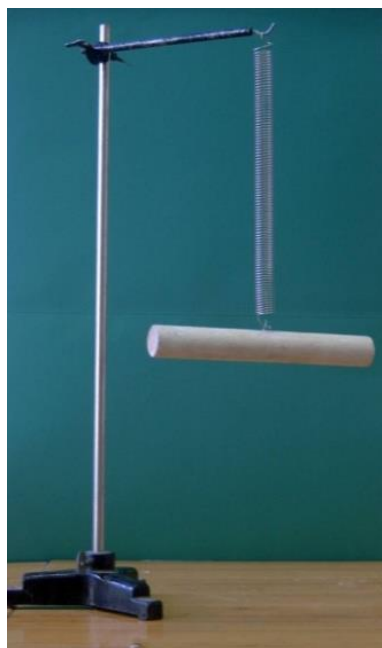
**Порядок проведения опыта.** Демонстрируются:

- 1) упругие вертикальные колебания цилиндра;
- 2) крутильные упругие колебания.

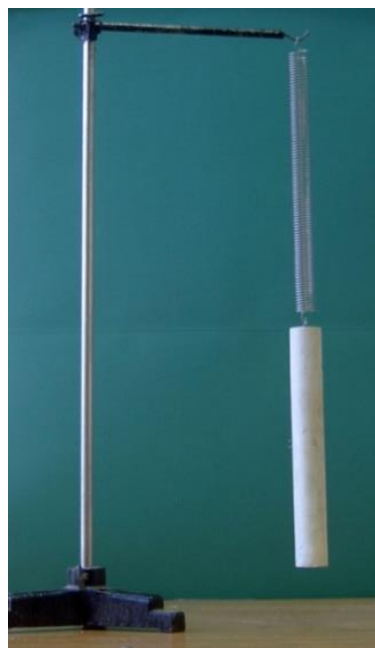
При использовании универсального штатива на пружине подвешивается цилиндр с отношением длины к диаметру порядка 5. Цилиндр имеет два крючка, так что его можно подвешивать горизонтально I и вертикально II (рис. 1.23).

1. Демонстрируются упругие вертикальные колебания цилиндра вдоль оси пружины. Период колебаний определяется жесткостью пружины и массой цилиндра. Масса цилиндра не зависит от его расположения, и период колебаний цилиндра на пружине в вертикальном и горизонтальном положениях совершенно одинаков.

2. Демонстрируются упругие крутильные колебания. Период колебаний цилиндра в положении I значительно больше, чем в положении II (момент инерции в положении I больше), и поэтому период колебаний возрастает.



I



II

Рис. 1.23

## 1.8. УГЛОВОЕ УСКОРЕНИЕ И СИЛЫ ИНЕРЦИИ ПРИ ВРАЩАТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ

### 1.8.1. Зависимость центробежной силы от массы тела и радиуса вращения

**Оборудование:** прибор (рис. 1.24).

**Порядок проведения опыта.**

I. Два цилиндра разной массы  $M$  и  $m$ , нанизанных на горизонтальный стержень, вращаются на одинаковом расстоянии  $r$  от оси. Оба тела скреплены нитью. Цилиндры движутся в сторону груза с большей массой.

II. Цилиндры находятся в равновесии, если

$$Mr_1 = mr_2,$$

где  $r_1, r_2$  – расстояния от центров масс цилиндров  $M$  и  $m$  до оси вращения.



Рис. 1.24

### 1.8.2. Центрифуга

**Оборудование:** центрифуга (рис. 1.25), пробирки, молоко.

**Порядок проведения опыта.** Демонстрируется действие центробежной силы. Приводят барабан центрифуги во вращение с закрытыми пробками пробирками, расположенными горизонтально радиально и заполненными взвесью мела в воде или молоком. Так можно осадить мел, разделить молоко на масло и обрат.



Рис. 1.25

**Указания:** для сохранности пробирок их делают металлическими.

## 1.9. УРАВНЕНИЕ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ АБСОЛЮТНО ТВЁРДОГО ТЕЛА ОТНОСИТЕЛЬНО НЕПОДВИЖНОЙ ОСИ

**1.9.1. Маятник Обербека, проверка уравнения вращательного движения абсолютно твёрдого тела относительно неподвижной оси**

### Опыт № 1

**Оборудование:** маятник Обербека, грузы.

**Порядок проведения опыта.** Для лекционного эксперимента берется маятник Обербека с двумя шкивами разного радиуса (рис. 1.26). Маятник раскручивается одним или несколькими грузами на чашке. Изменяя количество грузов, положенных на чашку, и радиус (плечо) шкива, на котором намотан шнур, убеждаемся, что угловое ускорение пропорционально моменту силы. Уг-

ловое ускорение обратно пропорционально квадрату времени, за которое грузы пройдут определенную высоту (например, от края демонстрационного стола до пола). Время можно измерять демонстрационным секундомером.

### Опыт № 2

**Оборудование:** маятник Обербека с двумя шкивами разного радиуса, несколько грузов.

**Порядок проведения опыта.** 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.

Как иллюстративный, опыт достаточно эффективен.



Рис. 1.26

## 1.10. МОМЕНТ ИМПУЛЬСА ТЕЛА, УРАВНЕНИЕ МОМЕНТОВ

### 1.10.1. Наблюдение прецессии оси гироскопа

#### Опыт № 1

**Оборудование:** гироскоп, например типа ТМ-20 (рис. 1.27, а) или устройство демонстрационное «Гироскоп» (рис. 1.27, б).

**Порядок проведения опыта.** В этом опыте используется модель гироскопа типа ТМ-20. Модель позволяет демонстрировать прецессию и зависимость величины угловой скорости прецессии от различных факторов. Диск гироскопа раскручивают с помощью шнура. На один конец шнура привязывается короткий гвоздь, который вставляется в отверстие шкива, а на второй конец – деревянная ручка. Шнур должен быть длиной около полутора метров.

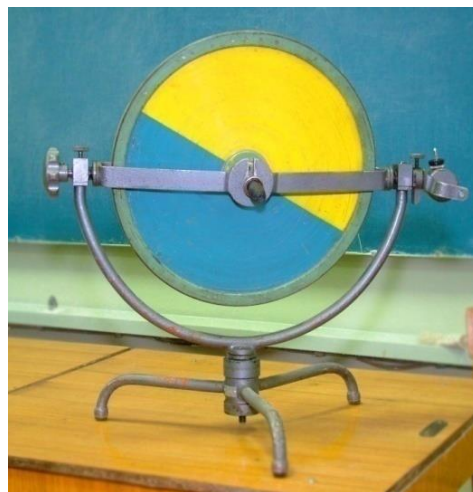
Демонстрируется действие уравнения моментов:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}, \quad \text{èèè} \quad d\vec{L} = \vec{M}dt,$$

где  $\vec{L}$  – момент импульса,  $\vec{M}$  – момент силы.

При изменении знака внешнего момента силы направление прецессии изменяется. При изменении направления вращения диска изменяется направление

прецессии. В этих опытах обязательно показывать студентам, куда направлены  $\vec{M}$  и  $\vec{L}$ . Обратить внимание, что  $d\vec{L}$  всегда направлен туда же, куда и  $\vec{M}$ .



а)



б)

Рис. 1.27

## Опыт № 2

**Оборудование:** гироскоп с электронным блоком управления ФМ-1/1 (рис. 1.28).

**Порядок проведения опыта.**

Устройство позволяет широко демонстрировать свойства гироскопа и удобно представлять измеренные величины. Объясняют устройство гироскопа, принцип его закрепления в подвесе и назначение электронного блока ФМ-1/1. Включив установку, демонстрируют прецессию и нутацию оси гироскопа, используя различные закрепления (с разных сторон гироскопа) противовеса на оси гироскопа.

Отмечают возможность исследования зависимости частоты прецессии от момента внешней силы, действующей на ось, и от частоты вращения гироскопа. Рассказывают о том, как важнейшие

свойства гироскопа позволяют использовать его в технике.

### 1.10.2. Иллюстрация основного закона динамики вращательного движения

**Оборудование:** велосипедное колесо с длинной осью, шнур подвеса (рис. 1.29).

**Порядок проведения опыта.** Раскрученное вокруг горизонтальной оси велосипедное колесо, имеющее момент импульса, направленный вдоль оси, подвешено на шнур за конец оси. Сила тяжести колеса  $\vec{P}$  обуславливает момент силы  $\vec{M}$  относительно точки подвеса, направленный горизонтально и перпендикулярно оси колеса, и вызывает изменение момента импульса колеса  $d\vec{L} = \vec{M}dt$ , направленное как и момент силы перпендикулярно моменту импульса колеса, так что колесо начинает прецессировать вокруг горизонтальной оси.

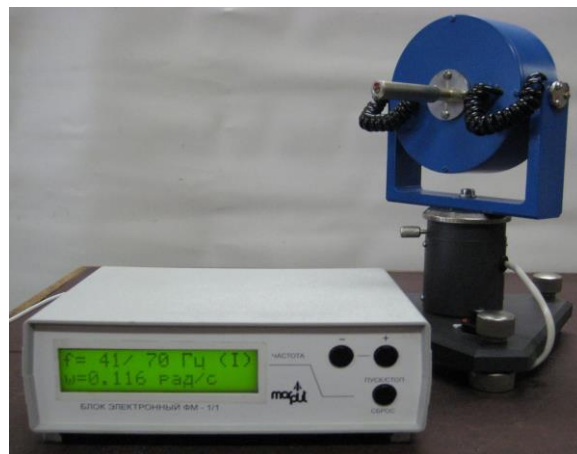


Рис. 1.28



Рис. 1.29

### 1.10.3. Прецессия вращающегося колеса

**Оборудование:** велосипедное колесо с длинной осью, шнур подвеса (см. рис. 1.29).

**Порядок проведения опыта.** Раскрученное велосипедное колесо подвешено на шнуре за конец ручки. Оно прецессирует вокруг вертикальной оси, с угловой скоростью  $\vec{\Omega}$  (рис. 1.30). Вращением рукоятки подвеса создают дополнительный вращательный момент относительно вертикальной оси и наблюдают дополнительную прецессию колеса вокруг горизонтальной оси, вследствие чего колесо поднимается. При измене-

нии направления вращения рукоятки момент силы  $\vec{M}$  будет направлен вниз, поэтому  $d\vec{L}$  будет направлен также вниз, и колесо при прецессии будет опускаться.

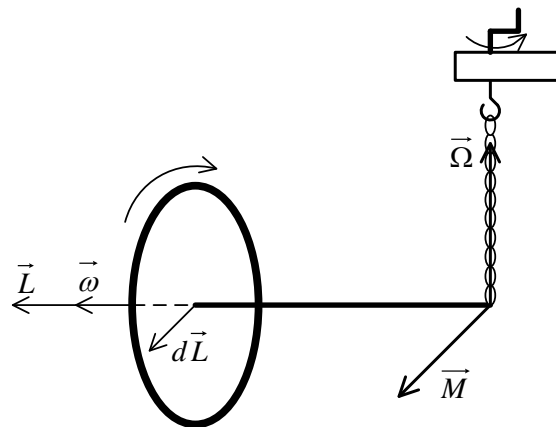


Рис. 1.30

### 1.10.4. Иллюстрация закона сохранения момента импульса на скамье Жуковского

#### Опыт № 1

**Оборудование:** скамья Жуковского, гантели или гири.

**Порядок проведения опыта.** Демонстратор, стоя на скамье Жуковского и держа гантели в раскинутых руках, получает медленное вращение (рис. 1.31, а).

Если прижать гантели к груди, то вследствие уменьшения момента инерции частота вращения увеличивается. Масса гантелей должна быть не менее 5 кг. Для иллюстрации можно рассказать о вращениях фигуристов.

**Указание.** Демонстратору,



стоящему на скамье Жуковского с гантелями, должен сообщить медленное вращение другой человек. При этом надо следить, чтобы гантели демонстратора при его вращении не ударили по голове раскручивающего человека.

**Примечание.** Вместо напольного варианта скамьи Жуковского можно использовать вариант с сидением (рис. 1.32). При этом достигается более устойчивое положение демонстратора.



а)



б)

Рис. 1.31

### Опыт № 2

**Оборудование:** скамья Жуковского, велосипедное колесо с длинной осью.

**Порядок проведения опыта.** Демонстратор, стоя в центре неподвижной скамьи Жуковского, держит велосипедное колесо над

головой так, что ось колеса,



Рис. 1.32

момент импульса системы "колесо – человек + скамья" относительно вертикальной оси равен нулю (рис 1.31, б). Если демонстратор начнет раскручивать велосипедное колесо в одном направлении, то сам начинает вращаться в противоположном направлении. Таким образом, суммарный момент импульса системы "колесо – человек + скамья" относительно вертикальной оси остается равным нулю. При остановке колеса останавливается и вращение демонстратора.

### Опыт № 3

**Оборудование:** скамья Жуковского, велосипедное колесо с длинной осью.

**Порядок проведения опыта.** Неподвижный демонстратор, стоящий на скамье Жуковского, получает раскрученное вокруг гори-

горизонтальной оси велосипедное колесо (рис. 1.33). Скамья и человек остаются в покое: в этом положении момент импульса системы "колесо – человек + скамья" относительно вертикальной оси равен нулю.



Рис. 1.33

При опускании вращающегося колеса осью вниз колесо вращается в одном направлении, а демонстратор вместе со скамьей приходит во вращение в противоположном направлении.

Если далее повернуть ось колеса на  $180^\circ$ , то человек и скамья изменят направление вращения на противоположное.

Суммарный момент импульса системы "колесо – демонстратор + скамья" относительно вертикальной оси в том и другом случаях остается равным нулю.

## Опыт № 4

**Оборудование:** скамья Жуковского, велосипедное колесо с длинной осью.

**Порядок проведения опыта.** Неподвижный демонстратор получает раскрученное вокруг вертикальной оси велосипедное колесо.

При опускании оси в горизонтальное положение демонстратор приходит во вращение, при подъеме колеса вновь – останавливается. При остановке поднятого колеса демонстратор приходит во вращение (см. рис. 1.33).

### 1.10.5. Гирскопическая монорельсовая дорога

**Оборудование:** гироскоп с вертикальной осью, двухколесная тележка, шнур или проволока.

**Порядок проведения опыта.** Гироскоп с вертикальной осью находится на двухколесной тележке (рис. 1.34). При раскручивании гироскопа тележка сохраняет равновесие на шнуре или проволоке. Тележку можно заставить двигаться вдоль шнура как по наклонной плоскости, опуская или поднимая один конец шнура.

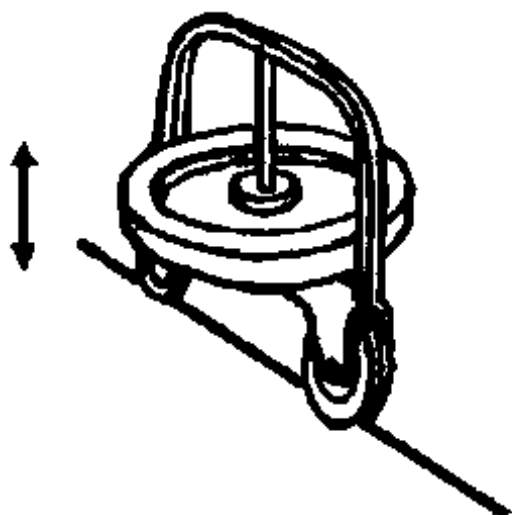


Рис. 1.34

### 1.10.6. Свободные оси вращения

#### Опыт № 1

**Оборудование:** лёгкий цилиндр с эксцентричными свинцовыми вставками, наклонная плоскость.

**Порядок проведения опыта.** Лёгкий цилиндр с двумя свинцовыми вставками скатывается с наклонной плоскости, кувыркаясь (рис. 1.35). Это движение объясняется тем, что он стремится к вращению вокруг оси  $OO$  с наибольшим моментом инерции.

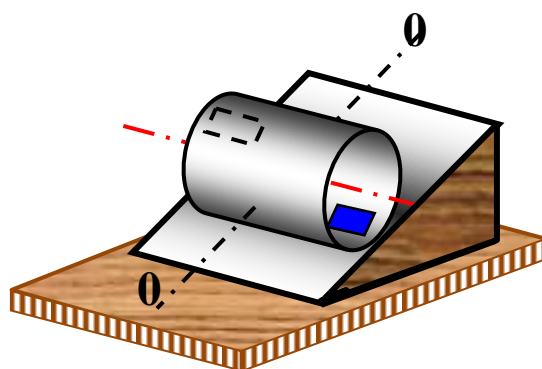
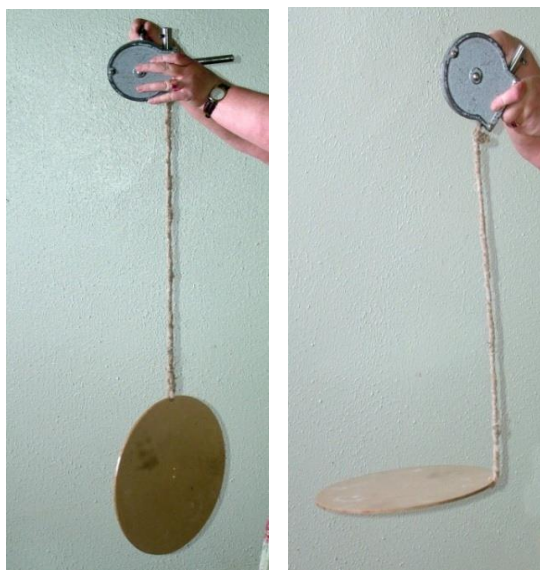


Рис. 1.35

#### Опыт № 2

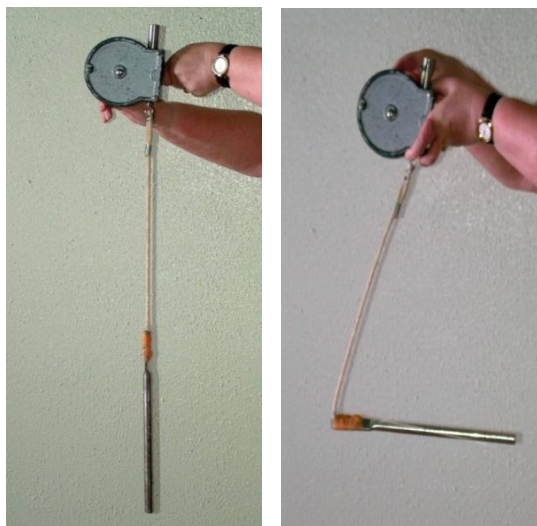
**Оборудование:** центробежная машина, штатив, диск, стержень, цепочка.

**Порядок проведения опыта.** Центробежную машину устанавливают на штативе и закрепляют на ее оси втулку с крючком. К крючку можно подвешивать на веревке различные тела: цилиндрический стержень (диаметр 4 – 5 мм, длина 30 – 35 см), диск, вырезанный из листового металла толщиной 0,75 – 1 мм (диаметр около 25 см), кольцо (диаметр около 30 см), цепочку и т.п. (рис. 1.36).



а)

б)



в)

г)

Рис. 1.36

Диск и кольцо подвешивают за край, стержень за конец. Массивной цепочке длиной около 60 см придают замкнутую форму. Во время вращения тела стремятся повернуться вокруг оси с наибольшим моментом инерции. Поэтому все они постепенно займут горизонтальное положение, вращаясь вокруг оси, проходящей через центр тяжести тела.

Когда тело занимает горизонтальное положение, веревку на которой оно висит, снимают с крючка и показывают, что в течение нескольких секунд тело продолжает вращаться, сохраняя горизонтальное положение. Цепочка при вращении принимает форму кольца.

В качестве примера из техники можно рассказать о самоцентрировании сравнительно гибких роторов больших турбин при их вращении в подшипниках или самоцентрирование центрифуг стиральных машин.

#### 1.10.7. Вращение спичечного коробка вокруг свободных осей

**Оборудование:** модель спичечного коробка (параллелепипед).

**Порядок проведения опыта.** Коробок приводится во вращение щелчком большого пальца вверх (рис. 1.37). Устойчивым оказывается вращение лишь относительно осей с экстремальным моментом инерции ( $I_{\max}$  и  $I_{\min}$ ). Опыт следует повторить несколько раз.

Можно этот опыт показать с большим коробком, склеенным из картона. Соотношение сторон выдерживается близким к соотношению сторон спичечного коробка. Коробок кладут на край стола и приводят во вращение ударом. Ударять нужно ближе к

краю. Для удобства регистрации того, вокруг какой оси вращается коробок, необходимо противоположные грани окрасить попарно в три ярких легко отличимых цвета. При попытке организовать вращение вокруг оси со средним моментом инерции вращение будет неустойчивым. Описанное явление используют спортсмены – прыгуны в воду, выполняя сложные вращения с поворотами. Это возможно при изменении максимального и минимального моментов инерции тела спортсмена путем соответствующей группировки частей тела.

конец). Опыт получается лучше при хорошо выраженной у яйца асимметрии. Так как при раскручивании яйцо может легко соскочить со стола (и при этом разбиться), опыт требует определенной тренировки. Хорошо раскручивать яйцо на стеклянной поверхности с бортиками: на блюде, мелкой большой тарелке или плоской стеклянной ванне, которая используется для демонстрации поверхностных волн. Опыт можно проводить с деревянным аналогом.

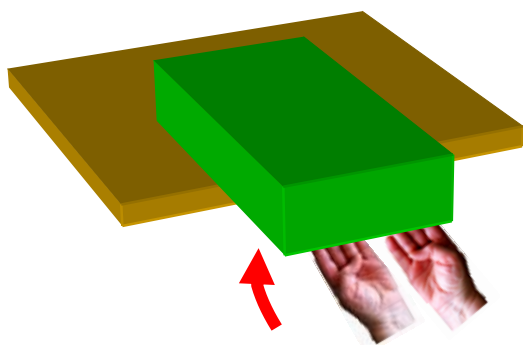


Рис. 1.37

### 1.10.8. Как поставить яйцо на острый конец

**Оборудование:** деревянная модель куриного яйца.

**Порядок проведения опыта.** Если быстро крутануть на твердой поверхности сваренное вкрутую куриное яйцо, оно при вращении встает на носок (на более острый

## 1.11. МЕХАНИКА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

### 1.11.1. Давление в потоке воды, протекающей по трубе переменного сечения

**Оборудование:** проекционный аппарат, объектив с оборотной призмой, экран, ёмкость с подкрашенной водой, прибор с тремя манометрическими трубками.

#### *Порядок проведения опыта.*

Опыт иллюстрирует вторую основную задачу гидродинамики. Прибор представляет собой пластинку из органического стекла, внутри которой просверлен горизонтальный канал, имеющий в середине сужение (рис. 1.38). К каналу на равных расстояниях друг от друга подходят три манометрические вертикальные трубки диаметром 3 мм, причём одна из них соединена с его узкой частью. Горизонтальный канал с обеих сторон оканчивается ниппелями для подачи и стока воды. Прибор укреплён на металлическом стержне и может устанавливаться в рейтере проекционного аппарата. Прибор помещают перед конденсором проекционного аппарата и объективом с оборотной призмой и получают на экране прямое изображение. К ниппелю для подачи воды

присоединяют резиновую трубочку от сосуда с водой, который закрепляют в штативе. К другому ниппелю присоединяют сливную трубку со стеклянным наконечником (или с зажимом). Медленно открывают винтовой зажим на трубке от сосуда с водой и на экране наблюдают, как при некотором установившемся потоке уровни жидкости в манометрических трубках займут определённое положение. В узкой части канала, где скорость течения наибольшая, давление меньше. Некоторое уменьшение давления в третьей трубке, расположенной у выходного ниппеля, по сравнению с первой объясняется влиянием внутреннего трения (вязкости) жидкости.

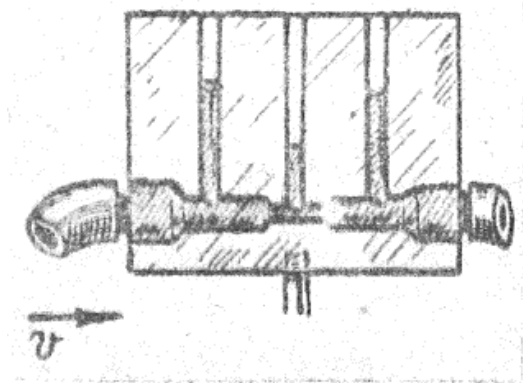


Рис. 1.38

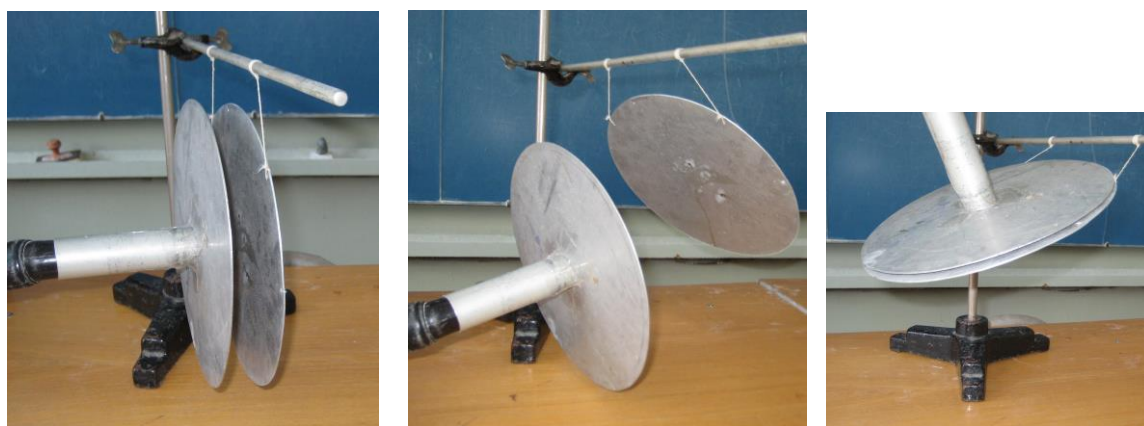
### 1.11.2. Давление в газе, движущемся с большой скоростью

**Оборудование:** два круглых диска из дюралюминия, штатив, пылесос (рис. 1.39, а).

**Порядок проведения опыта.** При приближении диска I с отверстием, из которого выходит газ, к другому диску II, подвешенному на штативе, наблюдается отталкивание висящего диска силой аэродинамического сопротивления (рис. 1.39, б). Диск II отклоняется влево. Если его придерживать рукой и приблизить диск I достаточно близко, то скорость движения воз-

духа в зазоре станет большой, давление между дисками упадет и они притянутся друг к другу (рис. 1.39, в). Теперь можно диск I повернуть по стрелке и диск II окажется висящим под диском I. Диски следует делать из дюралюминия толщиной 0,5 – 1 мм, диаметром 25 – 30 см. В качестве источника струи очень удобно использовать бытовой пылесос.

Как пример, можно рассказать о неизбежности столкновения кораблей, движущихся параллельными курсами на малом расстоянии друг от друга.



а)

б)

в)

Рис. 1.39

### 1.11.3. Шарик в струе газа

**Оборудование:** пластмассовый шарик, пылесос.

**Порядок проведения опыта.** Если поместить пластмассовый

шарик в струю воздуха, вытекающую из трубы пылесоса, то шарик будет устойчиво держаться как в вертикальной, так и в наклонной струе (рис. 1.40). Можно использовать мячик для

пинг-понга, но лучше пластмассовый ярко окрашенный шар диаметром 5 – 10 см.

Во время опыта целесообразно менять наклон струи, при этом шарик эффектно следует за струёй, оставаясь приблизительно на одной высоте.

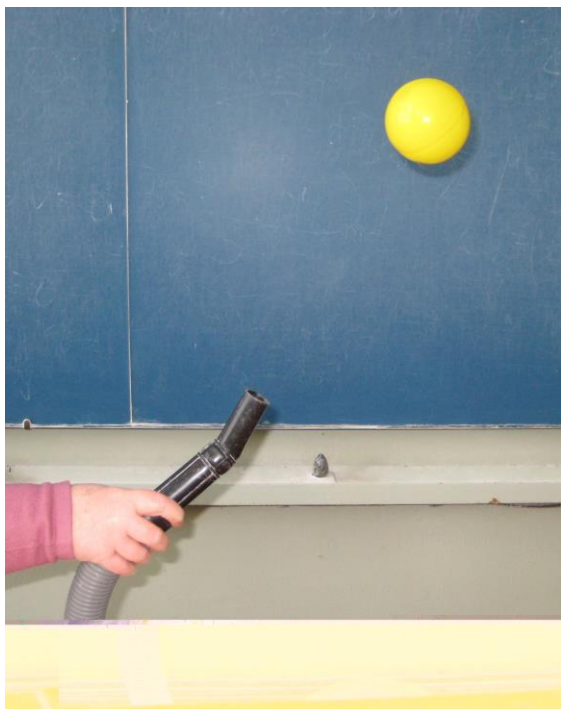


Рис. 1.40

#### 1.11.4. Прибор для демонстрации ламинарного и турбулентного движения жидкости

**Оборудование:** прозрачный цилиндр, сосуд с подкрашенной водой, проекционный аппарат, экран.

**Порядок проведения опыта.** Для демонстрации ламинарного течения жидкости и перехода его при увеличении скорости

потока в турбулентное промышленностью выпускается специальный прибор, представляющий собой толстостенный цилиндр диаметром 30 и длиной 120 мм, изготовленный из прозрачного органического стекла (рис. 1.41). Внутри цилиндра по всей его длине просверлен потоковый канал диаметром 10 мм. На концах трубы расположены входной и выходной ниппели. Цилиндр укрепляется на опорном стержне, который служит для установки прибора в рейтере проекционного фонаря. Перед проведением опыта помещают прибор у конденсора проекционного аппарата и при помощи объектива получают на экране чёткое изображение. На выходной ниппель надевают сливную трубку с краном и направляют её в кювету для стока воды. После этого постепенно открывают кран и наполняют прибор водой. При определённой небольшой скорости течения (вода из крана вытекает слабой струйкой) на экране наблюдают прямую устойчивую цветную линию тока, характерную для ламинарного течения. Затем медленно увеличивают скорость течения. При дальнейшем постепенном увеличении скорости течения воды у стенок канала возникают завихрения, линия тока разрывается,



происходит перемешивание всей жидкости (турбулентность).

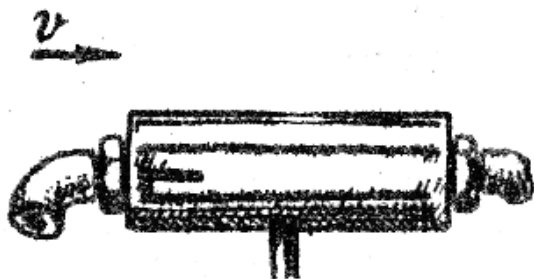


Рис. 1.41

### 1.11.5. Распределение скоростей при течении вязкой жидкости

**Оборудование:** прозрачный цилиндр с краном, проекционный аппарат, экран, глицерин.

**Порядок проведения опыта.** Распределение скоростей при течении вязкой жидкости можно видеть при вытекании глицерина или раствора сахара из широкой трубки. Верхняя часть жидкости подкрашена. Опыт наблюдается в проекции (рис 1.42).



Рис. 1.42

### 1.11.6. Кольцевые вихри в воздухе

**Оборудование:** ящик Вуда, деревянный молоток, дымовое устройство.

**Порядок проведения опыта.** Для демонстрации используется ящик размерами  $0,8 \times 0,8 \times 0,8$  м<sup>3</sup>, одна стенка которого сделана из резины толщиной 2 – 3 мм, а в центре противоположной стенки прорезано отверстие диаметром примерно 0,2 м (рис. 1.43).

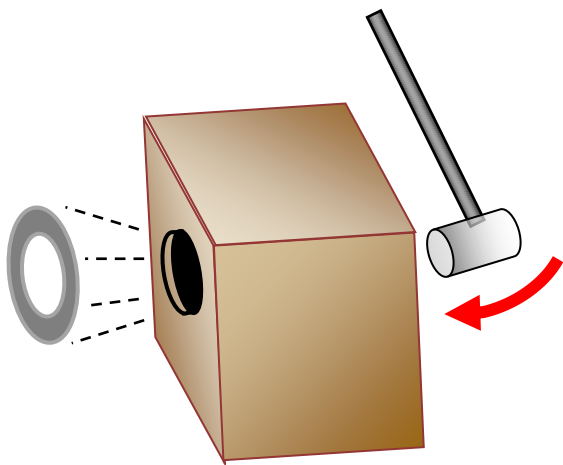


Рис. 1.43

При ударе деревянным молотком в центр резиновой стенки из отверстия вылетают кольцевые вихри. Чтобы сделать их видимыми, перед опытом ящик заполняют дымом через специальное отверстие диаметром 10 мм, закрыв основное отверстие листом бумаги на кнопке. Кольцевые вихри даже на большом расстоянии от ящика могут отклонять лист бумаги, гасить свечу и даже сбивать тетрадь со стола. Дым легко получается с помощью простейшего устройства, изображённого на рис 1.44.

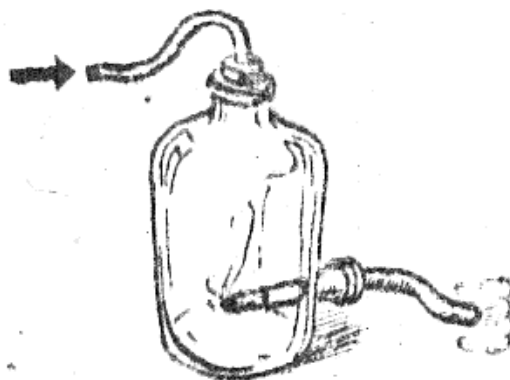


Рис. 1.44

### 1.11.7. Эффект Магнуса

**Оборудование:** цилиндр из картона, лента с рейкой.

**Порядок проведения опыта.** Возникновение силы, перпендикулярной потоку, при обтекании вращающегося цилиндра можно продемонстрировать с картонным самодельным цилиндром (рис. 1.45). Цилиндр склеивается из тонкого картона или толстой прочной бумаги. Хорошо для этой цели использовать наждачную бумагу, склеивая цилиндрическую поверхность абразивным слоем наверх. Приблизительные размеры следующие: длина цилиндра 30 – 40 см, диаметр 10 – 15 см, выступающие бортики по краям высотой 3 см. Наматывают на цилиндр матерчатую ленту шириной 3 – 4 см и длиной около 1,5 м, а цилиндр ставят на стол так, чтобы лента выходила снизу

цилиндра; конец ленты привязывается к деревянной рейке длиной 1 – 1,2 м. Приводят рейку в быстрое поступательное движение вдоль стола. Цилиндр вместе с горизонтальным движением придёт во вращение. Создаётся разность давлений, обуславливающая подъёмную силу, цилиндр поднимается вверх. Наматывая ленту так, чтобы она выходила сверху цилиндра, приводят в движение рейку в ту же сторону, расположив цилиндр недалеко от края стола. Цилиндр, достигая края стола, резко отклоняется вниз.

В качестве примера можно рассказать о поправках в прицеливании, которые надо вносить при наличии бокового ветра.

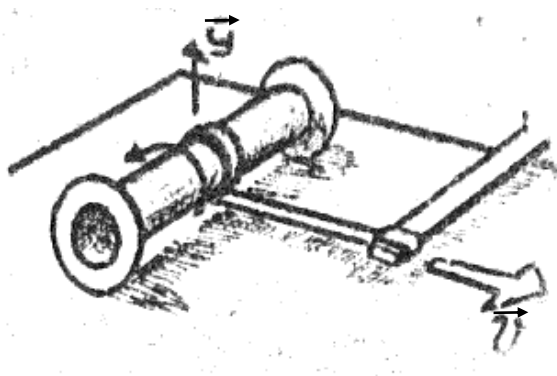


Рис. 1.45

### 1.11.8. Демонстрация теоремы Жуковского

**Оборудование:** линейка на нитке, палочка.

**Порядок проведения опыта.** К палочке на нитке через карабин привязана деревянная линейка (рис. 1.46). Если привести во вращение линейку вокруг её оси, а затем раскрутить вокруг палочки, то в зависимости от направлений вращения подъёмная сила  $y$  будет направлена вверх или вниз. Линейка в полёте жужжит как шмель, только громче. Следует разъяснить студентам взаимное расположение векторов  $v$  и  $y$ , возникающее как результат действия теоремы Жуковского при учёте направления циркуляции.

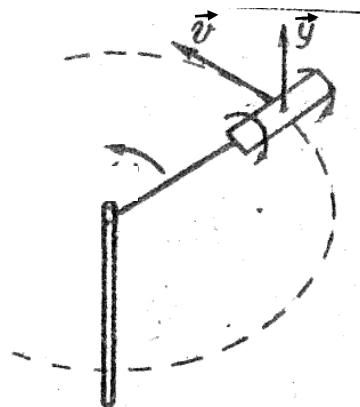


Рис. 1.46

### 1.11.9. Связь подъёмной силы с циркуляцией скорости

**Оборудование:** полоска из толстой бумаги (тонкого картона).

**Порядок проведения опыта.** Полоска из бумаги или картона размерами  $L \times 0,1 L$ , поднятая в вытянутой вверх руке так, что ось  $ab$  горизонтальна, а угол  $\alpha = 5 - 10^\circ$ , отпускается (рис. 1.47). Падая, полоска начинает вращаться, возникает подъёмная сила, и снижение происходит по наклонной пологой траектории.

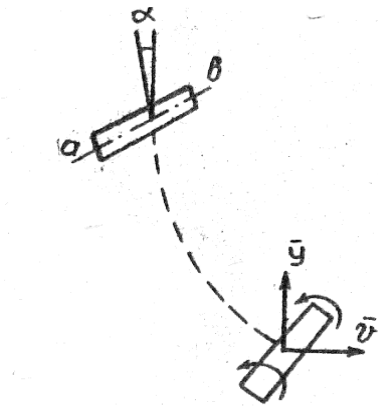


Рис. 1.47

### 1.11.10. Измерение скорости газового потока с помощью трубки Пито – Прандтля

**Оборудование:** трубка Пито – Прандтля, пылесос, указатель скорости потока (рис. 1.48).

**Порядок проведения опыта.** Струя воздуха от пылесоса направляется на входное отверстие трубки Пито – Прандтля. Внимание аудитории обращается на отклонение стрелки указателя скорости. Объясняется принцип работы трубки Пито – Прандтля с привлечением понятий полного и статического давлений. Приводится пример использования трубки в авиации для измерения скорости самолёта.



Рис. 1. 48

---

## Выводы

1. Лекционные демонстрации наглядно представляют физические явления основных разделов механики: кинематики, динамики, законов сохранения.

2. В опытах подчеркивается векторный характер важнейших физических величин (скорость, момент импульса и т.д.) и основных законов механики (например, 2-й закон Ньютона, закон сохранения момента импульса).

3. В лекционных демонстрациях этого раздела физики детально анализируются свойства новых понятий (например, момент инерции, момент импульса) и особенностей сложных механических процессов (например, движение тела переменной массы, прецессия оси гироскопа).

4. Ряд лекционных демонстраций дополняется аналитическими выкладками, позволяющими глубже проникнуть в суть поставленного опыта.

Таким образом, представленные лекционные демонстрации позволяют студентам, с одной стороны, охватить материал в целом сложного раздела физики – механика, а с другой – глубже усвоить физический смысл понятий механики и детально рас-

смотреть разнообразные механические процессы.

## Контрольные вопросы

1. Выделите (перечислите) лекционные демонстрации, в которых наглядно проявляется векторный характер соответствующих физических величин и векторный характер соответствующего закона механики.

2. Какие законы сохранения вы наблюдали в опыте № 1.6.1 при абсолютно-упругом соударении шаров?

3. Укажите возможные (в зависимости от направления вращения) направления момента импульса колеса на рис. 1.33.

4. Какие оси вращения являются свободными осями вращения (опыт № 1.10.7).

## *Библиографические ссылки*

1. Иродов, И. Е. Механика. Основные законы / И. Е. Иродов. – 5-е изд., испр. – М. : Лаборатория базовых знаний, 2000. – 320 с. – ISBN 5-93208-032-9.

2. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 1. Механика / И. В. Савельев. – М. : АСТ : Астрель, 2005. – 336 с. – ISBN 5-17-002963-2.

3. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. В 5 т. Т. 1. Механика / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1979. – 519 с.

4. Хайкин, С. Э. Физические основы механики / С. Э. Хайкин. – 2-е изд., доп. – М. : Наука, 1971. – 751 с.

5. Демонстрационное и техническое обеспечение лекций по физике. Механика и молекулярная физика : метод. указания / Владим. политехн. ин-т ; сост. В. Н. Кунин. – Владимир, 1980. – 56 с.

6. Демонстрационное и техническое обеспечение лекций по физике. Электричество и оптика : метод. указания / Владим. политехн. ин-т ; сост. В. Н. Кунин. – Владимир, 1980. – 40 с.

7. Лекционные демонстрации по физике / под ред. В. И. Иверновой. – 2-е изд. перераб. – М. : Наука, 1972. – 640 с.

8. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика : учеб. пособие для вузов. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 5-е изд., испр. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 736 с. – ISBN 5-9221-0121-8 (Т. VI).

**РАЗДЕЛ II**

**МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА**

## 2.1. ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ

### 2.1.1. Модель идеального газа

**Оборудование:** прибор для демонстрации хаотического движения молекул, ЛАТР, проекционный фонарь, экран.

**Порядок проведения опыта.** Прибор позволяет имитировать хаотичное движение молекул газа и зависимость скорости молекул от температуры, броуновское движение, давление молекул газа на стенки сосуда. Демонстрационный прибор (рис. 2.1) устроен следующим образом. Горизонтальная квадратная катушка имеет 300 – 320 витков медного провода диаметром 1 мм. Площадь свободного пространства внутри рамки 150 мм. Рамка помещена между двумя прозрачными стеклами. Внутренние стенки прибора изготовлены из стекла. Внутри рамки помещены мелкие кусочки дробленого ферритового магнита (рис. 2.1). Питание рамки – от автотрансформатора (ЛАТР) переменным напряжением 30 – 50 В.

Рис. 2.1

Постоянные магниты, ориентированные хаотично, при взаимодействии с переменным магнитным полем движутся по случайным траекториям. Скорость движения зависит от напряжения. Прибор помещается на проекционный фонарь, и внутренняя часть рамки проектируется на экран.

### 2.1.2. Движение молекул

**Оборудование:** прибор для демонстрации хаотического движения молекул, ЛАТР, экран, проекционный фонарь.

**Порядок проведения опыта.** Прибор (см. рис. 2.1) подключают к источнику переменного тока, и при напряжении 40 В на экране отчетливо видно хаотичное движение частиц ферромагнитного вещества в объеме прибора.



### 2.1.3. Давление газа на стенку

**Оборудование:** прибор для демонстрации хаотического движения молекул, ЛАТР, проекционный фонарь, экран.

**Порядок проведения опыта.** Внутри рамки прибора (см. рис. 2.1) помещают легкую перегородку так, чтобы она делила весь объем на две части и все магнитные частицы были сосредоточены в одной части объема. При включении тока под ударами ферромагнитных хаотично движущихся частиц перегородка начинает двигаться. Скорость движения перегородки тем больше, чем больше скорость частиц, т.е. чем выше подводимое напряжение.

### 2.1.4. Броуновское движение

**Оборудование:** механическая модель броуновского движения, проекционный фонарь, экран.

**Порядок проведения опыта.** Внутри рамки (рис. 2.2) помещен кусок пробки диаметром 1 – 1,5 и высотой 1 см. Случайные удары магнитных частиц о пробку со всех сторон заставляют ее двигаться хаотично. Прибор устанавливают на проекционном аппарате, подготовленном для горизонтального проецирования. Над прибором закрепляют объектив с плоским зеркалом. Проецируют прибор, добиваясь резкости изображения стальных шариков или резиновой пробки.



Рис. 2.2

Затем вращают ручку ударного механизма. На экране видно, как под влиянием быстрого хаотического движения шариков, имитирующих движение молекул, совершается беспорядочное движение пробки.

### 2.1.5. Зависимость давления газа от объема

**Оборудование:** стеклянные баллоны, резиновые трубки с краниками, насос, водяной манометр.

**Порядок проведения опыта.** Берется ряд стеклянных одинаковых баллонов, соединенных друг с другом резиновыми трубками с краниками (рис. 2.3). Насосом создается некоторое избыточное давление в первом баллоне. При присоединении к нему второго баллона избыточное давление уменьшается в два раза, при присоединении третьего – в 3 раза и т.д. Давление измеряется водяным манометром.

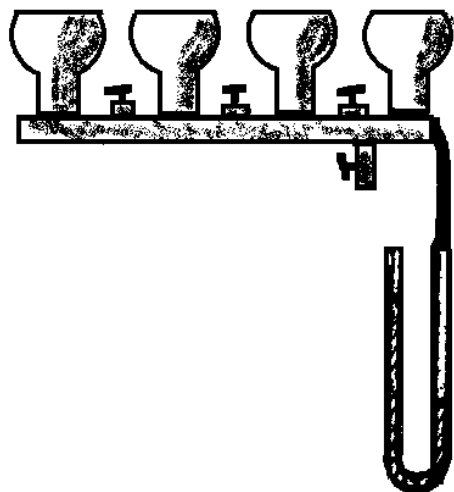


Рис. 2.3

### 2.1.6. Модель трёхмерного фазового пространства

**Оборудование:** модель PVT-пространства.

**Порядок проведения опыта.** Уравнение Клайперона – Менделеева можно наглядно представить поверхностями в 3-мерном фазовом пространстве PVT (рис. 2.4).

Состояние газа характеризуется тремя координатами изображающей точки, находящейся на этой поверхности. Любое изменение состояния газа однозначно описывается переходом изображающей точки из одного положения на поверхности в другое. Кинетика изменения состояния характеризуется траекторией этой точки на фазовой поверхности, сечения которой плоскостями, параллельными плоскости  $POT$ , образуют семейство изохорических прямых, сечения, параллельные плоскости  $VOT$ , – семейство изобарических прямых и сечения, параллельные плоскости  $POV$ , – семейство изотермических гипербол.



Рис. 2.4

Модель можно изготовить из пенопласта. С этой целью берут куб из пенопласта соответствующих размеров. Раскаленной натянутой проволокой, проходящей через начало координат и касающейся шаблона, вырезают модель. Координатные плоскости следует сделать из органического стекла. Если куб изготавливается из листов пенопласта, то его можно не склеивать, что позволит демонстрировать плоские сечения фазовой поверхности. Модель дает возможность наглядно ввести понятие трехмерного фазового пространства и, безусловно, оправдывает не очень большие затраты времени и средств на ее изготовление.

### 2.1.7. Модели молекул идеального газа

**Оборудование:** модели молекул.

**Порядок проведения опыта.** Модели молекул изготавливаются из шаров для электроскопов, соединенных металлическими стержнями, изображающими межатомные связи (рис. 2.5). Размер стержней около 0,5 м. Демонстрируется число степеней свободы. Иллюстрируются: один шар – 3 поступательные степени свободы; пространственная модель – 3 поступательные и 3 вращательные степени свободы. Если предложить студентам заменить мысленно жесткий стержень пружиной, то можно говорить еще и о колебательных степенях свободы. Следует рассказать о конфигурациях реальных молекул, например кислорода.

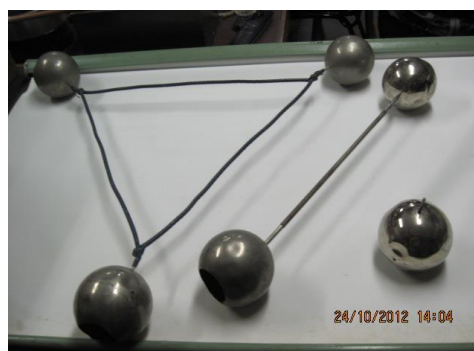


Рис. 2.5

### 2.1.8. Получение статистического среднего значения

**Оборудование:** деревянная рейка длиной 1 м, бумажные карточки.

**Порядок проведения опыта.** Берут деревянную рейку длиной 1 м, показывают студентам, затем

отламывают небольшой кусок (приблизительно 30 см), и кусок побольше показывают студентам. Студентам раздают карточки, на которых они пишут определенное значение длины большей части рейки. После сбора всех карточек измеряется точная длина большей части рейки и находится среднее значение из написанных длин.

Оба значения сравниваются и определяется погрешность.

## 2.2. ТЕРМОДИНАМИКА

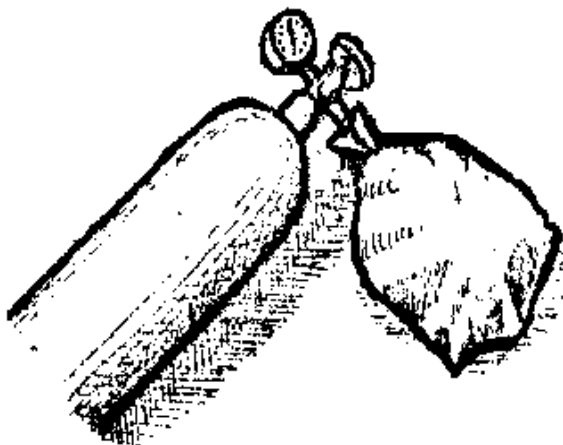
### 2.2.1. Получение «сухого льда»

Рис. 2.6

**Оборудование:** баллон с жидкой углекислотой, мешочек из плотной материи.

**Порядок проведения опыта.** На отверстие вентиля баллона надевают небольшой мешок из плотной материи (рис. 2.6), прочно привязывают его и открывают вентиль.

Выходящая сильной струей углекислота охлаждается вследствие испарения и адиабатического расширения. Углекислота конденсируется из газа в твердое состояние. В результате в мешке скапливается твердая углекислота в виде снега. Этот «снег» высыпают из мешка в какой-нибудь сосуд и показывают студентам. Во время опыта в баллоне возникают электрические заряды, и при касании его демонстратор может получить электрический удар. Поэтому баллон должен быть заземлен.



### 2.2.2. Охлаждение газа при адиабатическом расширении

**Оборудование:** прочная бутылка, небольшое количество спирта, насос электровакуумный (рис. 2.7).

**Порядок проведения опыта.** Толстостенная бутылка с небольшим количеством спирта закрывается не очень прочно пробкой. При накачивании воздуха пробка вылетает. В бутылке при этом образуется густой туман.



Рис. 2.7

### 2.2.3. Воздушное огниво

**Оборудование:** воздушное огниво, серный эфир, вата.

**Порядок проведения опыта.** Используется выпускаемый промышленностью прибор, представляющий собой прозрачный толстостенный цилиндр с порш-

нем, укрепленным на длинном штоке (рис. 2.8).

На дно цилиндра опускают небольшой кусочек ваты, слегка смоченный серным эфиром, и закрывают цилиндр поршнем. Затем устанавливают прибор на стол (см. рис. 2.8), и резким ударом ладони на головку штока вдвигают 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.



Рис. 2.8

**Указание.** При повторении опыта необходимо «проветрить» полость цилиндра.

#### 2.2.4. Определение изменения энтропии

**Оборудование:** устройство для определения изменения энтропии ФПТ 1-11.

**Порядок проведения опыта.** Представляется принцип действия электронной установки (рис. 2.9), позволяющей: 1) построить диаграмму плавкости метал-лического образца (сплав олова) в диапазоне температур 20 – 300 °С; 2) определить температуру плавления образца; 3) определить величину изменения энтропии сплава олова; 4) провести проверку справедливости закона «охлаждения» Ньютона при остывании сплава олова. Демонстрируют характер изменения температуры образца со временем при нагревании по показаниям приборов устройства. Объяснения связывают с идеальной диаграммой плавкости.



Рис. 2.9

### 2.2.5. Определение показателя адиабаты воздуха методом Клемана – Дезорма

**Оборудование:** установка для определения показателя адиабаты воздуха методом Клемана – Дезорма ФПТ 1-6.

**Порядок проведения опыта.** Представляется установка (рис. 2.10), реализующая особенности изопроцессов в воздухе для определения важнейшей характеристики многоатомного газа – показателя адиабаты. Демонстрируют величину перепада давления в манометре в различных процессах. Элементы прибора (микрокомпрессор, колба, электропневмоклапан, манометр) представляют самостоятельный интерес и объясняют их назначение и принцип действия. Указывают на проявления релаксационного процесса во время измерения перепадов давления. Оценивают время релаксации на данной установке.

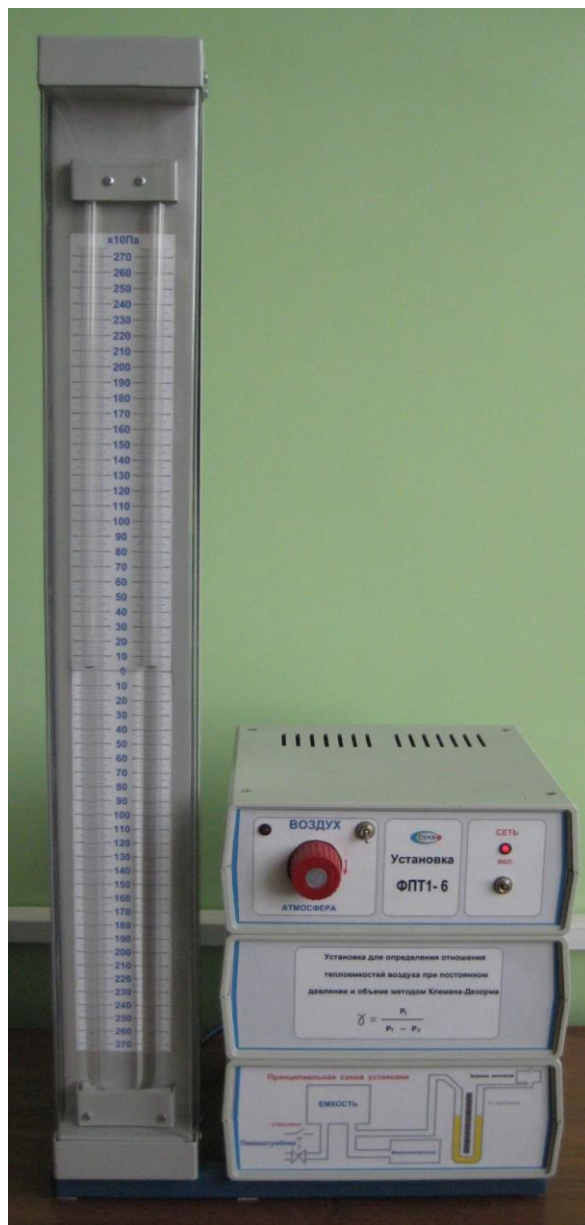


Рис. 2.10

## 2.3. ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА

### 2.3.1. Диффузия газов

**Оборудование:** стеклянный аквариум, пластинка из оргстекла, вата, промокательная бумага, нашатырный спирт, фенолфталеин.

**Порядок проведения опыта.** На пластинку из органического стекла кладут промокательную бумагу белого цвета, смоченную раствором фенолфталеина, и помещают ее в плоскую кювету (рис. 2.11). Сверху вешают кусочек ваты, смоченной в нашатырном спирте. Аммиак диффундирует вниз, и бумага постепенно окрашивается в красный цвет.



Рис. 2.11

Обратить внимание студентов на скорость распространения красного цвета вниз.

**Указание.** Для исключения конвекции газа (воздух и аммиак) в аквариуме его следует закрыть крышкой. Закрываем аквариум крышкой с прорезью (шириной около 1 см). Сверху на прорезь кладут тряпочку, смоченную в нашатырном спирте.

### 2.3.2. Диффузия газов через пористую стенку

**Оборудование:** пористый стакан для демонстрации диффузии газов, манометр демонстрационный с резиновой трубкой, прибор для получения водорода и углекислого газа, стакан химический.

**Порядок проведения опыта.** Пористый цилиндр соединяют резиновой трубкой с демонстрационным манометром (рис. 2.12) и приводят уровни воды в нем в первоначальное положение. Цилиндр поворачивают доньшком вверх и накрывают небольшим химическим стаканом. В стакан вводят водород из аппарата Киппа и наблюдают за изменением уровней воды в манометре. 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 манометр. Разность уровней быстро достигает максимального значения. Снимают стакан с пористого цилиндра и наблюдают обратное явление. Давление в манометре доходит сначала до нормального, а затем уменьшается. Падение давления объясняется тем, что теперь молекулы водорода, находящиеся внутри цилиндра, выходят из него быстрее, чем туда проникают другие компоненты газов, входящих в состав атмосферы.

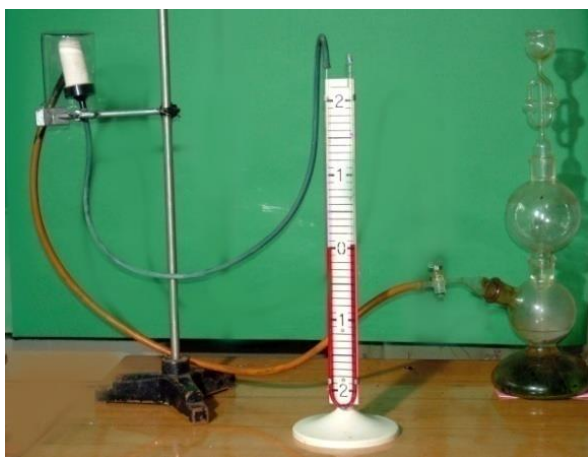


Рис. 2.12

### 2.3.3. Теплопроводность газов

**Оборудование:** прибор для демонстрации теплопроводности газов, аппарат Киппа, регулятор напряжения.

**Порядок проведения опыта.** Для сравнения теплопроводности различных газов служит прибор, показанный на рис. 2.13.

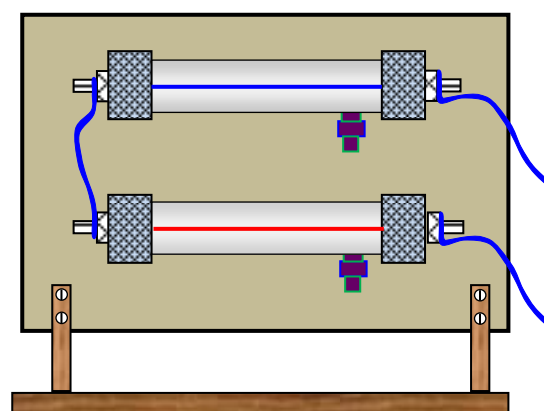


Рис. 2.13

Две стеклянные трубки диаметром около 7 см имеют с обоих концов крышки, герметически закрывающие их с помощью мendeлеевской замазки. Вдоль оси трубок проходят нихромовые проволоки толщиной около 0,4 мм, соединенные последовательно между собой. Концы проволок прикреплены к крышкам посредством стальных пружин, держащих их в натянутом состоянии. Через клеммы, укрепленные на крышках трубок, подается напряжение 40 – 50 В от ЛАТРа. Когда в трубках находится воз-

дух, обе проволоки накаливаются одинаково. Затем ток выключается, и в верхнюю трубку через верхнее ответвление длительно пропускают водород, который вытесняет воздух через нижнее ответвление. После этого ответвления закрывают. Когда по проволокам снова пропускают ток, то накаливается только проволока в нижней трубке, а в верхней проволока остается темной вследствие большой теплопроводности водорода. Это объясняется малой массой молекул водорода и как следствие большой скоростью теплового движения. По условиям техники безопасности прибор следует экранировать от аудитории листом из органического стекла.

После демонстрации уместно рассказать о водородном охлаждении больших электромашин.

#### **2.3.4. Теплопроводность бумаги**

**Оборудование:** коробочка из плотной пергаментной бумаги, спиртовка.

**Порядок проведения опыта.** Склейте коробочку из пергаментной бумаги и налейте в нее воды. Установите коробочку с водой на металлической сетке над спиртовкой. Вода закипает, но бумага

несколько не пострадает от огня. Причина в том, что вода может быть нагрета в открытом сосуде только до температуры кипения 100 °С, поэтому нагреваемая вода, обладающая к тому же большой теплоемкостью, поглощая избыток теплоты бумаги, не дает ей нагреться заметно выше 100 °С, т.е. настолько, чтобы она могла воспламениться. Бумага не загорается, даже если пламя лизет ее. Теплопроводность воды в семь раз выше теплопроводности бумаги, а теплоемкость – в четыре раза выше.

#### **2.3.5. Теплопроводность воды и стекла**

**Оборудование:** пробирка, кусочки льда, спиртовка.

**Порядок проведения опыта.** Берут пробирку, наполняют водой, на дно погружают кусочки льда. Чтобы лед не всплыл, прижимают грузиком; при этом вода должна иметь свободный доступ ко льду. Приближают пробирку к спиртовке так, чтобы пламя лизало лишь верхнюю часть пробирки. Вскоре вода начинает кипеть, но лед не тает. Расширяясь от тепла, вода становится легче и не опускается на дно, а остается в верхней части пробирки. Перемешивание слоев

воды будет происходить лишь в верхней части пробирки, не захватывая нижних слоев. Нагревание может передаваться вниз лишь путем теплопроводности, но теплопроводность воды и стекла чрезвычайно мала.

### 2.3.6. Теплопроводность металла и стекла

**Оборудование:** металлический стержень, бумажная полоска, спиртовка.

**Порядок проведения опыта.** Толстый гвоздь или железный стержень (еще лучше медный) обмотать плотно узкой бумажной полоской наподобие винта. Аналогичную обмотку навить на стеклянную палочку. Внести металлическую и стеклянную палочки в пламя спиртовки. Пламя закоптит бумагу на железной палочке, но не сожжет, пока прут не раскалится. На стеклянной палочке бумага сгорает практически мгновенно. Разгадка опыта в хорошей теплопроводности металла и плохой теплопроводности стекла.

### 2.3.7. Внутреннее трение в газе

#### Опыт № 1

**Оборудование:** электромотор с картонным диском, диск картонный на нитяном подвесе, штатив универсальный.

**Порядок проведения опыта.** Демонстрацию внутреннего трения в воздухе показывают с легким картонным диском, подвешенным на нити (рис. 2.14). Под диском устанавливают электромоторчик с таким же диском на расстоянии 1,5 – 2 см. Приводят нижний диск во вращение и наблюдают, как благодаря наличию сил внутреннего трения в слоях воздуха, находящегося между дисками, верхний диск поворачивается, закручивая нить подвеса. Для удобства наблюдения за поворотом диска на него приклеивают флажок. Силы внутреннего трения пропорциональны градиенту скоростей. Градиент скорости можно менять, регулируя ЛАТРОм частоту вращения электромотора или изменяя расстояние между дисками.

## Опыт № 2

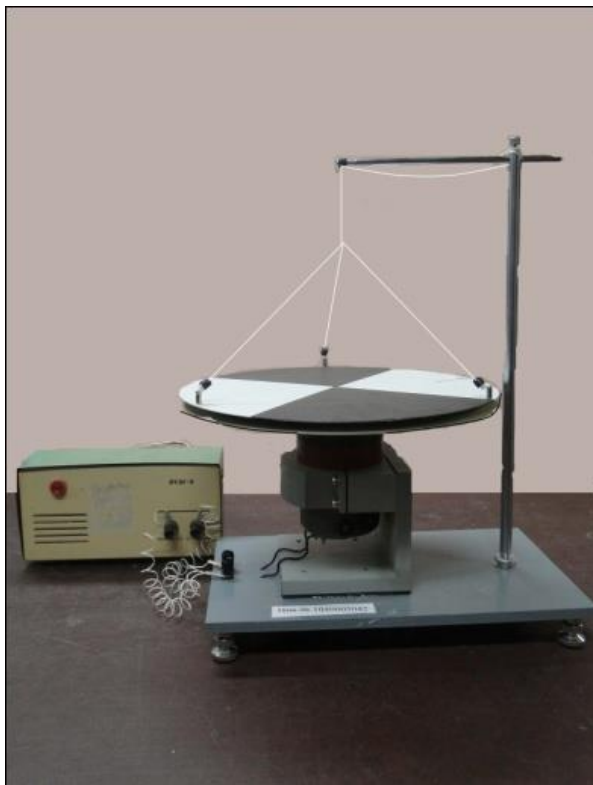


Рис. 2.14

**Оборудование:** устройство для определения коэффициента вязкости воздуха ФПТ 1-1 (рис. 2.15).

**Порядок проведения опыта.** Представляется принцип действия капиллярного вискозиметра. Демонстрируют перепад давления на границах капилляра при вязком течении воздуха. Элементы прибора (микрокомпрессор, реометр, манометр, отборные камеры, металлический капилляр) представляют самостоятельный интерес и объясняют их назначение и принцип действия. Указывают, что данная установка позволяет определить, помимо коэффициента вязкости воздуха, другие параметры, например длину свободного пробега.



Рис. 2.15

## 2.4. ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

### 2.4.1. Кристаллизация переохлажденной жидкости

**Оборудование:** проекционный фонарь, гипосульфит, стеклянная трубка, колба, баня комбинированная.

**Порядок проведения опыта.** Берут колбу вместимостью около 200 см<sup>3</sup> и наполняют кристаллами

гипосульфита приблизительно до горлышка. Затем кристаллы расплавляют, нагревая колбу в горячей воде, и закупоривают колбу пробкой, сквозь которую продета стеклянная трубка с внутренним диаметром 5 – 7 мм. Нижний конец трубки оттянут так, чтобы диаметр отверстия был около 1 мм. Этот конец должен находиться-

ся в центре шарообразной части колбы или немного выше. После этого колбу наклоняют в разные стороны, чтобы горячий гипосульфит расплавился. Верхний конец трубки затыкают ватой, чтобы внутрь не попадала пыль или же верхнюю часть колбы с трубкой накрывают бумажным колпаком. Далее колбу охлаждают в проточной воде до комнатной температуры. Для демонстрации колбу помещают перед конденсором проекционного фонаря и получают на экране резкое изображение оттянутого конца трубки. Сверху в трубку бросают кристаллик гипосульфита, который застревает у оттянутого конца и вызывает кристаллизацию внутри трубки; когда кристаллизация дойдет до нижнего конца трубки, то от него начинают расти внутри колбы крупные красивые кристаллы.

#### **2.4.2. Рост кристаллов гипосульфита в поляризованном свете**

**Оборудование:** проекционный фонарь, гипосульфит, два поляроида, две стеклянные пластины.

**Порядок проведения опыта.** Многие вещества, будучи расплавлены, легко переохлаждаются. В пробирку насыпают кри-

сталлы гипосульфита. Затем кристаллы расплавляют, нагревая пробирку в горячей воде (время нагрева и плавления порядка 30 мин). Плавить гипосульфит следует осторожно, чтобы не дать жидкости закипеть, иначе вещество разлагается. Температура плавления гипосульфита 48,2 °С. Несколько капель полученного таким образом препарата в горячем виде помещают между двумя стеклянными пластинами, которые сильно прижимают между стеклами. Проецируют на экран эти пластинки в поляризованном свете. При скрещенных поляризаторе и анализаторе жидкость представляется темной. Касаются кристалликом гипосульфита края стекла, и с этого места начинают расти окрашенные кристаллы гипосульфита. Стекла перед опытом должны быть вымыты с мылом и протёрты спиртом.

#### **2.4.3. Силы поверхностного натяжения**

**Оборудование:** проволочное кольцо с ниткой или волосом, штатив, проекционный фонарь, мыльный раствор.

**Порядок проведения опыта.** Подвешивают на штативе проволочное кольцо с ниткой. Проецируют это кольцо на экран. Затем

подносят снизу химический стакан с мыльным раствором так, чтобы все кольцо погрузилось в раствор. На поверхности кольца получают сплошную мыльную пленку. Прокалывают пленку внутри нитяной петельки, тогда образуется правильная окружность. Эти опыты убеждают в

наличии поверхностного натяжения. Пленка во всех случаях принимает возможно минимальную площадь поверхности и силы поверхностного натяжения всегда направлены перпендикулярно к любому элементу контура, ограничивающего пленку.

## 2.5. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ

### 2.5.1. Критическое состояние эфира

**Оборудование:** проекционный аппарат, прибор для демонстрации критического состояния эфира (рис. 2.16).

**Порядок проведения опыта.** Закрепляют прибор в универсальном штативе и располагают между конденсором и объективом проекционного аппарата. Проецируют ампулы на экран, чтобы отчетливо был виден мениск эфира, зажигают газовую горелку. По мере нагревания прибора становится заметным небольшой подъем мениска, некоторое расширение газообразного состояния в верхней части ампулы над эфиром и значительное "просветление" нижней части ампулы, занятой эфиром (плотность

паров увеличивается, а плотность жидкости уменьшается). Уменьшается поверхностное натяжение эфира, и заметно выравнивается кривизна мениска. Далее мениск поднимается приблизительно до половины ампулы, становится расплывчатым. При критической температуре и выше вся ампула оказывается заполненной однородным веществом. После этого прекращают нагревание и наблюдают на экране обратный процесс. Дают возможность прибору постепенно охладиться и обращают внимание на то, как в ампуле появляются и становятся хорошо заметными многочисленные, вихреобразные образования. В это время температура близка к критической, а при критической температуре эфир становится пересыщенным паром и, как только

в нем возникнут центры конденсации, вся ампула внезапно заполняется туманом. Затем она быстро оказывается опять прозрачной и на экране появляется образовавшаяся жидкость с резко выраженным мениском, разделяющим газообразную и жидкую фазы.

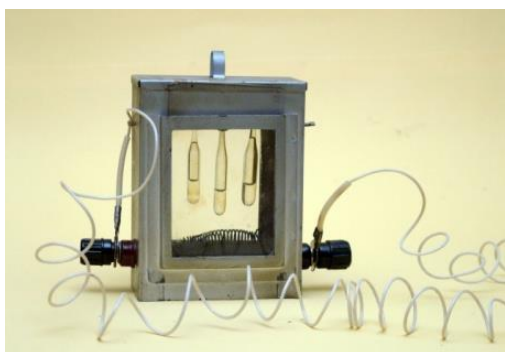


Рис. 2.16

### 2.5.2. Опыты с жидким кислородом.

**Кислород как реальная жидкость**

**Оборудование:** жидкий кислород в сосуде Дьюара (рис. 2.17), кварцевый стакан, пылесос.



Рис. 2.17

**Порядок проведения опыта.** Кислород представляет собой голубую жидкость. Для демонстрации цвета кислорода его следует налить в кварцевый или тонкостенный стеклянный стакан. Наблюдение цвета затруднено сильным образованием тумана. Этот туман можно легко сдувать струей пылесоса. Удельный вес кислорода больше, чем у воды. Налитый в плоскую кювету с водой жидкий кислород образует большие капли, которые тонут в воде. При испарении этих капель образуются пары, что приводит к непрерывному движению капель вверх и вниз. При этой демонстрации также необходимо сдувать пылесосом туман. В результате поверхностного натяжения жидкий кислород, налитый непосредственно на поверхность стола, образует круглые капли, которые интенсивно движутся на газовой подушке, возникающей при испарении капель в точке контакта со столом.

### 2.5.3. Механические свойства веществ при низких температурах

#### Опыт № 1

**Оборудование:** жидкий кислород в сосуде Дьюара, свинцовый



колокольчик, резиновая трубка, резиновый мячик.

**Порядок проведения опыта.** Свинцовый колокольчик, замороженный в кислороде, начинает звенеть вследствие повышения у свинца упругости (модуля Юнга).

Охлажденная в кислороде резиновая трубка становится жесткой и хрупкой. Замороженной трубкой можно постучать по столу, а затем разбить ее ударом молотка.

Резиновый мячик хорошо отскакивает от стены (показать). Замороженный мячик разбивается о стену. Хлопок возникает потому, что при замораживании мячика давление воздуха в нем понижается приблизительно в три раза.

## Опыт № 2

**Оборудование:** жидкий кислород в сосуде Дьюара, кварцевый стакан, деревянная лучинка, стальная и медная проволоки, деревянный кубик.

**Порядок проведения опыта.** Тлеющая лучинка, опущенная в пары кислоро-

да, ярко вспыхивает. Горение стали. Взять стальную проволоку диаметром 0,5 мм. На конец проволоки насаживается небольшой деревянный кубик, который поджигается. При опускании этого конца проволоки в пары кислоро-

да сначала ярко горит дерево, а затем вспыхивает проволока. Горят только те металлы, у которых температура вспышки ниже температуры плавления. Медь и латунь в кислороде не горят. Поэтому баллоны для хранения кислорода выполняются из медных сплавов. Медным сделан и сосуд Дьюара. Следует продемонстрировать студентам, что горят лишь те металлы, температура которых выше температуры их плавления. Хлопчатобумажная вата, пролитая кислородом, при поднесении длинной тлеющей лучины взрывается. Взрывать вату удобнее спиралькой, нагретой электрическим током.

## Выводы

1. Лекционные демонстрации дают представление о широком круге моделей, процессов, закономерностей молекулярной физики и термодинамики. Это модель идеального газа, модель реального газа, модель жидкого и твердого состояний вещества, молекулярно-кинетическая теория идеального газа, законы термодинамики, неравновесные процессы (явления переноса), характеристики фазовых переходов 1-го рода, свойства веществ при температурах жидкого кислорода и ряд других вопросов.

2. Размеры и элементы демон-

страционных установок таковы, что позволяют проводить опыты наглядно и ясно в поточной лекционной аудитории.

3. Рассмотренные лекционные демонстрации отражают особенность учебного материала: сочетания аналитической формы физического процесса с использованием закономерностей в технике и их проявлением в бытовых условиях.

Включение данных лекционных демонстраций в учебный процесс позволяет глубже проникнуть в суть физических явлений, убедиться в многогранности и неразрывности теоретического и экспериментального описаний явлений природы в области физики.

### **Контрольные вопросы**

1. Перечислите основные элементы моделей идеального газа, реального газа, жидкости, кристаллического состояния, представленных в лекционных демонстрациях.

2. Какие элементы модели идеального газа обосновывает форма броуновского движения (см. опыт № 2.1.4)?

3. Почему в приборе для демонстрации критического состояния эфира (см. рис. 2.14) используются несколько ампул с эфиром?

4. Почему для демонстрации роста кристаллов гипосульфита

используется поляризованный свет?

### **Библиографические ссылки**

1. Иродов, И. Е. Физика микросистем. Основные законы : учеб. пособие для вузов / И. Е. Иродов. – М. : Лаборатория базовых знаний, 2001. – 200 с. – ISBN 5-93208-088-1.

2. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 3. Молекулярная физика и термодинамика / И. В. Савельев. – М. : АСТ : Астрель, 2005. – 208 с. – ISBN 5-17-004585-9.

3. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. В 5 т. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика / Д. В. Сивухин. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 1990. – 544 с. – ISBN 5-9221-0601-5.

4. Телеснин, Р. В. Молекулярная физика / Р. В. Телеснин. – 2-е изд., доп. – М. : Высш. шк., 1973. – 360 с.

5. Демонстрационное и техническое обеспечение лекций по физике. Механика и молекулярная физика : метод. указания / Владим. политехн. ин-т ; сост. В. Н. Кунин. – Владимир, 1980. – 56 с.

6. Лекционные демонстрации по физике / под ред. В. И. Ивероной. – 2-е изд., перераб. – М. : Наука, 1972. – 640 с.

## **РАЗДЕЛ III**

# **ЭЛЕКТРИЧЕСТВО**

### 3.1. Наблюдение электрических сил

#### Опыт № 1

##### Эксперимент 1

**Оборудование:** металлическая метровая линейка (стальная полоса или уголок), плосковыпуклая линза, эбонитовая палочка.

**Порядок проведения опыта.** Металлическую метровую линейку кладут серединой на выпуклую поверхность плосковыпуклой линзы, расположенной на столике выпуклой стороной вверх. Опираясь в точке соприкосновения, линейка с очень малым трением может вращаться вокруг оси линзы. Если поднести к концу линейки по касательной заряженную эбонитовую палочку, то линейка приходит во вращение в результате притяжения разноименных зарядов на палочке и в линейке, возникших в результате поляризации. Перемещая палочку перед линейкой, можно раскрутить ее.

##### Эксперимент 2

**Оборудование:** кусочки бумаги, эбонитовая палочка, деревянная линейка, линза.

##### *Порядок проведения опыта.*

На демонстрационный стол насыпают мелкие кусочки бумаги. Подносят наэлектризованную эбонитовую палочку и наблюдают прилипание кусочков бумаги к ней. Если поднести к деревянной линейке, положенной на линзу, заряженную палочку, то линейка притягивается к палочке. Если не допускать касания палочкой линейки, сохраняя между ними малое расстояние, и перемещать палочку, то наблюдается вращение линейки.

Такой опыт можно проделывать с различными телами (стальная полоса или уголок, стеклянная пластина, пластмассовая полоса).

#### Опыт № 2

**Оборудование:** стеклянная трубка, крокодильчик, провод, электрофорная машина.

**Порядок проведения опыта.** Мыльный пузырь выдувают стеклянной трубкой. Мокрый конец трубки с помощью крокодильчика соединяют проводом с одним из полюсов электрофорной машины. Вследствие проводимости раствора пузырь оказывается заряженным и парит над концом

трубки на высоте 5 – 20 см за счет электрических отталкивающих сил. Соответствующим перемещением трубки можно заставить пузырь перемещаться в нужном направлении. Расстояние от трубки до пузыря зависит от потенциала, т.е. частоты вращения ручки электрофорной машины.

### 3.2. Взаимодействие разноименных и одноименных зарядов

**Оборудование:** бумажные гильзы, штатив, стеклянная и эбонитовая палочки.

**Порядок проведения опыта.** Эбонитовой палочкой заряжают легкие бумажные гильзы, подвешенные на тонких капроновых нитях к штативу (рис. 3.1). Заряжаясь одноименно, гильзы отталкиваются друг от друга и от эбонитовой палочки. Подносят заряженную стеклянную палочку. Так как стеклянная палочка имеет противоположный знак заряда с эбонитовой, гильзы притягиваются к ней.

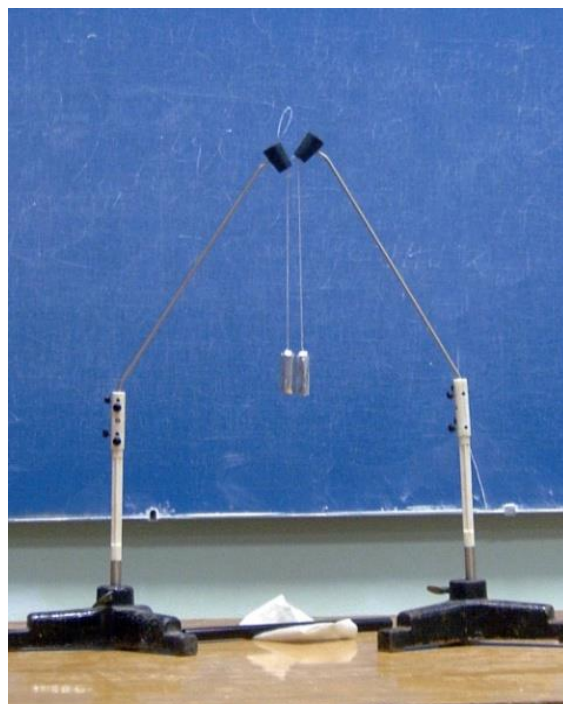


Рис. 3.1

### 3.3. Разделение зарядов при электризации тел

**Оборудование:** два металлических диска с изолирующими ручками, два электромметра, кусочек сукна.

**Порядок проведения опыта.** Два металлических диска на изолирующих ручках (один из них оклеен сукном) натирают один о другой. Оба диска электризуются одинаковыми по величине зарядами противоположного знака, что обнаруживается с помощью электрометров.

### 3.4. Силовые линии электрического поля

#### Опыт № 1

**Оборудование:** электрофорная машина, бумажные султаны на изолирующих штативах (рис. 3.2, а, б).



а)



б)

Рис. 3.2

**Порядок проведения опыта.** Простейшая демонстрация электрических силовых линий выполняется при помощи султанов, которые устанавливаются на изолированных штативах и заряжаются от электрофорной машины.

Сначала показывают опыт с

одним заряженным султаном и обращают внимание на радиальное расположение бумажных полосок. Заряжают оба султана одноименными, а затем разноименными зарядами и показывают искривление полосок при отталкивании и притяжении. Опыт идет лучше, если полоски слегка увлажнить.

#### Опыт № 2

**Оборудование:** стеклянная кювета, набор электродов, электрофорная машина, манная крупа, вакуумное или касторовое масло, проекционный аппарат, провода соединительные (рис. 3.3, а).

**Порядок проведения опыта.** Демонстрация силовых линий электростатического поля основана на том, что диэлектрики с диэлектрической проницаемостью большей, чем диэлектрическая проницаемость окружающей среды, обладающие малой проводимостью, взятые в виде небольших частиц, располагаются в электрическом поле вдоль силовых линий. Проводится наглядная демонстрация-показ силовых линий при помощи мелких кристалликов или крупных в жидком диэлектрике. Возьмем манную крупу и поместим в жидкий диэлектрик, обладающий достаточно большой вязкостью, например,

касторовое или вакуумное масло (рис. 3.3, б).



а)



б)

Рис. 3.3

Опыт показывают в проекции на экран. Масло наливают в стеклянную кювету (удобны чашки Петри), в которую вложены электроды (электроды различной формы). Электроды соединяются с полюсами электрофорной машины. Размешивают манную крупу стеклянной палочкой. Затем создают электрическое поле с помощью электрофорной машины и наблюдают, как крупинки располагаются вдоль силовых

линий поля, образуя картину поля, соответствующую данной конфигурации электродов.

### 3.5. Механическое действие катодных лучей

**Оборудование:** катодная трубка с легкой металлической крыльчаткой (мельницей) против катода, индуктор высоковольтный, выпрямитель, провода соединительные.

**Порядок проведения опыта.** Катодная трубка с легкой металлической крыльчаткой (мельницей) против катода (рис. 3.4) подключается к индуктору.



Рис. 3.4

При разряде крыльчатка, покрытая люминисцирующим

слоем, светится и вращается. Опыт показывает, что движущиеся электроны обладают кинетической энергией, т.е. имеют вполне определенную массу.

### 3.6. Зависимость ионной проводимости от концентрации электролита

**Оборудование:** стакан, электролампа 220 В, проволока, раствор медного купороса.

**Порядок проведения опыта.** В стакан с дистиллированной водой вставлены две проволоки, которые включены последовательно с лампой в сеть. Если добавлять по каплям к воде раствор медного купороса, яркость свечения лампы увеличивается, т.е. увеличивается проводимость смеси – воды и медного купороса.

### 3.7. Зависимость ионной проводимости от температуры

**Оборудование:** стакан, лампа, проволока, раствор медного купороса.

**Порядок проведения опыта.** В стакан с водопроводной водой вставлены две проволоки, которые включены последовательно с лампой в сеть. При подогревании воды яркость свечения лампы увеличивается, т.е. увеличивается ионная проводимость воды.

### 3.8. Проверка закона Джоуля – Ленца

**Оборудование:** электролампы 40 и 100 Вт, 220 В (рис. 3.5).

**Порядок проведения опыта.**

**Опыт 1.** При одном и том же токе (последовательном соединении ламп) выделяющееся тепло пропорционально сопротивлению лампы или квадрату падения напряжения на ней (рис. 3.5, а)



а)



б)

Рис. 3.5



**Опыт 2:** При параллельном соединении ламп выделяющееся тепло обратно пропорционально сопротивлению лампы или пропорционально квадрату тока, проходящего через нее (рис. 3.5, б).

### 3.9. Выравнивание потенциалов проводников при их соединении

**Оборудование:** неоновая лампочка, два электрометра.

**Порядок проведения опыта.** При соединении проводником заряженного электрометра с незаряженным происходит выравнивание потенциалов электрометров; неоновая лампочка, включенная в цепь, при этом вспыхивает.

### 3.10. Распределение зарядов на конденсаторах при их параллельном соединении

**Оборудование:** два конденсатора, гальванометр.

**Порядок проведения опыта.** Два разных по емкости конденсатора заряжают до одинакового напряжения, затем разряжают по отдельности каждый на гальванометр, получая разный отброс стрелки.

### 3.11. Зависимость емкости конденсатора от расстояния между пластинами и проницаемости диэлектрика

**Оборудование:** конденсатор разборный, электрометр, пластины из диэлектрика (рис. 3.6).



Рис. 3.6

**Порядок проведения работы.** Одна обкладка конденсатора должна быть неподвижной и надежно изолированной, другая – перемещаться относительно первой; ее надо заземлить. Неподвижную пластину соединяют с электрометром и заряжают – стрелка электрометра отклоняется на некоторый угол. Отодвигая подвижную пластину конденсатора, наблюдают увеличение отклонения стрелки электрометра. Это происходит потому, что при

раздвигании обкладок емкость конденсатора уменьшается, а следовательно, разность потенциалов на обкладках увеличивается. Поставив подвижную пластину в положение, при котором расстояние между обкладками немного больше толщины пластины из диэлектрика, вдвигают эту пластину из диэлектрика (эбонит, стекло, воск) между обкладками конденсатора. При этом емкость конденсатора увеличивается, что вызывает соответствующие уменьшение потенциала и уменьшение отклонения стрелки электрометра. После удаления диэлектрика стрелка электрометра возвращается в прежнее положение. Для успешного выполнения опыта необходимо, чтобы изоляция была высокого качества.

### 3.12. Зависимость емкости проводника от его размеров

**Оборудование:** электрометр, гармошка из металлической бумаги.

**Порядок проведения опыта.** При растяжении присоединенной к электрометру сложенной гармошки из металлизированной бумаги емкость заряженного электрометра увеличивается, а его потенциал уменьшается.

### 3.13. Реактивные силы при истечении заряда с острия

**Оборудование:** легкая жестяная вертушка с двумя остриями, подставка с острым наконечником, электрофорная машина, соединительные провода (рис. 3.7).



Рис. 3.7

**Порядок проведения опыта.** Подключаем вертушку к положительному полюсу электрофорной машины. При большой напряженности электрического поля произойдет поляризация молекул воздуха вблизи острия вертушки. Затем по мере стекания зарядов с каждого острия вертушки ей будет передаваться импульс, и она начнет вращаться.

### 3.14. Зависимость поверхностной плотности электрических зарядов от кривизны поверхности проводника

**Оборудование:** электрофорная машина, проводник сложной формы.

**Порядок проведения опыта.** Проводник сложной формы заряжают от электрофорной машины и пробным шариком снимают заряд с различных точек его поверхности. Наибольшая плотность заряда оказывается на острие проводника, внутри проводника она равна нулю (рис. 3.8).

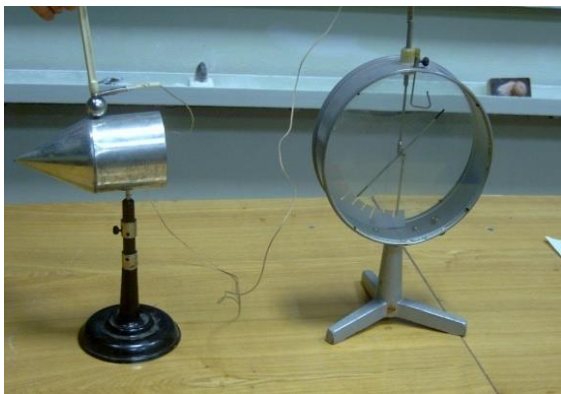


Рис. 3.8

### 3.15. Поверхность проводника и его объем эквипотенциальны

**Оборудование:** металлический кондуктор (проводник), электрофорная машина, пробный металлический шарик на изолирующей ручке, электромметр, провода соединительные.

**Порядок проведения опыта.** Потенциалы точек проводника, находящегося в электростатическом поле, одинаковые. Для де-

монстрации возьмем кондуктор с выступающей и вдающейся коническими торцовыми поверхностями и зарядим его. Пробный шарик соединяют достаточно длинной проволокой с демонстрационным электромметром и прикасаются им к какой-либо точке наэлектризованного кондуктора. Стрелка электромметра отклоняется на некоторый угол. Перемещают шарик по всей поверхности кондуктора как наружной, так и внутренней – отклонение стрелки не изменяется. Отклонение стрелки определяется зарядом, последний же зависит от потенциала тела, с которым соприкасается стержень электромметра.

**Указание.** При выполнении демонстрации надо следить за тем, чтобы провод, соединяющий пробный шарик с электромметром, не проходил слишком близко от заземленных предметов. Лучше всего пробный шарик держать неподвижно, а заряженный проводник перемещать, не отрывая его от шарика.

**Оборудование:** клетка Фарадея, электрофорная машина, два султана, изолирующий лист, металлический лист, соединительные провода (рис. 3.9).



Рис. 3.9

**Порядок проведения опыта.** На металлический лист кладут лист пенопласта толщиной 4 – 8 см, а на него ставят клетку Фарадея, выполненную в виде цилиндра из сетки. Один бумажный султанчик помещим внутрь клетки, другой поставим на нее. Для демонстрации экранирующего действия проводников с помощью клетки Фарадея заземлим один полюс электрофорной машины с металлическим листом, другой полюс соединим с клеткой. Бумажные полоски султана расходятся только на внешней поверхности заряженной клетки, внутри клетки – не расходятся. Опыт можно наблюдать, если нет металлического листа и клетка Фарадея подсоединяется к одному полюсу электрофорной машины.

## Опыт № 2

**Оборудование:** сетка Кольбе, электрофорная машина и эбонитовая палочка или палочка из органического стекла с куском меха.

**Порядок проведения опыта.** Гибкую металлическую сетку с бумажными лепестками устанавливают на демонстрационном столе и заряжают ее от электрофорной машины. Листочки – электроскопы – отклоняются только на внешней поверхности заряженной сетки.

### 3.17. Вещества-проводники тока и вещества-изоляторы

**Оборудование:** два электрометра, стеклянная палочка, металлическая палочка, деревянная палочка, электрофорная машина (рис. 3.10).

**Порядок проведения опыта.** Заряжают электрометр от электрофорной машины и соединяют с незаряженным электрометром стеклянной палочкой – перетекания зарядов не происходит. По деревянной палочке перетекание зарядов происходит медленно, по металлической проволоке – очень быстро.



Рис. 3.10

### 3.18. Работа электрических сил

**Оборудование:** электрофорная машина, раздвижной плоский конденсатор, шарик пластмассовый, натертый графитом, штатив универсальный (рис. 3.11).

**Порядок проведения опыта.** Заряжают пластины раздвижного конденсатора от электрофорной машины. Легкий проводящий шарик, подвешенный на нити между пластинами раздвижного конденсатора, начинает колебаться между пластинами, перенося заряд от пластины к пластине. Хорошо использовать мячик для пинг-понга, натертый графитом. Шарик скачет между пластинками очень быстро, издавая звук при ударах. Расстояние между пластинами 10 – 20 см. Высота подвеса около 1 м.



Рис. 3.11

### 3.19. Влияние сетки на анодный ток лампы

**Оборудование:** ламповый триод, кусок проволоки, амперметр.

**Порядок проведения опыта.** К сетке лампы триода присоединяют кусок проволоки. Перемещение наэлектризованной палочки около этой проволоки приводит к резкому изменению анодного тока лампы. Объяснить наблюдаемое в опыте.

### 3.20. Наблюдение тихого разряда в газе

**Оборудование:** свеча, раздвижной конденсатор, электрометр.

**Порядок проведения опыта.** Заряженный раздвижной конденсатор быстро разряжается, если поместить пламя свечи между его пластинами (рис. 3.12).



Рис. 3.12

### 3.21. Зависимость электропроводности от температуры

**Оборудование:** источник тока, железная проволока, угольный стержень, амперметр.

**Порядок проведения опыта.** При нагревании железной проволоки ток в цепи уменьшается, при нагревании угольного стержня – увеличивается. Источник тока должен иметь малую ЭДС и малое внутреннее сопротивление.

### 3.22. Появление разности потенциалов при прохождении тока

**Оборудование:** листочки папиросной бумаги, деревянная рейка.

**Порядок проведения опыта.** Потенциал точки проводника

можно оценить по углу расхождения листочков из папиросной бумаги при пропускания тока от электрофорной машины по деревянной рейке.

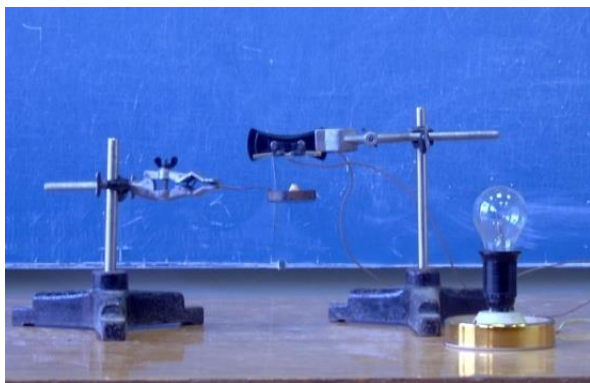
### 3.23. Ионная проводимость стекла при нагревании

**Оборудование:** стеклянная палочка, медная проволока, лампа накаливания.

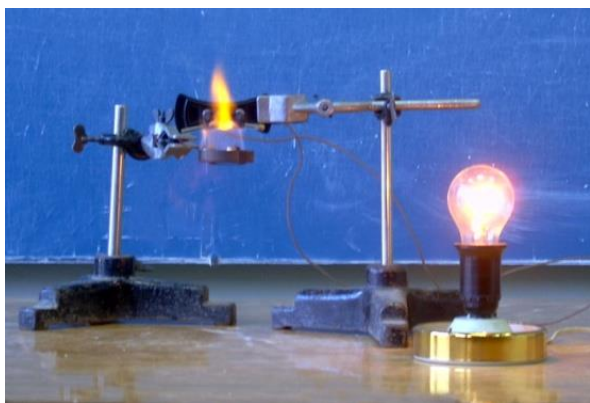
**Порядок проведения опыта.** Собирается установка. На стеклянную палочку плотно навивают в двух местах медную проволоку по 4 – 5 витков, между спиральями оставляют пространство 10 – 15 мм. Свободные концы проволоки соединяют через лампу накаливания с осветительной сетью 220 В и обращают внимание на то, что лампа при этом не горит (рис. 3.13, а).

Стекло при обычной температуре является хорошим изолятором.

После этого нагревают стеклянную палочку в промежутке между навитыми проволоками и доводят ее до красного каления. Лампа начинает светиться (рис. 3.13, б). Затем убирают горелку, однако стекло не остывает. Теперь оно нагревается проходящим через него током. Палочка размягчается, прогибаясь под собственной тяжестью.



а)



б)

Рис. 3.13

Во время этого опыта можно показать дугу между стеклянными электродами, разорвав палочку по размягченному месту.

**Примечание.** Сорт стекла для этой демонстрации нужно подобрать заранее.

### 3.24. Истечение заряда с проводника

**Оборудование:** электрофорная машина, острие, свеча на подставке.

**Порядок проведения опыта.** На изолирующем штативе укрепляют металлический стержень с острием и соединяют его с одним

из кондукторов электрофорной машины. Против острия ставят зажженную свечу. При подаче заряда электрофорной машины на острие молекулы воздуха вблизи острия ионизируются и возникает поток ионов, направленный с острия («электрический ветер»), который сильно отклоняет пламя свечи и может ее погасить (рис. 3.14).

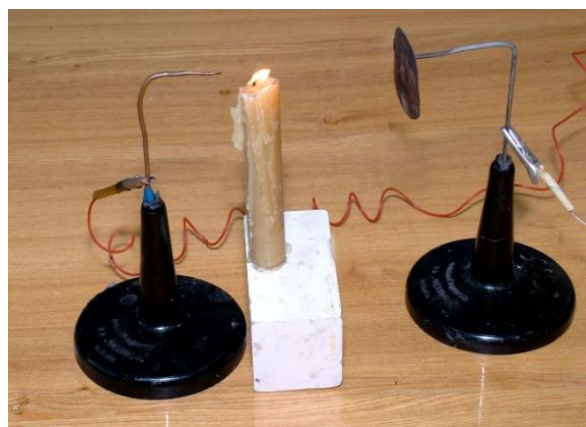


Рис. 3.14

Опыт идет лучше, если по другую сторону свечи находится пластина, соединенная с другим электродом электрофорной машины.

### 3.25. Передача заряда проводнику нанесением его на внешнюю поверхность проводника

**Оборудование:** шарик, несущий заряд, электрометры.

**Порядок выполнения опыта.** Если шариком, несущим заряд, коснуться внешней поверхности

шара на первом электрометре, то электрометр зарядится, а на шарике остается часть заряда, и его можно перенести на второй электрометр.

### 3.26. Передача заряда проводнику, внесение его внутрь проводника

**Оборудование:** электрофорная машина, два электрометра, пробный шарик на изолирующей ручке, соединительные провода.

**Порядок проведения опыта.** Заряжаем шарик от электрофорной машины. Коснемся им внутренней поверхности шара на первом электрометре, а затем на втором. Обнаружим по электрометрам, что на втором шаре заряд отсутствует.

### 3.27. Измерение разности потенциалов с помощью пламенного зонда

**Оборудование:** пламенный зонд, электрометр, штатив, наэлектризованная палочка.

**Порядок выполнения опыта.** Для измерения потенциалов в какой-либо точке электрического поля вокруг заряженного проводника пользуются пламенным зондом, представляющим собой небольшую часть тонкой свечи, укрепленной на изолирующем штативе. В пламя свечи помеща-

ют острие, которое с помощью проволоки соединено со стержнем электрометра.

Электрометр во время опыта помещают возможно дальше от зонда. Заряжают наэлектризованной палочкой металлический шар и подносят к нему на расстоянии 30 – 40 см зонд (рис. 3.15).



Рис. 3.15

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

Приближают зонд к шару или удаляют от него и наблюдают большее или меньшее показание электрометров. Необходимость применять в этом случае пламя вызывается тем, что оно в соотнесении с острием способствует более быстрому снятию индуцированных зарядов, которые могут искажать поле.



Затем помещают зонд в разных точках вокруг заряженного шара, где показания электрометра были бы одинаковые. Эти точки располагаются на эквипотенциальной поверхности, имеющей форму сферы. В качестве заряженного шара удобно брать сосуд Дьюара. Этот шар устанавливают на сухое стекло или на сухой пенопласт.

### **3.28. Разделение зарядов в процессе электрической индукции**

**Оборудование:** два электрометра, пробный металлический шарик на изолирующей ручке, провода соединительные, электрофорная машина.

#### ***Порядок проведения опыта.***

**Эксперимент 1.** Пробный шарик, соединённый с первым электрометром, несущий заряд, вносим внутрь проводящей сферы, установленной (не касаясь его) на первом электрометре, а затем на время заземляем эту сферу. После вынимания шарика электрометр будет заряжен. Заряд его равен заряду сферы и противоположен по знаку, в чем можно убедиться, передав заряд шарика на второй электрометр и соединив электрометры. Опыт хорошо иллюстрирует теорему Гаусса.

**Эксперимент 2.** Если на диск заряженного электрометра поло-

жить заземленный диск (с тонкой прокладкой изолятора), то в заземленном диске произойдет разделение зарядов, и заряды, одноименные с зарядом электрометра, уйдут в землю. Отсоединим диск от земли, заряд на нем сохранится. Если теперь этот диск поднести к другому электрометру, то заряд легко обнаруживается.

**Эксперимент 3.** Если привести в соприкосновение два цилиндра на стержнях электроскопов и поднести к одному из них на небольшое расстояние наэлектризованную палочку, то произойдет разделение зарядов, которые сохраняются, если раздвинуть цилиндры, а затем убрать палочку.

### **3.29. Определение знака заряда на электрометре, используя явление электрической индукции**

**Оборудование:** электрометр, эбонитовая или стеклянная палочка, кусок шерсти или шелка.

**Порядок проведения опыта.** Заряжаем электрометр и подносим к нему наэлектризованную палочку. Если палочка имеет тот же заряд, что и на электрометре, то стрелка отклоняется еще больше; если имеет другой заряд, то отклонение стрелки уменьшается.

### 3.30. Демонстрация поляризации диэлектрика

**Оборудование:** электрофорная машина, разборный конденсатор, плоские металлические и пластмассовые пластины на изолирующих ручках, электрометры, соединительные провода.

**Порядок проведения опыта.** Поляризация диэлектриков и смещение зарядов на проводнике в электрическом поле происходят следующим образом. Зарядив пластины конденсатора от электрофорной машины, внесем внутрь него две соприкасающиеся пластины из изолятора. Эти пластины, разделенные в поле, после вынимания из него не несут зарядов. Металлические пластины, разделенные в поле, несут поверхностную плотность зарядов на единицу поверхности, равную модулю вектора смещения в том месте поля. Пластины должны быть укреплены на изолирующих ручках. Заряд пластин и его знак определяются электрометром.

### 3.31. Принцип действия электрического фильтра

**Оборудование:** генератор дыма, электрофорная машина, стеклянный сосуд с двумя электродами (рис. 3.16).

**Порядок проведения опыта.** Наполняем дымом стеклянный сосуд, закрытый с двух сторон электродами. Один электрод является диском, другой – острием. Подсоединяем электроды к электрофорной машине. В электрическом поле происходит ионизация частиц дыма, которые под действием кулоновских сил быстро осаждаются. Мутный сосуд с дымом почти мгновенно осветляется.



Рис. 3.16

### 3.32. Наблюдение тлеющего разряда

**Оборудование:** двухэлектродная стеклянная трубка, высоковольтный индуктор, форвакуумный насос, выпрямитель ВСЧ-12, провода соединительные (рис. 3.17).



Рис. 3.17

**Порядок проведения опыта.** К электродам газоразрядной трубки подключают высоковольтный индуктор.

Включают насос, который выкачивает воздух из трубки. 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. Далее происходит образование заметного темного катодного пространства и положительного анодного столба, а потом образование отдельных слоев – страт. 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).

### 3.33. Свечение неоновой лампы

**Оборудование:** неоновая лампа, источник переменного тока (рис. 3.18).



Рис. 3.18

**Порядок проведения опыта.** Неоновая лампа с большими электродами включается в сеть переменного тока. Наблюдается прикатодное свечение вокруг обоих электродов. При быстром перемещении лампы видно, что свечение каждого электрода кажется прерывистым. При наблюдении за движущейся лампой взгляд нужно фиксировать на каком-нибудь неподвижном предмете.

### 3.34. Наблюдение дугового разряда

**Оборудование:** сварочный трансформатор, дуговая лампа, вольтметр, амперметр, угли для дуги диаметром 5 мм (2 шт.), соединительные провода, объектив с оборотной призмой.

**Порядок проведения опыта.** Угольные электроды подключаются к сварочному трансформатору. Перед тем как включить ток, выводим трансформатор до минимума.

Включаем трансформатор, приводим в соприкосновение электроды и доводим ток по прибору до 75 А. Затем, разведя электроды, а потом регулируя расстояние между ними, поддерживаем ток 35 – 40 А, тем самым добиваемся нормального горения дуговой лампы. Так как ток переменный, то угли сгорают равномерно и кратеры образуются одновременно у обоих углей. Дуга проецируется на полупрозрачный экран. В проекции видно, что плазма между электродами изгибается дугой. Хорошо видны области с различной температурой по соответствующему свечению от фиолетового до вишневого.

### 3.35. Свечение спектральных трубок

**Оборудование:** высоковольтный индуктор, набор спектральных трубок.

**Порядок проведения опыта.** Наблюдается свечение трубок с тонким каналом. Наибольшая яркость свечения наблюдается в канале, где плотность тока наибольшая. Можно заметить разницу свечения около анода и катода.

### 3.36. Наблюдение безэлектродного разряда

**Оборудование:** трансформатор Тесла, набор безэлектродных трубок, соединительные провода (рис. 3.19).



Рис. 3.19

**Порядок проведения опыта.** Безэлектродные трубки помещают в высокочастотное поле трансформатора Тесла и наблюдают их свечение.

## **Выводы**

1. Лекционные демонстрации наглядно представляют электрические явления: протекание электрического тока в различных средах, проявление электрических сил, зависимости электрических величин от различных параметров, физический смысл различных электрических величин.

2. Лекционная демонстрация позволяет глубже понять суть электрических явлений и законов, их описывающих.

## **Контрольные вопросы**

1. Сформулируйте закон Кулона.

2. Что такое напряжённость электрического поля? В чём заключается принцип суперпозиции электрических полей?

3. Что такое потенциал электростатического поля? Запишите его выражение для точечного заряда.

4. Как определяется поляризованность вещества? Каков её физический смысл?

5. Чему равна напряжённость электрического поля внутри проводника, помещённого в электри-

ческое поле? Почему?

6. Что называется электрическим током и каковы условия существования тока проводимости?

7. Что называется газовым разрядом?

8. Как возникает тлеющий разряд? Где он применяется?

## **Библиографические ссылки**

1. Иродов, И. Е. Электромагнетизм. Основные законы / И. Е. Иродов. – 3-е изд., испр. – М. : Лаборатория базовых знаний, 2001. – 352 с. – ISBN 5-93208-001-9.

2. Калашников, С. Г. Электричество / С. Г. Калашников. – М. : Наука, 1977. – 592 с.

3. Яворский, Б. М. Курс физики. В 3 т. Т. 2 / Б. М. Яворский. – 2 изд., испр. и доп. – М. : Высш. шк., 1966. – 500 с.

4. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 3 т. Т. 2 / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1978. – 480 с.

5. Трофимова, Т. И. Курс физики : учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк.,

1990. – 478 с.

6. Физический практикум (электричество и оптика) / под ред. В. И. Ивероновой. – М., 1968. – 353 с.

7. Гробовский, М. А. Лекционные демонстрации по физике / М. А. Гробовский [и др.] ; под ред. В. И. Ивероновой. – М. : Наука, 1965. – 572 с.

8. Демонстрационное и техническое обеспечение лекций по физике. Электричество и оптика : метод. указания / Владим. политехн. ин-т ; сост. В. Н. Кунин. – Владимир, 1980. – 40 с.

**РАЗДЕЛ IV**

**МАГНЕТИЗМ**

## 4.1. Магнитное поле тока

**Оборудование:** провод, магнит, источник тока (рис. 4.1, а, б).



а)



б)

Рис. 4.1

**Порядок выполнения опыта.** Магнитную стрелку располагают над проводом или под ним. Наблюдается отклонение стрелки при включении тока. Отклонение тем больше, чем больше ток. Опыт идет наглядно, если по проводу пропускается ток 500 – 700 А. В этом случае используется большая стрелка из картона, наклеенная на постоянный магнит. Концы стрелки окрашивают-

ся в красный и синий цвета. Магнит укладывается на стекло или подвешивается на штативе. При этом происходит поворот стрелки. Опыт масштабный и хорошо виден с любого места аудитории.

## 4.2. Магнитные силовые линии постоянных магнитов

**Оборудование:** магниты дугообразные и прямые, железные опилки, стрелка магнитная, проекционный фонарь, набор проводников разной конфигурации, выпрямитель ВС 4-12, соединительные провода.

### Опыт № 1

**Порядок проведения опыта.** Постоянный магнит, стальное кольцо или стержень помещают между стеклами и посыпают железными опилками, которые образуют цепочки "силовые линии". Опыт демонстрирует эффекты намагничивания железа (стали), экранировку. Полученная картина наблюдается в проекции.

### Опыт № 2

**Порядок проведения опыта.** Наблюдают в проекции силовые линии магнитного поля кругового тока, прямого тока и катушки с током, полученные с помощью железных опилок на стекле (рис.

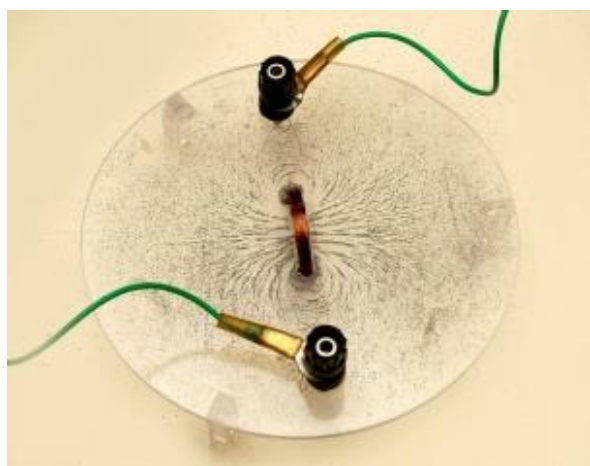


4.2, а, б, в). Во время опыта следует постукивать по стеклу карандашом. Берут органическое стекло. Катушку наматывают медным проводом в лаковой изоляции непосредственно через отверстия в стекле.

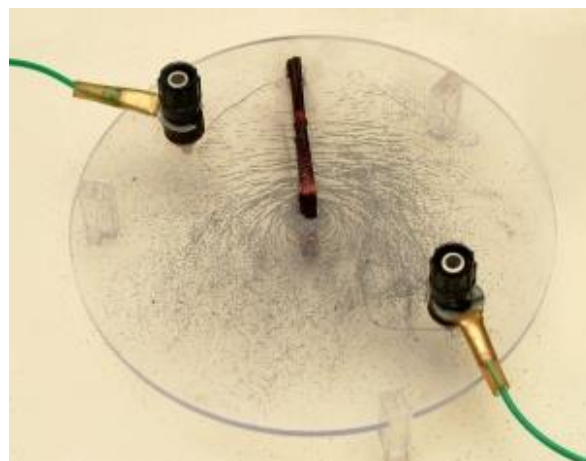
**Указание.** Наблюдение конфигурации силовых линий возможно с применением как теневой, так и телевизионной проекции.

### 4.3. Действие магнитного поля на ток

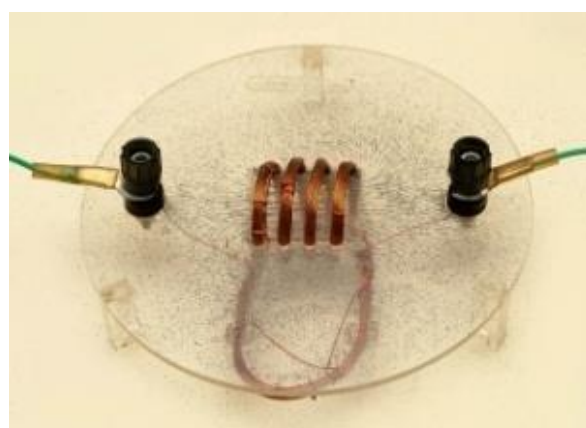
**Оборудование:** магниты дугообразные, скоба проволочная, амперметр демонстрационный, штатив универсальный, выпрямитель ВСЧ-12, ключ, провода соединительные.



а)



б)



в)

Рис. 4.2

**Порядок проведения опыта.** Собирают установку по схеме (рис. 4.3), включают ток в одном направлении. Прямой проводник, помещенный между полюсами магнита, выталкивается или втягивается в межполюсное пространство в зависимости от расположения полюсов и направления тока.

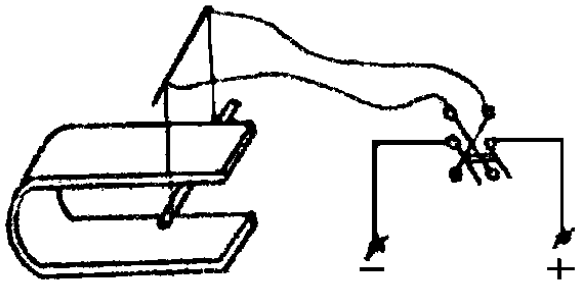


Рис. 4.3

Эти опыты демонстрируют правило левой руки, связывающее направление тока, силовых линий поля и силы, действующей на проводник. При наличии мощного магнита опыт проходит более эффектно (рис. 4.4, а, б). Через проводник сечением не менее  $1 \text{ см}^2$  (например, используемый в электросварке), длиной около 10 м пропускают ток 600 – 700 А. Середина провода располагается между полюсами большого дугообразного магнита. Под действием тока относительно тяжелый провод выбрасывается магнитным полем (рис. 4.4, б) из межполюсного промежутка вверх. Демонстрация дает наглядное представление действия закона Ампера.



а)



б)

Рис. 4.4

#### 4.4. Действие магнитного поля на контур с током

**Оборудование:** свободно подвешенная, небольшая рамка из медного провода, расположенная между полюсами магнита, при пропускании электрического тока ориентируется так, что её вектор магнитного момента всегда оказывается сонаправленным с вектором магнитной индукции внешнего магнитного поля. Рамка площадью  $1 \text{ м}^2$ , имеющая 100

витков, при токе 5 А хорошо поворачивается в магнитном поле Земли, будучи подвешенной на гибком проводящем проводе (рис. 4.5).



Рис. 4.5

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

**Оборудование:** катушка, мощный магнит, выпрямитель ВС442.

**Порядок выполнения опыта.** Катушка подвешена вблизи от конца сердечника магнита. При включении тока катушка надевается на стержень или сначала отталкивается (рис. 4.6, а), а потом поворачивается и надевается в за-

висимости от направления поля тока в катушке (рис. 4.6, б).



а)



б)

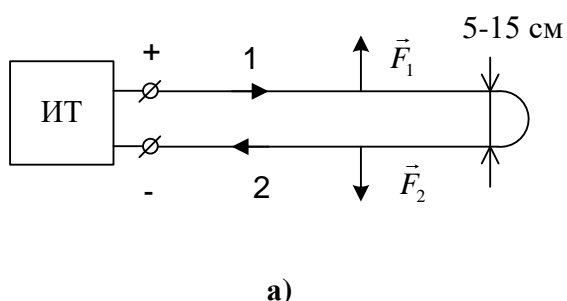
Рис. 4.6

#### 4.6. Взаимодействие токов через их магнитные поля

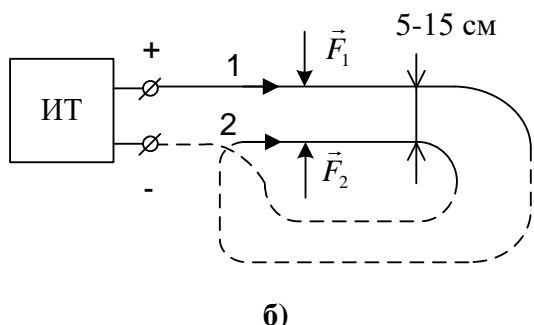
**Оборудование:** две станиолевые ленты, штатив универсальный, провода соединительные.

**Порядок проведения опыта.**  
1. Через две станиолевые ленты пропустить ток одинакового и

противоположного направлений. Наблюдают соответственно притяжение или отталкивание лент вследствие их магнитного взаимодействия. 2. Два демонстратора (студента) держат гибкий провод от сварочного аппарата с поперечным сечением  $300 \text{ мм}^2$ , образующий петлю с двумя параллельными ветвями на расстоянии 5 – 15 см друг от друга. При пропускании тока 500 – 600 А провода заметно расходятся при антипараллельных токах, а при подборе участков сложной петли с параллельными токами проводники взаимно притягиваются. Схемы петли условно показаны на рис. 4.7, а и 4.7, б. ИТ – источник тока 500 – 600 А при напряжении 12 В.



а)



б)

Рис. 4.7

На рис. 4.7, б сплошной линией показаны части проводников,

находящиеся в руках студентов, а пунктирной линией – части проводников, лежащих на полу аудитории. Общая длина провода должна составлять около 10 – 15 м.

#### 4.7. «Прыгающие катушки»

**Оборудование:** две катушки, источник тока 220 В.

**Порядок выполнения опыта.** Две плоские круглые катушки (диаметр витка катушек 15 – 20 см), имеющие по 200 – 300 витков медной проволоки диаметром 0,7 – 1,0 мм, соединены параллельно длинными проводами (рис. 4.8). Катушки укладывают друг на друга на столе так, что токи в них текут параллельно или антипараллельно. Затем катушки на короткий промежуток времени включают в сеть 220 В. В первом случае катушки притягиваются друг к другу, а во втором – верхняя катушка высоко подскакивает.



Рис. 4.8

#### 4.8. Изменение магнитного поля ферромагнетиком

**Оборудование:** катушка, стальная полоска.

**Порядок выполнения опыта.** При внесении в катушку с током стальной полоски отклонение магнитной стрелки, размещенной недалеко от катушки, увеличивается. При замыкании этой полоски в кольцо поле вне катушки резко уменьшается, уменьшается и отклонение стрелки.

#### 4.9. Изучение гистерезиса ферромагнитных материалов

**Оборудование:** модуль ФПЭ-07 (рис. 4.9), осциллограф.

**Порядок проведения опыта.** Модуль позволяет получать петлю гистерезиса ферромагнитных материалов, определять коэрцитивную силу и работу перемагничивания за один цикл. Исследуемый ферромагнетик – кольцевой ферритовый сердечник типа М 2000 НМ К 31×18, 5×7.

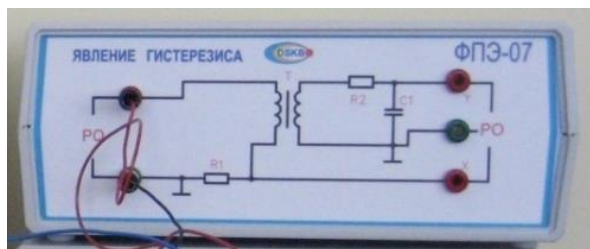


Рис. 4.9

#### 4.10. Превращение ферромагнетика в парамагнетик в точке Кюри

**Оборудование:** никелевая жесть, магнит, спиртовка.

**Порядок выполнения опыта:** кусок никелевой жести подвешен так, что притягивается магнитом. Если под жесть поставить зажженную спиртовку, то скоро жесть теряет магнитные свойства и отпадает от магнита, затем остывает и снова притягивается.

#### 4.11. Наблюдение ЭДС индукции при относительном движении магнита и катушки

**Оборудование:** катушка из универсального трансформатора, провода соединительные, гальванометр, постоянный магнит (рис. 4.10).

**Порядок проведения опыта.** Катушка от разборного демонстрационного трансформатора с наибольшим числом витков подключается к демонстрационному гальванометру. При внесении или удалении полосового магнита из катушки по стрелке гальванометра наблюдают показания индукционного тока. Подчеркивают, что величина индуцируемого тока зависит от скорости изменения магнитного потока, а направле-

ние – от знака приращения магнитного потока.

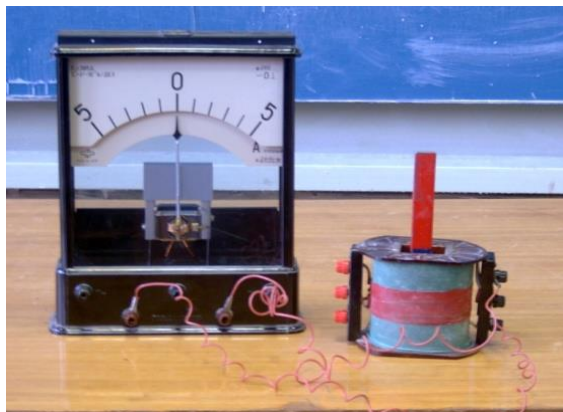


Рис. 4.10

#### 4.12. Наблюдение ЭДС индукции при включении и изменении тока

**Оборудование:** источник постоянного тока до 2 – 4 А с напряжением 4 – 12 В, реостат или регулируемый автотрансформатор (ЛАТР), демонстрационный разборный трансформатор с двумя катушками, демонстрационный гальванометр.

**Порядок проведения опыта.** Собрать электрическую цепь по схеме (рис. 4.11), подключив одну из катушек трансформатора к гальванометру, а вторую через реостат к источнику тока. При включении или выключении источника тока, а также при изменении тока ползунком реостата или при помощи ЛАТРа по стрелке гальванометра наблюдают действие ЭДС во вторичной катушке.

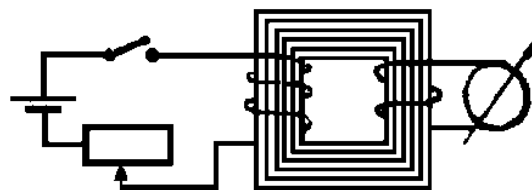


Рис. 4.11

#### 4.13. Наблюдение ЭДС индукции при изменении магнитного потока

**Оборудование:** подковообразный магнит, катушка, гальванометр, железный сердечник.

**Порядок проведения опыта.** Катушка, соединенная с гальванометром, надета на подковообразный магнит. При соединении полюсов магнита железным сердечником в катушке возникает ЭДС индукции.

#### 4.14. Наблюдение ЭДС индукции при изменении магнитного поля катушки с помощью железного сердечника

**Оборудование:** две катушки, гальванометр, железный сердечник, провода соединительные, источник постоянного тока (рис. 4.12).

**Порядок проведения опыта.** Катушка с током вставлена в катушку, соединенную с гальванометром. При перемещении железного сердечника в катушках возникает ЭДС индукции.



Рис. 4.12

#### 4.15. Обратимость электродвигателя и генератора

**Оборудование:** генератор, лампа, источник постоянного тока.

**Порядок выполнения опыта.** Генератор с независимым возбуждением питает лампу, если вращать его ротор. Если же подключить его к источнику постоянного тока, он работает как электродвигатель.

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

##### Опыт №1

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

**Порядок проведения опыта.** При движении магнита в замкнутом кольце кольцо приходит в движение вслед за магнитом. При

движении магнита в незамкнутом кольце кольцо не движется.

Этот опыт утверждает, что во всяком замкнутом проводнике при изменении магнитного потока сквозь площадь, ограниченную алюминиевым замкнутым кольцом, в последнем возникает индукционный ток. Индукционный ток всегда имеет такое направление, при котором его магнитное поле противодействует изменению магнитного потока, вызывающему этот ток (рис. 4.13, а, б).



а)



б)

Рис. 4.13

## Опыт № 2

**Оборудование:** катушка от универсального трансформатора, железный сердечник, алюминиевое кольцо, соединительные провода (рис. 4.14).

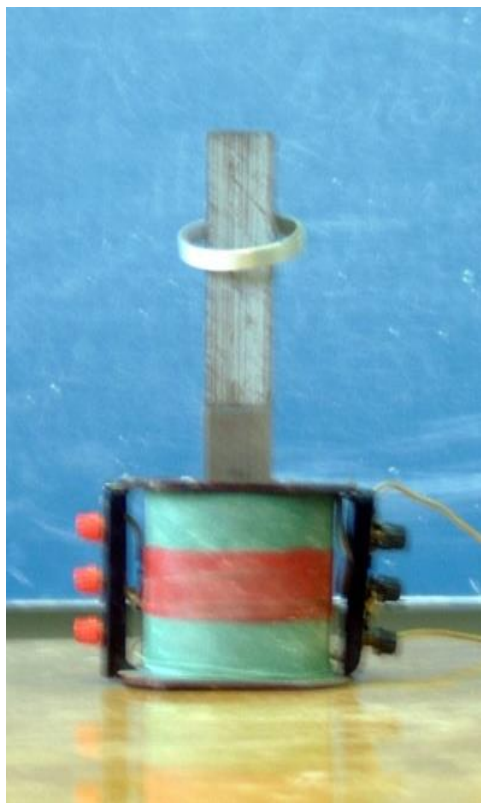


Рис. 4.14

**Порядок проведения опыта.** При пропускании через катушку электромагнита постоянного тока кольцо слетает со стержня. При включении переменного тока кольцо подпрыгивает и висит, не слетая со стержня, над катушкой, постепенно разогреваясь индукционным током. Величины токов необходимо заранее подобрать.

## 4.17. Индукция в сплошных проводниках (токи Фуко)

**Оборудование:** трансформатор универсальный, катушка дроссельная, диск для демонстрации вихревых токов, алюминиевые пластины (сплошная и с разрезами), выключатель, выпрямитель, провода соединительные, маятник (рис. 4.15).

**Порядок проведения опыта.** Из деталей универсального трансформатора и дроссельной катушки собирают электромагнит с полюсными наконечниками, повернутыми плоскими концами друг к другу. Под гайку одного из винтов зажимают стойку с маятником в виде сплошной пластины. Положение маятника и полюсных наконечников регулируют так, чтобы зазоры между пластинами и наконечниками были как можно меньше. Катушку через выключатель присоединяют к источнику постоянного тока. Маятник, приведенный в движение, колеблется с малым затуханием. При включении тока (около 2 А) наблюдается почти мгновенная остановка маятника. Заменяв в маятнике сплошную пластину другой, равной по размерам, но имеющей прорези, повторяют опыт. При включении тока наблюдается заметное торможение маятника, однако он не сразу останавливается, а совершает не-



сколько затухающих колебаний, так как теперь часть вихревых токов с большим радиусом циркуляции отсутствует из-за наличия прорезей.

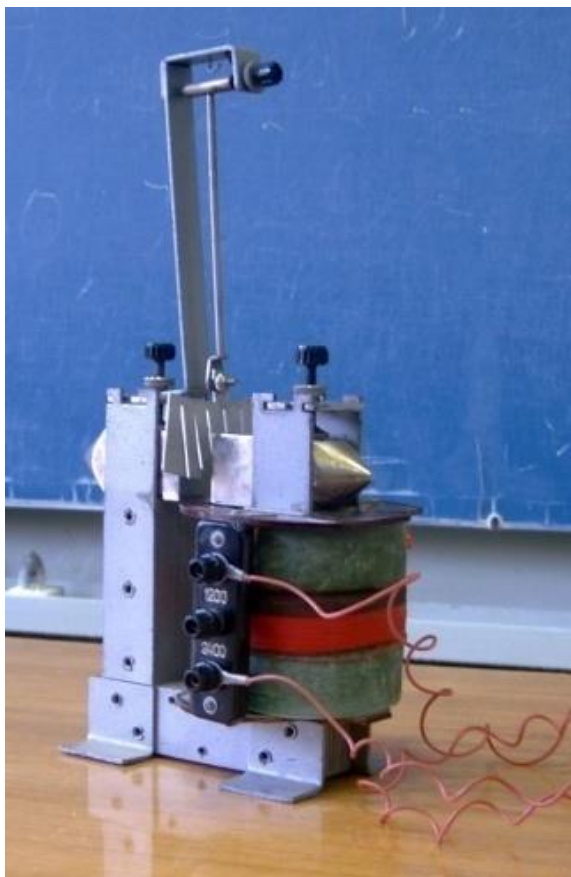


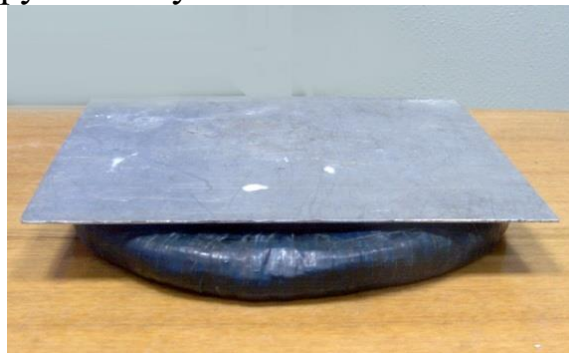
Рис. 4.15

#### 4.18. Демонстрация возникновения вихревых токов, правила Ленца

**Оборудование:** две тороидальные катушки, алюминиевый лист.

**Порядок проведения опыта.** На катушку из опыта «прыгающие катушки» накладывают алюминиевый лист (рис. 4.16, а). При подключении катушки в сеть пере-

менного тока 220 В на 2 – 4 секунды алюминиевый лист приподнимается над катушкой (рис. 4.16, б). При прижимании листа к катушке можно ощутить заметный его нагрев; дать потрогать руками слушателям.



а)



б)

Рис. 4.16

#### 4.19. Взаимодействие вихревых токов и магнита

**Оборудование:** медный или алюминиевый диск, магнит, шарик, пылесос.

**Порядок выполнения опыта.** Медный или алюминиевый диск увлекается вращающимся магнитом за счет взаимодействия магнитного поля с вихревыми тока-

ми в диске. Магнит также увлекается при вращении диска. Этот же опыт можно показать несколько по-иному. Алюминиевый диск на острие (волчок) раскручивается подковообразным магнитом, вращающимся от ручной центробежной машины (дрели). После раскручивания дрель можно убрать, волчок продолжает крутиться на столе. Высота острия от диска 0,5 – 2 см.

#### 4.20. Увлечение проводника бегущим магнитным полем

**Оборудование:** виток с током, диск или алюминиевый стакан.

**Порядок выполнения опыта.** Магнитное поле витка, созданное индукционным током в нем, отстает от поля сердечника по фазе. В результате возникает бегущее поле, которое и увлекает за собой диск или легкий перевернутый алюминиевый стакан, поставленный на острие.

#### 4.21. Возникновение противоэдс при работе электромотора

**Оборудование:** электродвигатель.

**Порядок выполнения опыта.** При раскручивании ротора электродвигателя уменьшается потребляемый ток, что происходит вследствие возникновения проти-

воэдс в роторе коллекторного электродвигателя.

#### 4.22. Наблюдение ЭДС самоиндукции при размыкании цепи

##### Опыт № 1

**Оборудование:** подвижный демонстрационный столик, демонстрационный трансформатор, источник тока, неоновая лампа, две лампочки накаливания, реостат, ключ.

**Порядок проведения опыта.** Катушка от демонстрационного трансформатора с наибольшим числом витков подключается к источнику постоянного тока 6 – 10 В. Параллельно клеммам катушки подключена неоновая лампа. При размыкании цепи неоновая лампа с напряжением зажигания 60 – 70 В вспыхивает, а между контактами ключа видна небольшая кратковременная дуга (рис. 4.18).



Рис. 4.17

## Опыт № 2

**Оборудование:** вольтметр, катушка с током.

**Порядок выполнения опыта.** Стрелка вольтметра с нулем в середине шкалы отклоняется при прохождении тока через катушку. При быстром выключении тока наблюдается бросок стрелки в обратную сторону (рис. 4.18).

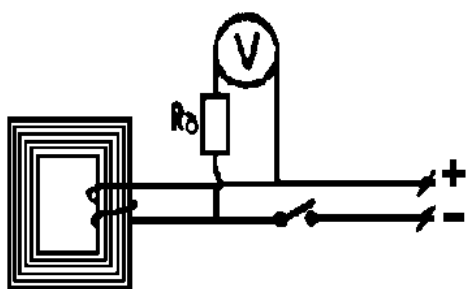


Рис. 4.18

## 4.23. Наблюдение ЭДС самоиндукции при размыкании и изменении тока

**Оборудование:** реостат, лампочки.

**Порядок выполнения опыта.** Одна лампочка Л1 включена последовательно с реостатом, другая Л2 последовательно с катушкой большой индуктивности. При замыкании лампа Л2 загорается позже лампы Л1 (см. рис. 4.17). При включении в цепь переменного тока лампа Л2 не горит совсем.

## 4.24. Изменение индуктивности катушки введением железного сердечника

**Оборудование:** катушка от универсального трансформатора, электрическая лампочка, универсальный трансформатор, провода соединительные, железный сердечник.

**Порядок проведения опыта.** Катушка индуктивности, надетая на незамкнутый сердечник, включается последовательно с электрической лампочкой. Переменный ток подбирается так, чтобы лампа горела почти полным накалом. Если замкнуть сердечник, то накал лампы заметно уменьшается. Следовательно, индуктивное сопротивление катушки увеличивается.

## 4.25. Изучение явления взаимной индукции

**Оборудование:** модуль ФПЭ-05 (рис. 4.19).



Рис. 4.19

**Порядок проведения опыта.** Модуль ФПЭ-05 позволяет исследовать взаимную индукцию двух коаксиально расположенных катушек, измерять коэффициенты взаимной индукции катушек в зависимости от их взаимного расположения при различных значениях амплитуды и частоты входного сигнала.

#### 4.26. Зависимость взаимной индукции катушек трансформатора от магнитного сопротивления сердечника

**Оборудование:** универсальный трансформатор, две лампочки на 220 В, ключ однополюсной, провода соединительные.

**Порядок проведения опыта.** Замыкая вторичную катушку трансформатора на мощную лампу, наблюдают увеличение тока в первичной катушке, который зависит от магнитного сопротивления сердечника. Магнитное сопротивление сердечника можно изменить, создав воздушный зазор. При увеличении зазора в сердечнике взаимная индукция катушек уменьшается.

#### 4.27. Демонстрация разветвления магнитного потока

**Оборудование:** катушка, магнитный шунт.

**Порядок выполнения опыта.** При включении магнитного шунта происходит уменьшение магнитного потока через вторичную катушку и уменьшение накала лампы (рис. 4.20).

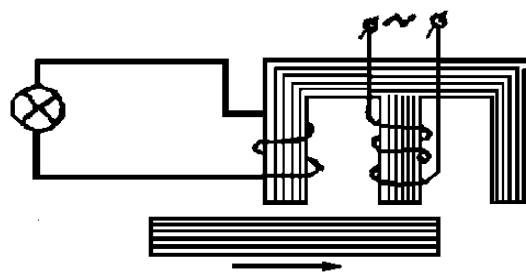


Рис. 4.20

#### 4.28. Зависимость магнитного потока от магнитного сопротивления

**Оборудование:** реостат, трансформатор, электрическая лампочка, железный сердечник.

**Порядок проведения опыта.** Поддерживая с помощью реостата постоянное значение тока в первичной цепи трансформатора, наблюдают увеличение накала лампы и, следовательно, ЭДС индукции во вторичной цепи при замыкании сердечника.

#### 4.29. Движение электронного пучка в магнитном поле катушки с током

**Оборудование:** осциллограф, катушка, ЛАТР.

**Порядок выполнения опыта.** К экрану осциллографа соосно с электронно-лучевой трубкой подносится одна из катушек, используемых в опыте «прыгающие катушки». Ток в катушке регулируется с помощью ЛАТРа. При включенной развертке луча по оси  $X$  на экране можно наблюдать фигуру в виде двух соединенных спиралей, направленных в противоположные стороны (рис. 4.21).



Рис. 4.21

Вид фигуры легко объяснить, помня, что магнитное поле знакопеременно и величина его изменяется по синусоидальному за-

кону. Следует демонстрацию проводить при различных значениях тока питания катушки. Опыт прост в подготовке и хорошо воспринимается студентами.

Демонстрацию следует проводить при неполном затемнении аудитории.

#### 4.30. Отклонение катодных лучей в магнитном поле

**Оборудование:** подковообразный магнит, катодная трубка со щелью и люминесцирующим экраном за щелью, высоковольтный индуктор, провода соединительные.

**Порядок проведения опыта.** Подковообразный магнит подносят к катодной трубке. Наблюдается искривление следа пучка электронов на люминесцентном экране трубки.

#### 4.31. Наблюдение сил, действующих на ток в магнитном поле

**Оборудование:** сосуд с раствором медного купороса и мелкими частицами манки, подковообразный магнит, источник тока ВС-12 (рис. 4.22).

### **Порядок проведения опыта.**

1. Между полюсами дугообразного магнита помещен сосуд с раствором медного купороса и мелкими частицами. Пропускаем постоянный ток последовательно через электролит и наблюдаем вращение раствора, что видно по движению частиц. Опыт наблюдается в проекции.

2. В магнитном поле катушки находится круглый сосуд (чашка Петри) с раствором поваренной соли. Ток (постоянный или переменный) идет последовательно через электролит и катушку. В чашке Петри электрод находится в центре, а второй в виде кольца – вдоль стенки чашки. Возникает вращение раствора за счет увлечения нейтральной компоненты. Опыт иллюстрирует действие силы Лоренца на движущиеся ионы. Для визуализации в чашку насыпается немножко пробковой крошки. Опыт наблюдается в проекции.



Рис. 4.22

### **Выводы**

Лекционные демонстрации по разделу электромагнетизм особенно актуальны, так как только наглядные и эффективные демонстрации, например визуальный показ характера силовых линий для разных конфигураций проводников с током и явлений электромагнитной индукции, позволяют существенно углубить понимание характерных особенностей вихревого характера поля магнитных сил и более глубокого понимания сущности явлений электромагнитной индукции, развивая логику физического мышления и ясность в понимании наблюдаемых проявлений физических эффектов.

### **Контрольные вопросы**

1. О каком свойстве поля вектора магнитной индукции говорит характер силовых линий и в чём различие электростатического и магнитного полей?

2. Как объяснить взаимодействие двух параллельных проводников с током одинаковых и противоположных направлений?

3. Применяя правило левой руки (или тройки векторов), предскажите направление силы,

действующей на проводник с известным направлением тока, помещённый между полюсами магнита.

4. Используя известные правила в магнетизме, предскажите направление вращения рамки с током, помещённой в магнитном поле.

5. Как объяснить явление возникновения ЭДС индукции при наблюдении демонстрации опыта Фарадея?

6. Сформулируйте основной закон явления электромагнитной индукции, от чего зависят направление индуцируемого тока в замкнутых проводниках и величина индуцируемой ЭДС.

7. Поясните физические закономерности в явлении самоиндукции.

8. Где и в каких устройствах используются явления электромагнитной индукции?

9. Объясните физический смысл знака «-», опираясь на правило Ленца.

10. Предскажите направление протекания тока замыкания и тока размыкания.

11. Почему надо опасаться последствий при несоблюдении техники безопасности при размыкании цепей, питающих трансформаторы и электродвига-

тели большой мощности?

12. Поясните принцип действия трансформатора напряжения.

13. Как предсказать направление силы, действующей на электрический заряд, движущийся в магнитном поле?

### *Библиографические ссылки*

1. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика : учеб. пособие для вузов. В 10 т. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 4-е изд. стер. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 656 с. – ISBN 5-9221-0123-4 (Т. VIII).

2. Калашников, С.Г. Электричество / С.Г. Калашников. – М. : Наука, 1977. – 592 с.

3. Яворский, Б. М. Курс общей физики. В 3 т. Т. 2 / Б. М. Яворский. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 1996. – 500 с.

4. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 3 т. Т. 2 / И. В. Савельев – М. : Наука, 1978. – 480 с.

5. Трофимова, Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. – М. : Высш. шк., 1990. – 478 с.

6. Физический практикум (электричество и оптика) / под ред. В. И. Ивероновой. – М., 1968. – 353 с.

7. Гробовский, М. А. Лекцион-

ные демонстрации по физике / М. А. Гробовский [и др.] ; под ред. В. И. Ивероновой. – М. : Наука, 1965. – 572 с.

8. Демонстрационное и техническое обеспечение лекций по

физике. Электричество и оптика : метод. указания / Владим. политехн. ин-т ; сост. В. Н. Кунин. – Владимир, 1980. – 40 с.

---



## **РАЗДЕЛ V**

# **КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ**

## 5.1. Вертикальные упругие колебания

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

**Порядок выполнения опыта.** Вертикальные упругие колебания демонстрируют, наблюдая зависимость периода колебаний от массы груза и жесткости пружины (рис. 5.1). Жесткость изменяют, используя разные пружины, а массу – используя различное число одинаковых грузов. Период колебаний регистрируют по секундомеру.

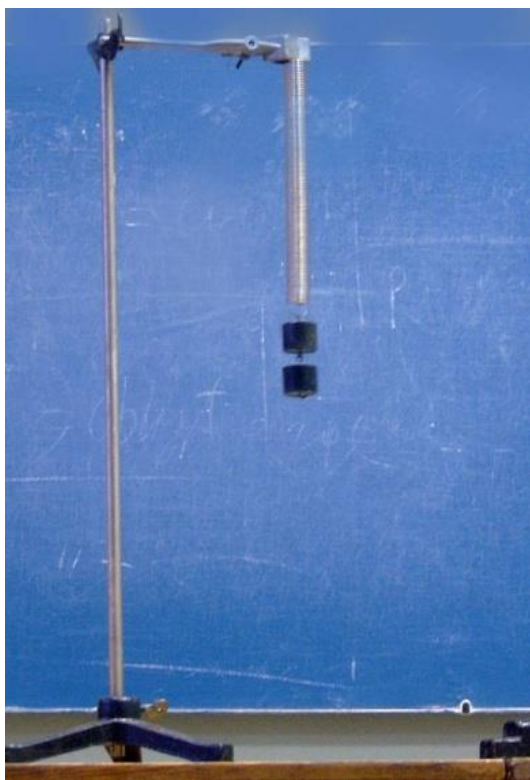


Рис. 5.1

По результатам опыта делают

вывод о зависимости периода колебаний пружинного маятника от жесткости пружины и массы груза.

## 5.2. Вертикальные и крутильные упругие колебания

**Оборудование:** штатив универсальный, пружина, два цилиндра одинаковой массы и размеров, секундомер.

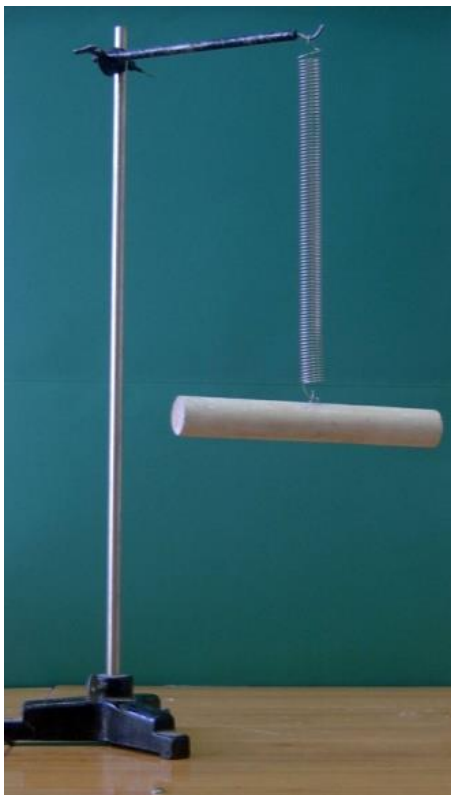
**Порядок проведения опыта.**

1. Наблюдают период вертикальных колебаний цилиндров, подвешенных в двух разных позициях (рис. 5.2, а и б). Период вертикальных колебаний зависит от массы и жесткости пружины. Массы цилиндров равны, поэтому периоды вертикальных колебаний будут одинаковыми.

2. Наблюдают крутильные колебания. В первом случае (рис. 5.2, а) период крутильных колебаний меньше, чем во втором (рис. 5.2, б). Можно сделать вывод, что период крутильных колебаний зависит от момента инерции маятника, или, по-другому, от распределения массы крутильного маятника относительно оси вращения.



Рис.5.2.а)



б)

Рис. 5.2

### 5.3. Механическая запись колебательного движения

**Оборудование:** два штатива универсальных, два стержня, воронка, картонный лист с прикрепленной по поверхности темной тканью, шпагат, песок или манная крупа.

**Порядок выполнения опыта.** Закрепляют на штативах два стержня параллельно друг другу и подвешивают к ним воронку (рис. 5.3). Под воронку на стол кладут лист картона, обвернутый темной тканью. Насыпают в воронку песок или манную крупу. Если воронка будет находиться в положении покоя, а лист картона перемещаться в горизонтальном направлении, то песок, высыпаясь, будет оставлять прямую линию. Если же привести маятник в колебательное движение, а картон перемещать по возможности равномерно в горизонтальном направлении, то на ткани останется след в виде, подобном синусоиде.

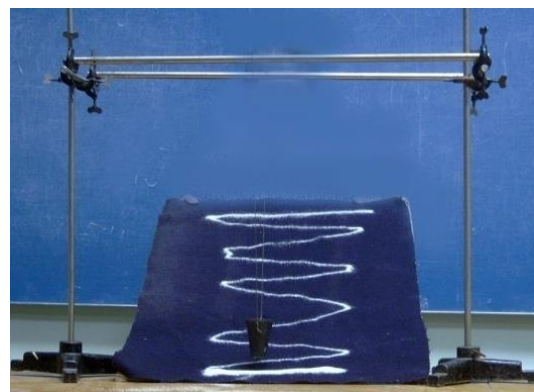


Рис. 5.3

Опыт наглядно демонстрирует возможный способ записи колебательного процесса, а также качественно вид графика колебаний.

#### 5.4. Демонстрация распределения вероятности нахождения классического маятника в различных точках траектории

**Оборудование:** маятник, подвешенный к потолку аудитории или укрепленный на штативе и пять штативов.

**Порядок выполнения опыта.** Устанавливают на демонстрационном столе пять штативов (рис. 5.4), причем средний штатив отмечает положение равновесия маятника.

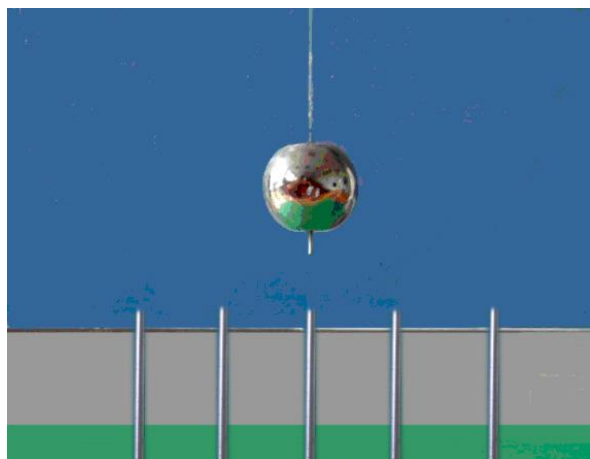


Рис. 5.4

Необходимо отклонить маятник до крайнего штатива. Студенты закрывают глаза. Препода-

ватель через некоторое время отпускает маятник и просит студентов открыть глаза, не согласовывая момент открытия глаз друг с другом (когда кто захочет), через промежутки времени, больший, чем 5 с, и меньший, чем 30 с. Каждый студент должен заранее назначить себе промежуток времени и выдержать его, отсчитывая мысленно секунды. После того как все студенты откроют глаза следует попросить поднять руку тех студентов, кто увидел маятник в положениях разных “окон”, отмеченных штативами.

Группа студентов, увидевшая маятник в областях, прилегающих к положению равновесия, оказывается существенно меньшее той, которая увидела маятник в областях, прилегающих к максимальному отклонению маятника. Опыт эффектно иллюстрирует для классического маятника возрастание вероятности его обнаружения к краям потенциальной ямы и минимум вероятности в центре ямы. По опыту можно построить функцию распределения

$$f(x) = N_i / (\Delta x \sum_{i=1}^n N_i).$$

Здесь  $N_i$  – число наблюдателей, видевших маятник в заданном интервале отклонений  $\Delta x$ ;

$\sum_{i=1}^n N_i$  – общее число студентов, участвующих в эксперименте.

## 5.5. Затухающие колебания

**Оборудование:** штатив с перекладиной, на которой закреплен шарикоподшипниковый узел, стержень металлический, набор пластинок в форме лопаточки, сосуд прямоугольной формы с водой.

**Порядок выполнения опыта.**

Маятник с жестким подвесом (рис. 5.5) имеет снизу лопатку, которая может погружаться при колебаниях в сосуд с водой.

Изменением уровня воды можно менять глубину погружения лопатки. Опыт проводится несколько раз при различной глубине погружения лопатки. С увеличением глубины погружения сила сопротивления растет, и скорость затухания колебаний возрастает. В опыте можно использовать сменные лопатки разной площади. При достаточном погружении лопатки в воду можно наблюдать переход затухающих колебаний в режим апериодического процесса.



Рис. 5.5

С использованием секундомера, измеряя время десяти колебаний, можно продемонстрировать увеличение периода затухающих колебаний по сравнению с колебаниями маятника без воды.

## 5.6. Вынужденные колебания и резонанс

**Оборудование:** электромотор с эксцентриком на валу, установленный на основание, стальные полоски разной длины, закрепленные на общей станине.

**Порядок выполнения опыта.** При вращении оси электромотора с эксцентриком возникают вибрации, которые передаются ста-

нине. При изменении частоты вращения (рис. 5.6), полосы резонируют по очереди. Наблюдение ведется в теневой проекции полосок на экран.



Рис. 5.6

### 5.7. Механический резонанс

**Оборудование:** электромотор с эксцентриком на валу, закрепленный на доске.

**Порядок выполнения опыта.** Механический резонанс можно наблюдать при вынужденных колебаниях закрепленной на демонстрационном столе доски, на которой стоит электромотор с эксцентриком на валу. Число оборотов мотора можно изменять плавно. По результату этого наблюдения оценивается амплитуда колебаний всей системы.

### 5.8. Демонстрация резонанса и сдвига фаз при механическом резонансе

**Оборудование:** колесо с валом, закрепленным в подшипниковый узел колеса, деревянная доска размерами 20×100×1500 мм, свинцовая пластина, струбцины.

**Порядок выполнения опыта.** К упругой доске (рис. 5.7) крепится маховое колесо. Удобно использовать колесо от модели большого демонстрационного гироскопа (ТМ-20). Момент трения вращающегося колеса можно регулировать с помощью барашка. На ободе колеса укрепляется свинцовая пластина. Доска закрепляется на демонстрационном столе струбцинами.

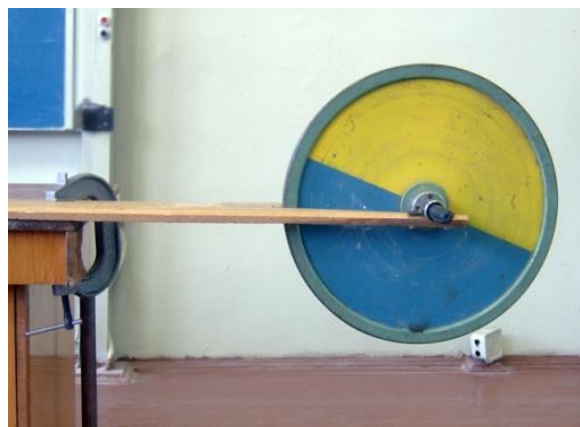


Рис. 5.7

При вращении колеса в результате дисбаланса возникают поперечные колебания упругой доски. При уменьшении скорости вращения в результате трения

происходит переход системы через резонансную частоту. В какой-то момент амплитуда вынужденных колебаний достигает максимального значения. Если держать рукой кусочек мела на удачном расстоянии от колеса, то при касании мелом обода колеса в момент резонанса на ободке появится белая полоска, середина которой будет сдвинута на  $90^\circ$  против хода вращения от положения груза. Для того чтобы полоска была не слишком длинной, необходимо заранее научиться раскручивать колесо так, чтобы амплитуда колебаний доски при переходе через резонанс была около 5 см. Этого можно достичь соответствующим подбором усилия торможения.

Опыт эффектно иллюстрирует также возможность динамического балансирования ротора в условиях, когда момент трения больше, чем момент дисбаланса.

Эта ситуация характерна для условий динамической балансировки быстро-вращающихся деталей, например колес турбин.

Необходимо обратить внимание студентов на то, что при балансировке колеса высверливанием массы необходимо засверлить обод не там, где возникла при резонансе полоска, а под углом  $90^\circ$  к ней по ходу вращения колеса.

## 5.9. Акустический резонанс

**Оборудование:** два камертона, теннисный шарик, подвешенный на штатив.

**Порядок выполнения опыта.** Возбуждают ударом один из двух одинаковых камертонов (рис. 5.8). Второй камертон также приходит в движение, что видно по отскакиванию от него легкого шарика, подвешенного на штативе.

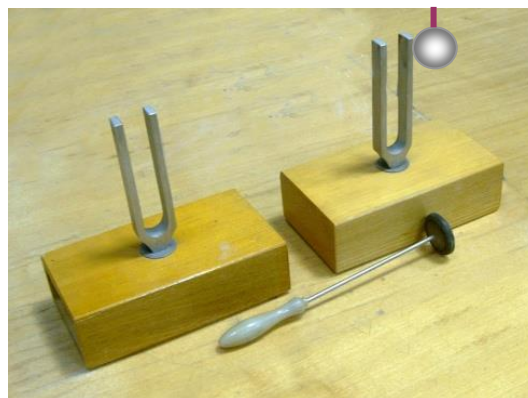


Рис. 5.8

## 5.10. Параметрический резонанс

**Оборудование:** маятник, подвешенный к потолку через шарнир.

**Порядок выполнения опыта.** Через шарнир пропущен шнур, на котором подвешен маятник (рис. 5.9). Другой конец шнура держит демонстратор, и шарнир допускает возможность

удлинения или укорочения шнура подвеса маятника. Маятник отклоняют на небольшой угол и приводят в колебательное движение.

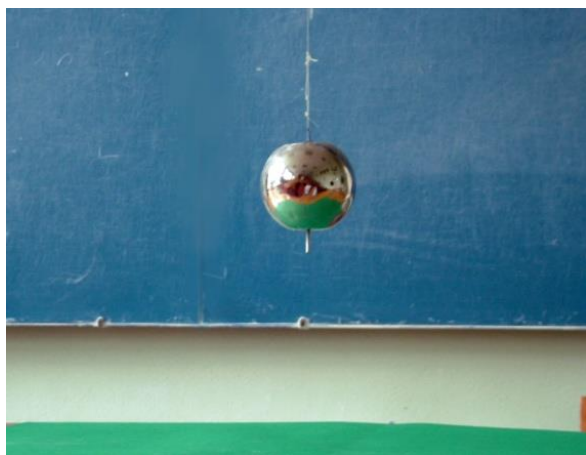


Рис. 5.9

Периодическим изменением длины подвеса маятника можно добиться максимальной амплитуды колебаний (резонанса).

### 5.11. Сложение колебаний

**Оборудование:** электронный осциллограф, два звуковых генератора ГЗ-34, соединительные провода.

**Порядок проведения опыта.** На входы  $X$  и  $Y$  осциллографа подаются сигналы от генераторов (рис. 5.10).



Рис. 5.10

При кратных частотах ( $\frac{f_x}{f_y} = \frac{m}{n}$ ,

где  $m$  и  $n$  – целые числа) на экране осциллографа наблюдаются замкнутые фигуры, называемые фигурами Лиссажу.

### 5.12. Акустические колебания и биения

**Оборудование:** два динамика, два звуковых генератора, осциллограф.

**Порядок проведения опыта.**

1. Динамики соединяют со звуковыми генераторами и прослушивают звуковые колебания на разных частотах (в пределах слышимости от 20 Гц до 20 кГц).

2. Настраивают оба генератора на частоты  $f_1$  и  $f_2$ , близкие друг к другу, и прослушивают звуковые колебания. Отчетливо слышны периодические усиления и ослабления звука – биения.

3. На одном генераторе незначительно изменяют частоту, увеличивая или уменьшая разность частот  $f_1 - f_2$  обоих генераторов, и



прослушивают биения с разной частотой.

4. Подключают дополнительно оба генератора к осциллографу, и на экране осциллографа наблюдают синхронно со звучанием график биения амплитуды складываемых колебаний.

### 5.13. Связанные маятники

**Оборудование:** стержень на штативе, шесть маятников (шарики с прикрепленной нитью каждый).

**Порядок выполнения опыта.** На упругом стержне подвешены на одинаковых расстояниях маятники, которые имеют подвес одинаковой длины (рис. 5.11).

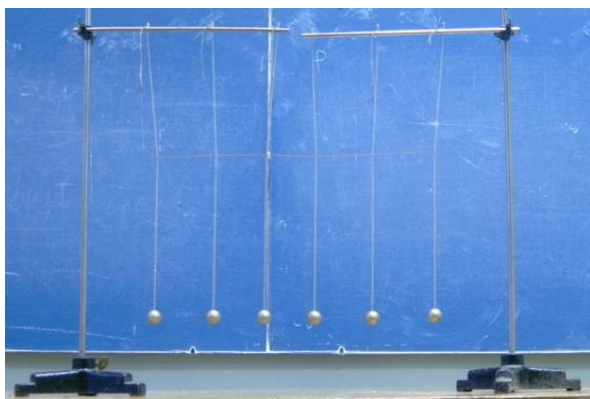


Рис. 5.11

Нити шариков связаны тонкой резинкой, обеспечивая слабый натяг между соседними подвесами маятников. Если привести в колебание один из крайних ша-

риков, то через некоторое время придут в колебательное движение и другие шарики, последовательно передавая энергию колебаний один другому.

### 5.14. Проволочная пружина для демонстраций продольных волн

**Оборудование:** длинная проволочная пружина (диаметр витка 15 – 18 см, диаметр проволоки 2,5 – 3 мм), два штатива.

**Порядок выполнения опыта.** Большая проволочная пружина, подвешенная горизонтально на длинных нитях. Удар по краю пружины позволяет наблюдать отдельный упругий продольный импульс, бегущий по виткам и отражающийся от конца пружины. На этой установке можно наблюдать также стоячие волны.

### 5.15. Возникновение стоячих волн

**Оборудование:** резиновый шнур длиной 4 – 6 м, анкерный крючок, заделанный в стену аудитории.

**Порядок выполнения опыта.** Шнур, привязанный одним концом к крючку, позволяет продемонстрировать отдельный поперечный импульс, бегущий по

шнуру, отражение импульса, а также стоячую волну. Для получения стоячей волны демонстратор берет шнур за непривязанный конец, слегка натягивает и приводит в колебание в вертикальной плоскости. Частоту колебаний и натяжение шнура подбирает заранее. В опыте наглядно показана связь между длиной волны и частотой колебаний.

### 5.16. Резонанс воздушного столба

**Оборудование:** сосуд с водой, цилиндрическая трубка несколько меньшего диаметра, чем диаметр сосуда.

**Порядок выполнения опыта.** Высокий сосуд наполняют почти до краев водой. Цилиндрическую трубку опускают в воду и удерживают там. Затем к открытому концу трубки подносят звучащий динамик и медленно поднимают динамик и трубку, следя за тем, чтобы расстояние между динамиком и открытым концом трубки оставалось все время постоянным. Когда длина воздушного столба в трубке становится равной  $1/4$  длины волны, излучаемой динамиком, вследствие резонанса звук резко усиливается. При дальнейшем подъеме трубки и увеличении длины столба воздуха звук затихает. Когда длина

воздушного столба достигает  $3/4$  длины звуковой волны, излучаемой динамиком, то звук вновь усиливается. Удобно взять трубку с делениями, чтобы длину звуковой волны определить непосредственно из опыта.

### 5.17. Наблюдение эффекта Доплера

**Оборудование:** звуковой генератор, динамик, привязанный к веревке длиной 1 м.

**Порядок выполнения опыта.** К звуковому генератору с помощью длинных и гибких проводов подключают динамик и возбуждают его на частоте ( $f \approx 500$  Гц). В течение 15 – 20 с дают возможность прислушаться к звучанию покоящегося динамика. После этого приводят его во вращение в вертикальной плоскости, держа за свободный конец веревки. Частота вращения примерно 1 – 2 об/с. Радиус вращения 50 – 60 см, а плоскость вращения перпендикулярна рядам студентов. В этом случае динамик то приближается, то удаляется от студентов. При вращении динамика студенты отмечают периодическое изменение высоты тона звука: при движении динамика в сторону студентов высота тона повышается, а при движении в обратную сторону – понижается.

### 5.18. Модель демонстрации групповой скорости распространения волн

**Оборудование:** два плоских растра с разным периодом, проектор, экран.

**Порядок выполнения опыта.** Растры устанавливаются один на другой и размещаются на поверхности проектора (рис. 5.12). Их совмещенное изображение проецируется на экран. При относительном перемещении растров в направлениях, показанных стрелкой, на экране движутся места сгущений и разрежений. Можно взять две гребенки или мужские расчески с разным шагом зубьев. Расческа с частыми зубьями моделирует коротковолновый процесс, а с редкими – более длинноволновый.

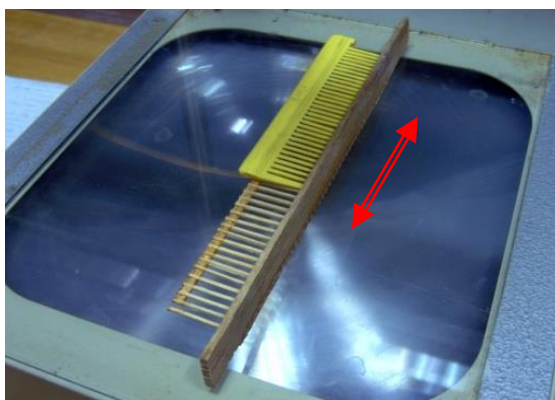


Рис. 5.12

Скорость перемещения сгущений представляет собой групповую скорость. Места сгущений могут двигаться как быстрее, так и медленнее самих расчесок, что соответствует случаю нормальной и аномальной дисперсий.

### 5.19. Волновая ванна

**Оборудование:** плоская ванна из прозрачного материала, наполненная водой, вибратор, источник света.

**Порядок проведения опыта.** Во время опыта изображение поверхности воды наблюдают в проекции на потолке аудитории. Волновая ванна позволяет продемонстрировать колебательные и волновые движения: колебание отдельных частиц, колебание двух частиц с разными фазами, образование волны, распространение волн, стоячие волны. При этом можно изменять частоту и амплитуду колебаний, направление распространения волн, расположение узлов и пучностей стоячей волны.

**Указание.** При подготовке и проведении опытов с волновой ванной следует иметь в виду, что демонстрации будут более выразительными и четкими при определенной частоте колебаний вибратора. Рекомендуется опытным

путем подобрать частоту колебаний вибратора так, чтобы на экране наблюдалась наиболее отчетливая картина.

## 5.20. Волны на воде

**Оборудование:** плоская ванна из прозрачного материала, наполненная водой, вибратор, источник света, набор пластинок, которые можно установить вертикально в ванне.

### Опыт № 1

#### *Порядок выполнения опыта.*

Плоская ванна с водой освещается снизу точечным источником света. В проекции на потолок можно видеть:

- 1) отражение волн;
- 2) преломление волн на границе раздела двух сред.

### Опыт № 2

#### *Порядок выполнения опыта.*

Плоская ванна с водой освещается снизу точечным источником света.

В проекции можно видеть:

- 1) дифракцию волн за малым отверстием в одной из пластинок, установленных в ванне;
- 2) дифракцию волн за экраном (преградой).

### Опыт № 3

#### *Порядок выполнения опыта.*

В проекции можно наблюдать:

- 1) интерференцию волн от двух когерентных источников;
- 2) интерференцию волн от двух отверстий, выполненных в одной из пластинок.

## 5.21. Релаксационный генератор

**Оборудование:** звуковой генератор, осциллограф, релаксационный генератор.

#### *Порядок выполнения опыта.*

Релаксационный генератор подключается к звуковому генератору, напряжение на электроёмкости релаксационного генератора подаётся на осциллограф, на экране которого наблюдаются затухающие пилообразные колебания.

## 5.22. Наблюдение резонанса напряжений и токов

**Оборудование:** катушка с железным сердечником, конденсатор с изменяющейся ёмкостью, электрическая лампочка, соединительные провода.

#### *Порядок выполнения опыта.*

Собирается колебательный контур, в разрыв которого включают

электрическую лампочку и источник тока. Установка позволяет демонстрировать резонанс на частоте 50 Гц. О величине тока судят по накалу лампочки, напряжение и ток измеряют демонстрационными приборами.

### 5.23. Исследование затухающих колебаний

**Оборудование:** Модуль ФПЭ-10 (рис. 5.13), осциллограф.

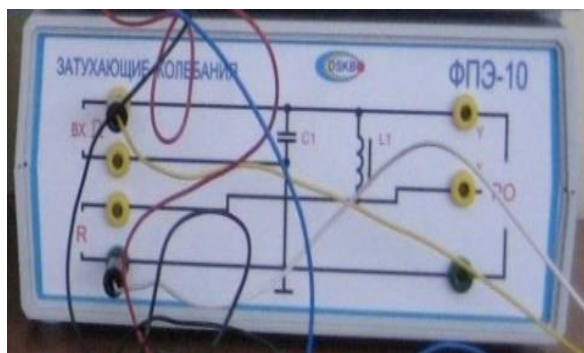


Рис. 5.13

**Порядок проведения опыта.** Модуль позволяет изучать затухающие колебания в последовательном колебательном контуре и резонансные кривые при различных значениях сопротивления контура, измерять период и логарифмический декремент затухания колебаний, определить параметры колебательного контура ( $R$ ,  $C$  и  $L$ ), критическое сопротивление, при котором разряд конденсатора становится апериодическим, и зависимость резонанс-

ной частоты от емкости конденсатора, включенного в контур.

### 5.24. Изучение вынужденных колебаний

**Оборудование:** Модуль ФПЭ-11 (рис. 5.14), осциллограф.

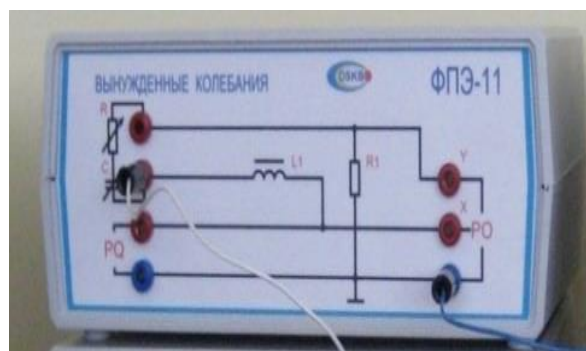


Рис. 5.14

**Порядок проведения опыта.** Модуль позволяет исследовать вынужденные колебания в колебательном контуре, изучать резонансные кривые при различных значениях сопротивления контура, определить зависимость резонансной частоты от величины ёмкости конденсатора, включенного в контур.

### 5.25. Резонанс на высокой частоте

**Оборудование:** лейденская банка, два проводника с подвижной перемычкой, газоразрядная трубка, электрическая лампа.

**Порядок выполнения опыта.** Резонансный контур составлен из лейденской банки и двух проводников с подвижной перемычкой. В разрыв его ставится газоразрядная трубка или маломощная лампа, которая светится при настройке в резонанс.

### 5.26. Прибор для демонстрации скин-эффекта

**Оборудование:** коаксиальный кабель, две электрические лампочки, высокочастотный генератор (например генератор Тесла) и низкочастотный генератор.

**Порядок выполнения опыта.** Несколько витков коаксиального кабеля свернуты в спираль. Одна лампочка присоединена к концам осевого провода коаксиального кабеля, другая – экрана. При помещении этого устройства в высокочастотное поле светится только лампочка, присоединённая к экрану. При помещении в поле низкой частоты светятся обе.

### 5.27. Трансформатор Тесла

**Оборудование:** трансформатор Тесла, газоразрядные трубки.

**Порядок выполнения опыта.** Прибор позволяет демонстрировать свечение безэлектродных трубок, заполненных гелием, неоновом. Безэлектродные трубки

помещают в высокочастотное поле трансформатора Тесла и наблюдают их свечение так же, как свечение трубок с электродами и свечение неоновых ламп.

### 5.28.Опыты с демонстрационным генератором электромагнитных волн

**Оборудование:** генератор электромагнитных волн (рис. 5.15), полуволновый диполь, полуволновой приемник.

#### Опыт № 1

**Порядок выполнения опыта.** Излучателем служит полуволновой диполь. Прием осуществляется на колебательный контур, состоящий из витка проволоки и переменного конденсатора, в контур включена лампа. С помощью этого контура исследуется поле диполя-излучателя.



Рис. 5.15

## Опыт № 2

**Порядок выполнения опыта.** Излучателем служит полуволновой диполь. Приемником является полуволновой вибратор в комплекте с реле и лампочкой. При наличии сигнала светится лампочка. Приема нет (лампочка не светится), когда передающий и приемный диполи располагаются во взаимно перпендикулярных плоскостях.

### 5.29. Комплект приборов для изучения электромагнитных волн (комплект ПЭВ)

**Оборудование:** комплект состоит из генератора электромагнитных волн длиной 3 см, модулированных звуковой частотой 600 Гц, блока питания, диполя и приемника с рупорной антенной, усилителя низкой частоты и динамика.

#### Опыт № 1. Демонстрация направленного излучения и направленного приема электромагнитных волн

**Порядок выполнения опыта.** Включают установку комплект

ПЭВ и, используя приемник, обходят с ним рупорную антенну, убеждаясь в том, что излучение является направленным. Используя приемник с рупорной антенной, поворачивают его вокруг вертикальной оси, убеждаясь в том, что прием является направленным.

#### Опыт № 2. Отражение электромагнитных волн

**Порядок выполнения опыта.** Располагают рупорные антенны излучателя и приемника установки ПЭВ так, чтобы их оси пересеклись; приема сигналов при этом нет. Если в точку пересечения осей поместить металлический лист, наблюдается прием отраженных сигналов. Отражение от диэлектрической пластины получается слабым.

#### Опыт № 3. Отражение электромагнитных волн под разным углом

**Порядок выполнения опыта.** Располагают рупорные антенны

приемника и излучателя установки ПЭВ так, чтобы их оси пересеклись на поверхности стола. Убеждаются в том, что прием есть, если угол падения равен углу отражения и лучи, падающий и отраженный, лежат в одной плоскости.

#### **Опыт № 4. Фокусировка электромагнитных волн**

*Порядок выполнения опыта.* Приемник-диполь установки ПЭВ обеспечивает наиболее громкий прием, если располагается в фокусе вогнутого зеркала.

#### **Опыт № 5. Демонстрация экранирующего действия проводников**

*Порядок выполнения опыта.* Медленно вносят между излучателем и приемником установки ПЭВ металлический лист и наблюдают ослабление и исчезновение звука. При внесении листа из непроводящего материала (например стеклопластика) звук ослабляется.

#### **Опыт № 6. Преломление электромагнитных волн**

*Порядок выполнения опыта.* Приемник-диполь установки ПЭВ обеспечивает наиболее громкий прием сигналов, если располагается на пути луча, преломленного треугольной призмой.

#### **Опыт № 7. Фокусировка и рассеяние электромагнитных волн**

*Порядок выполнения опыта.* Приемник-диполь установки ПЭВ обеспечивает наиболее громкий прием сигналов, если находится в фокусе собирающей линзы. За рассеивающей линзой громкость сигналов уменьшается.

#### **Опыт № 8. Интерференция электромагнитных волн (схема Ллойда)**

*Порядок выполнения опыта.* Приемник-диполь установки ПЭВ принимает прямой и отраженный сигналы металлическим листом. При медленном перемещении отражающего листа или приемника наблюдается усиление



и ослабление сигнала.

**Опыт № 9.**  
**Интерференция**  
**электромагнитных**  
**волн**  
**(схема Френеля)**

*Порядок выполнения опыта.*

Приемник-диполь установки ПЭВ принимает сигнал, отраженный от двух металлических зеркал, расположенных под углом, близким к  $180^\circ$ . При перемещении приемника наблюдается усиление и ослабление сигнала.

**Опыт № 10. Стоячие**  
**электромагнитные**  
**волны**

*Порядок выполнения опыта.*

Приемник-диполь располагается между излучателем и металлическим листом. Медленно перемещая приемник, наблюдают зоны максимальной громкости сигнала и зоны молчания.

**Опыт № 11.**  
**Поляризация**  
**электромагнитных**  
**волн**

*Порядок выполнения опыта.*

Генератор излучает поляризованные волны. Убеждаются в этом,

поворачивая рупор приемника вокруг оси волновода; при этом наблюдается усиление и ослабление сигнала.

**Опыт № 12. Наблюдение**  
**поляризации**  
**электромагнитных волн**

*Порядок выполнения опыта.*

Генератор излучает поляризованные волны, поэтому, вращая поляризационную решетку, расположенную между генератором и приемником, наблюдают усиление и ослабление сигнала.

**Опыт № 13.**  
**Дифракция**  
**электромагнитных**  
**волн**

*Порядок выполнения опыта.*

Приемник-диполь помещают сначала за широким металлическим листом, приема сигналов от генератора при этом нет. Затем заменяют широкий лист узким, прием сигналов за ним наблюдается вследствие дифракции волн.

**Опыт № 14. Наблюдение**  
**дифракции электромагнитных**  
**волн**

*Порядок выполнения опыта.*

Приемник-диполь помещают

против щели (шириной 3 – 4 см) в металлическом экране. Перемещая приемник по дуге вокруг щели, наблюдают усиление и ослабление сигнала.

### **Опыт № 15. Исследование дифракции электромагнитных волн**

#### *Порядок выполнения опыта.*

Между генератором и приемником-диполем ставится металлический экран с двумя или несколькими щелями. Перемещая приемник вокруг щелей, наблюдают центральный и боковые максимумы сигналов.

#### **Выводы**

1. Коллекция демонстраций по теме «Колебания и волны» позволяет в доступной форме и наглядно изучать этот раздел физики.

2. Многие из приведённых физических опытов базируются на простом оборудовании, и поэтому они могут быть легко воспроизведены (в том числе студентами в домашних условиях), что расширяет возможности в изучении физики.

#### **Контрольные вопросы**

1. Какие процессы в природе называются колебательными?

2. Изобразите на графике свободные гармонические колебания.

3. От каких параметров зависит период колебаний: математического, пружинного, физического маятника?

4. При каких условиях протекают вынужденные колебания?

5. Объясните явление резонанса.

6. При каких условиях возникают биения?

7. Изобразите на рисунке график биений и поясните характерные признаки такого колебания.

8. Какие условия необходимо реализовать, чтобы наблюдать фигуры Лиссажу?

9. Что такое волновой процесс?

10. Изобразите графически волну и назовите характеристики волны.

11. Как можно демонстрировать стоячую волну с помощью резинового шнура?

12. Какими свойствами обладает стоячая волна?

13. Какую максимальную длину волны можно получить при создании стоячей волны на гитарной струне?

14. В чём состоит эффект Доплера?

15. Какие явления можно наблюдать, экспериментируя с волнами на поверхности воды?

16. Назовите основные свойства электромагнитной волны.

### ***Библиографические ссылки***

1. Иродов, И. Е. Волновые процессы. Основные законы : учеб. пособие для вузов / И. Е. Иродов. – М. : Лаборатория Базовых знаний, 2001. – 256 с. – ISBN 5-93208-031-0.

2. Стрелков, С. П. Введение в теорию колебаний : учебник / С. П. Стрелков. – 3-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2005. – 437 с. – ISBN 5-8114-0614-2.

3. Механика : учеб. для студ.

вузов / В. А. Алешкевич, Л. Г. Деденко, В. А. Караваев ; под ред. В. А. Алешкевича. – М. : Академия, 2004. – С. 333 – 458. – ISBN 5-7695-1155-9.

4. Савельев, И. В. Курс общей физики : учеб. пособие для вузов. В 3 т. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1978. – 480 с.

5. Астахов, А. В. Курс физики. Механика. Кинетическая теория материи / А. В. Астахов. – М. : Главн. редакц. Физико-матем. литературы, 1977. – С. 172 – 208.

6. Демонстрационное и техническое обеспечение лекций по физике. Электричество и оптика : метод. указания / Владим. политехн. ин-т ; сост. В. Н. Кунин. – Владимир, 1980. – 40 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Современное демонстрационное и техническое обеспечение, используемое в курсе «Колебания и волны»



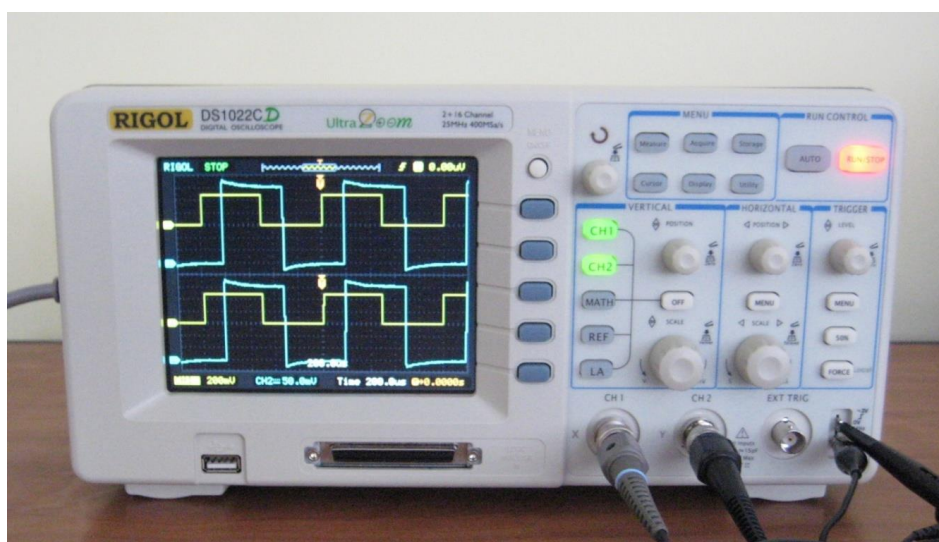
Многоцелевой учебно-демонстрационный комплекс с платформой NI ELVIS – комплект виртуальных измерительных приборов

Основным элементом для выполнения демонстраций является съёмная макетная плата базовой платформы NI ELVIS PROTOTYPING BOARD, служащая для создания и коммутации электрических цепей (2800 гнезд) с помощью навесных дискретных элементов. Наличие съёмной макетной платы позволяет создавать различные электрические цепи в зависимости от конкретной демонстрации. Управление осуществляется как программно, так и в ручном режиме, с использованием элементов управления на лицевой панели.

В электронный комплект учебного оборудования базовой платформы NI ELVIS входят следующие приборы: двухлучевой осциллограф, обладающий всей функциональностью традиционных осциллографов, использующихся в учебных лабораториях; функциональ-

ный генератор, позволяющий выбрать форму сигнала, его амплитуду и частоту; цифровой мультиметр – служит для измерения постоянного и переменного тока и напряжения, активного сопротивления, ёмкости, индуктивности, проверки целостности электрических проводников; регулируемые блоки питания, позволяющие изменять напряжения на их выходах; анализатор спектра – использует аналоговый вход модуля ввода-вывода для измерений, которые выполняются в непрерывном или однократном режимах, при определении спектра можно фильтровать сигнал и накладывать различные окна; анализатор импеданса, позволяющий измерять активное и реактивное сопротивление на заданной частоте.

С помощью переносной видеокамеры можно вывести на экран изображение макетной платы с расположенными на ней радиоэлементами.



Цифровой видеорегиcтpатор с блоком памяти  
(2-канальный осциллограф)

Цифровой осциллограф DS 1022C, имеющий два автономных входа с широким спектральным диапазоном, отображающий исследуемые электрические процессы на экране с возможностью детализации изображений в цвете.



Комплект электронного видеовоспроизведения электрических процессов – телевизор с большой диагональю экрана, осциллограф двухканальный цифровой запоминающий АСК-3116 и ноутбук

Позволяет осуществлять визуальное наблюдение колебательных процессов. Программное обеспечение позволяет выполнять спектральный анализ сигналов, цифровую фильтрацию, автоматическое измерение параметров импульса, сохранение полученных осциллограмм в файлы и т.д. Цифровой запоминающий осциллограф-приставка к компьютеру АСК-3116 предназначена для широкого диапазона осциллографических измерений и используется совместно с персональным компьютером. Программное обеспечение позволяет уширять линии изображения для улучшения наглядности.

**РАЗДЕЛ VI**

**ОПТИКА**

## 6.1. Явление полного внутреннего отражения

**Оборудование:** демонстрационный He-Ne лазер, ванна стеклянная прямоугольная с водой, экран для ванны.

**Порядок проведения опыта.** Луч света от He-Ne лазера направляют на боковую стенку ванны. В воде луч преломляется, а затем полностью отражается от поверхности воды и выходит из ванны с противоположной стороны, испытав еще раз преломление. При уменьшении угла падения луча на границу воды и воздуха до угла, меньше предельного, появляется преломленный луч (воздух можно слегка задымить). При небольшом уровне воды в ванне можно продемонстрировать многократное полное отражение луча от поверхности воды и дна ванны – модель распространения света в световоде.

## 6.2. Сложение цветов спектра

**Оборудование:** призма прямого зрения, прибор в виде поворотных зеркал для сложения цветов спектра, проекционный фонарь, экран (лучше прозрачный).

**Порядок проведения опыта.** Предварительно на экране необходимо получить яркий и четкий сплошной спектр. Для этого собираем установку с проекцион-

ным аппаратом и призмой прямого зрения. Далее помещают за призмой прибор. Расстояние подбирают такое, чтобы весь спектр от красных до фиолетовых лучей попадал на зеркала прибора. Вследствие отражения лучей спектра от зеркал прибора на экране получают отдельные цветные полосы. Не меняя установки, осторожно поворачивают зеркало так, чтобы все отраженные на экране лучи собрать в одну узкую полоску. Цветные лучи, накладываясь один на другой, в результате дадут белый цвет, какой даёт источник света.

## 6.3. Дисперсия (опыт со скрещенными призмами)

**Оборудование:** проекционный фонарь, две призмы прямого зрения, экран (полупрозрачный).

**Порядок проведения опыта.** Непрерывный спектр проецируют на экране через вертикальную щель с помощью призмы прямого зрения. Спектр на экране имеет вид узкой полосы. За первой призмой помещают вторую призму так, чтобы ее преломляющее ребро было горизонтально и спектр на экране отклонялся по вертикали. В результате вследствие дисперсии в призме фиолетовый край спектра поднимается выше красного.



## 6.4. Интерференция волн

**Оборудование:** ванна для проекции с зеркальным дном, осветитель, экран.

**Порядок проведения опыта.** На вибратор надевают насадку с двумя шариками. Вибратор устанавливают так, чтобы оба шарика были наполовину погружены в воду. Приводят в колебание вибратор, включают лампу подсветки, и на экране наблюдают интерференцию.

## 6.5. Полосы интерференции от бипризмы Френеля

**Оборудование:** проекционный фонарь с кинопроекционной или дуговой лампой, бипризма Френеля на диске-ширме, щель раздвижная на диске-ширме, экран проекционный.

**Порядок проведения опыта.** На оптической скамье проекционного фонаря располагают закрепленные раздвижную щель и бипризму Френеля. При помощи конденсора получают на поверхности ширмы с раздвижной щелью, расположенной на главной оптической оси, яркое светящееся пятно от источника света. Пятно должно быть такого размера, чтобы оно полностью покрывало щель. Получив за щелью узкий пучок лучей, направляют его на

ребро призмы, установленной приблизительно на расстоянии 6 см от щели. Ребро бипризмы должно быть расположено строго параллельно щели и находиться с ней в одной вертикальной плоскости, проходящей вдоль главной оптической оси конденсора. Это легко осуществить при помощи рейтеров с приспособлением для малых перемещений. Уменьшают постепенно ширину щели до 0,1 – 0,005 мм, тогда на экране, расположенном от бипризмы на расстоянии 1,5 – 2 м, образуется изображение в виде цветных интерференционных полос. После этого экран слегка поворачивают на некоторый угол в сторону аудитории и получают “растянутое” изображение интерференционных полос шириной 3 – 4 см.

## 6.6. Дифракция от одной щели

**Оборудование:** демонстрационный He-Ne лазер, раздвижная щель, проекционный экран.

**Порядок проведения работы.** Если щель очень узка, то на экране видна размытая полоса, по бокам которой расположены дифракционные полосы (рис. 6.1). При постепенном расширении щели в середине центральной светлой полосы появляется темная полоса, хорошо видимая на значительном расстоянии. При дальнейшем расширении щели

темная полоса раздваивается и в центре картины между двумя темными появляется светлая полоса.



Рис. 6.1

Если расширять щель еще дальше, появляются три темные полосы, четыре и т.д.

### 6.7. Интерференция света в тонких пленках

**Оборудование:** проекционный аппарат, проволочная рамка, штатив, экран проекционный, мыльный раствор.

**Порядок проведения опыта.** Проволочный каркас для получения мыльной пленки лучше брать в виде равнобедренного треугольника, причем неравный угол должен быть обращен вверх. Для демонстрации интерференции света проволочный треугольник укрепляют в штатив в вертикальной плоскости. Сосуд с мыльным раствором подводят к треуголь-

нику снизу и поднимают его так, чтобы треугольник затянулся пленкой. Пленку проецируют на экран в отраженном свете.

На пути светового пучка, отраженного от мыльной пленки, устанавливают объектив на треноге от универсального штатива. Перемещая объектив вдоль этого пучка, получают на экране четкое изображение мыльной пленки с цветными полосами интерференции.

При демонстрации можно пользоваться светофильтром (желательно оранжевым или красным). Помещаем его в узком пучке света за проецирующим объективом: это увеличивает число наблюдаемых полос интерференции по сравнению с белым светом.

**Примечание.** Успех опыта зависит от качества раствора. Рекомендуется 2,5-процентный раствор олеиновокислого натрия (или калия), причем растворять следует в дистиллированной воде при 60 °С; для большей прочности пленок к этому раствору прибавить глицерин (примерно 1 % от общего объема). Красивые потоки, которые видны на экране в виде разноцветных узоров, можно получить, если поднести к пленке на некотором расстоянии зажженную спичку или сигарету.

## 6.8. Дифракция волн

**Оборудование:** ванна для проекции волн, осветитель, экран.

### **Порядок проведения работы.**

На вибратор надевают насадку с одним шариком. На дно ванны на расстоянии 150 – 300 мм от насадки вибратора устанавливают плоские экраны так, чтобы между ними осталась узкая щель. Приведя в колебание вибратор и включив лампу подсвета, наблюдают дифракционную картину. Дифракцию можно видеть и в том случае, когда будут открыты два отверстия. Опыт подтверждает также, что каждую точку фронта бегущей волны можно рассматривать как центр возникновения новых кольцевых волн, которые складываются между собой и образуют фронт бегущей волны (принцип Гюйгенса).

**Указание.** При подготовке и проведении опытов следует иметь в виду, что демонстрации будут более выразительными и четкими при определенной частоте колебаний вибратора. Рекомендуется опытным путем подобрать частоту колебаний вибратора так, чтобы на экране наблюдалась наиболее отчетливая картина.

## 6.9. Дифракция на диске.

### Пятно Пуассона

**Оборудование:** демонстрационный He-Ne лазер, линза собирающая, прозрачная пластинка с диском, проекционный экран, телекамера, телевизор.

**Порядок проведения опыта:** луч света, попадая на линзу, расширяется в виде узкого конуса, падает на пластинку с диском (в качестве диска можно использовать шарик диаметром 2 – 3 мм от подшипника). В результате дифракции на экране наблюдается интерференционная картина.

В центре тени от диска (или шарика) всегда остается светлое пятно, которое называют пятном Пуассона.

С помощью телевизионной системы изображение интерференционной картины демонстрируется аудитории.

## 6.10. Исследование

### деформаций

### с помощью

### поляризованного света

**Оборудование:** проекционный аппарат, два поляроида, тепловой фильтр, винтовой пресс с моделью рельса.

**Порядок проведения опыта.** Собирают установку, аналогичную в опыте с поляризацией света поляроидами. Скрещивают поляро-

иды, чтобы получить на экране почти полное затемнение. Между поляроидами помещают модель рельса из органического стекла, вставленную в винтовой пресс модель сжимают, вращая от руки головку винта. Тогда на экране появляется картина распределения напряжений в модели (рис. 6.2).

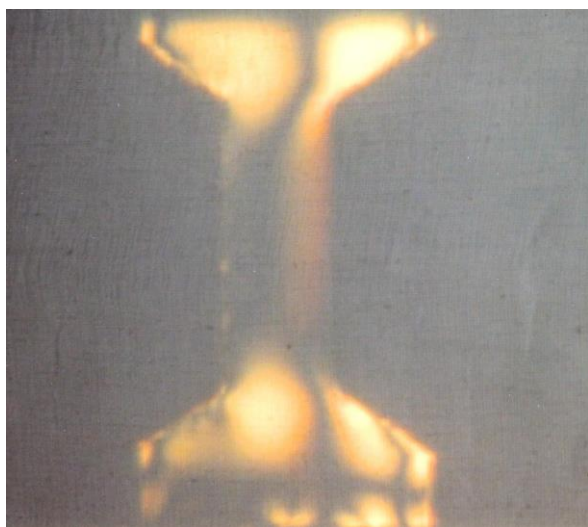


Рис. 6.2

Постепенно ослабляют винт прессы и обращают внимание на то, что картина распределения механических напряжений исчезает. Поле на экране снова становится затемненным.

### 6.11. Рост кристаллов гипосульфита в поляризованном свете

**Оборудование:** проекционный фонарь, гипосульфит, поляроиды, две стеклянные пластины, про-

бирка, электроплитка, сосуд с водой.

**Порядок проведения опыта.** В пробирку насыпают кристаллы гипосульфита. Затем кристаллы расплавляют, нагревая пробирку в горячей воде. Полученный таким образом препарат помещают между стеклянными пластинами и сдавливают.

Проецируют пластинки на экран в поляризованном свете. Вначале жидкость изотропна и при скрещенных поляризаторе и анализаторе проекция жидкости на экране темная. При касании кристаллом гипосульфита жидкости у края стекла с этого места начинается рост кристаллов. Изотропность жидкости нарушается. На экране виден процесс роста кристаллов (рис. 6.3, 6.4), окрашенных в разные цвета, в динамике.



Рис. 6.3



Рис. 6.4

Опыт демонстрирует возможности наблюдения в поляризованном свете.

*Примечание.* Стекла перед опытом должны быть тщательно вымыты и протерты спиртом.

### 6.12. Поляризация света поляроидами. Проверка закона Малюса

*Оборудование:* проекционный аппарат, два поляроида, экран проекционный, теплопоглощающий фильтр.

*Порядок проведения опыта.* Перед сборкой установки закрепляют поляроиды на ширма-дисках. К поворотным кольцам каждого из дисков приклеивают стрелки-указатели так, чтобы при скрещенных поляроидах стрелки располагались перпендикулярно друг другу. Сборку установки на скамье проекционного аппарата начинают с расположения стеклянного теплопоглощающего фильтра перед конденсором освещителя.

Затем включают лампу и в образовавшемся световом конусе от конденсора укрепляют поляроиды ближе к конденсору, чтобы фокус светового пучка, выходящего из конденсора, оказался за вторым поляроидом. Медленно поворачивают один поляроид относительно другого на  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$  и  $360^\circ$ , наблюдая уменьшение освещенности и просветление, демонстрируя соответствие наблюдаемого закону Малюса.

### 6.13. Двойное лучепреломление и поляризация света в кристалле исландского шпата

*Оборудование:* проекционный аппарат, кристалл исландского шпата в оправе, теплопоглощающий фильтр, поляроид со стрелкой-указателем, круглая диафрагма.

*Порядок проведения опыта.* Собирают установку согласно схеме. Следят за тем, чтобы весь пучок света проходил сквозь кристалл. На экране получается не одно, а два изображения отверстия диафрагмы. Кристалл разложил пучок света, идущий от осветителя, на два: на обыкновенный (он проходит кристалл без изменения направления) и необыкновенный (он отклоняется в сторону). Вращая кристалл, закреплённый на ширмо-диске, об-

наруживаем, что изображение обыкновенного луча остается все время на месте, а изображение необыкновенного луча перемещается вокруг первого по некоторой окружности.

Плоскости поляризации у обыкновенного и необыкновенного лучей взаимно перпендикулярны. Чтобы убедиться в этом, поляроид поворачивают на 90, 180, 270 и 360°. На экране будут каждый раз наблюдаться поочередные гашения то одного, то другого изображений, получаемых от обыкновенного и необыкновенного лучей.

#### 6.14. Дифракция на дифракционной решетке

**Оборудование:** проекционный аппарат, дифракционная решетка в оправе, экран.

**Порядок проведения опыта.** Луч света дифрагирует на щелях дифракционной решетки, в результате чего на экране получают дифракционную картину (рис. 6.5), представляющую из себя разноцветные полосы – максимумы 0-го, 1-го, 2-го и так далее порядков, разделенные неосвещенными промежутками. В центре светлая полоска (максимум нулевого порядка). Изменяя расстояние между решеткой и экраном демонстрируют изменение положения максимумов на экране.

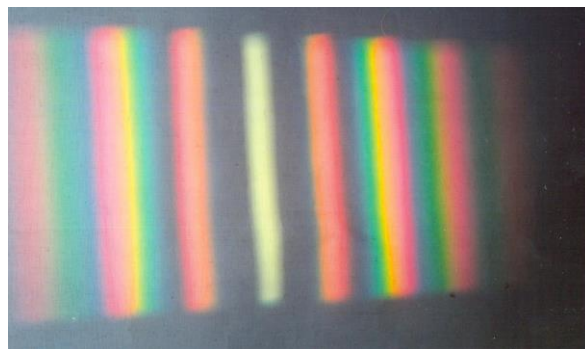


Рис. 6.5

#### 6.15. Интерферометр Майкельсона

**Оборудование:** лазерная установка «Интерферометр Майкельсона» (рис. 6.6).

**Порядок проведения опыта.** Проводят юстировку оптических элементов интерферометра. Настраивают интерференционную картину на камере (сначала на заглушке камеры, затем на ПЗС-матрице камеры). Убеждаемся, что камера работает (исправно горят светодиоды) и подключена к компьютеру. Запускают программу «Интерферометр». Наблюдают картину интерференционных полос на экране монитора (см. рис. 6.6).

Выбирают инструмент рисования линии и проводят линию перпендикулярно интерференционным полосам. Далее нажимают кнопку «Показать профиль». Открывается окно с профилем интенсивности вдоль выбранной линии. Далее перемещают курсоры

вдоль выбранной линии, при этом в текстовых индикаторах отображаются значения интенсивности и положения, по данным значе-

ниям в точках максимума и минимума интенсивностей можно определить значение видности интерференционной картины.



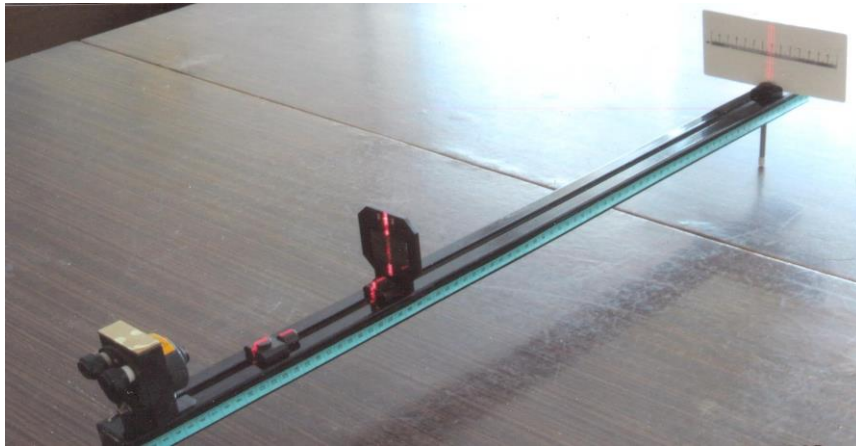
Рис. 6.6

### 6.16. Наблюдение явления интерференции и дифракции на щелях Юнга

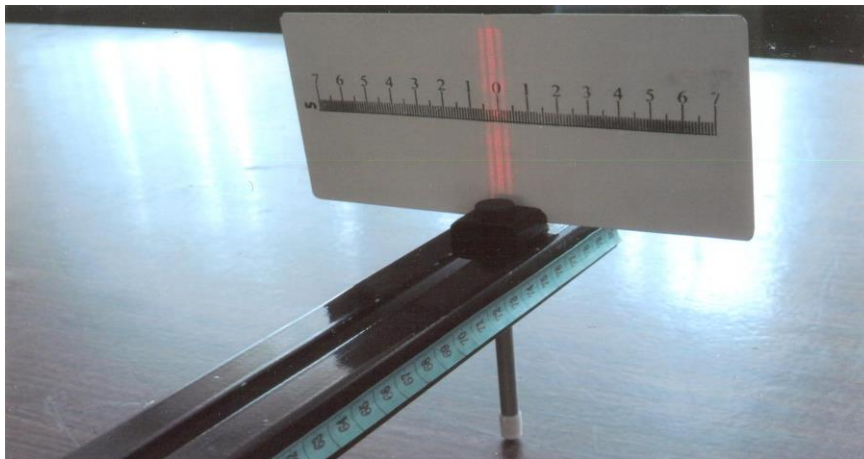
**Оборудование:** малая оптическая скамья, лазерный диод (0,65 нм), цилиндрическая линза-насадка, дифракционный элемент «Щели Юнга», экран (рис. 6.7, а).

**Порядок проведения опыта.** Излучение лазерного диода

направляется на щели дифракционного элемента (мала не только ширина обеих щелей, но и расстояние между ними), происходит интерференционное наложение когерентных пучков от каждой щели. Интерференционная картина (рис. 6.7, б) будет представлять чередование светлых максимумов и тёмных минимумов (интерференционные полосы, параллельные краям щелей).



а)



б)

Рис. 6.7

---

### Выводы

Лекционные демонстрации по разделу «Оптика» делают наглядными и понятными основные закономерности колебательных и волновых процессов.

### Контрольные вопросы

1. Что такое когерентность? В чём состоит временная когерентность? Каков смысл времени и длины когерентности?

2. Каковы условия получения интерференционных максимумов и минимумов при наложении света от двух когерентных источников?



3. Какое явление называется дифракцией? Как объяснить образование максимумов и минимумов с помощью принципа Гюйгенса – Френеля?

4. Чем отличается поляризованный свет от естественного?

5. Объясните закон Малюса для света, прошедшего через два поляризатора.

6. В чём заключается дисперсия света? В чём суть метода скрещённых призм?

7. Что называется спектром функции? Какова связь между спектром функции и спектром в физическом смысле?

### ***Библиографические ссылки***

1. Иродов, И. Е. Волновые процессы. Основные законы : учеб. пособие для вузов / И. Е. Иродов. – М. : Лаборатория базовых знаний, 2001. – 256 с. – ISBN 5-93208-031-0.

2. Карлов, Н. В. Колебания, волны, структуры / Н. В. Карлов, Н. А. Кириченко. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 496 с. – ISBN 5-9221-0205-2.

3. Ландсберг, Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг. – М. : Наука, 1976. – 948 с.

4. Годжаев, Н. М. Оптика / Н.

М. Годжаев. – М. : Высш. шк., 1977. – 432 с.

5. Трофимова, Т. И. Курс физики : учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1990. – 478 с.

6. Галкин, А. Ф. Лекции по физике. В 4 ч. Ч. 4. Колебания, волны, оптика / А. Ф. Галкин ; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. – 100 с.

7. Физика. Оптика : метод. указания к лаб. работам / Владим. гос. ун-т ; сост.: А. Ф. Галкин, О. В. Маковецкая-Абрамова, А. А. Кулиш ; под ред. А. Ф. Галкина. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. – 48 с.

8. Демонстрационное и техническое обеспечение лекций по физике. Электричество и оптика : метод. указания / Владим. политехн. ин-т ; сост. В. Н. Кунин. – Владимир, 1980. – 40 с.

9. Ташлыкова-Бушкевич, И. И. Физика : учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 2. Оптика. Квантовая физика. Строение и физические свойства вещества / И. И. Ташлыкова-Бушкевич. – 2-е изд., испр. – Минск : АСАР, 2010. – 240 с. – ISBN 978-985-6711-61-2.

## ПЕРЕЧЕНЬ ДЕМОНСТРАЦИОННЫХ ОПЫТОВ

1. Демонстрация векторного характера скорости
2. Сложение движений
3. Поступательное и вращательное движения
4. Свободное падение тел в вакууме
5. Демонстрация одновременности падения тел по параболе и вертикали
6. Уменьшение и увеличение веса при движении тела с ускорением
7. Второй закон Ньютона
8. Третий закон Ньютона
9. Инерция покоя груза на нити
10. Инерция покоя груза на горизонтальной поверхности
11. Демонстрация инертности тел
12. Инерция покоя и движения
13. Полет ракеты (закон сохранения импульса)
14. Движение тела в поле центральных сил
15. Закон сохранения механической энергии
16. Маятник Максвелла
17. «Мертвая петля»
18. Упругий и неупругий удары
19. Зависимость момента инерции от распределения масс
20. Момент инерции при вращении как аналог массы при поступательном движении
21. Зависимость центробежной силы от массы тела и радиуса вращения
22. Центрифуга
23. Маятник Обербека, проверка уравнения вращательного движения абсолютно твёрдого тела относительно неподвижной оси
24. Наблюдение прецессии оси гироскопа
25. Иллюстрация основного закона динамики вращательного движения
26. Прецессия вращающегося колеса (опыт № 1)
27. Прецессия вращающегося колеса (опыт № 2)
28. Иллюстрация закона сохранения момента импульса на скамье Жуковского
29. Гироскопическая монорельсовая дорога

30. Свободные оси вращения
31. Вращение спичечного коробка вокруг свободных осей
32. Как поставить яйцо на острый конец
33. Модель идеального газа
34. Движение молекул
35. Давление газа на стенку
36. Броуновское движение
37. Зависимость давления газа от объема
38. Модель трёхмерного фазового пространства
39. Модели молекул идеального газа
40. Получение статистического среднего значения
41. Получение «сухого льда»
42. Охлаждение газа при адиабатическом расширении
43. Воздушное огниво
44. Диффузия газов
45. Диффузия газов через пористую стенку
46. Теплопроводность газов
47. Теплопроводность бумаги
48. Теплопроводность воды и стекла
49. Теплопроводность металла и стекла
50. Внутреннее трение в газе
51. Кристаллизация переохлажденной жидкости
52. Рост кристаллов гипосульфита в поляризованном свете
53. Силы поверхностного натяжения
54. Критическое состояние эфира
55. Опыты с жидким кислородом. Кислород как реальная жидкость
56. Механические свойства веществ при низких температурах
- 57.** Наблюдение электрических сил
- 58.** Взаимодействие разноименных и одноименных зарядов
- 59.** Разделение зарядов при электризации тел
- 60.** Силовые линии электрического поля
- 61.** Механическое действие катодных лучей
- 62.** Зависимость ионной проводимости от концентрации электролита
- 63.** Зависимость ионной проводимости от температуры
- 64.** Проверка закона Джоуля – Ленца

65. Распределение зарядов на конденсаторах при их параллельном соединении
66. Зависимость емкости конденсатора от расстояния между пластинами и проницаемости диэлектрика
67. Зависимость емкости проводника от его размеров
68. Реактивные силы при истечении заряда с острия
69. Зависимость поверхностной плотности электрических зарядов от кривизны поверхности проводника
70. Поверхность проводника и его объем эквипотенциальны
71. Экранирующее действие проводников
72. Вещества-проводники тока и вещества-изоляторы
73. Работа электрических сил
74. Влияние сетки на анодный ток лампы
75. Наблюдение тихого разряда в газе
76. Зависимость электропроводности от температуры
77. Появление разности потенциалов при прохождении тока
78. Ионная проводимость стекла при нагревании
79. Истечение заряда с проводника
80. Передача заряда проводнику нанесением его на внешнюю поверхность проводника
81. Передача заряда проводнику, внесение его внутрь проводника
82. Измерение разности потенциалов с помощью пламенного зонда
83. Разделение зарядов в процессе электрической индукции
84. Определение знака заряда на электрометре, используя явление электрической индукции
85. Демонстрация поляризации диэлектрика
86. Принцип действия электрического фильтра
87. Наблюдение тлеющего разряда
88. Свечение неоновой лампы
89. Наблюдение дугового разряда
90. Свечение спектральных трубок
91. Наблюдение безэлектродного разряда
92. Магнитное поле тока
93. Магнитные силовые линии постоянных магнитов

94. Действие магнитного поля на ток
95. Действие магнитного поля на контур с током
96. Катушка с током в неоднородном магнитном поле
97. Взаимодействие токов через их магнитные поля
98. «Прыгающие катушки»
99. Изменение магнитного поля ферромагнетиком
100. Превращение ферромагнетика в парамагнетик в точке Кюри
101. Наблюдение ЭДС индукции при относительном движении магнита и катушки
102. Наблюдение ЭДС индукции при включении и изменении тока
103. Наблюдение ЭДС индукции при изменении магнитного потока
104. Наблюдение ЭДС индукции при изменении магнитного поля катушки с помощью железного сердечника
105. Обратимость электродвигателя и генератора
106. Демонстрация правила Ленца при возникновении индукционного тока
107. Индукция в сплошных проводниках (токи Фуко)
108. Демонстрация возникновения вихревых токов, правила Ленца и эффекта магнитной индукции катушки
109. Взаимодействие вихревых токов и магнита
110. Увлечение проводника бегущим магнитным полем
111. Возникновение противоэдс при работе электромотора
112. Наблюдение ЭДС самоиндукции при размыкании цепи
113. Наблюдение ЭДС самоиндукции при размыкании и изменении тока
114. Изменение индуктивности катушки введением железного сердечника
115. Зависимость взаимной индукции катушек трансформатора от магнитного сопротивления сердечника
116. Демонстрация разветвления магнитного потока
117. Зависимость магнитного потока от магнитного сопротивления
118. Движение электронного пучка в магнитном поле катушки с током
119. Отклонение катодных лучей в магнитном поле

120. Наблюдение сил, действующих на ток в магнитном поле
121. Вертикальные упругие колебания
122. Вертикальные и крутильные упругие колебания
123. Механическая запись колебательного движения
124. Демонстрация распределения вероятности нахождения классического маятника в различных точках траектории
125. Затухающие колебания
126. Вынужденные колебания и резонанс
127. Механический резонанс
128. Демонстрация резонанса и сдвига фаз при механическом резонансе
129. Акустический резонанс
130. Параметрический резонанс
131. Сложение колебаний
132. Акустические колебания и биения
133. Связанные маятники
134. Проволочная пружина для демонстраций продольных волн
135. Возникновение стоячих волн
136. Резонанс воздушного столба
137. Наблюдение эффекта Доплера
138. Модель демонстрации групповой скорости распространения волн
139. Волновая ванна
140. Волны на воде
141. Релаксационный генератор
142. Наблюдение резонанса напряжений и токов
143. Резонанс на высокой частоте
144. Прибор для демонстрации скин-эффекта
145. Трансформатор Тесла
146. Опыты с демонстрационным генератором электромагнитных волн
147. Комплект приборов для изучения электромагнитных волн
148. Явление полного внутреннего отражения
149. Сложение цветов спектра

- 150. Дисперсия (опыт со скрещенными призмами)
- 151. Интерференция волн
- 152. Полосы интерференции от бипризмы Френеля
- 153. Дифракция от одной щели
- 154. Интерференция света в тонких пленках
- 155. Дифракция волн
- 156. Дифракция на диске. Пятно Пуассона
- 157. Исследование деформаций с помощью поляризованного света
- 158. Рост кристаллов гипосульфита в поляризованном свете
- 159. Поляризация света поляроидами. Проверка закона Малюса
- 160. Двойное лучепреломление и поляризация света в кристалле исландского шпата
- 161. Дифракция на дифракционной решетке
- 162. Интерферометр Майкельсона
- 163. Наблюдение явления интерференции и дифракции на щелях Юнга

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учебно-наглядное пособие посвящено основной задаче лекционных экспериментов и демонстраций, состоящей в обеспечении важного этапа процесса познания – живого созерцания. Следует различать лекционные демонстрации и лекционные эксперименты.

Показано, что лекционный эксперимент представляет собой количественный опыт, выполненный лектором или демонстратором для подтверждения или получения количественных соотношений. В лекционном эксперименте можно вычислить соответствующую ошибку опыта. Эксперимент предполагает использование измерительных приборов, с помощью которых получают численные величины значений физических величин, причем таких приборов, чтобы каждый студент потока мог контролировать демонстратора, самостоятельно считывая показания приборов. Однако лекционным экспериментом следует считать и такие опыты, в которых не используются какие-либо измерительные приборы, но количественный результат тем не менее получают соответствующей количественной статистической обработкой результатов наблюдений. В учебно-наглядном пособии показано, что наиболее полезны с педагогической точки зрения лекционные демонстрации и эксперименты, которые:

- 1) прямым образом демонстрируют изучаемое явление;
- 2) хорошо воспринимаются и усваиваются студентами;
- 3) хорошо видны с любого места большой физической аудитории;
- 4) не требуют больших затрат времени и материалов при подготовке к лекции;
- 5) могут быть выполнены без применения уникального оборудования.



## ПОСЛЕСЛОВИЕ

Опыты, вошедшие в картотеку настоящего издания, отобраны на основе учета всех этих требований. Авторы надеются, что учебно-наглядное пособие окажется полезным для преподавателей физики вузов с целью обеспечения курса физики современным, квалифицированно осуществленным лекционным экспериментом, а также для студентов дневной и дистанционной форм обучения.

По ряду вопросов, связанных с обеспечением курса физики современным лекционным экспериментом, можно порекомендовать обратиться к литературе, указанной в рекомендательном библиографическом списке.

## РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Активная физика Электронный ресурс. – Режим доступа: <http://www.casedu.unibel.by/> (дата обращения: 10.02.2019).

2. Аниськин, В.Н. Видеокомпьютерное моделирование в преподавании физики Электронный ресурс. / В.Н. Аниськин. – Режим доступа: <http://itfm.ulstu.ru/Docs/21/1/> (дата обращения: 10.02.2019).

3. Беляева, Н.В. Применение новых информационных технологий с целью формирования у учащихся умений и навыков постановки и проведения физического эксперимента / Н.В. Беляева // Вестник ПГПУ. Серия «ИКТ в образовании». – 2005. – Вып. 1. – С. 79 – 95.

4. Булаева, О.В. Метод проектов и организация проектной деятельности учащихся по физике : учеб.-метод. пособие / О.В. Булаева, Е.А. Румбешта. – Томск : ТГПУ, 2005. – 20 с.

5. Виноградов, Д.В. Развитие теоретического мышления студентов в процессе обучения физике в педагогическом вузе : дис. ... канд. пед. наук / Виноградов Д. В. – Н. Тагил : [б.и.], 2005. – 170 с.

6. Говорков, А.В. Использование автоматизированных компьютерных комплексов для повышения эффективности учебного физического эксперимента по механике : дис. ... канд. пед. наук / Говорков А. В. – Курган : [б.и.], 2004. – 147 с.

7. Дистанционное образование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zoovet.kharkov.ua/rus/prep/dist/statti/stat01/l.htm> (дата обращения: 10.02.2019).

8. Зенкина, С.В. Компьютерное тестирование при оценке уровня учебных достижений студентов / С.В. Зенкина // Стандарты и мониторинг в образовании. – 2007. – № 1. – С. 30 – 32.

9. Ильин, В.А. История физики : учеб. пособие для вузов / В.А. Ильин. – М. : Академия, 2003. – 269 с.

10. Карбелашвили, Н.О. Разработка и применение интерактивных информационных обучающих систем на основе современных программных средств [Электронный ресурс] / Н. О. Карбелашвили. – Режим доступа: <http://kofan.narod.ru/mag/N1/Karbel.htm> (дата обращения: 10.02.2019).

11. Кечиев, Л. Н. Методы и средства построения образовательного портала технического вуза / Л.Н. Кечиев, Г.П. Путилов // Открытое образование. 2002. – № 2. – С. 34 – 41.

12. Климовский, А. Б. Использование информационных технологий в учебном процессе / А.Б. Климовский. – Режим доступа: <http://itfin.ulstu.ni/Docs/4/1/> (дата обращения: 10.02.2019).

*Учебное электронное издание*

ГАЛКИН Аркадий Федорович  
ГРУНСКАЯ Любовь Валентиновна  
ДОРОЖКОВ Владимир Васильевич

ФИЗИКА В ЛЕКЦИОННЫХ ДЕМОНСТРАЦИЯХ

Учебно-методическое пособие

*Издается в авторской редакции*

**Системные требования:** Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/7/8/10; Adobe Acrobat Reader; дисковод CD-ROM; 5,67 Мб. Загл. с титула экрана.

Тираж 42 экз.

Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
Изд-во ВлГУ  
rio.vlgu@yandex.ru

Институт прикладной математики, физики и информатики  
кафедра общей и прикладной физики  
pmibn(@)vlsu.ru  
grunsk@vlsu.ru  
vlsudorozhkov@mail.ru  
arkad47@mail.ru