

М.В. Семенов, А.А. Якута

**МЕХАНИКА.
ЛЕКЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ**

Под редакцией проф. А.М. Салецкого

*Допущено УМО по классическому университетскому образованию РФ
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки 011200 – Физика
и по специальности 011501– Астрономия*

Москва
Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова
2013

УДК 53.07 (075.8)
ББК 22.3

Семенов М. В., Якута А. А.. **Механика. Лекционный эксперимент**: Под ред. А. М. Салецкого / Учебное пособие. М.: Физический факультет МГУ, 2013. – 352 с.

В пособии содержатся описания более 360 лекционных экспериментов, которые могут демонстрироваться при чтении лекций по разделу «Механика» курса общей физики.

Пособие разбито по главам в соответствии с программой раздела «Механика». В начале каждой главы имеется краткое введение со ссылками на основные учебники по этому разделу курса общей физики. Описания лекционных экспериментов предваряются методическими указаниями и техническими пояснениями для лекторов и лекционных ассистентов, позволяющими формировать наборы демонстраций, которые наиболее соответствуют темам лекций. В пособии подробно описаны как классические лекционные демонстрации, так и новые автоматизированные количественные демонстрационные эксперименты по механике, показываемые с использованием датчиков физических величин и компьютера. Описания практически всех демонстрационных экспериментов снабжены фотографиями или рисунками.

Учебное пособие предназначено лекторам, читающим курс общей физики для студентов физических и технических специальностей университетов, лекционным ассистентам, а также школьным учителям. Пособие также может быть полезно студентам, аспирантам и научно-педагогическим работникам, интересующимся техникой и методикой демонстрационного физического эксперимента.

Рецензенты: д.ф.-м.н. профессор В. П. Кандидов,
д.ф.-м.н. профессор В. Е. Куницын.

Учебное издание

Подписано в печать 06.09.2013 г.
Формат 60×90.16 Объем 22 печ. л. Тираж 50 экз.
Заказ №

Отпечатано в отделе оперативной печати
физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

© Физический факультет МГУ
имени М.В.Ломоносова, 2013.
© Коллектив авторов, 2013.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	13
Глава 1. КИНЕМАТИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ И ТВЕРДОГО ТЕЛА	
1.1. Измерение времени (песочные часы, метроном, секундомер)	15
1.2. Измерение длины (рабочий эталон метра, линейка, штангенциркуль, микрометр, плитки Иогансона)	16
1.3. Равномерное прямолинейное движение	18
1.3.1. Демонстрация равномерного движения при помощи движущейся аудиторной доски (18). 1.3.2. Демонстрация равномерного прямолинейного движения при помощи скамьи с воздушной подушкой (19).	
1.4. Равноускоренное прямолинейное движение	21
1.4.1. Желоб Галилея (21). 1.4.2. Демонстрация равноускоренного прямолинейного движения при помощи скамьи с воздушной подушкой (22).	
1.5. Свободное падение тел	23
1.5.1. Наблюдение свободного падения в стробоскопическом освещении (23). 1.5.2. Сложение равномерного и равноускоренного движений при свободном падении (24). 1.5.3. Измерение ускорения свободного падения баллистическим методом (26).	
1.6. Сложение движений	28
1.6.1. Сложение взаимно перпендикулярных равномерных движений на движущейся аудиторной доске (28). 1.6.2. Сложение взаимно перпендикулярных равномерных движений на бильярдном столе с двумя ударниками (29). 1.6.3. Движение по параболе при свободном падении (29). 1.6.4. Движение струи воды, направленной под углом к горизонту (30). 1.6.5. Сложение равномерно прямолинейного и равномерного кругового движений – «спираль Архимеда» (31).	
1.7. Кинематика твёрдого тела	33
1.7.1. Степени свободы (стержень и цилиндр, гайка и винт, шар) (33). 1.7.2. Различие кругового поступательного и вращательного движения твёрдого тела («колесо обозрения») (34). 1.7.3. Угловая скорость (вращение диска с меткой в стробоскопическом освещении) (35). 1.7.4. Распределение скоростей во вращающемся твёрдом теле (опыт с точилом) (36). 1.7.5. Мгновенная ось вращения (качение параллелепипеда, призмы, цилиндра) (37). 1.7.6. Сложение вращательного движения с поступательным, мгновенная ось вращения (диск с точками) (37). 1.7.7. Сложение угловых скоростей (волчок) (38). 1.7.8. Сложение угловых скоростей (шар с точками) (40).	
Глава 2. ДИНАМИКА ТОЧКИ И СИСТЕМЫ МАТЕРИАЛЬНЫХ ТОЧЕК	
2.1. Инерция тел	42
2.1.1. Подъём гири на нити с ускорением (42). 2.1.2. Инерция висящей гири (43). 2.1.3. Выбивание пластинки из-под шарика (43). 2.1.4. Выбивание ниж-	

- него диска из стопки дисков (44). 2.1.5. Ломание деревянной палки на бумажных кольцах (45). 2.1.6. Выдергивание листа бумаги из-под колбы (45). 2.1.7. Падение гвоздя в бутылку (46).
- 2.2. Второй закон Ньютона 47
 2.2.1. Динамометр и весы различных конструкций (47). 2.2.2. Сложение сил (правило параллелограмма) (49). 2.2.3. Отклонение от прямолинейного движения под действием силы (50). 2.2.4. Деформация тел при ускоренном движении (50). 2.2.5. Труба Ньютона (51). 2.2.6. Тележка с пружинным динамометром (51). 2.2.7. Машина Атвуда (52).
- 2.3. Демонстрации динамических закономерностей при помощи скамьи с воздушной подушкой 53
 2.3.1. Проверка второго закона Ньютона: изучение зависимости ускорения от приложенной силы (53). 2.3.2. Проверка второго закона Ньютона: изучение зависимости ускорения от массы тела (54). 2.3.3. Изучение движения при наличии силы вязкого трения, пропорциональной скорости (54). 2.3.4. Проверка второго закона Ньютона в случае действия переменной силы (56).
- 2.4. Динамика вращательного движения 59
 2.4.1. Возникновение центростремительной силы (вращение шарика на пружине) (59). 2.4.2. Движение по «мертвой петле» (60). 2.4.3. Вращение ведерка с водой (61). 2.4.4. Конусообразная двойная спираль (62). 2.4.5. Реакция изогнутых рельсов (63).
- 2.5. Третий закон Ньютона 63
 2.5.1. Опыт с пружинами, сжатými между двумя маятниками (63). 2.5.2. Тележки Гримзеля (опыт с тележками на рельсах) (64). 2.5.3. Тележки с магнитами на скамье с воздушной подушкой (65). 2.5.4. Опыт с весами (66).
- 2.6. Движение центра масс 67
 2.6.1. Маятник на тележке (67). 2.6.2. Демонстрация движения центра масс при помощи скамьи с воздушной подушкой (68). 2.6.3. Бросание «палки» с лампочкой (69). 2.6.4. Опыт с дощечкой на столе (70).

Глава 3. ДИНАМИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

- 3.1. Маятник Обербека (момент силы и момент инерции) 71
- 3.2. «Непослушная» катушка 72
- 3.3. Скатывание цилиндров с различным распределением массы с наклонной плоскости (полюй, сплошной цилиндры и «ванька-встанька») 72
- 3.4. Маятники Максвелла 73
 3.4.1. Маятник с лопатками для создания трения о воздух (73). 3.4.2. Маятник Максвелла на весах (73). 3.4.3. Маятник Максвелла с фазой вращения в нижней точке (74).
- 3.5. Свободные оси вращения 75
 3.5.1. Бросание параллелепипеда (75). 3.5.2. Вращение стержня, диска, кольца и цепочки на центробежной машине (76).
- 3.6. Опыты на вращающемся столе с воздушной подушкой 76
 3.6.1. Кинематика вращательного движения (77). 3.6.2. Динамика вращательного движения (78). 3.6.3. Проверка теоремы Гюйгенса-Штейнера (79). 3.6.4. Измерение моментов инерции тел различной формы (80).

- 3.7. Гироскопы 81
 3.7.1. Сохранение направления оси вращения свободного гироскопа (карданов подвес, волчок) (81). 3.7.2. Прецессия и нутация гироскопа (82). 3.7.3. Опрокидывающийся гироскоп (гироскоп на вращающемся диске) (84). 3.7.4. Катящийся обруч (85).
- 3.8. Гироскопические силы 85
 3.8.1. Гибкий диск (85). 3.8.2. Монорельсовая дорога (87). 3.8.3. Гироскоп на «качалке» (88). 3.8.4. Гироскоп в шаре (89). 3.9. Волчки (89). 3.9.1. Вращение деревянного «яйца» (89). 3.9.2. Китайский волчок (90). 3.9.3. Кельтские камни (91).

Глава 4. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

- 4.1. Закон сохранения импульса 93
 4.1.1. Опыты с маятниками и с тележками Гримзеля (93). 4.1.2. Отдача пушки (93). 4.1.3. Столкновения тележек на скамье с воздушной подушкой – упругие, частично упругие и неупругие
- 4.2. Закон сохранения момента импульса 95
 4.2.1. Скамья Жуковского (с гантелями и с велосипедным колесом) (95). 4.2.2. Электродвигатель в подшипниках (взаимно противоположное вращение статора и ротора) (96). 4.2.3. Пушка с несимметричным снарядом (97). 4.2.4. Маятник Г.Н. Пешехонова (97). 4.2.5. «Кошка» Конопаткина (98). 4.2.6. Вращающаяся двойная цилиндрическая спираль (98). 4.2.7. Центр удара (реакция оси при ударе) (100).
- 4.3. Закон сохранения и превращения энергии 101
 4.3.1. Движение тележки по наклонной скамье с воздушной подушкой (переход кинетической энергии в потенциальную и обратно) (101). 4.3.2. «Прыгающий» шарик (102). 4.3.3. Маятник Галилея (103). 4.3.4. Опыт А. К. Тимирязева (вращение вала динамо-машины опускающейся гирей) (103).
- 4.4. Упругие и неупругие соударения 104
 4.4.1. Соударения шаров (104). 4.4.2. Соударения тележек на скамье с воздушной подушкой (проверка сохранения кинетической энергии при упругом ударе и измерение потерь энергии при неупругом ударе) (105). 4.4.3. Нелобовой упругий удар бильярдных шаров (105). 4.4.4. Баллистический маятник (106).
- 4.5. Механическое равновесие (прибор А. Б. Млодзеевского). Потенциальная яма и потенциальный барьер 107
- 4.6. Шарик на горке сложного профиля 108

Глава 5. СИЛЫ ИНЕРЦИИ. ДВИЖЕНИЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАЗНЫХ ТИПОВ СИЛ

- 5.1. Отвес на тележке 109
- 5.2. «Прыгающий» шарик на равномерно или ускоренно движущейся тележке 110
- 5.3. Опыты Н. А. Любимова 110
 5.3.1. Свободное падение рамки с грузом на пружине (110). 5.3.2. Свободное падение рамки с маятником (111). 5.3.3. Падение пружины (112). 5.3.4. Падение рамки с парашютом (установившаяся скорость) (112).

- 5.4. Центробежные силы инерции 113
 5.4.1. Модель Земли на валу центробежной машины (113). 5.4.2. Отвесы и свеча на вращающейся подставке (113). 5.4.3. Параболическая поверхность вращающейся жидкости (см. также демонстрацию 8.6.1) (114). 5.4.4. «Бегающая» цепочка (114). 5.4.5. Картонная «пила» (115). 5.4.6. Шарик в сферическом сосуде на центробежной машине (116). 5.4.7. Вращение в горизонтальной плоскости прута со скользящим по нему грузиком (116). 5.4.8. Шары разной массы на горизонтальной штанге (117). 5.4.9. Вращение шарика на спиральной пружине, конец которой прикреплен к оси (см. также демонстрацию 2.4.1) (118). 5.4.10. Вращение шариков разной массы в изогнутой трубке, наполненной маслом (118). 5.4.11. Регулятор Уатта (119). 5.4.12. Самоцентрирующийся гибкий вал (120).
- 5.5. Силы Кориолиса 120
 5.5.1. Качение шарика по вращающемуся диску (120). 5.5.2. Поток воды во вращающейся системе отсчета (121).
- 5.6. Маятник Фуко 122
 5.6.1. Модель маятника Фуко (122). 5.6.2. Маятник с песком на центробежной машине (122). 5.6.3. Опыт с маятником Фуко, подвешенным к потолку аудитории (123).
- 5.7. Водяной маятник (опыт Хайкина). Возникновение приливов 124
- 5.8. Движение под действием центральной силы (125). 5.8.1. Движение стального шарика в поле магнита (125). 5.8.2. Движение шарика в параболической чаше (16). 5.8.3. Маятник с магнитом (126).
- 5.9. Силы трения 127
 5.9.1. Сухое и вязкое трение – сравнение (127). 5.9.2. Наклонный трибометр (128). 5.9.3. Транспортёр (130). 5.9.4. Явление заноса (130). 5.9.5. Явление застоя (131). 5.9.6. Направление силы трения при качении колеса (132). 5.9.7. Падение шариков в воде и глицерине (133). 5.9.8. Всплывание пузырьков воздуха в жидкостях разной вязкости (133). 5.9.9. Внутреннее трение в газах (вращение на центробежной машине картонного диска под другим диском, висащим на нитях) (134).
- 5.10. Реактивное движение 134
 5.10.1. Опыты на воздушной дорожке с отбором части воздуха из-под тележки (134). 5.10.2. «Ракета» (см. также демонстрацию 9.5.2) (135). 5.10.3. Реакция струи (водяной или воздушной) на лодке (135). 5.10.4. Сегнерово колесо (см. также демонстрацию 9.5.4) (136).

Глава 6. КОЛЕБАНИЯ

- 6.1. Свободные колебания 137
 6.1.1. Вертикальные колебания груза на пружине (137). 6.1.2. Крутильные колебания (138). 6.1.3. Сравнение продольных и крутильных колебаний (139). 6.1.4. Математические маятники (140). 6.1.5. Маятник Обербека (крестообразный физический маятник) (140). 6.1.6. Физический маятник (центр качения, приведённая длина маятника) (142). 6.1.7. Колебания ножек камертона в стробоскопическом освещении (143). 6.1.8. Зависимость периода колебаний от «силы тяжести» – ферромагнитный маятник над магнитом (143). 6.1.9. Влияние среды на затухание колебаний маятника (шарик с лопастью и корыто

- с водой) (144). 6.1.10. Гармонические колебания (диск с шариками и стрелками в теневой проекции) в сравнении с колебаниями математического маятника (144). 6.1.11. Колебания пластинки с грузом, закрепленной в тисках (147). 6.1.12. Колебания магнитной стрелки в постоянном магнитном поле (147). 6.1.13. Колебания столба жидкости в U-образной трубке (148).
- 6.2. Запись колебаний 149
6.2.1. Маятник с песком: с затуханием и без него (149). 6.2.2. Бесконтактный электрокамертон, развертка с зеркального барабана (151). 6.2.3. Шлейфовый осциллограф (153). 6.2.4. Осциллографическая запись колебаний груза на пружине (154). 6.2.5. *Запись колебаний с использованием датчика углового перемещения* (155).
- 6.3. Вынужденные колебания 162
6.3.1. Прибор Н.М. Конопаткина для демонстрации вынужденных колебаний (162). 6.3.2. Вынужденные колебания математических маятников («пуговицы») (163). 6.3.3. Язычковые частотомеры (164). 6.3.4. Колебания электродвигателя, подвешенного на пружине (моды колебаний) (165). 6.3.5. Резонанс камертонов с шариком-индикатором (см. также демонстрацию 11.1.2) (166). 6.3.6. Гироскоп с резонирующими пластинками (167). 6.3.7. Колебания фундамента двигателя (168). 6.3.8. Вынужденные колебания струны с электрокамертоном (168). 6.3.9. Качающиеся часы (169).
- 6.4. Автоколебания 170
6.4.1. Анкерные часовые механизмы – маятниковый (Гюйгенса) и баланси́рный (170). 6.4.2. Спираль с током на железном сердечнике (172). 6.4.3. Биметаллическая пластинка с лампочкой (173). 6.4.4. Набор органических труб (см. также демонстрацию 11.1.7) (174). 6.4.5. «Ревун» (сирена Клемана-Дезорма) (175). 6.4.6. Маятник Фруда (на валу) (175). 6.4.7. Бесконтактный электрокамертон (177). 6.4.8. Стол Н. Е. Жуковского (доска на роликах) (179). 6.4.9. Скрипичная струна и смычок (180). 6.4.10. Колебания пластинки под струей воды (опыт А. Б. Млодзеевского) (180). 6.4.11. Возбуждение натянутой резиновой трубки потоком воздуха (181). 6.4.12. Прибор Рухардта с компьютерной моделью автоколебательной системы (182). 6.4.13. Китайский «гусь» («пьющая утка») (185). 6.4.14. Опыт Дарлинга (187).
- 6.5. Релаксационные колебания 187
6.5.1. «Корыто» (187). 6.5.2. Сифон (188). 6.5.3. Грузик с ниткой на валу (189).
- 6.6. Связанные колебания 190
6.6.1. Связанные маятники, нормальные колебания (190). 6.6.2. «Двойной» маятник (192). 6.6.3. Маятник Уилберфорса (переход продольных колебаний в крутильные и обратно) (192). 6.6.4. Динамический демпфер С. Э. Хайкина (193). 6.6.5. Уменьшение качки корабля (194). 6.6.6. *Изучение связанных колебаний и спектральный анализ колебательных процессов с использованием датчика углового перемещения* (195). 6.6.7. Вынужденные колебания в связанной системе с двумя степенями свободы (198).
- 6.7. Параметрическое возбуждение колебаний 199
6.7.1. Параметрическое возбуждение маятника (199). 6.7.2. «Качели» М. А. Грабовского (200). 6.7.3. Параметрическое возбуждение струны электрокамертоном (опыт Мельде) в стробоскопическом освещении (201).

- 6.7.4. Параметрическое возбуждение струны из-за нагрева переменным током (202). 6.7.5. Маятник Г. С. Горелика (203).
- 6.8. Сложение колебаний 204
 6.8.1. Механическая модель (деревянные синусоиды) (204). 6.8.2. Сложение колебаний двух электрокамертонов (205). 6.8.3. Сложение колебаний от двух генераторов на осциллографе (206).
- 6.9. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний 208
 6.9.1. Опыт с шаром (конический маятник) (208). 6.9.2. Маятник с песком (208). 6.9.3. Биения при сложении взаимно перпендикулярных колебаний (опыт А. Б. Млодзеевского) (209). 6.9.4. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний с помощью двух стальных плоских пластинок с прорезями (210). 6.9.5. Фигуры Лиссажу на стержнях прямоугольного сечения с разными соотношениями сторон (212). 6.9.6. Наблюдение фигур Лиссажу на электронном осциллографе (213). 6.9.7. Фигуры Лиссажу, получаемые при развертке лазерного луча в двух взаимно перпендикулярных направлениях (215).
- 6.10. *Нелинейные колебания* 219
 6.10.1. *Получение высших гармоник* (219). 6.10.2. *Комбинационные частоты* (221). 6.10.3. *Зависимость частоты собственных колебаний от амплитуды (неизохронность колебаний)* (222).

Глава 7. УПРУГИЕ СВОЙСТВА ТЕЛ

- 7.1. Закон Гука 224
 7.1.1. Модель кристалла NaCl (шарики с пружинами) (224). 7.1.2. Пружинный динамометр (224).
- 7.2. Типы деформаций (растяжение-сжатие, сдвиг; изгиб, кручение) 225
 7.2.1. Модель из пластин с пружинами (225). 7.2.2. Резиновые модели: брусок с нанесённой сеткой и брусок со штырьками (225). 7.2.3. Деформация висящего тела (226). 7.2.4. Деформация кручения неоднородного вала (227).
- 7.3. Упругая и остаточная деформация 228
 7.3.1. Свинцовая, медная и стальная пластинки, зажатые в тисках (228). 7.3.2. Прибор для растяжения проволоки со шкалой и стрелкой (228).
- 7.4. Стрела прогиба 229
- 7.5. Прочность пустотелой трубки (опыт Умова) 230
- 7.6. Изменение поперечного сечения образца при растяжении 231
- 7.7. Зависимость упругих свойств от температуры (резина и стальная пружина) 231
- 7.8. Зависимость упругих свойств от времени воздействия; среда Максвелла и среда Кельвина-Фохта 233

Глава 8. ГИДРО- И АЭРОСТАТИКА 234

- 8.1. Давление внутри жидкости 234
 8.1.1. Мембранный манометр (234). 8.1.2. Образование фонтана из отверстия в дне сосуда, погруженного в воду (234).
- 8.2. Закон Паскаля 235
 8.2.1. Шар Паскаля (235). 8.2.2. Сосуд с манометрическими трубками (235). 8.2.3. Гидравлический пресс и опыты с ним (236).

8.3. Давление жидкости на стенки сосуда	237
8.3.1. Сосуд Мариотта (237). 8.3.2. Прибор Паскаля (гидростатический парадокс) (238).	
8.4. Сжимаемость жидкости	239
8.4.1. Пьезометр Вайнгольда (239). 8.4.2. Искра в жидкости (240). 8.4.3. Простреливание сосуда с водой (240).	
8.5. Закон Архимеда	241
8.5.1. «Ведро» Архимеда (241). 8.5.2. Демонстрация по Эйхенвальду на весах с гидростатическим взвешиванием (242). 8.5.3. «Присасывание» тела к дну сосуда (243).	
8.6. Распределение давления в жидкости при её вращении	243
8.6.1. Жидкость в цилиндрическом сосуде (см. также демонстрацию 5.4.3) (244). 8.6.2. Легкий и тяжелый шарики в изогнутой трубке с маслом на центробежной машине (см. также демонстрацию 5.4.10) (244).	
8.7. Плавание тел	245
8.7.1. «Картезианский водолаз» (245). 8.7.2. Прогибание поверхности воды под металлическим диском (246). 8.7.3. Шарик Галилея (247). 8.7.4. Остойчивость, метацентрическая высота (247). 8.7.5. Непотопляемость корабля (249).	
8.8. Атмосферное давление	250
8.8.1. Опыт Торричелли (250). 8.8.2. Магдебургские полушария (251). 8.8.3. Раздавливание банки атмосферным давлением (252). 8.8.4. Опыт с переворачиванием стакана с водой, накрытого бумагой (253). 8.8.5. Разрывание бумаги, накрывающей откачиваемый цилиндр (254). 8.8.6. Перекачка воды и раздувание резинового шарика под колоколом воздушного насоса (254). 8.8.7. Зависимость давления от высоты (254). 8.8.8. Подъём мыльных пузырей, заполненных метаном (255). 8.8.9. Газовый сифон (256). 8.8.10. Плавание легкого «судна» в кювете с тяжелым газом (257).	

Глава 9. ГИДРО- И АЭРОДИНАМИКА

9.1. Ламинарное и турбулентное течения жидкости (прибор Поля–Колбанова) .	258
9.2. Обратимость ламинарного течения («фазовая память»)	259
9.3. Уравнение Бернулли (260).	
9.3.1. Трубка с сужением (261). 9.3.2. Сирена Клемана-Дезорма (см. также демонстрацию 6.4.5) (261). 9.3.3. Парение шарика в струе газа или жидкости (262). 9.3.4. Парение шарика в трубке переменного сечения (263) 9.3.5. Втягивающее действие струи (шарик на подвесе) (263). 9.3.6. Пульверизатор и водоструйный насос (263).	
9.4. Статическое и динамическое давление в потоке жидкости и газа	264
9.4.1. Трубки Пито и Прандтля (264). 9.4.2. Гидравлический удар (265). 9.4.3. Сифон, не требующий засасывания (266).	
9.5. Реакция струи	267
9.5.1. Сосуд с водой на тележке (267). 9.5.2. Полет «ракеты» (см. также демонстрацию 5.10.2) (267). 9.5.3. Отклонение изогнутой трубки при истечении из нее воды (268). 9.5.4. Сегнерово колесо (см. также демонстрацию 5.10.4) (268).	
9.6. Эффект Магнуса	269
9.6.1. Тележка с вращающимся цилиндром (модель судна Флетнера) (269) 9.6.2. Скатывание легких цилиндров с наклонной плоскости (270). 9.6.3. По-	

лет вращающегося цилиндра («мёртвая петля») (271). 9.6.4. «Резаный» мяч (271).	
9.7. Течение вязкой жидкости	272
9.7.1. Падение давления вдоль трубы (272). 9.7.2. Распределение скоростей по сечению потока (273).	
9.8. Вихри	273
9.8.1. «Смерч» в воронке с водой (273). 9.8.2. «Смерч», возбуждаемый магнитной мешалкой (274). 9.8.3. Кольцевые вихри в воздухе (дымовые кольца) (274). 9.8.4. Кольцевые вихри в жидкости (275). 9.8.5. Полукольцевые вихри у поверхности жидкости (по Гельмгольцу, «весло») (276).	
9.9. Диск Рэлея	277
9.10. Явление «подсасывания»	277
9.10.1. Свеча за диском, обдуваемым воздухом (277). 9.10.2. Реактивная тележка с отражательной заслонкой на воздушной дорожке – движение «назад» (278).	
9.11. Физические основы авиации	278
9.11.1. Демонстрация обтекания тел на приборе Поля–Колбанова (278). 9.11.2. Возникновение подъемной силы крыла (279). 9.11.3. Опыты с аэродинамической трубой (280). 9.11.4. Демонстрация силы тяги пропеллера (282). 9.11.5. Модель вертолета; авторотация (282).	
9.12. Измерение коэффициентов лобового сопротивления у тел различной формы	283

Глава 10. ВОЛНЫ

10.1. Механические модели бегущих и стоячих волн	288
10.1.1. Модель бегущей волны (288). 10.1.2. Модель стоячей волны (289). 10.1.3. Волновая машина Краснушкина (289). 10.1.4. Маятники Чеботаева (290).	
10.2. Распространение импульсов	291
10.2.1. Продольные волны в пружине (291). 10.2.2. Среда без дисперсии – волны на резиновой трубке (292). 10.2.2.1. Отражение от свободного и закреплённого концов (292). 10.2.2.2. Отражение от препятствия – опыт А.Б. Млодзеевского (292). 10.2.3. Модель среды с дисперсией (293). 10.2.3.1. Волны на висящей велосипедной цепи (293). 10.2.3.2. Бич (293).	
10.3. Волны на поверхности жидкости	293
10.3.1. Капиллярные волны на поверхности жидкости (прибор П. Н. Лебедева, И. Ф. Усагина, Е. В. Богословского) (294). 10.3.2. Капиллярные волны в кювете на кодоскопе (299).	
10.4. Стоячие волны	300
10.4.1. Стоячие волны на струне с электрокамертоном (300). 10.4.2. Стоячие волны на резиновой трубке (в потоке воздуха) (301). 10.4.3. Стоячие волны на стальной линейке (прибор Н. М. Конопаткина) (302). 10.4.4. Ксилофоны (деревянный и металлический) (302). 10.4.5. Набор деревянных пластинок («гамма») (302). 10.4.6. Труба Рубенса (303). 10.4.7. Продольные колебания стержней (303). 10.4.8. Струны (см. также демонстрацию 6.4.9) (304).	

10.5. Фигуры Хладни	305
10.6. Колокол	306
10.7. Поляризация волн.....	306
10.7.1. Волны на резиновой трубке, проходящей через ящик с прорезями (306).	
10.7.2. Модель поляризации – «ёршик» между пластинами (308).	

Глава 11. АКУСТИКА

11.1. Возбуждение звуковых волн	309
11.1.1. Набор камертонов (309). 11.1.2. Камертон с шариком, резонанс двух камертонов (см. также демонстрацию 6.3.5) (310). 11.1.3. Электрокамертоны – наблюдение за колебаниями ветвей камертонов (311). 11.1.4. Сирены Савара (зубчатые колёса) (311). 11.1.5. Дисковая сирена Зеебека (312). 11.1.6. Сирена Каньяр де Ла-Тура (воздушный «поющий» гироскоп) (312). 11.1.7. Набор органных труб (см. также демонстрацию 6.4.4) (313). 11.1.8. Набор свистков – зависимость тона от размера (313). 11.1.9. Патефон (314). 11.1.10. Звуковые генераторы с динамиками (315).	
11.2. Звучание электрического звонка под колоколом форвакуумного насоса ...	315
11.3. Скорость звука (316).	
11.3.1. «Улитка» Н. А. Умова (316). 11.3.2. Акустический интерферометр (316).	
11.4. Акустические резонаторы Гельмгольца	317
11.4.1. Зависимость собственной частоты от размеров резонатора (317). 11.4.2. Зависимость собственной частоты от рода газа (наблюдение биений при сложении волн от одинаковых резонаторов, заполненных воздухом и метаном) (318). 11.4.3. Модель глотки человека, разговор в атмосфере гелия (318). 11.4.4. Зависимость собственной частоты резонатора от температуры газа (319). 11.4.5. Модуляция звука (320). 11.4.6. Акустическое реактивное колесо (320). 11.4.7. Акустическое «захватывание» (321).	
11.5. Звукопроводность твёрдых и жидких тел	321
11.6. Отражение и фокусировка звука – зеркала Пикте	322
11.7. Анализ звука	323
11.7.1. Прибор П. Н. Лебедева (323). 11.7.2. Спектр различных гласных звуков на осциллографе (324). 11.7.3. Анализ звука при помощи компьютера (325).	
11.8. Интерференция звука	325
11.8.1. Прибор Квинке (325). 11.8.2. Сложение волн от двух динамиков, биения (326). 11.8.3. Интерференция звука при отражении от стенки (326). 11.8.4. Интерференция звуковых волн, излучаемых ветвями камертона (327). 11.8.5. Резонанс воздушного столба (328).	
11.9. Эффект Доплера	328
11.9.1. Движущийся камертон на 2 кГц, отражение волн от доски (329). 11.9.2. Опыт с вращающейся органной трубой (329). 11.9.3. Акустический интерферометр («вращение» фигур Лиссажу) (330). 11.9.4. Влияние совместного движения источника и приемника звука на разность фаз между их колебаниями (330).	

11.10. Термоакустические эффекты	331
11.10.1. Молоток Тревельяна (332). 11.10.2. Ложка на куске твердой углекислоты (332). 11.10.3. Газовая (химическая) гармоника (333).	
11.11. Ультразвуковые волны	334
11.11.1. Генерация ультразвука (334). 11.11.2. Ультразвуковой фонтан (335). 11.11.3. Получение эмульсии (336). 11.11.4. Химическое действие ультразвука (разложение КJ) (336). 11.11.5. Дифракция света на ультразвуке (337). 11.11.6. Ультразвуковая установка фирмы «Владис» (337).	
11.12. Компьютерные демонстрации по акустике	338
11.12.1. Осциллограммы и спектры нот гаммы, звуков человеческой речи, различных музыкальных инструментов (340). 11.12.2. Свойства слуха (343).	
Литература	350

ПРЕДИСЛОВИЕ

В Кабинете физических демонстраций кафедры общей физики физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова в течение ряда лет ведется работа по подготовке к изданию нового учебно-методического пособия «Физика. Лекционный эксперимент», предназначенного для преподавателей и лекционных ассистентов. Это пособие должно охватывать разделы «Механика», «Молекулярная физика», «Электромагнетизм» и «Оптика», соответствовать учебным программам по курсу общей физики, разрабатываемым на физическом факультете МГУ в рамках новых образовательных стандартов высшего профессионального образования, и отражать современные тенденции и технологии физического образования.

Отличительной особенностью современных методик преподавания курса общей физики является сочетание традиционных, классических приемов и методов обучения с новыми технологиями, основанными на достижениях современной компьютерной техники. Поэтому на лекциях, наряду с классическими демонстрационными экспериментами, в настоящее время активно используются современные лекционные демонстрации – как модельные, так и количественные. При показе демонстраций последнего типа применяется получение и обработка экспериментальных данных в режиме «он-лайн», то есть непосредственно на лекции. В связи с этим можно говорить о формировании нового класса лекционных демонстраций – автоматизированных количественных демонстрационных экспериментов. Эта тенденция неизбежно должна найти свое отражение в литературе, посвященной технике и методике показа лекционного эксперимента. Новые пособия, посвященные этому вопросу, должны содержать описания не только традиционных лекционных экспериментов, но и современных автоматизированных приборов и установок, разработанных в последние годы. Также эти пособия должны быть как можно более полно иллюстрированы.

Учебно-методическое пособие «Механика. Лекционный эксперимент» разработано в рамках этой идеологии и является первой частью готовящегося к изданию пособия по современному демонстрационному эксперименту. В нем описаны опыты, которые демонстрируются при чтении лекций по разделу «Механика» курса общей физики студентам МГУ имени М.В.Ломоносова. Большая часть этих экспериментов разработана в Кабинете физических

МЕХАНИКА. ЛЕКЦИОННЫЙ 14 ЭКСПЕРИМЕНТ демонстраций сотрудниками физического факультета МГУ, и многие из них были описаны в ранее изданных пособиях по лекционным демонстрациям [1–5]. Для полноты охвата материала описания этих классических экспериментов приведены с небольшими изменениями и в данном пособии. Кроме того, в нем использованы ранее опубликованные авторами описания демонстраций по механике твердого тела и механике сплошных сред [6, 7], и подробно описаны новые автоматизированные количественные демонстрационные эксперименты по механике, показываемые с использованием датчиков физических величин и компьютера [18–27]. В тексте пособия имеется также ряд ссылок на авторские свидетельства на изобретения в области лекционных экспериментов по механике, полученные сотрудниками Кабинета физических демонстраций физического факультета МГУ [8–7]. Описания практически всех демонстрационных экспериментов снабжены фотографиями или рисунками.

Порядок расположения материала в книге в основном соответствует программе раздела «Механика» университетского курса общей физики. В начале каждой главы пособия имеется краткое введение со ссылками на основные учебники по разделу «Механика» УКОФ [28–35]. Описания лекционных экспериментов предваряются методическими указаниями для лекторов и лекционных ассистентов, позволяющими формировать наборы демонстраций, которые наиболее соответствуют конкретным темам лекций по механике.

В Кабинете физических демонстраций физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова в течение многих лет осуществлялись видеозаписи лекционных экспериментов по механике и другим разделам курса общей физики [36]. Эти видеозаписи могут использоваться на лекциях в качестве иллюстративного материала, зачастую заменяющего реальные демонстрационные опыты. Со списками имеющихся видеозаписей можно ознакомиться на веб-сайте кафедры общей физики физического факультета МГУ <http://genphys.phys.msu.ru/video>

Авторы выражают глубокую благодарность заведующему кафедрой общей физики профессору А. М. Салецкому за помощь, внимательное прочтение рукописи данной работы и ценные замечания, а также студенту физического факультета А. М. Сергиенко за фотосъемку большого числа лекционных экспериментов по механике и изготовление ряда рисунков. __

Глава 1 КИНЕМАТИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ И ТВЕРДОГО ТЕЛА

Кинематика – это раздел механики, изучающий механическое движение различных тел безотносительно к причинам возникновения этого движения. Основными задачами, решаемыми в рамках кинематики, являются: определение зависимостей от времени координат, скоростей и ускорений материальных точек; траекторий отдельных материальных точек и состоящих из них твердых тел; установление правил сложения скоростей и ускорений [29, гл. 1, 2].

В соответствии с этим основные демонстрационные эксперименты, описанные в данной главе, посвящены методам измерения времени и длины, закономерностям равномерного и равноускоренного движения материальной точки (включая свободное падение тел), наблюдению сложения различных видов механических движений; основным понятиям и закономерностям кинематики твердого тела (степени свободы, мгновенная ось вращения, угловая скорость и правило сложения угловых скоростей).

1.1. Измерение времени (песочные часы, метроном, секундомер).

Основной задачей кинематики является определение в различные моменты времени положений (координат) движущихся тел в пространстве [28, лекции 1, 2; 30, гл. 1, §§1, 2]. Для решения этой задачи необходимо располагать приборами, позволяющими измерять промежутки времени и длины отрезков.

Для измерения промежутков времени используются различные устройства, которые называются «часами». В качестве примеров таких устройств можно продемонстрировать песочные часы, метроном и электронный секундомер.

Песочные часы представляют собой стеклянную колбу с мелким песком, разделенную посередине тонкой перетяжкой. При переворачивании колбы песок начинает сыпаться из верхней части колбы в нижнюю; момент полного пересыпа-



Рис. 1.1. Песочные часы.

ния песка соответствует истечению отсчитываемого промежутка времени. Таким образом, при помощи данных песочных часов можно отсчитывать только один единственный, заранее заданный интервал времени, а для отсчета различных по длительности интервалов необходимо иметь набор разных по размеру песочных часов (см. рис. 1.1).

Метроном служит для отсчета интервалов времени «на слух». Метроном выполнен в виде пружинного механизма, который приводит в периодическое колебательное движение стержень-маятник



Рис. 1.2. Метроном.



Рис. 1.3. Электронный секундомер.

(см. рис. 1.2). Перемещая по стержню маленький грузик вдоль специальной шкалы, можно известным образом изменять частоту колебаний маятника, и тем самым регулировать длительность отсчитываемых метрономом интервалов времени. Для удобства подсчета числа колебаний маятника механизм метронома устроен так, что по окончании каждой половины периода колебаний раздается громкий щелчок. Метрономом обычно используется также для определения темпа исполнения музыкального произведения.

Более удобны для отсчета времени механические и электронные секундомеры различных конструкций. В них отсчет промежутков времени производится точным пружинным часовым механизмом либо специальной электронной схемой. Результат отсчета времени отражается на шкале, вдоль которой движутся стрелки секундомера (см. рис. 1.3), либо на электронном табло.

1.2. Измерение длины (рабочий эталон метра, линейка, штангенциркуль, микрометр, плитки Йогансона).

Измерение длин отрезков осуществляется с помощью различных приспособлений, позволяющих определять длину с различной точностью. Для первоначальной градуировки приборов, предназначенных для измерения длины, необходимо иметь рабочий эталон

единицы длины [31, гл. 1, §1]. В качестве рабочего эталона метра применяется специально изготовленный металлический стержень (см. рис. 1.4), на поверхности которого нанесено антикоррозийное покрытие и сделаны метки, служащие для измерения длины. Рабочий эталон должен храниться в специальном футляре при определенных температуре и влажности. Поверка рабочего эталона, в свою очередь, осуществляется при помощи так называемых исходных эталонов и вторичных эталонов.



Рис. 1.4. Рабочий эталон метра.

Для непосредственных измерений длины используются различные приборы, в качестве примеров которых можно продемонстрировать линейку, штангенциркуль (см. левый рис. 1.5) и микрометр (см. правый рис. 1.5). Они позволяют определять длину с разной степенью точности (от 1 мм при помощи линейки до сотых долей миллиметра при помощи микрометра).

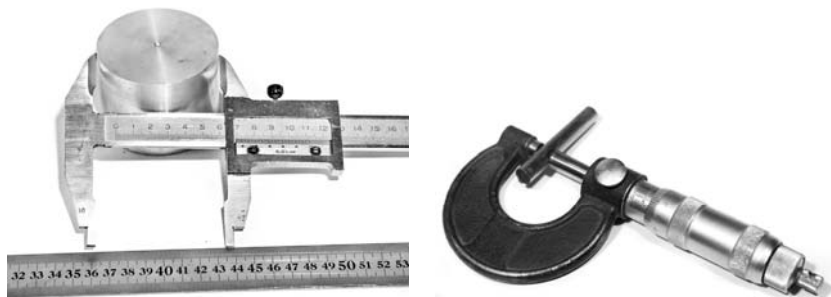


Рис. 1.5. Линейка, штангенциркуль и микрометр.

Для точного измерения величин зазоров удобно использовать так называемые концевые меры длины, или плитки Йогансона¹ (см. рис. 1.6), представляющие собой металлические бруски, противоположные поверхности которых обработаны с высокой точностью, чистотой поверхности и степенью параллельности друг другу. Процедура измерения состоит в последовательном помещении различных

¹ Называются так по наименованию шведской фирмы «Йогансон», которая в 1900 году продемонстрировала их на Всемирной выставке в Париже.

плиток в зазор до тех пор, пока величина зазора с наибольшей степенью точности не совпадет с шириной какой-либо плитки. Плитки Иогансона разной ширины выпускаются в виде наборов. С целью предохранения от внешних воздействий они, подобно рабочему эталону метра, хранятся в специальных футлярах.



Рис. 1.6. Плитки Иогансона.

1.3. Равномерное прямолинейное движение.

Равномерным прямолинейным называется движение по прямой линии, при котором материальная точка за любые равные промежутки времени проходит равные расстояния (или, иначе, движется с постоянной по модулю скоростью). При демонстрации такого движения следует обращать внимание на постоянство модуля скорости тел, движение которых наблюдается.

1.3.1. Демонстрация равномерного движения при помощи движущейся аудиторной доски.

Данную демонстрацию можно показывать в лекционной аудитории, оборудованной аудиторной доской, вертикальная поверхность которой может перемещаться с постоянной скоростью при помощи электродвигателя. Для показа демонстрации необходимы метроном, метровая линейка и кусочек мела. Метроном настраивается таким образом, чтобы он издавал щелчки через каждые 1,5 – 2 секунды. Аудиторная доска приводится в движение, и при каждом ударе метронома демонстратор наносит на доску вблизи ее края метку мелом. Все метки должны располагаться на доске друг под другом. После того, как на движущуюся доску будет нанесено несколько меток, ее нужно остановить и при помощи линейки убе-

даться в том, что расстояния между метками одинаковы. Это и будет свидетельствовать о постоянстве модуля скорости аудиторной доски.

1.3.2. Демонстрация равномерного прямолинейного движения при помощи скамьи с воздушной подушкой.

Одной из основных причин, затрудняющих реализацию в лабораторных условиях равномерного прямолинейного (и других типов) движения, является действие на движущиеся тела сил трения. Практически полностью устранить влияние трения позволяет описанная ниже демонстрационная установка [13].

Основу экспериментальной установки (см. рис. 1.7) составляет скамья с воздушной подушкой длиной около двух метров.

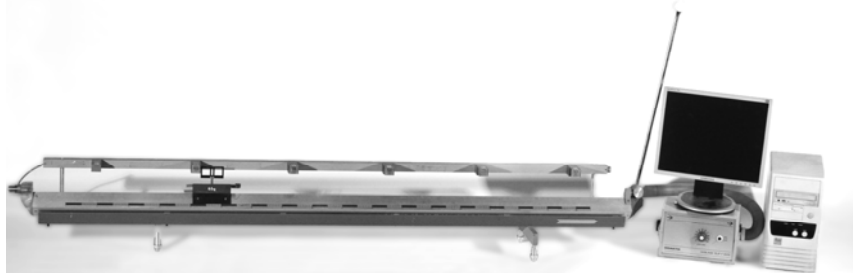


Рис. 1.7. Скамья с воздушной подушкой, подключенная к компьютеру.

Она представляет собой полую тонкостенную дюралюминиевую трубу квадратного сечения, установленную на горизонтальном основании так, что одна из диагоналей сечения вертикальна. Эта конструкция снабжена регулировочными винтами, которые дают возможность изменять наклон скамьи, поворачивая ее в двух взаимно перпендикулярных вертикальных плоскостях. Торцы трубы закрыты заглушками. В одной из заглушек имеется отверстие, через которое в трубу при помощи компрессора нагнетается воздух, выходящий затем через большое количество маленьких отверстий, просверленных в двух ориентированных вверх гранях трубы. Благодаря этому между указанными гранями трубы и специально изготовленными тележками создается воздушная подушка, наличие которой позволяет тележкам «зависать» над скамьей и двигаться по ней практически без трения. Для удобства управления тележками на одном из концов скамьи установлен электромагнитный пускатель, который позволяет удерживать тележку в исходном положении и в нужный момент сообщать ей регулируемую в некоторых пределах начальную скорость.

Установка снабжена набором из шести – восьми датчиков положения типа «световые ворота», позволяющих определять координату тележки в различные моменты времени, а также измерять ее скорость и ускорение. Датчики закреплены на съемной планке, которая устанавливается в горизонтальном положении над скамьей, а на тележках имеется специальная насадка, выполненная в виде «рогов» – четырех вертикальных пластинок известной ширины с известными расстояниями между ними (см. рис. 1.8). Когда тележка, двигаясь по скамье, проходит под датчиком, пластинки последовательно перекрывают и открывают световой поток, что приводит к изменению сигнала, подаваемого соответствующим датчиком. Сигналы, поступающие от датчиков, передаются компьютеру через специальный электронный блок сопряжения, который дает возможность измерять интервалы времени между сигналами и анализировать порядок их поступления. Это позволяет с высокой точностью независимо определять координату, скорость и ускорение тележки в разные моменты времени, а также направление ее движения.



Рис. 1.8. Тележка с насадкой.

Для управления работой блока сопряжения, анализа поступающих от него данных, а также для отображения хода и представления результатов экспериментов используется специально созданная компьютерная программа. Она позволяет проверять исправность блока сопряжения и датчиков, управлять работой электромагнитного пускателя, проводить пробные эксперименты для тестирования и настройки установки, задавать необходимые параметры при проведении демонстрационных экспериментов.

Для демонстрации равномерного движения тележка запускается вдоль скамьи, установленной горизонтально. В результате на экран компьютера по желанию демонстратора могут быть выведены таблица экспериментально полученных величин (независимо измеряются координата x , скорость v и ускорение a тележки в различные моменты времени t), а также графики зависимостей $x(t)$, $v(t)$, $a(t)$, $v(x)$, $a(x)$ и $a(v)$ – не более двух сразу. С использованием данных, отображаемых на графике зависимости $x(t)$ (см. рис. 1.9), при помощи метода наименьших квадратов (МНК) определяется постоянная скорость тележки. При представлении результатов этого эксперимента (а также

всех других экспериментов, демонстрируемых при помощи описываемой установки) экспериментальные данные и результаты их обработки выводятся на экран с указанием погрешностей измерения. Для демонстрации полученных результатов в большой лекционной аудитории используется специальный мультимедийный проектор.

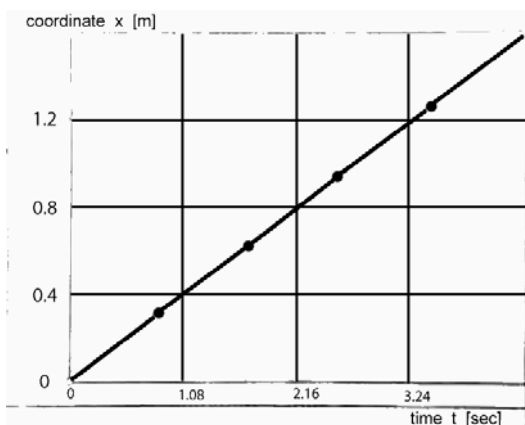


Рис. 1.9. Зависимость координаты от времени при равномерном движении.

1.4. Равноускоренное прямолинейное движение.

Равноускоренным прямолинейным называется движение по прямой, при котором модуль скорости материальной точки за любые равные промежутки времени изменяется на одинаковую величину (или, иначе, материальная точка движется с постоянным по модулю ускорением). При демонстрации такого движения следует обращать внимание на постоянство модуля ускорения тел, движение которых наблюдается. Если непосредственное измерение модуля ускорения тела невозможно, то нужно в определенные моменты времени фиксировать скорости или координаты движущегося тела и проверять, соответствуют ли они закону равноускоренного движения.

1.4.1. Желоб Галилея².

В данной демонстрации рассматривается скатывание шара по наклонному желобу и демонстрируется, что расстояния, которые шар проходит за равные промежутки времени, находятся между собой в определенном соотношении. Впервые такие измерения провел Г. Галилей, и поэтому подобный прибор получил название «Желоб Галилея».

² Г. Галилей (1564 – 1642) – итальянский физик, механик, астроном, философ и математик.



Рис. 1.10. Модель желоба Галилея.

Модель желоба Галилея, при помощи которого он исследовал закономерности равноускоренного движения, представляет собой наклонный желоб из стального швеллера длиной около 4 м, по которому можно скатывать шар (см. рис. 1.10). Отмечая мелом на желобе положение скатывающегося шара через равные интервалы времени,

отбиваемые метрономом, можно проверить соотношение между расстояниями, которые шар проходит за эти промежутки – они относятся, как нечетные числа: $1 : 3 : 5 : 7 \dots$, как это и должно быть при равноускоренном движении.

1.4.2. Демонстрация равноускоренного прямолинейного движения при помощи скамьи с воздушной подушкой.

Демонстрацию, аналогичную опыту с желобом Галилея, можно провести с использованием современного оборудования, которое позволяет практически полностью устранить трение, влияющее на характер движения тела, а также дает возможность непосредственно убедиться в постоянстве ускорения при скатывании тела по наклонной плоскости. Для этого нужно использовать скамью с воздушной подушкой.

При показе этого эксперимента скамью с воздушной подушкой (см. демонстрацию 1.3.2) устанавливается под известным малым углом α к горизонту. Величину угла наклона скамьи можно изменять в пределах от -10^{-2} рад до $+10^{-2}$ рад при помощи регулировочного микрометрического винта со шкалой. Затем вдоль скамьи запускается тележка, после чего на экран компьютера могут быть выведены графики зависимостей кинематических характеристик тележки от времени и друг от друга. С использованием данных, отображаемых на графиках квадратичной зависимости координаты от времени и линейной зависимости скорости от времени, при помощи МНК определяются постоянное ускорение a тележки и погрешность его измерения, которые также отображаются на экране (см. рис. 1.11). Измеренное значение ускорения a тележки можно сравнить с его ожидаемым значением $g \sin \alpha$.

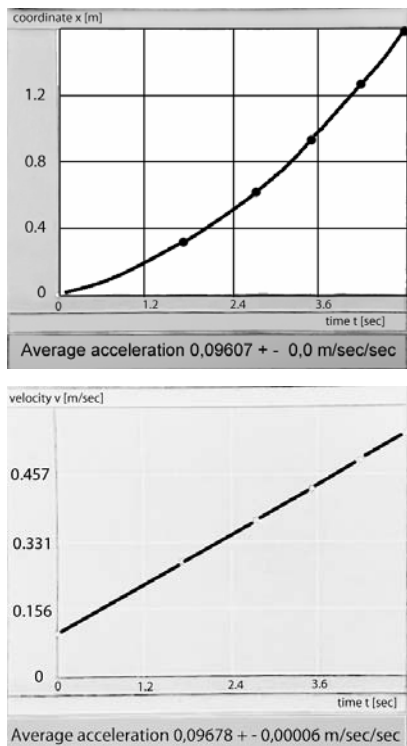


Рис. 1.11. Зависимости координаты и скорости тележки от времени при ее равноускоренном движении вдоль наклонной дорожки.

1.5. Свободное падение тел.

Свободное падение тел является разновидностью равноускоренного движения – в этом случае движение происходит вдоль вертикали с постоянным ускорением, сообщаемым телу Землей и называемым ускорением свободного падения. При демонстрации свободного падения тел следует обращать внимание на общие закономерности, характерные для любого равноускоренного движения.

1.5.1. Наблюдение свободного падения в стробоскопическом освещении.

В данном опыте осуществляется наблюдение за свободно падающими каплями воды. Поскольку ускорение свободного падения довольно велико, то скорость падающих капель возрастает весьма

быстро, и поэтому для определения их

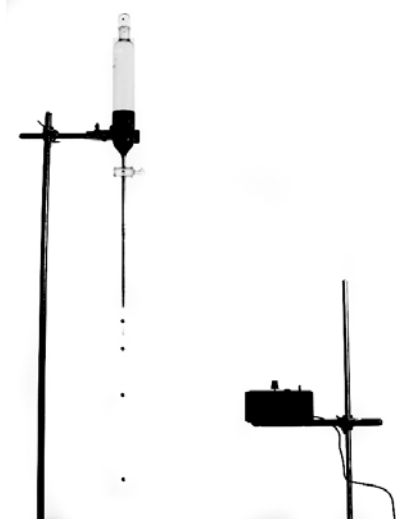


Рис. 1.12. Падение капель в стробоскопическом освещении.

местоположения при падении используется специальный прием – применение стробоскопического освещения. Для демонстрации эксперимента берется капельница с водой, установленная при помощи штатива на высоте около 1,5 м над столом (см. рис. 1.12). Скорость вытекания воды из капельницы должна быть постоянной и такой, чтобы из капельницы в подставленный снизу поддон падало 5 – 7 капель воды в секунду. Затем аудитория затемняется, и падающие капли воды наблюдаются в стробоскопическом освещении. При частоте мигания лампы стробоскопа, равной частоте падения капель, капли воды кажутся неподвижно висящими в воздухе, причем расстояние между соседними каплями тем больше, чем ниже находятся эти капли, как и должно быть при равноускоренном движении. Плавно изменяя частоту мигания лампы стробоскопа, можно добиться медленного кажущегося движения капель в направлении от капельницы к поддону, либо в обратном направлении.

1.5.2. Сложение равномерного и равноускоренного движений при свободном падении.

В данном опыте демонстрируется свободное падение тел при различных начальных скоростях. Эксперимент доказывает, что время свободного падения тела с данной высоты не зависит от наличия у него горизонтальной скорости, то есть равномерное движение по горизонтали и равноускоренное движение по вертикали происходят независимо друг от друга. Для демонстрации эксперимента используется специальный прибор (см. левый рис. 1.13). На деревянном держателе высотой около 1 м установлена горизонтальная площадка с отверстием, вблизи которого укреплена за верхний конец упругая вертикальная прижимная пластинка и на горизонтальной оси подвешен молоточек. Два одинаковых деревянных шарика диаметром

около 15 мм располагаются по разные стороны от пластинки так, что один

из них свободно лежит на площадке, а второй удерживается на уровне поверхности площадки над отверстием в ней благодаря тому, что пластинка прижимает этот шарик к специальному упору. Прибор ставится на край стола таким образом, чтобы оба шарика при показе демонстрации падали на пол. Если отклонить молоточек от положения равновесия и отпустить его, то он ударит по упругой пластинке, нижний конец которой, в свою очередь, сообщит некоторую горизонтальную скорость лежащему на площадке шарика.

Одновременно пластинка в момент удара по ней молоточка перестанет прижимать к упору второй шарик, который провалится в отверстие в площадке и начнет падать вниз с нулевой горизонтальной скоростью (см. правый рис. 1.13). В результате оба шарика, начав одновременно падать с одинаковой высоты с нулевой начальной вертикальной скоростью, одновременно достигнут пола, несмотря на то, что первый из них двигался по параболической, а второй – по вертикальной траектории. Об одновременности падения шариков на пол можно судить по стуку, издаваемому ими в момент касания пола. Для убедительности опыт следует повторить два-три раза. Также можно сначала продемонстрировать падение каждого из шариков по отдельности, а затем показать их совместное движение. Для того чтобы издаваемый шариками при ударе о пол стук был лучше слышен, рекомендуется придерживать молоточек рукой после того, как он ударит по упругой пластинке и сообщит шарикам движение.

Разновидность этого же опыта можно продемонстрировать с помощью другого прибора³. Он представляет собой Г-образный

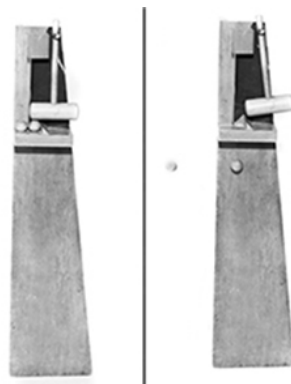


Рис. 1.13. Сложение движений при свободном падении.

³ Данный прибор был предложен и изготовлен сотрудником Кабинета физических демонстраций физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова Н. М. Конопаткиным.

штатив высотой около 2 м, на горизонтальной стреле C которого помещен электромагнитный держатель D , питающийся от источника постоянного напряжения (см. рис. 1.14). Держатель может перемещаться вдоль стрелы. К нему подвешивается стальной шар 1 диаметром около 5 см. На вертикальной стойке штатива укреплена пусковая горка AB , с конца которой может скатываться другой такой же шар 2. Нижний конец A горки и держатель D находятся на одной высоте от пола. У нижнего конца горки установлен размыкатель P , разрывающий цепь питания держателя в момент отрыва шара от горки.

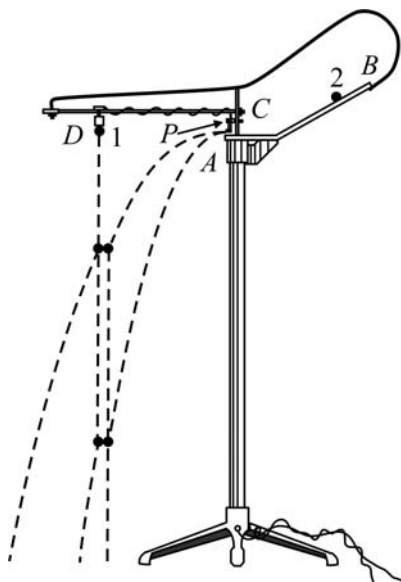


Рис. 1.14. Сложение движений – прибор Н. М. Конопаткина.

Это обеспечивает одновременность начала падения шаров: первый начинает двигаться вдоль вертикали, а второй – по параболе. На пол в месте предполагаемого падения шаров следует заранее поставить поддон с песком. При показе демонстрации нужно, закрепляя один шар на держателе, последовательно скатывать второй шар по пусковой горке с разных начальных высот.

В каждом случае шары будут сталкиваться друг с другом в полете, хотя это будет происходить на разных высотах. Перемещая держатель вдоль стрелы, можно убедиться, что шары сталкиваются в полете вне зависимости от начального расстояния между ними в момент начала полета.

1.5.3. Измерение ускорения свободного падения баллистическим методом.

Наблюдение свободного падения тел может быть использовано для экспериментального определения модуля ускорения свободного падения g . Для измерения g с высокой точностью необходимо использовать специальное электронное оборудование и применять математические методы, позволяющие учесть наличие силы трения о воздух, действующей на падающие тела [23, 27].

Для показа этой демонстрации со скамьи с воздушной подушкой (см. 1.3.2) снимается планка с датчиками и при помощи отвеса устанавливается в вертикальном положении на специальной подставке (см. левый рисунок 1.15). Над верхним датчиком закрепляется механический пускатель (см. правый верхний рисунок 1.15). В ходе эксперимента три шарика одинакового диаметра, но с различными массами m (эбонитовый, алюминиевый и стальной) роняются из пускателя без начальной скорости и пролетают через все датчики, попадая в улавливатель (см. правый нижний рисунок 1.15). При этом для каждого из шариков измеряется зависимость его координаты от времени, по которой, путем ее аппроксимации параболой при помощи МНК, находится среднее ускорение a шарика. Так как падение шариков происходит в воздухе, то значение среднего ускорения для каждого из шариков получается несколько меньше величины ускорения свободного падения g в вакууме. В результате оказывается (это можно строго обосновать), что получаемая в эксперименте зависимость ускорения a шарика от его обратной массы $1/m$ линейна, что позволяет путем ее экстраполяции к бесконечной массе (поскольку трение о воздух не должно влиять на движение гипотетического «бесконечно тяжелого» шарика!) найти g в вакууме. В ходе эксперимента на экране последовательно отображаются измеренные значения средних ускорений шариков и их обратные массы, а соответствующие точки наносятся на график зависимости $a(1/m)$. По окончании измерений на графике строится экстраполирующая прямая, указывается ее коэффициент корреляции, выводятся найденные значения g и средней силы трения шариков о воздух с указанием погрешностей измерения (см. рис. 1.16). Экспериментальная установка позволяет непосредственно на лекции определять ускорение свободного падения g с точностью $\sim 0,1\%$.



Рис. 1.15. Установка для измерения ускорения свободного падения.

1.6.

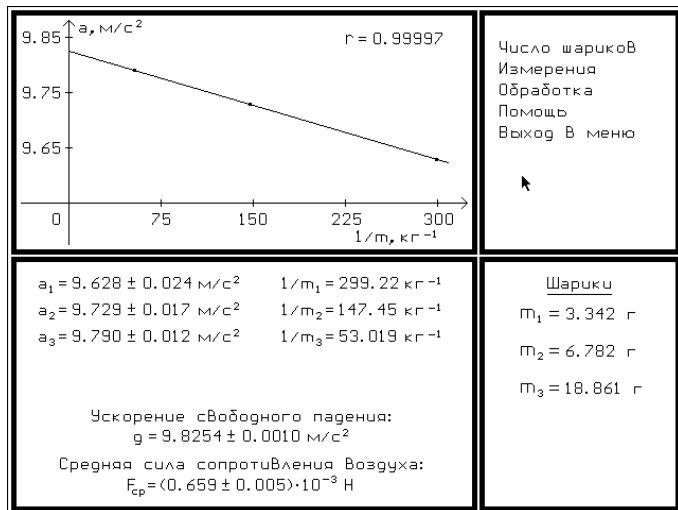


Рис. 1.16. Результаты измерений ускорения свободного падения.

Сложение движений.

Одним из основных принципов механики является принцип независимости движений, который позволяет складывать друг с другом различные механические движения, либо, наоборот, раскладывать сложное механическое движение на несколько более простых. Суть демонстраций по проверке этого принципа состоит в одновременном сообщении телу нескольких (обычно двух) различных по характеру и направлению движений и дальнейшем наблюдении движения, являющегося результатом их сложения.

1.6.1. Сложение взаимно перпендикулярных равномерных движений на движущейся аудиторной доске.

Показывается, что результатом сложения двух взаимно перпендикулярных равномерных прямолинейных движений является также равномерное прямолинейное движение. Данную демонстрацию, подобно демонстрации 1.3.1, можно показывать в лекционной аудитории, оборудованной аудиторной доской, поверхность которой может перемещаться вертикально с постоянной скоростью при помощи электродвигателя. Демонстратор приводит доску в равномерное движение вдоль вертикали и начинает перемещать по поверхности доски кусок мела, двигая его с постоянной скоростью по

горизонтали. В качестве направляющей для мела можно использовать нижний край рамы, которой окружена доска. Мел оставляет на доске прямую линию, наклоненную под некоторым углом к вертикали. Такая траектория мела относительно доски получается в результате сложения двух равномерных взаимно перпендикулярных движений.

1.6.2. Сложение взаимно перпендикулярных равномерных движений на бильярдном столе с двумя ударниками.

Данная демонстрация по своей сути полностью аналогична предыдущей, с той лишь разницей, что движение происходит в горизонтальной плоскости. Для демонстрации используется небольшой переносной прямоугольный бильярдный стол, в одном из углов которого установлены два пружинных ударника (см. рис. 1.17). Бойки удар-



Рис. 1.17. Общий вид установки.

ников направлены вдоль бортов стола, перпендикулярно друг другу. Стол при помощи регулировочных винтов устанавливается горизонтально, после чего деревянный или пластмассовый бильярдный шар кладется в угол стола так, чтобы он касался взведенных бойков обоих ударников. Затем бойки ударников одновременно освобождаются и ударяют по шару, сообщая ему некоторые начальные скорости в направлении вдоль бортов бильярдного стола, перпендикулярно друг другу. После этого шар движется по столу равномерно и прямолинейно под некоторым углом к бортам стола.

1.6.3. Движение по параболе при свободном падении.

В данной демонстрации показывается, что в результате сложения двух взаимно перпендикулярных движений, одно из которых является равномерным (по горизонтали), а другое равноускоренным (по вертикали), тело движется по параболической траектории.



Рис. 1.18. Движение шарика по параболе.

Демонстрационный прибор представляет собой вертикальный стенд, на котором закреплена горка с пускателем, служащая для разгона шарика. На поверхности стенда нанесена координатная сетка и изображена параболическая траектория движения шарика. Вдоль параболы установлены латунные кольца, через которые шарик проходит во время падения (см. рис. 1.18). Они нужны для того, чтобы проконтролировать, действительно ли шарик движется вдоль нарисованной параболы. Перед началом показа демонстрации нужно, пользуясь отвесом, установить стенд на столе вертикально и убедиться, что кольца повернуты так, что их плоскость перпендикулярна касательной к параболе в точке крепления каждого кольца. Затем с помощью регулировочных винтов нужно добиться, чтобы шарик, выпущенный из пускателя, скатывался с горки и, свободно пролетев через все кольца, попадал в лузу (кольцо с сеткой), прикрепленную снизу к стенду. При показе опыт рекомендуется повторить два-три раза для большей убедительности.

Перед началом показа демонстрации нужно, пользуясь отвесом, установить стенд на столе вертикально и убедиться, что кольца повернуты так, что их плоскость перпендикулярна касательной к параболе в точке крепления каждого кольца. Затем с помощью регулировочных винтов нужно добиться, чтобы шарик, выпущенный из пускателя, скатывался с горки и, свободно пролетев через все кольца, попадал в лузу (кольцо с сеткой), прикрепленную снизу к стенду. При показе опыт рекомендуется повторить два-три раза для большей убедительности.

1.6.4. Движение струи воды, направленной под углом к горизонту.

Данный эксперимент, в отличие от предыдущего, позволяет не только продемонстрировать движение по параболической траектории при сложении взаимно перпендикулярных равномерного и равноускоренного движений, но и показать зависимость параметров траектории от начальных условий движения.

При подготовке опыта один конец резинового или силиконового шланга надевается на водопроводный кран, а во второй конец шланга вставляется твердый наконечник (например, отрезок металлической или пластмассовой трубки с сужением на свободном конце). Наконечник закрепляется в штативе таким образом, чтобы он был расположен выходным отверстием вверх и наклонен под некоторым углом к горизонту, а вытекающая из него вода попадала в поддон. При подаче воды из крана в шланг можно наблюдать, что

вытекающая из наконечника струя имеет форму, близкую к параболе (см. рис. 1.19). Уменьшая или увеличивая напор воды, можно наблюдать зависимость дальности полета и высоты подъема струи от ее начальной скорости. Изменяя угол наклона наконечника к горизонту, можно продемонстрировать, что при данном напоре воды максимальная дальность полета струи достигается при угле к горизонту, близком к 45° .

Провести сравнение дальности полета струй воды, направленных под разными углами к горизонту, можно и другим способом. Для этого нужно подсоединить идущий от водопроводного крана шланг к разветвителю-тройнику, а к двум остальным выходам тройника подсоединить одинаковые отрезки шланга, в концы которых вставлены одинаковые наконечники. Эти наконечники закрепляются в штативе рядом друг с другом так, как описано выше, но направляются в одной вертикальной плоскости под разными углами к горизонту (см. рис. 1.20). При подаче воды в шланг она вытекает из обоих наконечников с одинаковой начальной скоростью, но из-за разницы в углах наклона наконечников дальности полета струй воды оказываются различными.

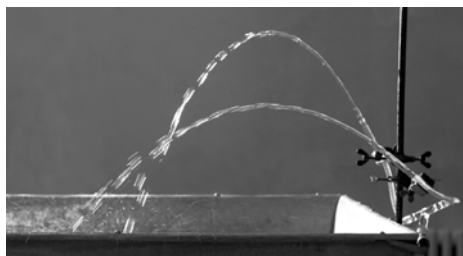
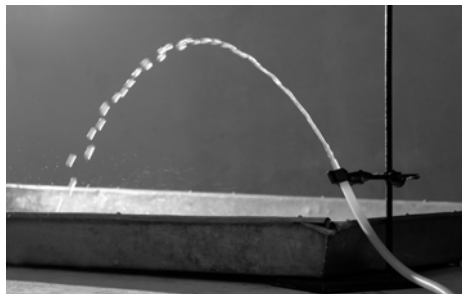


Рис. 1.20. Сравнение дальности полета струй воды, направленных под разными углами к горизонту.

1.6.5. Сложение равномерного прямолинейного и равномерного кругового движений – «спираль Архимеда».

Опыт позволяет зафиксировать траекторию, получающуюся при сложении равномерного прямолинейного и равномерного кругового движений.

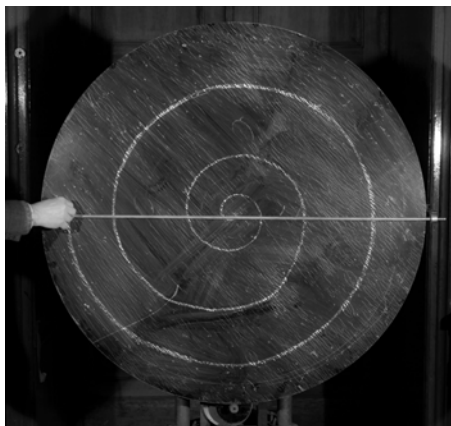


Рис. 1.21. Сложение прямолинейного и кругового движений («спираль Архимеда»).

Используемый для демонстрации прибор⁴ представляет собой укрепленный на специальной подставке большой зачерненный диск диаметром около 1,5 м, который может вращаться вокруг своей оси при помощи низкооборотного электродвигателя (рис. 1.21). Над центром диска вдоль его диаметра проходит неподвижная направляющая рейка. Плоскость диска, в зависимости от демонстрируемых экспериментов, может устанавливаться вертикально

или горизонтально.

Для показа данной демонстрации нужно установить плоскость диска в вертикальное положение и при выключенном двигателе провести мелом по диску вдоль направляющей рейки – на поверхности диска останется след от мела в виде прямой линии. Затем нужно включить двигатель и коснуться поверхности диска мелом на некотором расстоянии от центра вращающегося диска, не двигая его относительно рейки – на поверхности диска останется след в виде окружности. Наконец, нужно при включенном двигателе равномерно перемещать кусок мела вдоль направляющей рейки от центра диска к его краю – на поверхности диска останется след в виде спирали (она называется «спиралью Архимеда»⁵). Данный опыт может служить демонстрацией зависимости траектории движения от выбора системы отсчета. В первом случае система отсчета, связанная с диском, покоилась относительно системы отсчета, связанной с аудиторией. Поэтому движение в обеих системах отсчета выглядело одинаково, и траекто-

⁴ Данный прибор был разработан и изготовлен сотрудником Кабинета физических демонстраций физического факультета МГУ Н. М. Конопаткиным.

⁵ Архимед (287 до н.э – 212 до н.э.) – древнегреческий математик, физик, механик и инженер.



Рис. 1.23.

Гайка и винт. В процессе движения остаются неизменными. При этом, как и обычно, в рамках кинематического подхода не рассматривается вопрос о причинах движения твердого тела. Движение твердого тела имеет ряд особенностей по сравнению с движением тела, которое можно считать материальной точкой. Для отражения этих особенностей вводится ряд новых понятий и кинематических характеристик [29, гл. 2, §10], которые и иллюстрируются в демонстрационных экспериментах.

1.7.1. Степени свободы (стержень и цилиндр, гайка и винт, шар).

Число степеней свободы, то есть число независимых параметров – координат, однозначно определяющих положение твердого тела, – зависит от ограничений, наложенных на движение этого тела. Это демонстрируется на следующих примерах. Если на металлический стержень надет цилиндр с отверстием, диаметр которого равен диаметру стержня, то цилиндр, перемещаясь относительно стержня, имеет две степени свободы – поступательное движение вдоль стержня и вращение вокруг него (см. рис. 1.22).



Рис. 1.22. Стержень и цилиндр.

При внешне похожем движении гайки вдоль винта (см. рис. 1.23) она имеет всего одну степень свободы, поскольку в этом случае линейная и угловая координаты связаны между собой.

Движение твердого тела, имеющего одну неподвижную точку, описывается тремя независимыми угловыми координатами. Это демонстрируется при помощи шара большого диаметра, лежащего

на подставке из цилиндрической трубы, имеющей несколько меньший диаметр. При всех поворотах шара относительно подставки его центр остаётся на месте. На шар нанесена метка в виде стрелки, так что его положение однозначно определяется положением стрелки (см. рис. 1.24). Стрелка может быть переведена из одного в любое другое положение путём последовательных поворотов шара вокруг трёх осей: например, две угловые координаты определяют смещение начала стрелки по шару, а третья – её угол поворота. Шар может также использоваться для иллюстрации теоремы Эйлера⁶, согласно которой твердое тело с закрепленной точкой может быть переведено из начального положения в любое конечное положение путем единственного поворота вокруг оси, проходящей через указанную закрепленную точку.

1.7.2. Различие кругового поступательного и вращательного движения твёрдого тела («колесо обозрения»).

При рассмотрении кинематики твердого тела следует различать поступательное движение по окружности и вращательное движение по окружности [28, лекция 11]. В первом случае любой отрезок, соединяющий две точки твердого тела, при его движении по окружности остается параллелен сам себе. Во втором случае все точки твердого тела движутся по окружностям с совпадающими центрами. Для демонстрации различия этих видов вращательного движения используют следующий прибор.



Рис. 1.24. Шар (движение тела с одной закрепленной точкой).

К ободу колеса, которое может вращаться в вертикальной плоскости, прикреплены на равных расстояниях два прямоугольных грузика, которые могут либо свободно висеть, как кабинки на «колесе обозрения», либо жёстко закрепляться. В первом случае (см. левый рис. 1.25) при вращении колеса они совершают поступательное движение по кругу, а во втором – вращательное движение (см. правый рис. 1.25).

⁶ Л. Эйлер (1707 – 1783) – швейцарский, немецкий и российский математик.

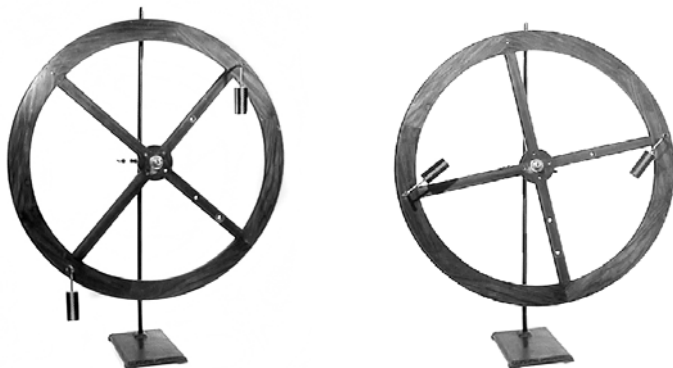


Рис. 1.25. «Колесо обозрения».

1.7.3. Угловая скорость (вращение диска с меткой в стробоскопическом освещении).

Угловой скоростью называется векторная физическая величина, характеризующая изменение угловой координаты твердого тела

с течением времени: $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$, где $d\varphi$

– вектор бесконечно малого угла поворота твердого тела за малое время dt . Следует отметить, что вектор угловой скорости является аксиальным, то есть он направлен вдоль оси вращения твердого тела, а его направление определяется при помощи правила правого винта [31, гл. 2, §14]. Для иллюстрации понятия угловой скорости в простейшем случае вращения вокруг неподвижной оси используется следующая демонстрация (см. рис. 1.26.).



Рис. 1.26. Вращение диска с меткой в стробоскопическом освещении.

Черный диск с белой радиальной меткой, вращающийся в вертикальной плоскости на валу электродвигателя со скоростью несколько сотен оборотов в минуту, освещается в затемнённой аудитории стробоскопической лампой. При вращении диска с постоянной скоростью видны отдельные положения метки, отстоящие друг от друга на равные углы. Подбирая частоту вспышек стробоскопа, можно добиться «неподвижного» положения метки и измерить угловую скорость вращения диска. При торможении или разгоне диска

демонстрируются неравноотстоящие положения метки, что свидетельствует о наличии углового ускорения, то есть об изменении угловой скорости с течением времени.

1.7.4. Распределение скоростей во вращающемся твёрдом теле (опыт с точилом).

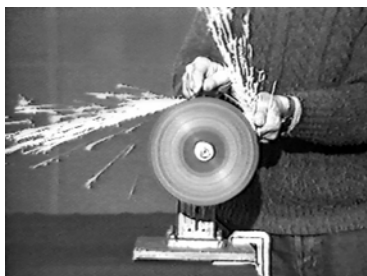


Рис. 1.27. Распределение скоростей по окружности вращающегося диска

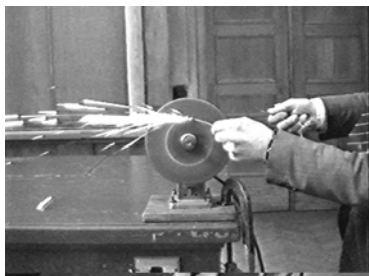


Рис. 1.28. Распределение скоростей по радиусу вращающегося диска.

При вращении вокруг неподвижной оси линейная скорость v любой точки твёрдого тела может быть найдена при помощи формулы $v = \omega \times r$, где ω – угловая скорость вращения твёрдого тела, r – вектор, проведенный от оси вращения к данной точке [28, лекция 11], [29, гл.2, §9]. При заданной угловой скорости твёрдого тела линейная скорость точки прямо пропорциональна расстоянию от нее до оси вращения и направлена по касательной к окружности, по которой движется точка.

Различие величин и направлений скоростей точек твёрдого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси, демонстрируется при помощи точила – наждачного диска, насаженного на вал электродвигателя. Точило с открытым диском устанавливается на аудиторном столе так, чтобы вертикальная плоскость

диска была обращена к аудитории. О величине и направлении линейной скорости различных точек вращающегося диска точила можно судить по длине и направлению снопа искр, возникающих при прижимании стальной проволоки к этому диску. Демонстрируется распределение скоростей точек, находящихся на окружности вращающегося диска точила (см. рис. 1.27) и на различных расстояниях от его оси (см. рис. 1.28). Затем электромотор выключается, и диск тормозится проволокой в одной точке до остановки, что позволяет убедиться в том, что длина снопа искр зависит от линейной скорости точек диска.

1.7.5. Мгновенная ось вращения (качение параллелепипеда, призмы, цилиндра).

Понятие мгновенной оси вращения [29, гл.2, §10] иллюстрируется при помощи перекатывания без проскальзывания по аудиторному столу деревянных моделей – параллелепипеда, шестигранной призмы и цилиндра (см. рис. 1.29). Мгновенная ось, то есть прямая линия, проходящая через неподвижные в данный момент точки тела, перемещается при этом как относительно тела, так и в пространстве, однако характер этого перемещения для разных тел различен. У параллелепипеда и призмы мгновенная ось, проходящая через линию их касания со столом, скачком смещается с одного ребра на другое при касании стола следующей гранью, а у цилиндра при его качении движется непрерывно, вместе с цилиндром.

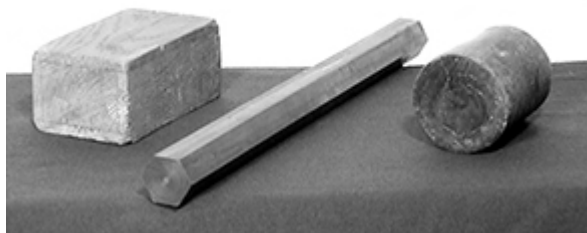


Рис. 1.29. Мгновенная ось вращения – качение разных тел по столу без проскальзывания.

1.7.6. Сложение вращательного движения с поступательным, мгновенная ось вращения (диск с точками).

Данный опыт позволяет продемонстрировать сложение вращательного движения твердого тела с поступательным движением и показать, как при таком сложении движений перемещается мгновенная ось вращения [31, гл.2, §15].

Белый диск с чёрными точками укреплен на валу электродвигателя, который установлен на тележке так, что плоскость диска вертикальна. Тележка может двигаться по рельсам, уложенным на аудиторном столе, а диск обращён к аудитории (см. рис. 1.30).

После включения двигателя при неподвижной тележке наблюдают, что точка в центре диска, лежащая на оси двигателя, неподвижна, а остальные вращаются вокруг неё. Затем демонстратор берёт тележку в руки и быстро описывает ею окружности в плоскости, параллельной диску. При этом неподвижными кажутся точки, уже не лежащие в центре диска, что свидетельствует о смещении мгновенной оси вращения.

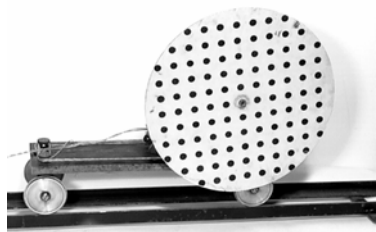


Рис. 1.30. Сложение вращательного движения с поступательным (диск с точками).

Потом тележка с вращающимся диском вновь ставится на рельсы, и демонстратор начинает её двигать то в одну, то в другую сторону. При этом «неподвижные» точки наблюдаются то выше, то ниже центра диска.

Следует отметить, что смещение оси вращения хорошо заметно лишь в моменты поворота, то есть при изменении скорости тележки. Это связано с тем, что наблюдатель непроизвольно следит за тележкой, и глаза «отстают» от неё только при наличии ускорения. Чтобы заметить смещение мгновенной оси вращения вверх или вниз при движении тележки с постоянной скоростью, желательно оставить в поле зрения только часть плоскости диска с точками, прикрыв от наблюдателей движущуюся тележку и края диска неподвижным экраном с отверстием подходящего размера.

1.7.7. Сложение угловых скоростей (волчок).

Поскольку угловая скорость является векторной физической величиной, то при сложении двух вращательных движений соответствующие им угловые скорости должны складываться, как векторы. Это можно продемонстрировать при помощи следующего эксперимента.

Круглая подставка-диск может приводиться во вращение вокруг вертикальной оси, укрепленной в подшипниках на массивном основании. На подставке лежит волчок, снабженный выдвигной осью (см. рис. 1.31). Установка позволяет продемонстрировать сложение угловых скоростей и изменение положения мгновенной оси вращения в разных системах отсчёта.

Волчок устанавливают в наклонном положении на подставку, немного выдвинув ось и закрепив её канговым зажимом. Острые оси при этом должны находиться в углублении в центре диска. При неподвижном диске толкают ось волчка так, чтобы он начал перекачиваться по диску без проскальзывания. В неподвижной системе отсчета, при покоящемся диске, волчок при перекачивании по диску вращается вокруг мгновенной оси, проходящей через острие оси и точку касания диска краем волчка. При этом абсолютная угловая скорость волчка ω направлена горизонтально (см. рис. 1.32), и при перекачивании против часовой стрелки (если смотреть на волчок сверху) складывается из направленной вверх переносной угловой скорости вращения оси волчка вокруг вертикальной оси установки ω_1 и направленной вниз под углом α относительной угловой скорости вращения волчка вокруг своей оси ω_2 .



Рис. 1.31. Общий вид установки.

Затем останавливают волчок и, удерживая рукой его ось, вращают диск за ручку, расположенную под ним, так, чтобы волчок без проскальзывания катился по диску (см. рис. 1.33). При вращающемся диске, когда ось волчка удерживается рукой в фиксированном положении, точка касания диска краем волчка стоит на месте, и мы как бы «пересаживаемся» в систему отсчета, вращающуюся вместе с осью диска вокруг вертикальной оси. В этой системе отсчета мгновенная ось вращения совпадает с осью волчка, относительная угловая скорость волчка, о которой шла речь в первом случае, ста-

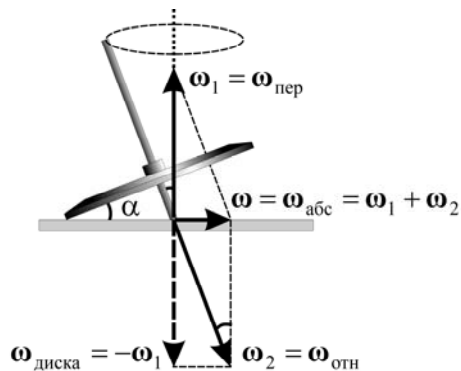


Рис. 1.32. Схема опыта с волчком.



Рис. 1.33. «Пересадка»
о вращающуюся систему отсчета.

новится абсолютной угловой скоростью, а абсолютная – относительной. Диск при этом вращается по часовой стрелке, и вектор его угловой скорости $\omega_{\text{диска}}$, являющейся в данном случае переносной скоростью, направлен вертикально вниз. Следует отметить, что при малых углах α величина $\omega = \omega_2 \sin \alpha = \omega_1 \operatorname{tg} \alpha$ может быть очень мала даже при больших угловых скоростях ω_1 и ω_2 .

1.7.8. Сложение угловых скоростей (шар с точками).

Векторный характер сложения угловых скоростей и перемещение мгновенной оси вращения относительно твердого тела, движущегося сложным образом, можно показать при помощи следующей эффектной демонстрации [11].

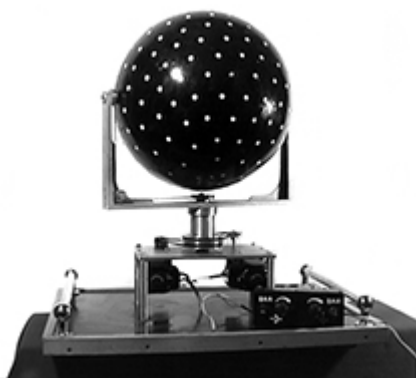


Рис. 1.34. Общий вид установки.

Черный шар с белыми точками (см. рис. 1.34) может приводиться двумя электродвигателями с редукторами в независимое вращение вокруг двух взаимно перпендикулярных осей – вертикальной и горизонтальной. Угловые скорости вращения вокруг каждой из осей регулируются от нуля до некоторой максимальной величины. Согласно теореме Эйлера, сложное движение этого твердого тела (шара

с точками) – вращение одновременно вокруг двух пересекающихся осей – сводится к вращению вокруг мгновенной оси, которая движется и в пространстве, и относительно тела. Вблизи мгновенной оси «смазывание» белых точек на черном шаре минимально, так как их скорости близки к нулю, и за перемещением мгновенной оси

вращения легко следить по перемещению этих «несмазанных» точек.

Вначале шар раскручивается только вокруг вертикальной оси, затем – только вокруг горизонтальной оси; неподвижные точки при этом находятся на вертикальном или горизонтальном диаметре шара. Потом, после закручивания шара вокруг горизонтальной оси, начинают его закручивать с все возрастающей скоростью вокруг вертикальной оси, плавно уменьшая скорость вращения вокруг первой оси. При этом направление мгновенной оси вращения и вектора полной угловой скорости тела меняется от горизонтального к вертикальному через все промежуточные положения (см. рис. 1.35). Затем опыт повторяется в обратном порядке. После демонстрации полезно показать на экране видеозапись этого эксперимента в замедленном темпе.



Рис. 1.35. Вращение шара вокруг двух взаимно перпендикулярных осей.

Глава 2 ДИНАМИКА ТОЧКИ И СИСТЕМЫ МАТЕРИАЛЬНЫХ ТОЧЕК

Задача динамики заключается в том, чтобы установить взаимосвязь между характером движения тела, его свойствами и теми причинами, которые вызвали или изменили это движение [28, лекция 3].

В данной главе иллюстрируются понятия массы и силы, законы динамики – 1-й, 2-й и 3-й законы Ньютона, а также движение центра масс системы материальных точек. Лекционные эксперименты следует начинать с рассмотрения массы, как меры инертности тела [30, гл. II, §10].

2.1. Инерция тел.

2.1.1. Подъем гири на нити с ускорением.



Рис. 2.1. Инерция тел – опыт с гирей.

На пол аудитории кладется гири́ка массой около 500 г с привязанной к ней тонкой веревкой (см. рис. 2.1). Вере́вка должна быть такой, чтобы она выдерживала вес гири́ки, но чтобы при этом ее можно было разорвать руками. Сначала демонстрируется, что если медленно потянуть за веревку вверх, то гири́ка отрывается от пола и висит на веревке.

Затем нужно снова поставить гири́ку на пол и резко дернуть за веревку вверх – при этом веревка порвется, а гири́ка останется стоять на полу. Это происходит потому, что при резком рывке тяжелая гири́ка не успевает прийти в движение и остается лежать на полу, вследствие чего сила натяжения веревки превышает максимально допустимую, и веревка рвется. Отметим, что этот эффектный эксперимент показывал студентам Московского университета в конце XIX – начале XX века выдающийся демонстратор И. Ф. Усагин¹, который использовал для его постановки фунтовую гири́ку (массой около 450 г) и крепкую бечевку для завязывания мешков с сахаром. Показ демонстрации с такой прочной веревкой требовал большой физической силы и сноровки.

¹ И. Ф. Усагин (1855 – 1919) – русский физик, работал в физическом кабинете Московского университета.

2.1.2. Инерция висящей гири.

Инерцию гири можно продемонстрировать и по-другому. Для этого необходим свинцовый шар массой в несколько килограммов с двумя крючками или проволочными ушками, расположенными на противоположных концах диаметра шара. К одному из крючков шара привязывается кусок тонкой веревки, к свободному концу которого привязывается деревянная ручка. К другому крючку привязывается кусок такой же веревки со скользящей петлей на свободном конце. На столе закрепляется штатив с прочной горизонтальной перекладиной, на которую нужно подвесить шар за веревку, накинув и затянув скользящую петлю (см. рис. 2.2). Веревка должна удовлетворять требованиям, сформулированным в описании предыдущего опыта.

При показе демонстрации нужно сначала, взявшись за ручку, резко дернуть за нее вниз. При этом оборвется нижняя веревка с привязанной к ней ручкой. Это произойдет потому, что шар при резком рывке за нижнюю веревку не успевает выйти из состояния покоя, и сила натяжения верхней веревки все время остается практически равной весу шара; сила же натяжения нижней веревки в момент рывка может быть очень велика и может значительно превышать вес шара. Затем нужно вновь привязать ручку к нижнему крючку (возможно, для этого понадобится еще один кусок веревки) и начать медленно тянуть за ручку вниз. В данном случае оборвется верхняя веревка, которая крепит шар к перекладине штатива. Это объясняется тем, что сила натяжения нижней веревки равна внешней силе, которая прикладывается рукой, а сила натяжения верхней веревки складывается из указанной внешней силы и веса шара, то есть она превышает силу натяжения нижней веревки. Падающий шар необходимо поймать в руки, либо следует заранее подставить под него поддон с песком.

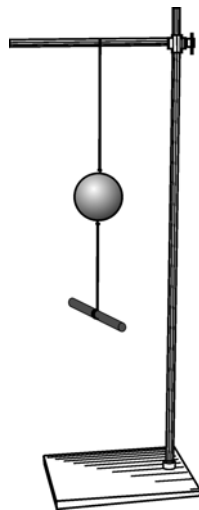


Рис. 2.2 Инерция висящей гири.

2.1.3. Выбивание пластинки из-под шарика.

Небольшая квадратная металлическая пластинка с просверленным в ее середине маленьким отверстием (диаметром ~ 4 мм) кладется на вертикальную закрепленную стойку. На горизонталь-

ной поверхности стойки должно быть сделано небольшое углубление. Пластинка должна располагаться так, чтобы отверстие находилось над углублением. Затем на пластинку кладется стальной шарик диаметром $\sim 15-20$ мм таким образом, чтобы он лежал на отверстии. Радиусы кривизны шарика и углубления в стойке должны совпадать. По краю пластинки резко ударяют в горизонтальном



Рис. 2.3. Выбивание пластинки из-под шарика.

направлении, в результате чего она вылетает из-под шарика, который остается лежать на стойке, упав в углубление. Для демонстрации удобно использовать специально изготовленную установку (см. рис. 2.3), в которой стойка закреплена на подставке, а выбивание пластинки из-под шарика осуществляется с помощью специального пружинного механизма.

2.1.4. Выбивание нижнего диска из стопки дисков.

На стол выставляется стопка из 5-7 стальных цилиндрических грузов массой по 250 г или по 500 г (высотой ~ 1 см, диаметром $\sim 6-8$ см). Для демонстрации необходим стальной стержень, диаметр которого немного меньше высоты груза. Стержнем можно выбить нижний груз из стопки, не разрушив ее – для этого нужно положить стержень на стол плашмя и, двигая его по столу, резко ударить по нижнему грузу (см. рис. 2.4). При этом груз выскочит из-под стопки, стержень также пройдет под ней, а вся стопка упадет вниз и ляжет на стол, сохранив свою конфигурацию. Таким



Рис. 2.4. Выбивание нижнего диска из стопки дисков.

способом можно последовательно выбить из-под стопки все грузы, до предпоследнего включительно. Стержень после показа этого опыта становится заметно изогнутым – действующие на него силы кратковременны, но довольно велики.

2.1.5. Ломание деревянной палки на бумажных кольцах.

Для показа демонстрации нужны кольца, вырезанные из плотной (ватманской) бумаги (внешний радиус ~ 20 см, внутренний радиус ~ 15 см), а также деревянная (сосновая) рейка длиной $\sim 1,5$ м и сечением $\sim 1 \times 1$ см. При помощи струбцин к краям двух столов, стоящих на расстоянии ~ 2 м друг от друга, крепятся на одинаковой высоте два горизонтальных стержня-держателя. На эти стержни подвешиваются бумажные кольца, а на них, в свою очередь, кладется в горизонтальном положении деревянная рейка. Затем нужно взять в руки достаточно тяжелый стальной прут (или трубу) и медленно надавить им вниз на середину деревянной рейки. Одно из бумажных колец разорвется, и рейка упадет на пол. Затем нужно заменить оба бумажных кольца на такие же, какие использовались ранее, и вновь положить на них рейку. После этого следует сильно с размаху ударить стальным прутком по средней части рейки. Удар должен быть достаточно резким. В результате деревянная рейка сломается, а оба бумажных кольца останутся целыми. Это произойдет потому, что при резком сильном ударе из-за малости времени действия приложенной силы рейка не успевает выйти из состояния покоя, и в месте удара возникают большие напряжения, которые и приводят к излому рейки. Демонстрация опыта требует предварительной тренировки.

2.1.6. Выдергивание листа бумаги из-под колбы.

Для демонстрации нужна пустая стеклянная колба с ровной плоскостью горлышка – колба, перевернутая вверх дном и поставленная на горлышко, не должна качаться. Вместо колбы можно использовать стеклянную бутылку. На стол кладется лист плотной бумаги, на который ставится на горлышко перевернутая вверх дном колба (см. рис. 2.5). Колба должна находиться на расстоянии 4-5 см от края листа. Демонстратор начинает медленно равномерно тянуть лист бумаги в горизонтальном направлении вдоль поверхности стола, перемещая лист с колбой к краю стола. Это нужно делать до тех пор, пока примерно $3/4$ листа не окажутся свисающими со стола. После этого демонстратор одной рукой смещает свисаю-



Рис. 2.5. Выдергивание листа бумаги из-под колбы.

щий край листа в сторону стола так, чтобы лист прогнулся вниз, после чего резко бьет второй рукой по бумаге сверху вниз между рукой, которая держит лист, и краем стола. При ударе бумага выскальзывает из-под колбы, которая остается стоять на столе на узком горлышке. Лист бумаги при этом остается в руке демонстратора. Для большей эффектности демонстрации рекомендуется использовать колбу с узким горлышком и широким дном.

2.1.7. Падение гвоздя в бутылку.

Для демонстрации необходимо деревянное или пластиковое кольцо диаметром $\sim 10-15$ см (в качестве него удобно использовать, например, пяльцы для вышивания). На горизонтальный стол ставится бутылка, в которую нужно насыпать 2-3 см песка для придания ей большей устойчивости. Кольцо ставится на горлышко бутылки «на ребро». На верхнюю часть кольца аккуратно ставится на шляпку (острием вверх) гвоздь длиной около 10 см. При установке гвоздя нужно добиться, чтобы он стоял устойчиво; в этом случае гвоздь окажется над центром горлышка бутылки. Затем демонстратор просовывает в кольцо палец и резким движением руки выбивает кольцо в сторону. Выбивать кольцо нужно так, чтобы оно двигалось строго горизонтально. После выбивания кольца гвоздь, сохраняя вертикальное положение, падает через горлышко внутрь бутылки и застревает в песке. Явление объясняется тем, что при резком горизонтальном ударе по кольцу изнутри оно немного сплющивается в вертикальном направлении, а тяжелый гвоздь не успевает опуститься вместе с верхней частью кольца. В результате трение между кольцом и гвоздем исчезает, и как раз в этот момент кольцо вылетает из-под гвоздя, вследствие чего гвоздь начинает падать вниз и попадает в горлышко бутылки. Демонстрация опыта требует предварительной тренировки. Вместо деревянного или пластмассового кольца можно использовать бумажное, склеенное из плотной (ватманской) бумаги – так демонстрацию показывать гораздо легче, но выглядит она менее эффектно.

Отметим, что если выбивать кольцо из-под гвоздя другим способом – бить по кольцу не изнутри, а снаружи, – то опыт не получается. Это происходит потому, что при горизонтальном ударе по кольцу снаружи оно сплющивается в горизонтальном направлении, и его верхняя часть при этом немного приподнимется. В результате гвоздь подпрыгивает вверх, в полете отклоняется от вертикали и, падая, уже не может попасть в узкое горлышко бутылки.

2.2. Второй закон Ньютона².

Уравнение движения, или второй закон Ньютона, основано на том опытном факте, что всякое ускорение тела в инерциальной системе отсчета является результатом действия сил со стороны других тел [30, гл. II, §11)] и зависит от массы тела.

2.2.1. Динамометр и весы различных конструкций.

В качестве примеров приборов, предназначенных для измерения силы и массы, демонстрируются пружинный динамометр, безмен, рычажные и электронные весы.

Пружинный динамометр представляет собой упругую пружину, величина растяжения которой пропорциональна растягивающей силе. Один конец этой пружины закреплен, а второй снабжен крючком, к которому и прикладывается измеряемая сила. Отсчет величины деформации пружины, а значит, и измеряемой силы, осуществляется при помощи шкалы с делениями. Если расположить пружину такого динамометра вертикально и подвешивать к ней грузы различной массы, то согласно закону Гука³ величина растяжения пружины будет пропорциональна весу этих тел, то есть пружинный динамометр будет играть роль пружинных весов (см. рис. 2.6). Динамометры выпускаются с различными пределами измерения сил и калибруются обычно в единицах силы – Ньютонах.

В отличие от динамометров, рычажные весы измеряют не силу, а массу, поскольку при взвешивании в качестве эталона используются гири известной массы.



Рис. 2.6. Динамометр.



Рис. 2.7. Безмен.

² И. Ньютон (1642 – 1727) – английский физик, математик и астроном, один из создателей классической физики.

³ Р. Гук (1635 – 1703) – английский естествоиспытатель, экспериментатор секретарь Лондонского Королевского общества.

Безмен представляет собой простейшие рычажные весы. Они выполнены в виде стержня с делениями, к которому крепится опорная петля, а также взвешиваемый груз и гири (см. рис. 2.7). Перемещая гирю вдоль стержня, безмен уравнивают, определяя затем по делениям на стержне массу груза.

Более совершенные рычажные весы представляют собой рычаг, к концам которого прикреплены чашки, на которые помещаются



Рис. 2.8. Рычажные весы.

взвешиваемый груз и уравнивающие его гири (см. рис. 2.8). Для повышения точности взвешивания конструкцию рычажных весов усложняют, снабжая их опорными призмами, которые уменьшают трение в механизме, системами дополнительных рычагов, гасителями колебаний, креплениями чувствительных подвижных частей (арретирами) и т.п.

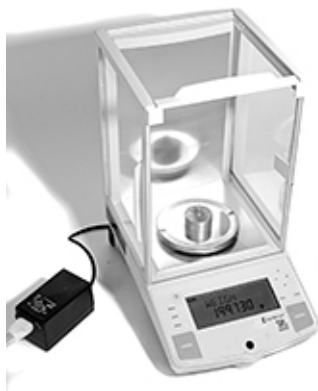


Рис. 2.9. Электронные цифровые весы.

В настоящее время большое распространение получили цифровые электронные весы, в которых масса груза определяется с помощью преобразования механической силы в электрический сигнал, пропорциональный величине этой силы. Полученный электрический сигнал затем анализируется электронной схемой и преобразуется в цифровую информацию, которая выводится на специальный дисплей (см. рис. 2.9) и может передаваться на компьютер. Точность электронных весов при этом может даже превосходить точность хороших рычажных лабораторных аналитических весов.

2.2.2. Сложение сил (правило параллелограмма).

Для показа векторного характера сложения сил (по правилу параллелограмма) используется демонстрационный стенд (см. рис. 2.10), представляющий собой вертикальную панель, у краев которой укреплены два ролика, вращающиеся с малым трением. На стенд при помощи канцелярских кнопок крепится лист белой ватманской бумаги. Через ролики перекидывается нить с петлями на концах и посередине. К концам нити подвешиваются грузы разной массы, а к средней петле – такой груз, который может уравновесить эту систему. На бумаге в точке крепления среднего груза к нити делается карандашная пометка; также отмечаются направления нитей, идущих от этой точки к блокам. Затем грузы снимаются со стенда, и на бумажном листе при помощи фломастера или другим способом изображается параллелограмм сил. При этом векторы сил натяжения нитей, идущих от точки крепления среднего груза к блокам, должны быть направлены вдоль соответствующих нитей и иметь длину, пропорциональную массам грузов, а вектор силы веса, уравновешивающего систему, должен быть направлен вертикально вниз и равняться по модулю направленному вертикально вверх вектору суммы сил натяжения нитей, который также нужно изобразить на чертеже. После этого система грузов вновь собирается и располагается таким образом, чтобы нити совпадали с изображенными на чертеже сторонами параллелограмма сил. Изготовленный описанным способом демонстрационный стенд с чертежом можно использовать многократно.

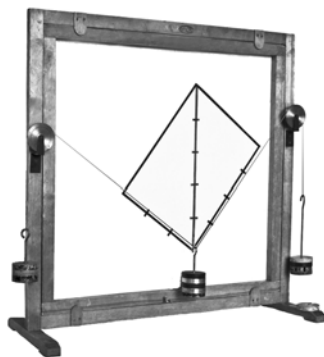


Рис. 2.10. Демонстрация сложения сил по правилу параллелограмма.

После демонстрации векторного характера сложения сил следует переходить к непосредственной иллюстрации их действия на движущиеся тела и в дальнейшем – к проверке второго закона Ньютона.

2.2.3. Отклонение от прямолинейного движения под действием силы.

Для показа демонстрации необходимы деревянный клин с пропиленным вдоль его наклонной поверхности желобком, стальной шарик и постоянный магнит. На демонстрационном столе проводится мелом прямая линия, и клин устанавливается так, чтобы желобок на

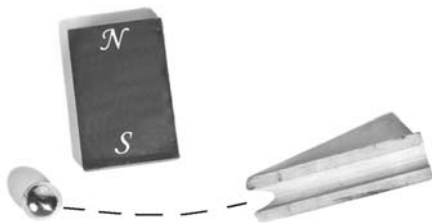


Рис. 2.11. Отклонение от прямолинейного движения тела под действием силы.

нем совпадал с направлением этой линии. Затем на верхнюю часть желобка кладется стальной шарик, который скатывается с клина по желобу на стол. Скатывание с клина нужно повторить два-три раза для того, чтобы убедиться, что шарик дви-

жется по столу вдоль нарисованной прямой линии. Затем на стол вблизи нарисованной линии кладется магнит, полюс которого должен быть обращен к этой линии. Теперь при скатывании с клина шарик, проходя мимо магнита, притягивается к нему, в результате чего траектория движения шарика искривляется (см. рис. 2.11). Таким образом демонстрируется, что внешняя сила способна изменять состояние равномерного и прямолинейного движения тела. При подготовке опыта следует заранее подобрать такое положение магнита, чтобы катящийся мимо него шарик лишь отклонялся в сторону от прямолинейной траектории, но не прилипал к магниту. Это положение магнита нужно отметить на столе мелом. При необходимости этот опыт можно проводить на стеклянной пластинке и демонстрировать в теневой проекции на потолок, либо показывать его на большом экране с помощью видеокамеры и мультимедийного проектора.

2.2.4. Деформация тел при ускоренном движении.

Протяженные массивные тела деформируются под влиянием приложенной к ним силы, причем при ускоренном движении эта деформация неоднородна – части тела деформируются тем сильнее, чем ближе они расположены к точке приложения силы. Для демонстрации этого явления используется набор из пяти-шести тяжелых одинаковых грузиков, соединенных между собой в цепочку пружинками. Грузики располагаются на столе вдоль прямой линии

так, чтобы пружинки не были растянуты. К крайнему грузику в цепочке привязывается прочная нитка. За конец этой нитки нужно резко потянуть в направлении вдоль цепочки так, чтобы грузики стронулись с места, а затем отпустить нитку. При этом силы сухого трения зафиксируют грузики на столе в тех положениях, в которых они находились в момент окончания действия внешней силы: пружинки, находящиеся ближе к началу цепочки, будут растянуты сильнее, чем пружинки, расположенные ближе к ее концу.

2.2.5. Труба Ньютона.

Опыт демонстрирует, что тела разной массы в отсутствие сил трения падают с одинаковой высоты за одинаковое время, то есть ускорение свободного падения не зависит от массы тела. Демонстрационный прибор представляет собой толстостенную стеклянную трубу, концы которой герметично закрыты заглушками (см. рис. 2.12). Одна из заглушек имеет отвод с краном, с помощью которого можно соединять внутренний объем трубы с атмосферой. Внутри трубы помещены три предмета разной массы – свинцовый грузик, пробка и птичье перо. При показе демонстрации нужно открыть кран, взять трубу в руки, удерживая ее вертикально, а затем резким движением перевернуть трубу на 180° . При этом будет видно, что тела разной массы падают на «дно» трубы не одновременно, что объясняется наличием сопротивления воздуха. Для большей убедительности опыт следует повторить несколько раз. Затем нужно надеть на кран шланг, идущий от форвакуумного насоса, откачать из трубы воздух, перекрыть кран и отсоединить от него шланг. После этого следует вновь продемонстрировать падение тел в трубе, как описано выше. Все три предмета будут падать на «дно» практически одновременно.



Рис. 2.12. Опыт с трубой Ньютона.

2.2.6. Тележка с пружинным динамометром.

На тележке крепится пружинный динамометр так, чтобы его пружина была горизонтальна. К крюку динамометра привязывается прочная нить, которая тянется над столом в горизонтальном направлении, а затем перекидывается через систему из двух блоков, ук-

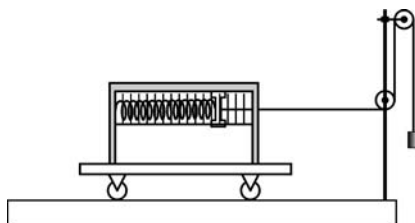


Рис. 2.13. Тележка с динамометром.

репленных на краю стола (см. рис. 2.13). К концу нити, перекинутой через второй блок, прикрепляется небольшой грузик, а тележка фиксируется на столе (например, путем подкладывания под ее колеса деревянной рейки). После освобождения тележки грузик начинает опускаться, а тележка начинает катиться по столу под действием силы натяжения нити. При этом пружина динамометра растягивается на некоторую величину, которая остается постоянной в течение времени движения тележки, что говорит о постоянстве действующей на нее силы.

В другом варианте этого опыта на тележку ставится высокий брусок, а к нити подвешивается массивный груз, обеспечивающий большое ускорение тележки. После отпускания тележки брусок опрокидывается, демонстрируя свои инерционные свойства.

2.2.7. Машина Атвуда⁴.

Для демонстрации второго закона Ньютона можно использовать так называемую «машину Атвуда». Она представляет собой подвешенный на закрепленной горизонтальной оси блок, через который перекинута прочная нить с прикрепленными к ее концам одинаковыми по массе грузами (см. рис. 2.14). При этом грузы находятся в состоянии безразличного равновесия. Если положить на один из грузов небольшой перегрузок, то равновесие нарушится, и грузы придут в движение с ускорением, зависящим от массы перегрузка. При перекладывании перегрузка на другой груз движение будет происходить в обратном направлении. Увеличив массы грузов, можно продемонстрировать зависимость ускорения от массы всей системы тел.

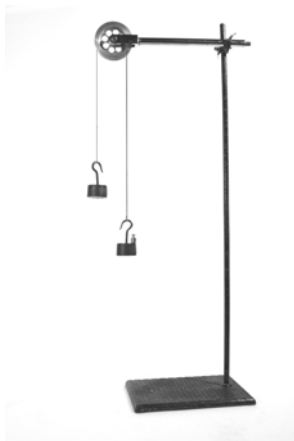


Рис. 2.14. Машина Атвуда.

⁴ Дж. Атвуд (1745 – 1807) – английский физик и математик, член Лондонского королевского общества; машина изобретена им в 1784 году.

2.3. Демонстрации динамических закономерностей при помощи скамьи с воздушной подушкой.

Для показа более сложных и точных экспериментов в режиме «он-лайн» используется скамья с воздушной подушкой (см. демонстрацию 1.3.2), снабженная набором компьютерных программ для демонстрации различных динамических закономерностей. На дальнем от электромагнитного пускателя конце скамьи имеется блок с воздушной подушкой и дополнительно устанавливается наклонная полая штанга с закрепленным на ней вторым таким же блоком (см. рис. 1.7). В блоки подается часть нагнетаемого в скамью воздуха, что обеспечивает их вращение практически без трения.

2.3.1. Проверка второго закона Ньютона: изучение зависимости ускорения от приложенной силы.

На горизонтальную скамью помещается тележка фиксированной массы. К тележке привязывается легкая нить, перекинутая через блоки. К другому концу нити поочередно прикрепляются грузы различной известной массы, обеспечивающие силу F натяжения нити. Для каждого из грузов измеряется зависимость координаты тележки от времени, по которой определяется ускорение тележки a .

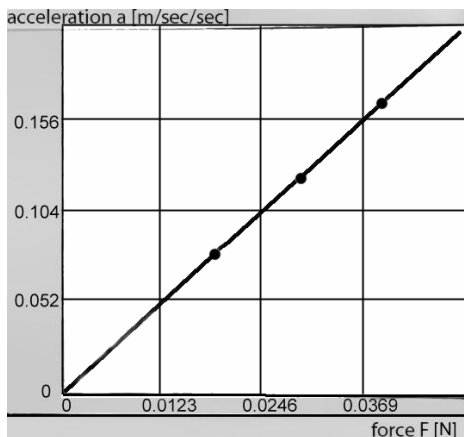


Рис. 2.15. Опыты на воздушной дорожке: зависимость ускорения тележки от приложенной к ней силы.

После этого на экране отображается таблица экспериментальных данных, а также строится график зависимости $a(F)$, показывающий, что величина ускорения тележки прямо пропорциональна приложенной к ней силе (см. рис. 2.15). Здесь же можно вывести найденный путем обработки зависимости $a(F)$ по МНК коэффициент пропорциональности между F и a , который сравнивается с массой использовавшейся тележки.

2.3.2. Проверка второго закона Ньютона: изучение зависимости ускорения от массы тела.

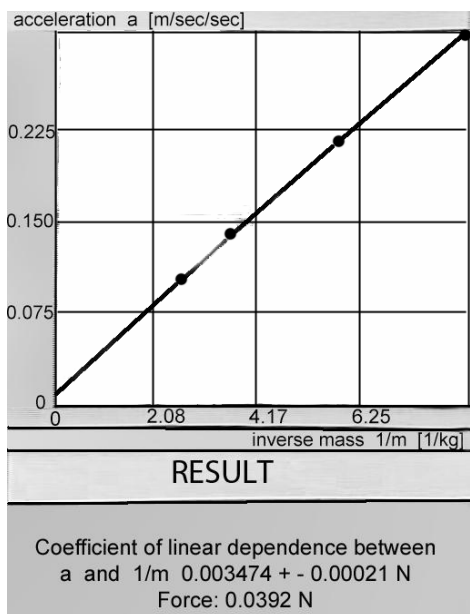


Рис. 2.16. Опыты на воздушной дорожке: зависимость ускорения тележки от обратной величины ее массы.

зависимостей $a(m)$ и $a(1/m)$. Последний график оказывается линейным и показывает, что величина ускорения тележки пропорциональна обратной величине ее массы (см. рис. 2.16). Найденный путем обработки этой зависимости по МНК угловой коэффициент выводится на экран для сравнения с величиной постоянной силы, под действием которой двигалась тележка в ходе эксперимента.

2.3.3. Изучение движения при наличии силы вязкого трения, пропорциональной скорости.

Для демонстрации этого эксперимента на тележку устанавливаются специальные магнитные насадки (см. рис. 2.17), которые, наводя в проводящем корпусе скамьи индукционные токи, обеспечивают при движении тележки действие на нее силы вязкого трения, пропорциональной скорости. Эксперимент ставится на горизонтальной или на наклонной скамье, а тележку можно заставлять двигаться либо сообщая ей пускателем некоторую на-

Эксперимент проводится аналогично предыдущему, с тем отличием, что к концу перекинутой через блоки нити прикрепляется груз фиксированной массы, а известная масса тележки несколько раз изменяется путем навешивания на нее специальных перегрузков. Для каждого из значений массы m тележки измеряется зависимость ее координаты от времени, по которой определяется ускорение тележки a . Затем на экране может отображаться таблица экспериментальных данных, а также могут строиться графики

чальную скорость, либо привязывая к ней перекинутую через блоки натянутую грузом нить, аналогично тому, как это делалось в экспериментах по проверке второго закона Ньютона.

Перед началом демонстрации задаются значения массы тележки, массы прикрепленного к нити груза и угла наклона скамьи.

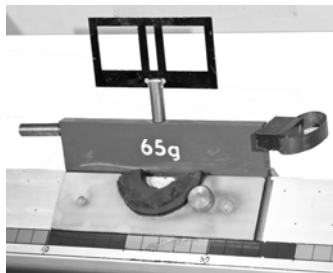


Рис. 2.17. Тележка с постоянным магнитом.

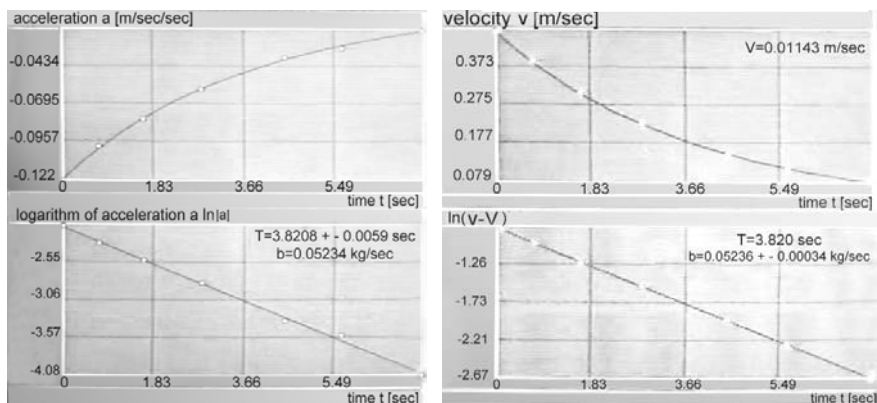


Рис. 2.18. Зависимости ускорения и скорости тележки, а также их логарифмов от времени при наличии вязкого трения.

Далее для движущейся тележки проводятся измерения зависимостей ускорения a и скорости v от времени t , и по последней определяется значение установившейся скорости тележки $v_{уст}$. Затем на экране либо отображается таблица экспериментальных данных, либо могут строиться на выбор графики зависимостей $a(t)$, $v(t)$, $\ln a(t)$,

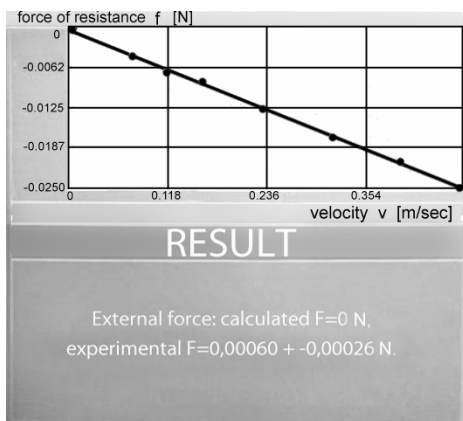


Рис. 2.19. Зависимость силы сопротивления движению тележки от ее скорости.

$\ln(v - v_{\text{уст}})(t)$, график зависимости действовавшей на тележку во время движения силы вязкого трения F от скорости (см. рис. 2.18 и 2.19). На графиках приводятся найденные значения $v_{\text{уст}}$, времени релаксации скорости τ и коэффициента b пропорциональности между F и v . Эксперимент показывает, что при наличии прямо пропорциональной зависимости между F и v скорость тележки экспоненциально зависит от времени, что соответствует теории.

2.3.4. Проверка второго закона Ньютона в случае действия переменной силы.



Рис. 2.20. Датчик силы на воздушной дорожке.

Для проведения демонстрационных экспериментов по проверке второго закона Ньютона в случае действия переменной силы нужно использовать специальный датчик силы. Этот датчик

должен позволять измерять как постоянные, так и изменяющиеся со временем и по направлению силы в диапазоне от $+10$ Н до -10 Н, иметь линейную рабочую характеристику и быстродействие ~ 1 мс. Датчик силы устанавливается на противоположном от пускателя конце горизонтальной скамьи с воздушной подушкой. На горизонтально расположенный штوك датчика накручивается специальная насадка с отверстием, в котором при необходимости может крепиться съемный буфер, выполненный в виде кольцевой пружины (см. рис. 2.20). Двигающаяся по скамье тележка в зависимости от условий эксперимента снабжается либо таким же буфером, либо специальным соединительным стержнем, который может при столкновении фиксироваться в отверстии, сделанном в насадке датчика. В начале эксперимента пускатель толкает тележку. Затем при помощи «световых ворот», стоящих вблизи датчика силы, измеряется скорость тележки v_1 перед ударом о датчик. После этого во время соударения при помощи датчика силы измеряется зависимость силы F , действующей на тележку со стороны датчика, от времени t . Наконец, если тележка отскочила от датчика, то при помощи «световых во-

рот» измеряется скорость тележки v_2 после удара о датчик. После этого при известной массе m тележки рассчитывается величина изменения ее импульса $\Delta p = m(v_2 - v_1)$. Далее, по полученной зависимости

$F(t)$ рассчитывается величина импульса силы $I_F = \int_0^t F(t)dt$.

Затем, сравнивая величины Δp и I_F с учетом погрешностей их определения, можно сделать выводы о соблюдении второго закона Ньютона для процесса соударения тележки с датчиком силы [20, 27].

Для проверки второго закона Ньютона при «абсолютно упругом» соударении тел тележка и датчик снабжаются двумя кольцевыми пружинными буферами, ориентированными во взаимно перпендикулярных плоскостях (в этом случае потери механической энергии при столкновении тележки с датчиком минимальны). Вначале тележке сообщается некоторая скорость, и она, двигаясь по направлению к датчику, проходит через «световые ворота», затем испытывает «абсолютно упругое» соударение с датчиком, после чего начинает двигаться в противоположном направлении, вновь проходя через «световые ворота». Типичный вид получающейся в результате такого эксперимента зависимости $F(t)$ приведен на рисунке 2.21. Измеренные таким образом значения изменения импульса тележки и импульса силы совпадают в пределах $\sim 2 \div 5\%$.

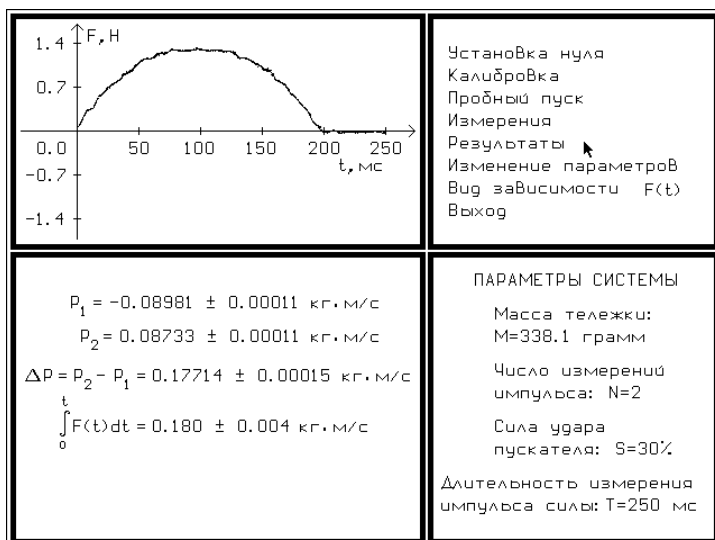


Рис. 2.21. Проверка закона изменения импульса при «абсолютно упругом» ударе.

Частично упругое соударение тел реализуется при столкновении тележки с датчиком в отсутствие пружинных буферов или в случае, когда при слишком больших деформациях буферов они испытывают «пробой». При таком ударе тележка отскакивает от датчика, потеряв некоторую часть своей кинетической энергии. Ход

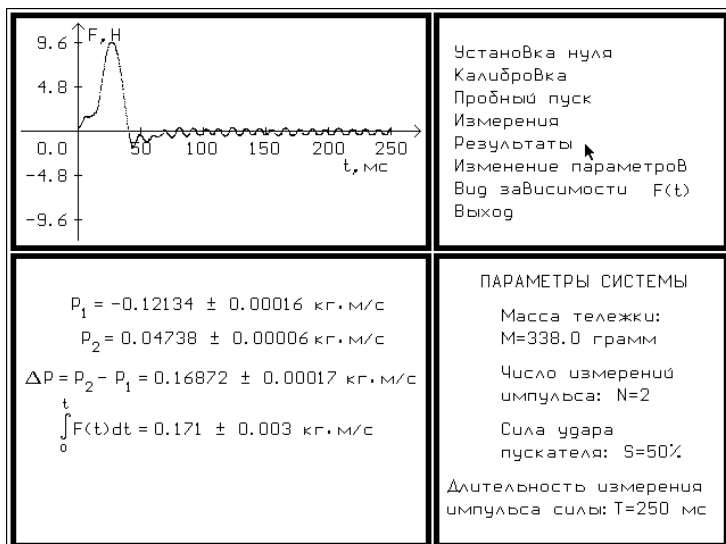


Рис. 2.22. Проверка закона изменения импульса при «частично упругом» ударе.

эксперимента аналогичен описанному выше. Получающаяся в результате типичная зависимость $F(t)$ приведена на рисунке 2.22. Измеренные значения изменения импульса тележки и импульса силы позволяют говорить о выполнении второго закона Ньютона в случае частично упругого соударения.

Для того чтобы наблюдать абсолютно неупругое соударение тел, на тележке устанавливается соединительный стержень, который может застревать в отверстии, сделанном в насадке датчика. В ходе эксперимента тележка движется по скамье, проходит через «световые ворота», после чего «прилипает» к датчику силы и останавливается. Скорость тележки после соударения в данном случае полагается равной нулю. Получающийся в результате типичный график зависимости $F(t)$ показан на рисунке 2.23. Измеренные значения изменения импульса тележки и импульса силы свидетельст-

вуют, что о справедливости второго закона Ньютона можно говорить и в этом случае.

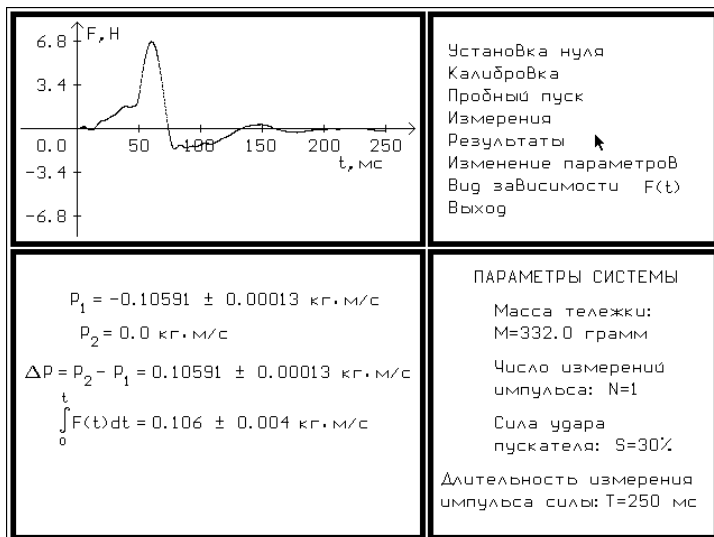


Рис. 2.23. Проверка закона изменения импульса при «абсолютно неупругом» ударе.

2.4. Динамика вращательного движения.

Важным случаем криволинейного движения тел является вращательное движение. Его можно проиллюстрировать при помощи следующих экспериментов.

2.4.1. Возникновение центростремительной силы (вращение шарика на пружине).

Возникновение центростремительной силы при вращении можно продемонстрировать следующим образом. Тяжелый стальной шарик, лежащий на аудиторном столе, прикрепляется при помощи свободно надетого на него кольца к пружине, другой конец которой закреплен на стойке тяжелого штатива (см. рис. 2.24). Шарик толчком в направлении, перпендикулярном пружине, сообщает некоторую скорость, после чего он, перемещаясь, растя-

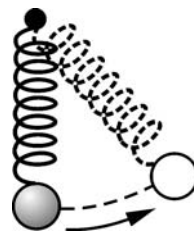


Рис. 2.24. Вращение шарика на пружине.

гивает пружину, которая в результате отклоняет шарик от прямолинейной траектории, создавая центростремительную силу.

Затем целесообразно показать еще один опыт: на вертикальный вал центробежной машины насаживается горизонтальный диск радиусом $\sim 10-15$ см (ось диска совпадает с осью вращения вала машины). На край диска кладется легкий деревянный шарик, к которому прикреплена мягкая спиральная пружина. Второй конец пружины прикрепляется к оси диска. При приведении диска во вращение шарик соскальзывает с его края и начинает двигаться по окружности под действием силы натяжения деформировавшейся пружины. Величина растяжения пружины тем больше, чем выше скорость вращения диска.

2.4.2. Движение по «мертвой петле».

Используемый для этой демонстрации прибор представляет собой станину, на которой при помощи стоек укреплены рельсы, изготовленные из жестких проволок или тонких металлических трубок. Рельсы сделаны в виде прямой горки, плавно переходящей на нисходящем участке в окружность («мертвую петлю»), которая, в свою очередь, переходит в короткий прямолинейный восходящий участок (см. рис. 2.25). Отрезок рельсов длиной около 10 см, расположенный вблизи верхней части «мертвой петли», может сниматься. При показе опыта деревянный шарик подходящего диаметра помещают на рельсы и скатывают его с трех различных начальных высот. В первый раз начальная высота должна быть достаточно

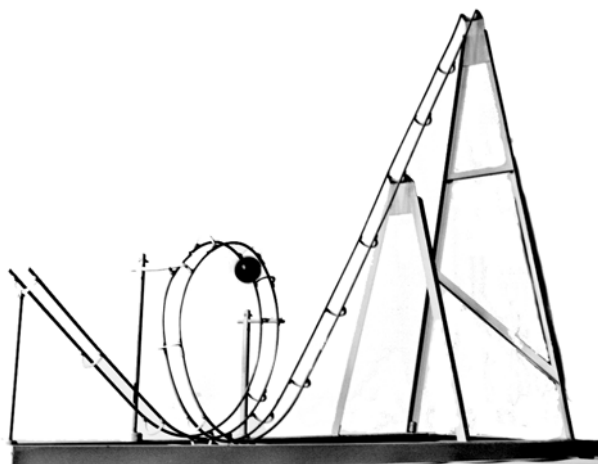


Рис. 2.25. Движение шарика по «мертвой петле».

большой – при этом шарик устойчиво проходит «мертвую петлю» с высокой скоростью и вылетает с противоположного конца рельсов, падая в руку демонстратора. Во второй раз начальная высота должна быть меньше – исходное положение шарика нужно подобрать так, чтобы шарик, проходя «мертвую петлю», едва касался рельсов в верхней точки «петли» (это исходное положение нужно заранее отметить на рельсах мелом). Наконец, в третий раз начальная высота должна быть еще меньше – при этом шарик, начав двигаться по «мертвой петле», сорвется с рельсов, не дойдя до верха «петли», после чего полетит по параболе. Далее нужно снять с «мертвой петли» верхний отрезок рельсов и повторить все три описанных эксперимента. В первом случае шарик будет слетать с рельсов вблизи верхней части «мертвой петли»; в третьем случае шарик по-прежнему будет отрываться от рельсов, не дойдя до верхней части «петли»; а вот во втором случае шарик будет продолжать двигаться по «мертвой петле» так, как будто удаленный участок рельсов по-прежнему находится на месте. Это объясняется тем, что при правильном подборе начальной высоты, с которой скатывается шарик, его скорость в верхней точке «петли» такова, что центростремительное ускорение шарика равно ускорению свободного падения и создается только силой тяжести. Поэтому сила реакции рельсов в верхней точке «петли» в данном случае равна нулю, и шарик может двигаться по «петле» даже в отсутствие отрезка рельсов в ее верхней части.

2.4.3. Вращение ведерка с водой.

Для показа этой демонстрации используется легкое пластмассовое ведерко, к ручке которого привязывается прочная веревка. В ведерко примерно до половины его высоты наливается вода. После этого демонстратор берет в руку конец веревки, приподнимает ведерко над полом и начинает раскачивать его, постепенно увеличивая амплитуду колебаний. Когда амплитуда колебаний станет достаточно большой, нужно быстрым движением ускорить движение ведерка и начать вращать его в вертикальной плоскости. При этом в верхней точке траектории ведерко оказывается перевернутым, а вода не будет выливаться из него, что объясняется наличием у нее большого центростремительного ускорения, превосходящего ускорение свободного падения.

2.4.4. Конусообразная двойная спираль.

Основным элементом прибора⁵ являются рельсы, изготовленные из проволоки или из тонких металлических трубок, расположенные в виде витков спирали вдоль конической поверхности (см. рис. 2.26). В верхней части плоскость рельсов близка к горизонтальной, а затем по мере приближения к основанию конуса угол наклона плоскости рельсов к горизонтали быстро возрастает, и, наконец, проволоки, образующие рельсы, оказываются расположенными практически друг над другом (то есть плоскость рельсов становится почти вертикальной). При скатывании шарика по таким рельсам он быстро разгоняется и, дойдя до середины спирали, продолжает катиться по отвесным рельсам, не срываясь с них. Это объясняется тем, что на движущийся шарик со стороны рельсов действует сила реакции, которая обеспечивает шарiku необходимое центростремительное ускорение при движении по окружности.

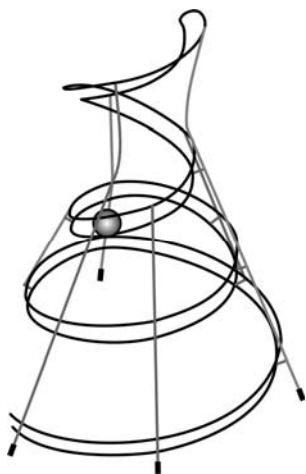


Рис. 2.26. Движение шарика по конусообразной двойной спирали.

Проводя эксперименты с данным прибором, можно заметить, что шарики большого диаметра скатываются по спиральным рельсам быстрее, чем шарики малого диаметра. Благодаря этому при помощи прибора можно продемонстрировать следующий занимательный опыт. С вершины спирали с небольшим интервалом друг за другом скатываются два шарика – сначала стальной, а за ним – эбонитовый, несколько большего размера. Эбонитовый шарик вскоре догоняет стальной и ударяется об него. Вследствие того, что масса эбонитового шарика меньше, чем стального, скорость эбонитового шарика после соударения уменьшается, а стального – увеличивается.

После нескольких таких столкновений скорость эбонитового шарика уменьшается настолько, что сила реакции рельсов не может обеспечивать его движение по окружности. В результате эбонитовый шарик срывается с рельсов и падает на стол, в то время как стальной шарик продолжает движение и успешно доходит до конца спирали.

⁵ Предложен М. А. Грабовским и В. С. Егоровым.

2.4.5. Реакция изогнутых рельсов.

Прибор представляет собой набор из двух пар наклонных рельсов, скрепленных легкой фермой. Ферма с рельсами может вращаться вокруг вертикальной оси, укрепленной на массивном основании (см. рис. 2.27). Начала и концы обеих пар рельсов находятся, соответственно, на одинаковой высоте, а их плоскости в средней части поворачиваются, становясь отвесными. Одни рельсы прямые, а другие изогнуты по дуге в сторону.

Если ферма закреплена, то шарик, пущенный сверху по прямым рельсам, срывается с них на половине пути, где плоскость

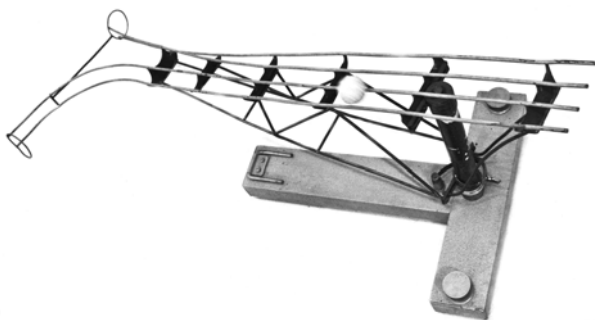


Рис. 2.27. Реакция изогнутых рельсов.

рельсов становится отвесной. Шарик, пущенный по изогнутым рельсам, проходит их до конца, поскольку на изгибе в отвесной части рельсов на него действует сила их реакции, искривляющая траекторию шарика. Наличие этой силы можно продемонстрировать, отпустив тормоз, не дающий ферме вращаться вокруг вертикальной оси. В этом случае после скатывания шарика по изогнутым рельсам ферма начинает вращаться в сторону, противоположную направлению вылета шарика, поскольку со стороны шарика на рельсы в области их изгиба действует сила реакции, создающая момент, закручивающий ферму. Данный опыт может также демонстрироваться при изучении закона сохранения момента импульса.

2.5. Третий закон Ньютона.

2.5.1. Опыт с пружинами, сжатыми между двумя маятниками.

Равенство сил взаимодействия и закон сохранения импульса можно продемонстрировать при помощи следующего простого

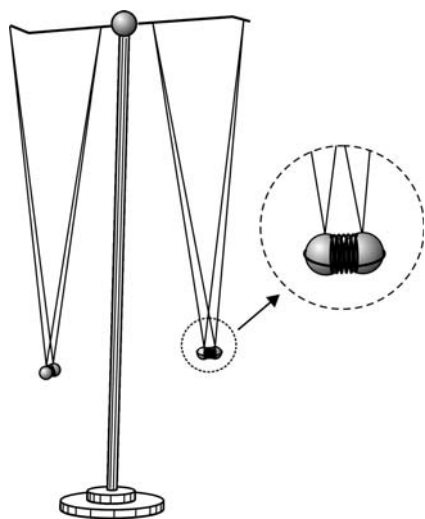


Рис. 2.28. Опыт с пружинами, сжатыми между двумя маятниками.

опыта. На вертикальный штатив с горизонтальной штангой наверху подвешиваются две пары маятников одинаковой длины (см. рис. 2.28): в одной паре на нитях висят свинцовые шарики одинаковой массы и одинакового размера, а в другой – разной массы и одинакового размера: свинцовый и деревянный. Между парами этих шариков помещаются сжатые стальные пружины, которые удерживаются нитяными петлями (см. врезку на рисунке). После пережигания петель одинаковые шарики расталкиваются пружиной так, что нити

подвеса отклоняются на одинаковые углы от вертикали, а пружина падает вниз. Шарики разной массы отклоняются по-разному: деревянный – сильно, а свинцовый – гораздо слабее.

2.5.2. Тележки Гримзеля⁶ (опыт с тележками на рельсах).

Для показа демонстрации нужны две одинаковые тележки с пружинящими буферами, одна из которых снабжена небольшим электродвигателем с валом. Тележки должны с малым трением кататься по рельсам, в средней части которых делается хорошо видимая метка. Перед показом демонстрации нужно с помощью уровня выставить рельсы горизонтально. Затем нужно уравновесить тележки на весах, используя для этого пластилин и гири-разновесы. Далее можно продемонстрировать два варианта опыта.

В первом варианте тележки связывают друг с другом нитью таким образом, чтобы пружинные буфера оказались сжатыми. Затем тележки устанавливают на середину рельсов так, чтобы их центр масс оказался над меткой (см. рис. 2.29), после чего нить пережигают. Тележки разъезжаются в противоположные стороны и останавливаются на одинаковых расстояниях от метки. Это происходит потому, что

⁶ Э. Гримзель – немецкий педагог и методист (конец XIX – начало XX вв.).

тележки имеют одинаковые массы, в процессе взаимодействия на них действуют, согласно третьему закону Ньютона, одинаковые по величине упругие силы, и при движении на них действуют одинаковые силы сопротивления, так что тележки имеют во все время движения одинаковые по модулю ускорения и проходят одинаковые пути.

Во втором варианте опыта нужно установить тележки на краях рельсов на одинаковых расстояниях от метки таким образом, чтобы пружинные буфера оказались напротив друг друга. Затем нужно намотать нить на вал электродвигателя, установленного на одной из



Рис. 2.29. Тележки Гримзеля.

тележек, а другой конец нити привязать ко второй тележке (нить должна быть натянута). Двигатель с помощью тонких гибких проводов следует подсоединить через ключ к источнику напряжения. После замыкания ключа тележки поедут навстречу друг другу и столкнутся над меткой, пройдя до столкновения одинаковые расстояния. При показе демонстрации необходимо следить, чтобы питающие электромотор провода не мешали движению тележек.

Описанные опыты можно показывать и с целью иллюстрации теоремы о движении центра масс и закона сохранения импульса системы тел.

2.5.3. Тележки с магнитами на скамье с воздушной подушкой.

Для проведения эксперимента используется скамья с воздушной подушкой (см. демонстрацию 1.3.2). При проведении опыта на тележки равной массы устанавливаются постоянные магниты таким образом, чтобы они отталкивались друг от друга. Тележки связываются нитью в середине скамьи, и после ее выравнивания до строго горизонтального положения нить пережигается. В результате тележки разъезжаются в разные стороны с одинаковыми по модулю скоростями, одновременно достигая концов скамьи. Это доказывает равенство величин ускорений в процессе взаимодействия

тележек, а, следовательно, равенство величин и противоположность направлений сил магнитного взаимодействия тележек.

2.5.4. Опыт с весами.

На горизонтальном столе устанавливаются рычажные весы. На одной чашке весов крепится штатив с лапкой, а на другой – вертикальный стержень, на который надеты кольцевые магниты. На чашку со штативом также ставится стакан с водой, а в лапке штатива зажимается пустая пробирка. После этого весы уравниваются путем доливания воды в стакан и помещения на чашки мелких разновесов (см. рис. 2.30).

Демонстрация показывается в следующем порядке. Сначала нужно взять в руку вторую пустую пробирку, одинаковую по размерам с первой, и опустить ее в стакан с водой, не касаясь его стенок. Равновесие весов нарушится – чашка, на которой стоит стакан, опустится вниз. Это объясняется тем, что на погруженную в воду пробирку со стороны жидкости действует выталкивающая сила Архимеда. По третьему закону Ньютона на жидкость со стороны пробирки действует равная по модулю сила, направленная вниз, которая и вызывает нарушение равновесия весов.



Рис. 2.30. Демонстрация третьего закона Ньютона при помощи весов.

Затем пробирка вынимается из воды, и после того, как равновесие весов восстановится, в стакан с водой опускается пробирка, закрепленная в стоящем на весах штативе. При этом равновесие весов не нарушается. Действительно, на погруженную в воду пробирку действует сила Архимеда, и

пробирка давит на штатив вверх, тем самым уменьшая его вес на величину силы Архимеда. Но по третьему закону Ньютона со стороны пробирки на жидкость действует направленная вниз сила, по

модулю равная силе Архимеда. Она компенсирует уменьшение веса штатива, и поэтому весы остаются в равновесии.

Затем нужно перевернуть надетые на вертикальную ось кольцевые магниты и показать, что независимо от того, притягиваются они или отталкиваются, равновесие весов также не нарушается. Это можно объяснить тем, что действующие между магнитами силы притяжения или отталкивания являются для рассматриваемой системы внутренними. Поскольку, в соответствии с третьим законом Ньютона, эти силы равны по модулю, противоположны по направлению, приложены к разным телам и являются силами одной природы, то они не могут нарушить равновесие системы.

2.6. Движение центра масс.

После показа опытов, иллюстрирующих третий закон Ньютона, можно переходить к экспериментам, демонстрирующим движение центра масс системы тел и справедливость теоремы о движении центра масс [30, гл. 3, §19].

2.6.1. Маятник на тележке.

Для того чтобы продемонстрировать невозможность движения центра масс под действием одних только внутренних сил, можно воспользоваться следующим простым опытом. На тележке, которая может кататься по горизонтальным рельсам с малым трением, крепится тяжелый маятник (см. рис. 2.31), масса которого должна быть больше массы тележки. Тележка ставится на рельсы, и возле одного из ее краев на них делается меловая метка. Демонстратор, придерживая тележку одной рукой, второй рукой выводит маятник из положения равновесия, после чего одновременно отпускает тележку и маятник. При возникающих после этого колебаниях маятника он движется в противофазе с тележкой. По истечении каждого следующего полного периода колебаний

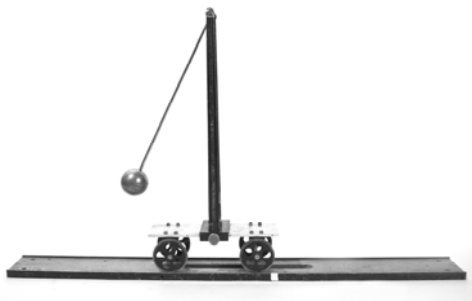


Рис. 2.31. Маятник на тележке.

край тележки оказывается возле меловой метки. Это доказывает, что при колебаниях маятника центр масс системы не смещается.



Рис. 2.32. Тележка с маятником на скамье с воздушной подушкой.

Аналогичный опыт можно показать, установив тележку с прикрепленным к ней тяжелым маятником на скамью с воздушной подушкой (см. рис. 2.32). Тележка, висящая на воздушной подушке, практически не испытывает действия силы трения, и такой эксперимент выглядит особенно убедительно, если в месте расположения центра масс системы «тележка + маятник» на жестком подвесе маятника поместить хорошо заметный белый кружок, который при колебаниях будет оставаться на месте.

2.6.2. Демонстрация движения центра масс при помощи скамьи с воздушной подушкой.

Для показа эксперимента используется скамья с воздушной подушкой (см. демонстрацию 1.3.2). На горизонтальную скамью помещаются две тележки одинаковой массы. Между тележками устанавливаются две одинаковые кольцевые пружины, на которые крепится насадка, выполненная в виде «рогов» – четырех вертикальных пластинок известной ширины с известными расстояниями между ними (см. рис. 2.33). Положение насадки подбирается так,

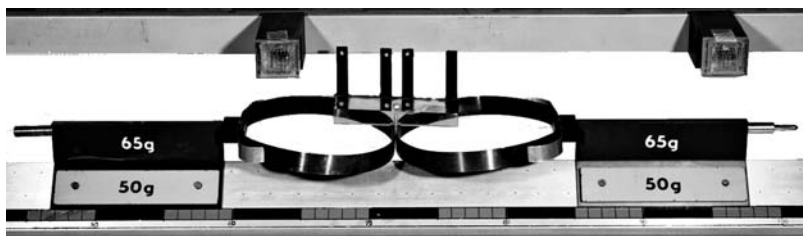


Рис. 2.33. Движение центра масс системы из двух тележек.

чтобы ее середина находилась в центре масс системы из двух тележек [15]. При движении тележек по скамье скорость центра масс измеряется с помощью датчиков положения («световых ворот»),

через которые проходит насадка. Затем на дисплее может отображаться таблица экспериментальных данных, а также может строиться график зависимости скорости центра масс системы от времени. Этот график показывает, что скорость центра масс в пределах погрешности измерений является постоянной даже при сложном движении системы с колебаниями после толчка, произведенного по одной из тележек. Это доказывает справедливость теоремы о движении центра масс. Если изменить положение центра масс системы, утяжелив одну и облегчив другую тележку при помощи грузов, то насадка уже не будет находиться в центре масс, и после толчка будет двигаться неравномерно, с хорошо заметными колебаниями.

2.6.3. Бросание «палки» с лампочкой.⁷

В затемненной аудитории бросают параллельно доске «палку» с лампочкой, причём последняя может быть смещена от центра масс системы на некоторое расстояние или может находиться в центре масс [12]. Положение центра масс системы при разном распределении массы вдоль «палки» определяется путем ее подвешивания на нити: если точка подвеса находится в центре масс, то «палка» висит горизонтально. «Палка» после броска летит, вращаясь; в первом случае мы наблюдаем сложную кривую с «петлями», во втором случае наблюдается параболическая траектория центра масс (см. левый рис. 2.34).

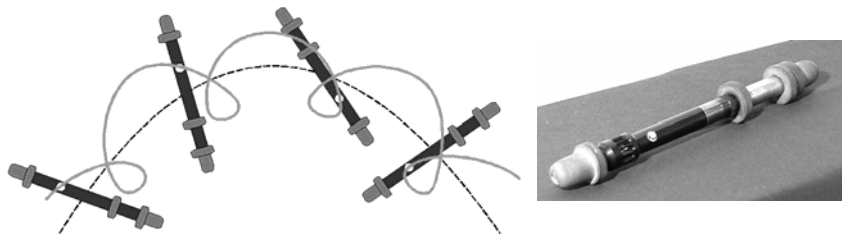


Рис. 2.34. Бросание «палки» с лампочкой.

«Палка» длиной около 30 см (см. правый рис. 2.34) состоит из нескольких цилиндрических деталей, внутри неё находятся две пальчиковые батарейки, выключатель и лампочка от карманного

⁷ Приборы для этой и следующей демонстрации предложены и изготовлены доцентом кафедры общей физики и физики конденсированного состояния физического факультета МГУ Г. Е. Пустоваловым.

фонаря. Вокруг лампочки профрезерованы сквозные пазы, чтобы она была хорошо видна во время полёта. На концы «палки» и вдоль неё надеты резиновые амортизаторы, смягчающие удар при падении на пол. Крайние секции «палки», изготовленные из лёгкого дюралья и тяжёлой латуни, свинчиваются и могут меняться местами, при этом центр масс системы смещается. Массы деталей подобраны так, чтобы при одном положении крайних секций центр масс находился вблизи светящейся нити лампочки (при этом он располагается не на середине «палки»!), а при другом – отстоял от лампочки на расстояние в несколько сантиметров.

Этот же опыт можно провести в упрощенном варианте. Два одинаковых деревянных или пластмассовых шарика соединяются прочным шнурком, на который привязывается бантик из яркой ленты. Шарик бросаются под углом к горизонту так, чтобы в полете они вращались вокруг своего центра масс, а шнурок был натянут. Если бантик находится посередине шнурка, то есть в центре масс, то бантик движется по параболической траектории. Если же сдвинуть бантик ближе к одному из шариков, то в полете он будет двигаться по более сложной траектории, как и при бросании «палки» с лампочкой.

2.6.4. Опыт с дощечкой на столе.



Рис. 2.35. Опыт с дощечкой на аудиторном столе.

На аудиторный стол кладется дощечка, на которую можно дополнительно прикреплять грузик, меняя положение её центра масс. Положение центра масс дощечки проверяется подвешиванием. После горизонтального удара молотком дощечка скользит по столу так, что её центр масс движется по прямой линии в направлении удара, независимо

от того, в какое место дощечки был произведен удар, был ли на ней грузик и каков характер её движения – поступательный или вращательный (см. рис. 2.35). Для увеличения наглядности опыта рекомендуется на аудиторном столе провести мелом прямую линию, на которую помещается центр масс дощечки и вдоль которой затем наносится удар.

Глава 3 ДИНАМИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

Задачей динамики твердого тела является установление связи между движением этого тела и действующими на него силами [28, лекция 12]. В данной главе приведены описания различных демонстрационных экспериментов, иллюстрирующих основные закономерности такого движения.

Вначале следует продемонстрировать опыты, поясняющие понятия момента инерции твердого тела и момента силы относительно оси, а также основное уравнение динамики твердого тела, вращающегося относительно неподвижной оси.

3.1. Маятник Обербека (момент силы и момент инерции).

Крестообразный маятник Обербека состоит из четырёх взаимно перпендикулярных стержней, закрепленных в цилиндрической обойме, которая может вращаться вместе с горизонтальной осью, проходящей через подшипники в неподвижной подставке прибора (см. рис. 3.1). На стержни насажены четыре грузика, при перемещении которых изменяется момент инерции маятника. На оси имеются два шкива различного диаметра, на которые можно наматывать шнурок, перекинутый через блок. К концу шнурка подвешиваются различные грузы.

Установка позволяет продемонстрировать зависимость углового ускорения маятника, которое оценивается по скорости опускания груза, от величины момента инерции при постоянном моменте силы, а также от приложенного момента силы натяжения шнурка при постоянном моменте инерции.



Рис. 3.1. Маятник Обербека.

3.2. «Непослушная» катушка.

На ось большой катушки, лежащей на горизонтальном столе, намотана нить. Если тянуть за нить, то катушка ведет себя по-разному

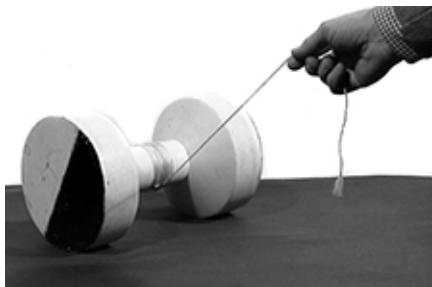


Рис. 3.2. «Непослушная» катушка.

в зависимости от того, какой угол с горизонтом составляет нить (см. рис. 3.2). В случае, когда катушку тянут под большим углом, катушка катится в сторону от человека, который ее тянет. Поэтому катушку называют «непослушной». Если же тянуть нить под маленьким углом к горизонту, то катушка будет катиться в направлении приложенной силы, то есть к тянущему за нить человеку. В случае, когда линия действия силы натяжения нити проходит через линию касания катушки и стола, сумма моментов сил, действующих на катушку, равна нулю, и катушка остается на месте или проскальзывает.

После описанных выше опытов можно показать эксперименты, иллюстрирующие плоское движение твердого тела, например, скатывание различных тел с наклонной плоскости [30, §48], а также различные варианты движения маятника Максвелла.

3.3. Скатывание цилиндров с различным распределением массы с наклонной плоскости (полый, сплошной цилиндры и «ванька-встанька»).

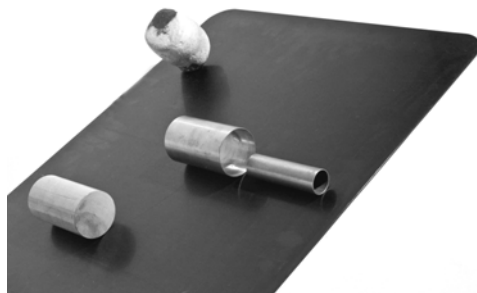


Рис. 3.3. Скатывание цилиндров с наклонной плоскости.

Цилиндры равной массы (проверяется взвешиванием) с различными моментами инерции, то есть с различным распределением массы относительно оси, скатываются с наклонной плоскости с различными ускорениями (см. рис. 3.3): цилиндр с большим моментом инерции (пустотелый) скатыва-

ется медленнее, чем цилиндр с меньшим моментом инерции (сплошной). Однако, все цилиндры с одинаковым распределением массы относительно оси, независимо от их радиуса, скатываются с одинаковым ускорением. Цилиндр с неравномерным распределением массы относительно оси («ванька-встанька»), изготовленный из куска пенопласта с асимметрично расположенным тяжёлым грузиком внутри, при качении с наклонной плоскости описывает замысловатую траекторию, меняя направление движения и подпрыгивая.

3.4. Маятники Максвелла¹.

3.4.1. Маятник с лопатками для создания трения о воздух.

Маятник Максвелла представляет из себя колесо с тонкой длинной осью, на концы которой намотаны две нити, пропущенные через отверстия в оси и закрепленные на штативе (см. рис. 3.4). После отпущения маятника нити разматываются, колесо раскручивается, приобретая большую угловую скорость, и после рывка нитей («удара») при прохождении нижней точки движется вверх, наматывая нити на ось; затем процесс повторяется. Такие колебания могут происходить довольно долго, так как потери энергии при движении маятника малы. Если увеличить потери энергии за счет трения о воздух, установив на ободе колеса лопатки, колебания быстро затухают.

3.4.2. Маятник Максвелла на весах.

При движении маятника вниз и вверх его ускорение всё время направлено вниз: в первом случае ско-

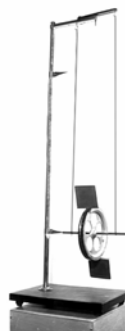


Рис. 3.4. Маятник Максвелла с лопатками.

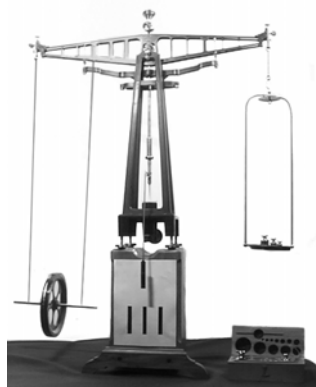


Рис. 3.5. Маятник Максвелла на весах.

¹ Д. К. Максвелл (1831 – 1879) – британский физик и математик, член Лондонского королевского общества.

гию при повторном подъёме. Кроме того, за время вращения в нижней точке (несколько секунд) можно измерить угловую скорость ω вращения маятника и затем сравнить величины потенциальной (mgh) и кинетической ($J\omega^2/2$) энергий маятника в крайних положениях. При этом масса маятника m , высота подъёма h и момент инерции $J \approx m_{\text{диска}} r_{\text{диска}}^2 / 2$ могут быть измерены и вычислены заранее.

Далее можно переходить к демонстрации опытов, иллюстрирующих вращение свободного твердого тела и устойчивость этого вращения [28, лекция 13].

3.5. Свободные оси вращения.

3.5.1. Бросание параллелепипеда.

Для демонстрации того, что устойчивое свободное вращение тела может происходить только вокруг главных центральных осей с наибольшим и наименьшим значениями момента инерции, а вращение вокруг оси с промежуточным значением момента инерции неустойчиво, подбрасывают прямоугольный однородный параллелепипед из пенопласта, размеры которого по всем трем осям различны (см. рис. 3.7). Закручивая его при броске поочередно вокруг всех трех главных центральных осей, наблюдают полет с устойчивым вращением при максимальном и минимальном моментах инерции и неустойчивое вращение – кувырканье – при промежуточном (см. рис. 3.8).



Рис. 3.7. Параллелепипед из пенопласта.



Рис. 3.8.
Бросание параллелепипеда.

3.5.2. Вращение стержня, диска, кольца и цепочки на центробежной машине.

На валу центробежной машины подвешиваются на нити и закручиваются разные тела: стержень, диск, кольцо, кольцо из цепочки. После установления вращения оно происходит вокруг главной центральной оси с наибольшим моментом инерции: перпендикулярно стержню, вдоль оси диска (см. рис. 3.9), кольца и цепочки, принимающей круглую кольцеобразную форму под действием центробежных сил инерции. Затем тела освобождаются (нить отцепляется), и демонстрируется устойчивость их свободного вращения во время падения.



Рис. 3.9. Вращение диска на центробежной машине.

В КФД физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова разработан целый ряд демонстрационных экспериментов, позволяющих в режиме «он-лайн» с ПЭВМ прямо на лекции изучать основные закономерности кинематики и динамики плоского движения твердого тела, проверять теорему Гюйгенса-Штейнера и измерять с высокой точностью осевые моменты инерции различных тел. Ниже приведено описание этих экспериментов.

3.6. Опыты на вращающемся столе с воздушной подушкой.

Стол с воздушной подушкой состоит из полого перфорированного цилиндрического основания, внутрь которого через шланг нагнетается воздух от воздуходувки, и надетой на основание круглой подвижной платформы с выемкой в нижней части, диаметр которой несколько превышает диаметр основания [16, 26, 27]. Воздушная подушка, образуемая между платформой и основанием, приподнимает платформу и не позволяет ей заметно смещаться в радиальном направлении. На внешней части платформы имеется шпенок для закрепления нити и канавка, в которую закладывается нить при ее намотке на платформу. К установке прилагается полая штанга с двумя блоками на воздушной подушке, используемая в ряде де-

монстраций по кинематике и динамике вращательного движения. Нить после намотки нескольких оборотов вокруг платформы перекидывается через блоки, и к ее концу могут подвешиваться грузики известной массы. На платформу могут помещаться тела различной формы (см. рис. 3.10). Установка снабжена оптическим датчиком углового положения платформы с выходом на компьютер, что позволяет получать кинематические характеристики движения – зависимости угла поворота, угловой скорости и углового ускорения платформы от времени.



3.6.1. Кинематика вращательного движения.

В рамках данной демонстрации можно показать равномерное вращение платформы в отсутствие моментов внешних сил и равноускоренное движение под действием постоянного момента M силы натяжения T нити, к концу которой прикреплен грузик.

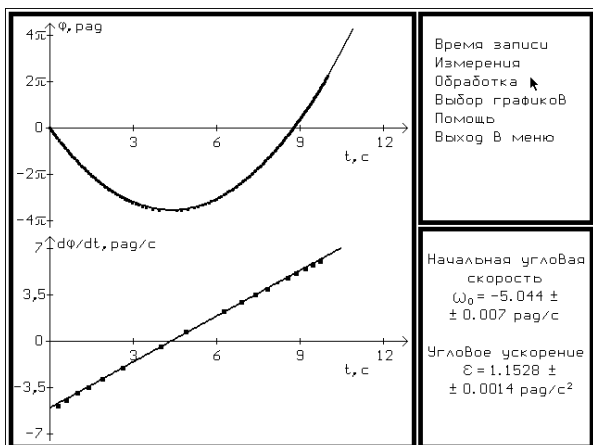


Рис. 3.11. Равноускоренное вращение платформы.

Программное обеспечение демонстрации аналогично программному обеспечению опытов по кинематике поступательного движения тележки на воздушной дорожке: на дисплей по выбору могут выводиться зависимости угла поворота φ , угловой скорости ω и углового ускорения $\varepsilon = d^2\varphi/dt^2$ платформы от времени t , а также значения углового ускорения ε , вычисленные по методу наименьших квадратов из зависимостей $\omega(t)$ и $\varphi(t)$ (см. рис. 3.11).

3.6.2. Динамика вращательного движения.

Демонстрируется справедливость основного уравнения динамики вращательного движения $J\varepsilon = M$, то есть пропорциональность углового ускорения ε приложенному моменту внешних сил $M = rT$ (здесь r – радиус платформы, на которую намотана нить; сила натяжения нити T определяется, исходя из массы m грузиков, подвешенных к нити) при постоянном моменте инерции платформы J (см. рисунок 3.12), а также то, что ε обратно пропорционально J при постоянном M (см. рисунок 3.13). При этом момент инерции платформы изменяется путем помещения на нее тонких колец известного радиуса и массы. Программное обеспечение демонстрации также аналогично программному обеспечению для проведения опытов по проверке второго закона Ньютона на скамье с воздушной подушкой.

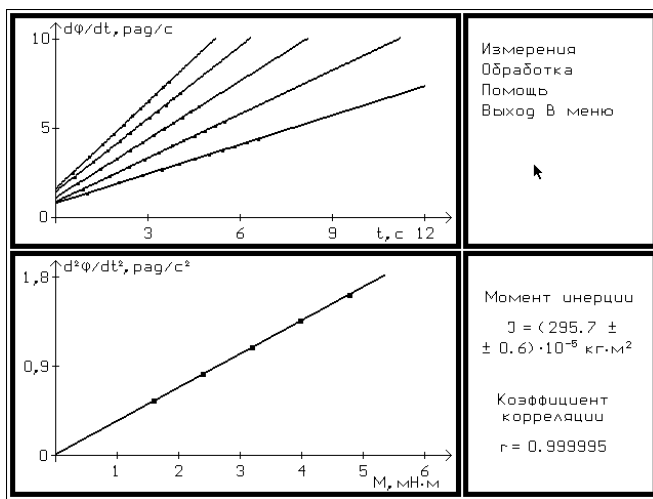


Рис. 3.12. Зависимость углового ускорения от приложенного момента сил.

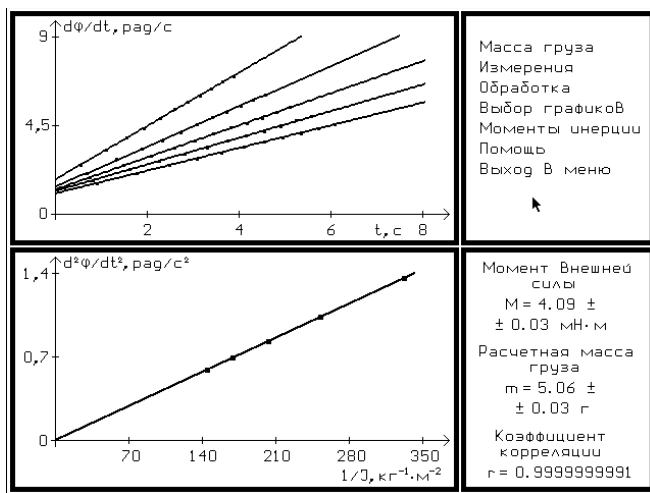


Рис. 3.13. Зависимость углового ускорения от обратной величины момента инерции.

3.6.3. Проверка теоремы Гюйгенса-Штейнера².

Независимо измеряя ε и M , можно найти момент инерции платформы J . Это позволяет проверить теорему Гюйгенса-Штейнера: $J = J_0 + ma^2$. Вначале два одинаковых груза массой m и радиусом R помещаются в центр платформы, и измеряется J_0 . Затем грузы симметрично смещаются таким образом, чтобы их центры масс находились на различных расстояниях a от центра платформы (см. рис. 3.14), и измеряются значения J . На дисплей компьютера выводится найденный график $J(a)$ и вычисленные значения массы m и радиуса R цилиндров. Для сравнения выводятся также m и R , найденные путем прямых измерений (см. рис. 3.15).

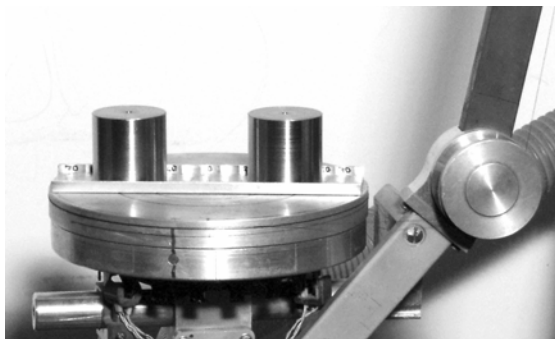


Рис. 3.14. Грузы на платформе.

² Х. Гюйгенс (1629 – 1695) – нидерландский механик, физик, математик, астроном и изобретатель; Я. Штейнер (1796 – 1863) – швейцарский математик.

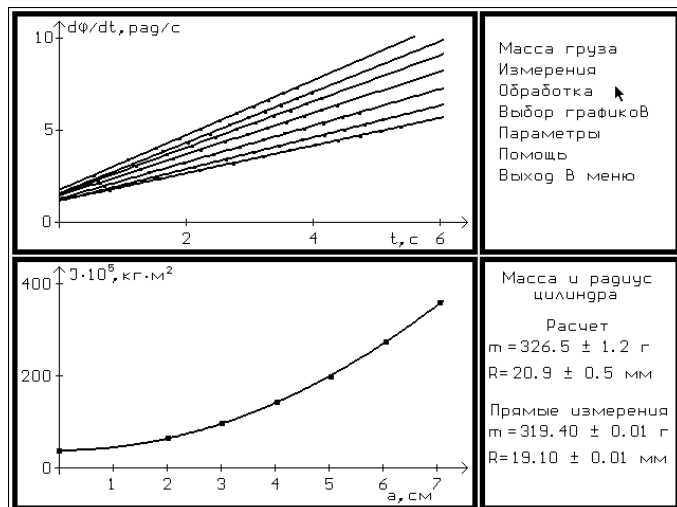


Рис. 3.15. Результаты проверки теоремы Гюйгенса-Штейнера.

3.6.4. Измерение моментов инерции тел различной формы.

К установке прилагается набор однородных тел различной формы с известными размерами и массами: цилиндр, конус, полу-сфера, плоский равносторонний треугольник, прямоугольный параллелепипед, тонкое кольцо, плоский диск, квадрат и тонкий стержень (см. рис. 3.16). Помещая их поочередно на стол с воздушной подушкой, проводят измерения зависимости углового ускорения от момента приложенной внешней силы. Это дает возможность определить суммарный момент инерции стола и помещенного на него тела, а затем вычислить момент инерции тела. Найденные таким способом

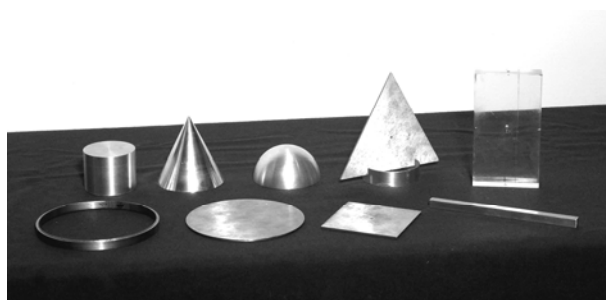


Рис. 3.16. Тела, для которых измеряются осевые моменты инерции.

осевые моменты инерции различных тел сравниваются с теоретическими значениями, вычисленными по формулам, которые также выводятся на экран дисплея вместе с изображениями

этих тел (см. рис. 3.17). Исследуемые тела можно помещать на стол в разных положениях при помощи специальных подставок для проверки справедливости теорем, касающихся осевых моментов инерции (например, для плоских тел).

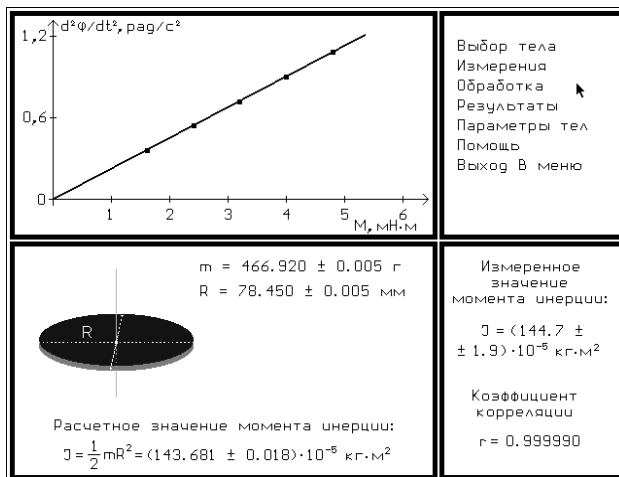


Рис. 3.17. Результаты измерений для диска.

Следующие демонстрационные эксперименты иллюстрируют движение твердого тела, закрепленного в точке, то есть движение гироскопов и волчков [29, гл. 11, §52].

3.7. Гироскопы.

3.7.1. Сохранение направления оси вращения свободного гироскопа (карданов подвес, волчок).

Для демонстрации используется уравновешенный гироскоп, установленный в кардановом подвесе³, что позволяет ему свободно вращаться вокруг трёх взаимно перпендикулярных осей, не подвергаясь воздействию моментов внешних сил (см. рис. 3.18). Гироскоп раскручивается при помощи шнурика, продетого че-



Рис. 3.18. Гироскоп в кардановом подвесе.

³ Изобретён греческим инженером Филоном Византийским (III век до н. э.); назван по имени итальянского инженера Джероламо Кардано (1501 – 1576), описавшего его в своей книге «Хитроумное устройство вещей».

рез отверстие в оси и намотанного на неё. При перемещениях и вращении подставки после раскрутки гироскопа его ось сохраняет неизменное направление в пространстве, поскольку сохраняется момент количества движения, направленный вдоль оси гироскопа.

Сохранение направления оси вращения свободного гироскопа можно также продемонстрировать при помощи волчка (см. рис. 3.19). Если раскрутить волчок на большом листе картона, то, взяв картон двумя руками, можно подбросить волчок вверх. При этом видно, что во время полета ось волчка сохраняет неизменное направление в пространстве. После приземления ось волчка, как обычно, медленно прецессирует вокруг вертикали.



Рис. 3.19. Волчок.

3.7.2. Прецессия и нутация гироскопа.

Опыт может показываться в нескольких вариантах – с гироскопом в кардановом подвесе (а), гироскопом, подвешенным за рамку (б), с небольшим велосипедным колесом из литой резины, подвешенным за конец оси (в), и с массивным волчком, точка опоры которого лежит выше центра масс (г).

Во всех этих случаях наблюдается вынужденная прецессия гироскопа после приложения к нему момента внешних сил. Демонстрируется также нутация гироскопа, то есть быстрые колебания его оси на фоне прецессии после резкого удара по оси.

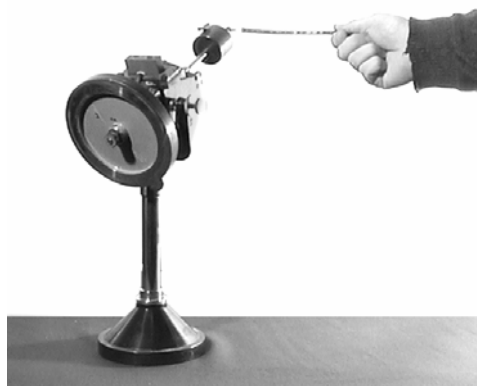


Рис. 3.20. Прецессия гироскопа вокруг направления приложенной силы.

а) Если к концу оси уравновешенного гироскопа в кардановом подвесе, раскрученного в наклонном положении, прикрепить грузик, создав, таким образом, момент силы тяжести, то гироскоп начинает прецессировать вокруг вертикальной оси. Если прикрепить к концу оси гироскопа пружинку и тянуть за неё в различных направлениях, то

можно продемонстрировать, что прецессия происходит вокруг направления постоянной силы, приложенной к гироскопу. Для данной демонстрации можно использовать также гироскоп, являющийся ротором высокооборотного электродвигателя (см. рис. 3.20).

Поскольку на штангу, расположенную вдоль оси этого гироскопа, надет грузик, положение которого можно изменять, то можно приложить к гироскопу определённый момент силы тяжести, сместив этот грузик. Когда точка опоры не совпадает с центром масс гироскопа, мы получаем так называемый «гироскопический маятник», угловая скорость прецессии которого постоянна, то есть не зависит от наклона оси гироскопа. Гироскопические маятники с большими периодами прецессии (десятки минут) мало подвержены действию кратковременных сил и применяются на самолётах и морских судах для создания искусственного горизонта и искусственной вертикали. После наблюдения движения гироскопического маятника можно продемонстрировать работу авиагоризонта, который имеется в коллекции приборов Кабинета физических демонстраций физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

б), в) Для демонстрации прецессии под действием силы тяжести можно использовать гироскоп, подвешенный на шнуре за рамку вблизи конца его оси (см. левый рисунок 3.21), или небольшое велосипедное колесо, подвешенное за конец оси. Для этой цели хорошо подходят массивные колёса от детских велосипедов,

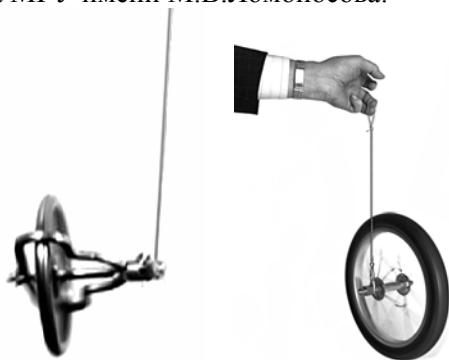


Рис. 3.21. Прецессия гироскопа в поле силы тяжести.

изготовленные из литой резины и обладающие большим моментом инерции (см. правый рисунок 3.21). Пока гироскоп или колесо не раскручены, они свободно висят на шнурах, а после раскрутки при горизонтальном положении оси – прецессируют под действием собственного веса вокруг вертикали. Если подтолкнуть ось в направлении прецессии, то она поднимется, приближаясь к вертикальному положению, а если задержать прецессию, то ось гироскопа опустится, поскольку при этом появляется прецессия вокруг гори-

зонтальной оси, вдоль которой направлена дополнительная сила, действующая на гироскоп. После резкого удара по оси вращающегося колеса наблюдаются затухающие нутационные колебания.

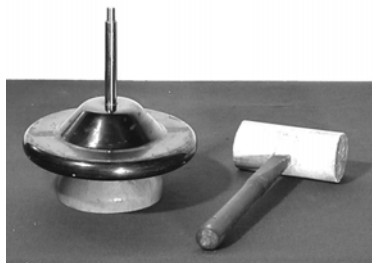


Рис. 3.22. Прецессия и нутация волчка.

г) Массивный волчок специальной формы, изготовленный таким образом, что его центр масс находится ниже опорного острия, устанавливается на специальной подставке в виде усеченного конуса (см. рис. 3.22). Острие волчка опирается на выемку наверху подставки, что позволяет оси волчка отклоняться от вертикали на значительные углы (до $\sim 30^\circ$). После раскручивания волчка при помощи электродвигателя с цилиндрической резиновой насадкой на валу можно наблюдать медленную прецессию, отклонив ось волчка от вертикали ударом деревянного молотка. При этом после удара одновременно с прецессией наблюдается и нутация волчка. Амплитуда нутационных колебаний оси при малых угловых скоростях вращения волчка может быть достаточно велика.

Затем можно продемонстрировать движение полусвободного гироскопа.

3.7.3. Опрокидывающийся гироскоп (гироскоп на вращающемся диске).

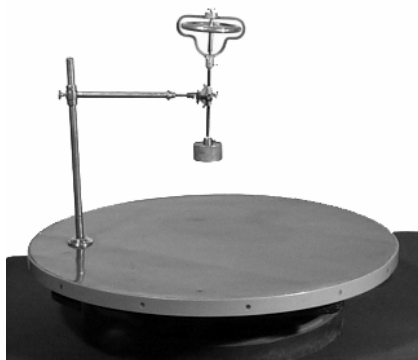


Рис. 3.23. Опрокидывающийся гироскоп.

Полусвободный гироскоп, имеющий возможность свободно поворачиваться только в одной вертикальной плоскости, после раскрутки ставится на поворотное основание; при его поворотах ось вращения гироскопа устанавливается параллельно оси вращения основания, причем оба вращения происходят в одну и ту же сторону (см. рис. 3.23). При измене-

нии направления вращения основания на противоположное гироскоп «опрокидывается», то есть переворачивается на 180° .

Опыт может служить иллюстрацией к опыту Барнетта по ферромагнетизму при чтении лекций по разделу «Электричество и магнетизм» курса общей физики.

3.7.4. Катящийся обруч.

Металлический обруч или диск заставляют катиться по горизонтальной поверхности аудиторного стола. Затем по верхней части обруча, перпендикулярно его плоскости, наносят удар деревянным молотком, как бы желая опрокинуть обруч на бок. В результате этого направление движения обруча изменяется: он поворачивается вокруг вертикальной оси и начинает катиться под углом к первоначальному направлению, так как при ударе вектор момента количества движения обруча поворачивается. Опыт может служить иллюстрацией принципа езды на велосипеде.

3.8. Гироскопические силы.

3.8.1. Гибкий диск.

Демонстрируется происхождение гироскопических сил, возникающих при попытках изменить направление оси вращающегося тела. Гироскопические силы, возникающие при поворотах оси гироскопа, можно рассматривать как силы Кориолиса⁴ во вращающейся системе отсчета. Предположим, что диск гироскопа, вращавшийся с угловой скоростью ω , начинает поворачиваться вокруг оси OO' , проходящей через центр масс диска и лежащей в его плоскости, с угловой скоростью Ω (см. рис. 3.24). При этом в системе отсчета, связанной с осью гироскопа и вращающейся с угловой скоростью Ω , возник-

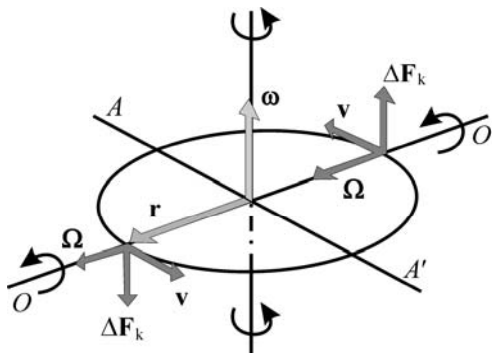


Рис. 3.24. Гироскопические силы.

⁴ Г. Г. Кориолис (1792 – 1843) – французский механик, член Парижской Академии Наук.

кают кориолисовы силы инерции $\Delta \mathbf{F}_k = -2\Delta m(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v})$, достигающие максимальной величины на линии, совпадающей с осью поворота $\boldsymbol{\Omega}$; здесь $\mathbf{v} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}$ – вектор линейной скорости, Δm – масса, \mathbf{r} – расстояние элемента диска от оси вращения. Эти силы стремятся повернуть диск вокруг оси AA' , перпендикулярной $\boldsymbol{\omega}$, и у свободного гироскопа вызывают прецессионное движение.

Если у диска гироскопа гибкие края, то наличие кориолисовых сил будет наглядно проявляться в изгибании этих краев в направлении действия сил. Для приведения диска во вращение с угловой скоростью $\boldsymbol{\Omega}$ его центральная часть должна быть жесткой; таким образом, диск должен иметь переменную жесткость, максимальную в центре и минимальную по краям. Для показа на лекции желательно добиться как можно большего изгиба диска; при этом следует иметь в виду, что максимальное отклонение краев будет наблюдаться при сравнительно небольших скоростях вращения ω , когда центробежные силы инерции, пропорциональные ω^2 и стремящиеся вернуть отклоненные края диска в плоскость, перпендикулярную оси вращения, будут не слишком велики по сравнению с изгибающими диск кориолисовыми силами, пропорциональными ω .

Конструктивно демонстрация оформлена следующим образом (см. рис. 3.25). Двигатель с диском на валу закреплен на поворотном устройстве таким образом, что ось поворота OO' лежит в плоскости диска и проходит через его центр. Ось поворотного устройства с ручкой проходит через два подшипника, установленные на стойке, прикрепленной к массивной станине. Питание двигателя осуществляется от сети переменного тока (~ 220 В) через последовательно включенный конденсатор, величина которого подбирается с целью достижения оптимальной скорости вращения диска. При первоначальном разгоне диска

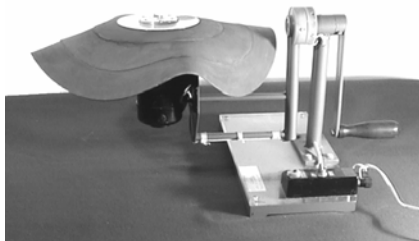


Рис. 3.25. Общий вид установки.

можно увеличить напряжение на двигателе при помощи кнопки «Разгон». Тумблер включения двигателя, кнопка и конденсаторы установлены на станине, а передача питания к двигателю для удобства показа демонстрации

осуществляется через скользящие контакты, смонтированные на оси поворотного устройства. Станина заземляется отдельным проводом.

Диск переменной жесткости склеен из концентрических резиновых кругов диаметром 40 см (1 шт), 30 см (2 шт) и 20 см (2 шт), изготовленных из листовой вакуумной резины толщиной 2 мм. Круги меньшего диаметра наклеены последовательно на обе стороны большого диска и зажаты между двумя дюралевыми шайбами диаметром 10 см, прикрепленными винтами к специальной втулке на валу двигателя. Для удобства наблюдения изгиба краев и направления вращения диска он имеет яркую концентрическую окраску с темными пятнами на центральных дюралевых шайбах. При показе демонстрации вначале раскручивают диск, затем, вращая ручку поворотного устройства в одну сторону, добиваются устойчивого изгиба краев диска (см. рис. 3.26) и убеждаются в соответствии расположения и направления этого изгиба приведенной выше формуле; после изменения направления вращения наблюдают изменение направления изгиба на противоположное.

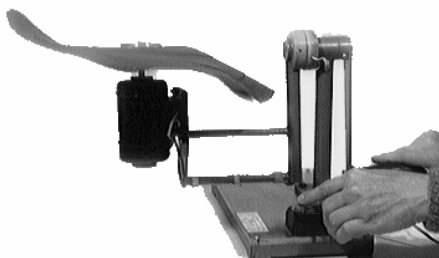


Рис. 3.26. Наблюдение изгиба краев резинового диска.

3.8.2. Монорельсовая дорога.

Демонстрируется применение гироскопических сил для стабилизации движения двухколесной тележки вдоль проволоки, натянутой в аудитории. Пока гироскоп, помещенный на тележке, центр масс которой расположен выше опорной проволоки, не раскручен, тележка не может устойчиво катиться вдоль проволоки и срывается. После раскрутки гироскопа (при вертикальном расположении его оси) наблюдается устойчивое движение тележки по проволоке (см. рис. 3.27). Для стабилизации



Рис. 3.27. Двухколесная тележка с гироскопом на проволоке.

тележки используется полусвободный гироскоп со смещенным вверх при помощи грузика центром тяжести; ось гироскопа имеет возможность свободно поворачиваться только в вертикальной плоскости вокруг оси, перпендикулярной проволоке. При отклонении тележки от вертикального положения возникает момент сил тяжести, направленный вдоль проволоки; этот момент вызывает прецессию – наклон оси гироскопа в направлении от вертикали к проволоке. Из-за этого наклона, поскольку центр масс гироскопа смещён грузиком вверх, возникает момент сил тяжести, перпендикулярный проволоке и стремящийся повернуть ось гироскопа обратно к вертикальной плоскости. На поворотные подшипники гироскопа при этом действует момент гироскопических сил, возвращающий тележку в вертикальное положение. Стабилизация тележки возможна, пока ось вращения гироскопа при колебаниях не достигнет горизонтального положения; после этого тележка переворачивается и срывается с проволоки.

3.8.3. Гироскоп на «качалке».

Гироскоп, являющийся ротором высокоскоростного электродвигателя, закрепляют на специальной подставке, напоминающей нижнюю часть кресла-качалки. Если ось раскрученного гироскопа установлена горизонтально перпендикулярно плоскости качания подставки (см. левый рис. 3.28), то качалка может свободно раскачиваться, поскольку направление оси гироскопа при этом не изменяется. Если же ось гироскопа закреплена в вертикальном положении (см. правый рис. 3.28), то для того, чтобы наклонить качалку, нужно приложить к ней значительное усилие.

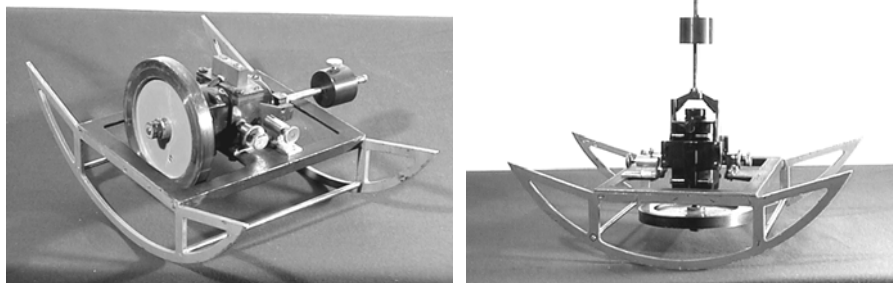


Рис. 3.28. Гироскоп на «качалке».

Если сильно ударить по качалке кулаком, пытаясь наклонить ее, то она будет подпрыгивать, а не наклоняться, сопротивляясь изменению направления оси вращающегося гироскопа.

3.8.4. Гироскоп в шаре.

Опыт, аналогичный предыдущему, можно продемонстрировать при помощи гироскопа, помещенного внутрь полый разборной сферы (см. рис. 3.29). Внутри сферы, которая собирается из двух половинок, имеются опоры игольчатых подшипников для крепления гироскопа. Ротор гироскопа раскручивается при помощи нити, намотанной на его ось и пропущенной через небольшое отверстие в сфере. После раскручивания ротора шар может свободно катиться по столу только таким образом, чтобы направление оси ротора оставалось неизменным, например, горизонтальным и перпендикулярным направлению движения. После толчка в произвольном направлении шар не катится равномерно по столу, а движется вначале с проскальзыванием, выписывая замысловатую траекторию, после чего обычно начинается качение с вращением шара вокруг наклонной оси, совпадающей с осью вращения ротора.



Рис. 3.29. Гироскоп в шаре.

3.9. Волчки.

Важную роль при движении волчков играют силы трения, действующие в точках их опоры. Для иллюстрации влияния этих сил можно использовать следующие демонстрации.

3.9.1. Вращение деревянного «яйца».

Движение волчков отличается от движения гироскопов тем, что в общем случае они не имеют ни одной неподвижной точки. Теория движения волчка достаточно сложна и в курсе общей физики подробно не рассматривается. Следует отметить, что на движение волчка важное влияние оказывает сила трения в точке его соприкосновения с поверхностью, на которой он вращается.

Быстро закрученный волчок стремится вращаться в таком положении, чтобы его центр масс находился как можно выше. В случае яйцеобразного волчка вращение «на боку» неустойчиво, и волчок поднимается, продолжая устойчивое вращение на более остром конце до тех пор, пока его угловая скорость не снизится ниже некоторой критической величины, после чего он упадет.



Рис. 3.30. Вращение деревянного «яйца».

Для демонстрации этого явления используется специально выточенное деревянное «яйцо», которое закручивается на аудиторном столе (см. рис. 3.30). Можно также проделать этот опыт с двумя куриными яйцами, одно из которых сварено вкрутую, а другое оставлено сырым. В последнем случае раскрутить яйцо не удастся из-за наличия внутри него жидкого содержимого. Заметим, что не каждое крутое яйцо можно, раскрутив, поставить на острый конец. Это связано с тем, что воздушный мешок, который есть в яйце, может располагаться таким образом, что центр масс окажется смещенным ближе к острому концу, и яйцо будет устойчиво вращаться на тупом конце.

3.9.2. Китайский волчок.

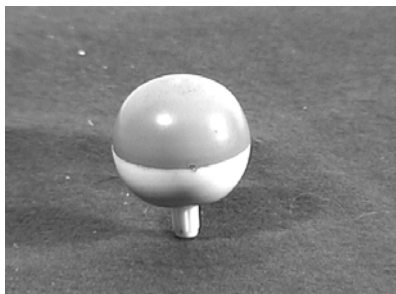


Рис. 3.31. Китайский волчок

Для демонстрации используется волчок специальной формы, представляющий из себя усеченный шар с осью в виде короткого стержня, расположенного вдоль оси симметрии (см. рис.3.31). Центр масс такого волчка расположен ниже центра шара, и его быстрое вращение осью вверх

неустойчиво. После раскручивания в таком положении волчок постепенно переворачивается, встает на ось, как на ножку, и продолжает некоторое время устойчиво вращаться на ней. Следует отметить, что в процессе переворачивания китайского

волчка его момент импульса сохраняет свое направление в пространстве, то есть волчок после переворота вращается относительно стола в том же направлении. В то же время, относительно оси симметрии волчка вращение после переворачивания будет происходить в противоположную сторону, если смотреть со стороны ножки, то есть в процессе переворота угловая скорость вращения вокруг оси симметрии проходит через ноль и меняет свой знак на противоположный.

3.9.3. Кельтские камни.

Забавный опыт, демонстрирующий сложное поведение волчка, можно показать при помощи так называемых «кельтских камней». Они представляют собой внешне одинаковые половинки деревянного эллипсоида вращения (см. рис. 3.32).

Будучи закрученными на аудиторном столе вокруг вертикальной оси, перпендикулярной длинной оси эллипсоида, они демонстрируют радикально отличающееся друг от друга поведение: один «камень» «умеет» устойчиво вращаться только по часовой стрелке, а другой – только против часовой стрелки. Если закрутить «камень» не в том направлении, то он начинает раскачиваться при вращении, затем вращение останавливается, и остаются только колебания вокруг горизонтальной оси, которые, в свою очередь, превращаются во вращательное движение в противоположном направлении.

Секрет опыта заключается в том, что главные оси инерции у двух «камней» при помощи небольших грузиков, находящихся внутри, смещены в разные стороны относительно осей эллипсоида. При этом грузики помещаются парами в углубления, расположенные центрально-симметрично на верхней плоской части «камней», и заклеиваются сверху тонким слоем шпона, так что внешне «камни» выглядят совершенно одинаково, и их центры масс не смещаются относительно своего положения для однородных деревянных заготовок. Разница в поведении «камней» становится заметной лишь при их вращении.

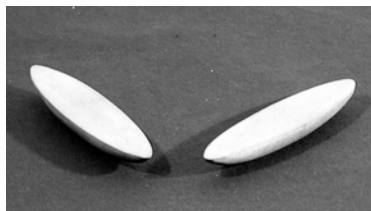


Рис. 3.32. Деревянные модели «кельтских камней».

При некотором старании можно найти среди гальки на берегу моря и настоящие «кельтские» камни, которые будут демонстрировать такое же поведение, как и их деревянные модели (см. рис. 3.33).



Рис. 3.33. «Кельтские» камни.

Глава 4 ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

Законы сохранения в механике Ньютона следуют из уравнений движения и являются первыми интегралами этих уравнений движения [29, гл. 6, п. 2.4]. Иллюстрацию действия этих законов можно начинать с закона сохранения импульса, а затем переходить к закону сохранения момента импульса и закону сохранения и преобразования энергии.

4.1. Закон сохранения импульса.

4.1.1. Опыты с маятниками и с тележками Гримзеля.

Закон сохранения импульса можно продемонстрировать при помощи простого опыта по расталкиванию шариков одинаковых и разных масс пружиной, описанного в п. 2.5.1, и при помощи опытов с тележками Гримзеля, описанных в п. 2.5.2. Все эти опыты можно показывать и при изучении третьего закона Ньютона.

4.1.2. Отдача пушки.

Модель пушки, заправленная несколькими каплями эфира, стреляет резиновой пробкой после поджигания горючей смеси в стволе искрой от автомобильной свечи (см. рис. 4.1). После выстрела снаряд летит вперед, а пушка откатывается назад. Если «снаряд» привязать к оси колес пушки двумя прочными нитями, то пушка, дернувшись назад при выстреле, останавливается на месте после натяжения нитей, так как полный импульс системы «пушка плюс снаряд» до и после выстрела равен нулю.



Рис. 4.1. Опыт с пушкой.

4.1.3. Столкновения тележек на скамье с воздушной подушкой – упругие, частично упругие и неупругие.

Для показа этих экспериментов используется скамья с воздушной подушкой (см. демонстрацию 1.3.2 и рис. 4 2). Интерфейс, связывающий скамью с ЭВМ, дает возможность одновременно измерять кинематические характеристики движения сразу двух тележек, в том числе их скорости. Это позволяет проверить закон сохранения импульса и наблюдать изменение кинетической энергии

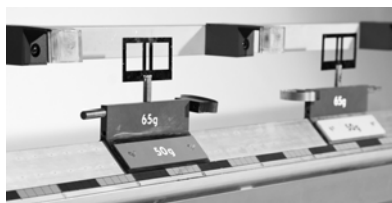


Рис. 4.2. Столкновения тележек на скамье с воздушной подушкой.

системы при различных типах столкновений тележек (упругих и неупругих) и разных соотношениях их масс:

$$m_1 = m_2, m_1 > m_2, m_1 < m_2.$$

Массы тележек задаются перед началом эксперимента, левая тележка получает толчок от электромагнитной пушки и

сталкивается с правой, установленной неподвижно посередине горизонтальной дорожки. Исходя из значений скоростей тележек до и после столкновения и последовательности прохождения тележек мимо разных датчиков, компьютер рассчитывает модули и знаки импульсов тележек, а также их кинетические энергии. Графики зависимостей импульсов и энергий первой и второй тележки, а также суммарного импульса и энергии от времени выводятся на дисплей; сплошными линиями изображены аппроксимирующие прямые, рассчитанные по МНК. Для примера на рисунке 4.3 показаны результаты эксперимента для неупругого удара двух тележек, слева – для импульса, справа – для кинетической энергии.

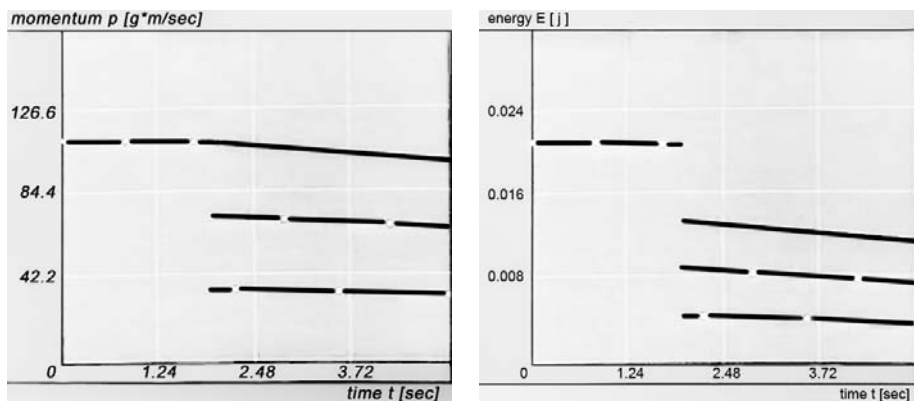


Рис. 4.3. Сохранение импульса и уменьшение кинетической энергии при неупругом ударе тележек.

Численные значения суммарного импульса и энергии до и после столкновения, найденные по этим аппроксимациям в момент удара, также могут выводиться на экран для сравнения. Проверка выполнения закона сохранения импульса проводится для всех трех соотноше-

ний масс тележек при упругом ударе, а также при неупругом ударе. При упругом ударе кинетическая энергия сохраняется, при неупругом – уменьшается, хотя импульс сохраняется в обоих случаях.

4.2. Закон сохранения момента импульса.

4.2.1. Скамья Жуковского¹ (с гантелями и с велосипедным колесом).

С помощью скамьи Жуковского, представляющей собой кресло на подшипниках, позволяющих ему свободно вращаться вокруг вертикальной оси, иллюстрируется закон сохранения момента импульса. Опыт демонстрируется в двух вариантах. Вначале экспериментатор² с гантелями в руках садится в кресло и закручивается, или помощник закручивает экспериментатора при вытянутых в стороны руках с гантелями (см. левый рисунок 4.4). Когда экспериментатор прижимает руки к корпусу, уменьшая свой момент инерции (см. правый рисунок 4.4), угловая скорость вращения кресла вокруг вертикальной оси возрастает, а при разведении рук – уменьшается, так как проекция суммарного момента импульса на эту ось не меняется.



Рис. 4.4. Скамья Жуковского – опыт с гантелями.

В другом варианте опыта помощники раскручивают велосипедное колесо со специально утяжелённым ободом, насаженное на длинную ось, и передают его при горизонтальном положении оси экспериментатору, сидящему в кресле (см. рис. 4.5). Когда он поворачивает ось в вертикальное

¹ Н. Е. Жуковский (1847–1921) – русский учёный, заслуженный профессор Императорского Московского университета, создатель аэродинамики.

² Опыты демонстрирует Н. М. Конопаткин.



Рис. 4.5. Скамья Жуковского – опыт с велосипедным колесом.

положение, кресло закручивается в сторону, противоположную вращению колеса; при возврате оси в горизонтальное положение кресло останавливается, а при повороте оси вертикально вниз – закручивается в противоположную сторону, так как суммарная проекция на вертикальную ось момента импульса экспериментатора с колесом сохраняет постоянное нулевое значение.

4.2.2. Электродвигатель в подшипниках (взаимно противоположное вращение статора и ротора).

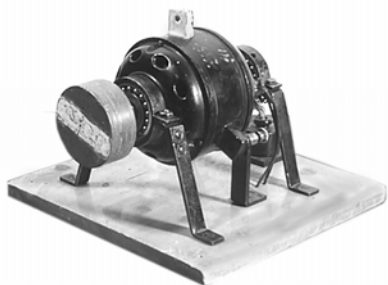


Рис. 4.6. Опыт с электродвигателем

Обычно статор электродвигателя закрепляется на станине, так что при включении тока раскручивается лишь ротор, хотя и на статор действует момент сил. Это можно продемонстрировать при помощи установки, где статор установлен в двух подшипниках, закреплённых на неподвижном основании (см. рис. 4.6). Ток к статору подводится через специальные контактные кольца и щётки. На ротор двигателя насажен диск с меткой, чтобы было удобнее следить за его вращением. При включении двигателя ротор и статор закручиваются в противоположных направлениях, демонстрируя сохранение начальной нулевой проекции момента импульса на ось вращения установки. Если статор закрепить при помощи скобы, то ротор закручивается с большей скоростью, чем в первом случае.

4.2.3. Пушка с несимметричным снарядом.

Модель пушки, заправленная несколькими каплями эфира, стреляет после поджигания горючей смеси в стволе искрой от автомобильной свечи. В качестве снаряда берется несимметричное тело – свинцовый цилиндр, соединенный с резиновой пробкой, которая вставляется в ствол пушки (см. рис. 4.7). Центр масс этого тела расположен в стороне от оси пушки. Поскольку суммарный момент импульса пушки со снарядом до и после выстрела равен нулю, при выстреле снаряд закручивается в одну сторону, а пушка – в другую.

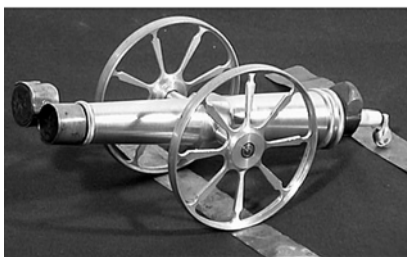


Рис. 4.7. Пушка с несимметричным снарядом.

4.2.4. Маятник Г. Н. Пешехонова.

Гантелеобразный физический маятник может совершать колебания вокруг горизонтальной оси, проходящей немного выше его центра масс. Эта ось, в свою очередь, укреплена в вилке, которая может свободно вращаться в подшипниках вокруг вертикальной оси (см. рис. 4.8). Если заставить маятник одновременно колебаться и вращаться, то он будет совершать сложное движение, быстро закручиваясь при каждом прохождении положения равновесия и замедляя вращение при максимальном отклонении, так как момент импульса относительно вертикальной оси сохраняется, а момент инерции маятника меняется в процессе колебаний.



Рис. 4.8. Маятник Г. Н. Пешехонова.

4.2.5. «Кошка» Конопаткина³.

Демонстрируется модель, иллюстрирующая способ, используемый кошкой для того, чтобы во время падения из любого положения развернуться и приземлиться на лапы. Внутри «кошки» имеется пружинный механизм, который может вращать ее «хвост» относительно «туловища». Поскольку во время падения момент импульса «кошки» сохраняется, вращение части ее тела – хвоста – в одну сторону вокруг оси туловища приводит к повороту туловища вокруг этой оси в другую сторону, и «кошка», падая вначале спиной вниз, все же приземляется на лапы (см. рис. 4.9).

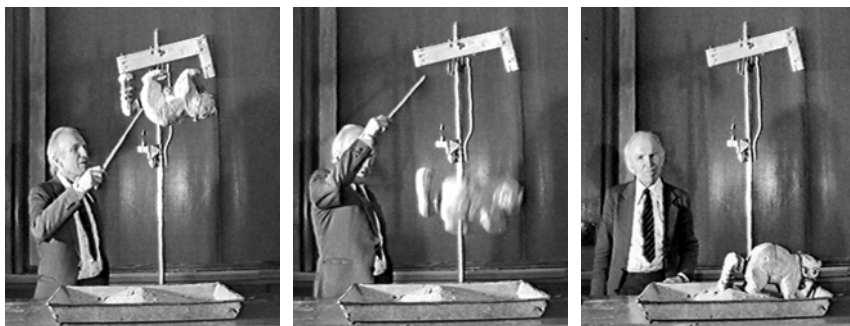


Рис. 4.9. Опыт с «кошкой» демонстрирует Н. М. Конопаткин.

Следует отметить, что реальная кошка при падении действует не столько хвостом, сколько всем корпусом, по очереди то вытягивая голову и передние лапы вдоль туловища и расставляя задние лапы и хвост, то наоборот, поворачивая при этом одну часть тела относительно другой.

4.2.6. Вращающаяся двойная цилиндрическая спираль.

Установка⁴ (см. рис. 4.10) состоит из массивного основания, сверху и внизу которого установлены шарикоподшипники. В них может свободно вращаться вокруг вертикальной оси двойная цилиндрическая спираль, навитая из легкой металлической трубки и прикрепленная к трём вертикальным стержням, соединённым с двумя дисками, опирающимися на нижний и верхний подшипники.

³ Демонстрация предложена Г. И Катаевым, поставлена сотрудником Кабинета физических демонстраций физического факультета МГУ Н. М. Конопаткиным.

⁴ Разработана М. А. Грабовским и В. С. Егоровым.

Витки спирали образуют рельсы, по которым может катиться шарик, положенный между ними через отверстие в верхнем опорном диске, после разгона на специальном верхнем разгонном витке, имеющем переменный шаг и наклон. Под нижним концом спирали прикреплена защитная сетка для предохранения установки от ударов падающего шарика и может устанавливаться ловушка, задерживающая шарик после прохождения последнего витка.

Для демонстрации закона сохранения момента количества движения в спираль закладывают массивный стальной шарик и, одновременно отпустив спираль и шарик, наблюдают закручивание спирали в сторону, противоположную движению шарика. После того, как шарик, уносящий определённый момент импульса относительно оси установки, вылетит из последнего витка спирали, она некоторое время вращается в противоположную сторону, пока не израсходует свой момент импульса на преодоление момента сил трения. Если внизу спирали установить ловушку для шарика, то после его вылета из

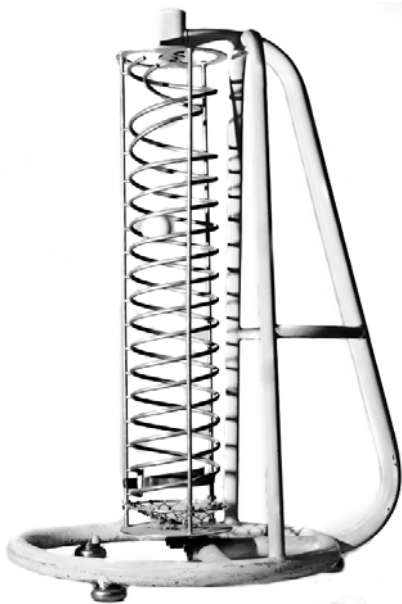


Рис. 4.10. Вращающаяся двойная спираль.

последнего витка спирали приобретает момент импульса спирали, и её вращение останавливается, поскольку суммарный момент импульса установки при движении шарика остаётся равным нулю.

Закрепив спираль в неподвижном положении, на установке можно также продемонстрировать действие сил реакции рельсов, заставляющих шарик двигаться по искривлённой траектории, подобно тому, как движется мотоциклист во время гонок по вертикальной стене. Если остановить движение шарика по спирали, он тут же срывается и падает вниз.

Затем можно проиллюстрировать действие закона сохранения момента импульса при ударе по физическому маятнику. Для этого служит следующая несложная установка.

4.2.7. Центр удара (реакция оси при ударе)⁵.

Однородный металлический стержень (алюминиевый профиль в форме двутавра) подвешен за верхний конец на штативе при помощи промежуточной шарнирной вставки, позволяющей верхнему концу стержня смещаться вбок при ударе по стержню палкой. Для наблюдения этого смещения к стержню прикреплена стрелка, отклоняющаяся относительно другой стрелки, закрепленной на шарнирной вставке.



Рис. 4.11. Реакция оси при ударе по маятнику.

Прибор позволяет продемонстрировать наличие горизонтальных сил реакции оси неподвижно висящего физического маятника при ударе по нему в горизонтальном направлении. Если удар приходится ниже центра качания стержня и направлен влево, то его верхний конец на шарнире отклоняется вправо (см. левый рисунок 4.11), и наоборот, при ударе влево выше центра качания верхний конец стержня отклоняется также влево (см. правый рисунок 4.11). При ударе в центр качания, который для однородного стержня находится на расстоянии от точки подвеса,

⁵ Прибор предложен и изготовлен доцентом кафедры общей физики и физики конденсированного состояния физического факультета МГУ Г. Е. Пустоваловым.

равном двум третям его длины, смещение верхнего конца стержня, а, следовательно, и реакция оси его подвеса отсутствуют.

Прибор позволяет понять причину изменения в общем случае горизонтальной (и вначале – нулевой) проекции импульса маятника при горизонтальном ударе по нему, и показывает, что сохраняющейся величиной при ударе в данном случае является момент импульса маятника относительно оси его подвеса.

4.3. Закон сохранения и превращения энергии.

4.3.1. Движение тележки по наклонной скамье с воздушной подушкой (переход кинетической энергии в потенциальную и обратно).

Демонстрируется сохранение механической энергии при движении тележки по наклонной скамье с воздушной подушкой (см. демонстрацию 1.3.2). Масса тележки известна, угол наклона φ отсчитывается по микрометрическому винту на опорной ножке скамьи, и потенциальная энергия тележки рассчитывается по формуле: $U = mgh = mgx \sin \varphi \approx mgx\varphi$, где x – координаты датчиков.

Кинетическая энергия тележки вблизи каждого датчика $T = mv^2 / 2$ определяется, исходя из известной массы и измеренных значений скорости тележки. После начального толчка электромагнитной «пушкой» тележка движется вверх, останавливается и возвращается к началу скамьи.

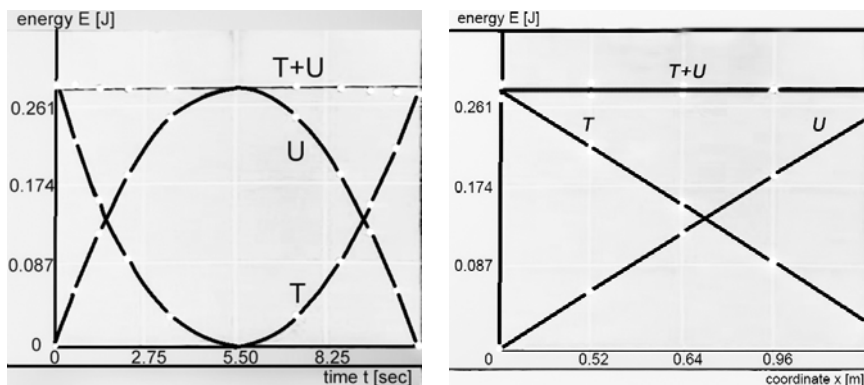


Рис. 4.12. Демонстрация закона сохранения механической энергии на дорожке с воздушной подушкой.

На дисплее наблюдаются графики зависимостей от времени t и координаты x величин U , T и полной механической энергии тележки $E = T + U$, которая должна сохраняться. Графики $U(t)$ и $T(t)$ (см. левый рисунок 4.12) имеют вид парабол, ориентированных ветвями вниз и вверх, соответственно, а $U(x)$ и $T(x)$ – прямых линий (см. правый рисунок 4.12); при этом видно, что $E \approx \text{const}$. Все сплошные аппроксимирующие кривые и прямые на рисунке 4.12 получаются при обработке экспериментальных данных по МНК.

4.3.2. «Прыгающий» шарик.

Демонстрируется переход потенциальной энергии в кинетическую и обратно с потерей некоторой части механической энергии вследствие не вполне упругого удара. На штативе с небольшим электромагнитом подвешивается стальной шарик (от подшипника) диаметром 8-10 мм. Под электромагнитом находится толстая стеклянная пластина, которую устанавливают в строго горизонтальном положении (см. рис. 4.13).



Рис. 4.13.
«Прыгающий» шарик.

Включив ток через электромагнит, подвешивают к нему шарик. После размыкания цепи шарик падает и подскакивает после удара о стекло вверх на высоту, несколько меньшую начальной. Если в момент подскока снова включить электромагнит, то шарик к нему притянется и снова повиснет. Если не включать ток в электромагните, то шарик будет подпрыгивать на

все меньшую высоту, демонстрируя постепенную потерю своей механической энергии.

В момент остановки шарика при отскоке от стекла кинетическая энергия шарика превращается в потенциальную энергию упругой деформации, которая при каждом следующем отскоке уменьшается. Это можно продемонстрировать следующим образом: стекло надо закоптить и слегка наклонить, чтобы шарик немного смещался при последовательных отскоках. Тогда шарик оставляет на закопченном стекле ряд круглых следов, диаметры кото-

рых постепенно уменьшаются, что говорит об уменьшении деформации стекла и шарика при его падении со все меньшей высоты.

4.3.3. Маятник Галилея.

Маятник Галилея (см. рис. 4.14) представляет собой математический маятник (шарик на длинной нити), у которого на вертикальной штанге под точкой подвеса O можно устанавливать шпенец D , задерживающий нить во время колебаний шарика после его отклонения в положение A

от положения равновесия E . При этом шарик, описывая при отклонениях влево и вправо дуги различного радиуса, оказывается в крайних положениях A , B , C на одной и той же высоте, что говорит о сохранении механической энергии системы. Если шпенец стоит достаточно

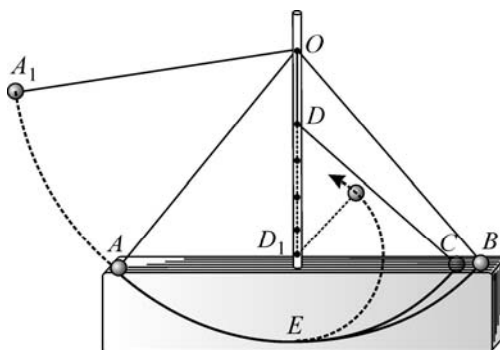


Рис. 4.14. Маятник Галилея.

близко к положению равновесия грузика (в положении D_1), а начальное отклонение достаточно велико (точка A_1), то кинетическая энергия не может полностью превратиться в потенциальную, и начинается вращение грузика вокруг шпеныка.

Для демонстрации закона превращения энергии можно использовать классический опыт А. К. Тимирязева, один из вариантов которого описан ниже.

4.3.4. Опыт А. К. Тимирязева⁶ (вращение вала динамо-машины опускающейся гирей).

Для демонстрации можно использовать в качестве динамо-машины небольшой коллекторный двигатель постоянного тока с постоянным магнитом в статоре, дающий при невысоких оборотах (~500 об/мин) напряжение 2-3 В. На вал редуктора электродвигателя

⁶ А. К. Тимирязев (1880 – 1955) – русский и советский физик, профессор МГУ.

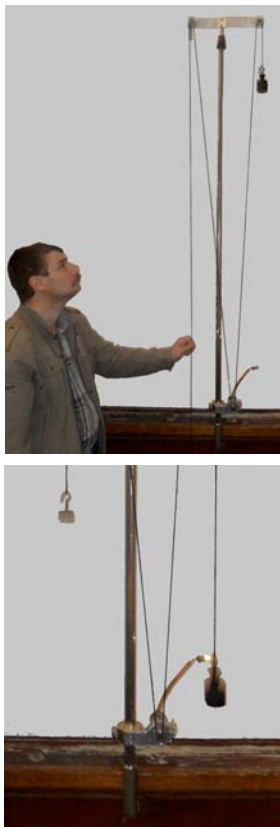


Рис. 4.15. Опыт Тимирязева (демонстрирует А. А. Якута).

насаживается шкив, вокруг которого оборачивается шнурок длиной 4-5 м. Концы шнурка перекидываются через блоки, находящиеся на штативе на высоте 2-3 м над полом аудитории, и подвешивают к ним грузы (см. рис. 4.15): с одной стороны – массой ~ 100 г (для натяжения шнурка), а с другой – ~ 1 кг (для приведения системы в движение). Вращая шкив, наматывают веревку и поднимают тяжелый груз на максимальную высоту, а к двигателю (то есть к динамо-машине) через выключатель присоединяют электрическую лампочку, рассчитанную на то же небольшое напряжение.

Вначале, не замыкая цепь, отпускают груз и наблюдают его ускоренное движение. Затем вновь поднимают груз, отпускают его, и когда он разгонится, замыкают цепь; при этом лампочка загорается, а движение груза заметно тормозится и далее происходит с постоянной скоростью до его касания с полом.

4.4. Упругие и неупругие соударения.

Для демонстрации законов сохранения импульса и механической энергии полезно использовать опыты по упругим столкновениям шаров или тележек на воздушной дорожке. При сравнении упругих и неупругих столкновений следует показать, что в последнем случае механическая энергия, в отличие от импульса, не сохраняется.

4.4.1. Соударения шаров.

В данном опыте демонстрируется неупругий и упругий удар шариков, подвешенных на нитях (пара свинцовых и несколько костяных шариков, см. рис. 4.16). При неупругом ударе отклоненный свинцовый шарик после удара о такой же неподвижный шарик

движется вместе с ним; при упругом ударе костяных шаров они обмениваются скоростями: налетающий шарик останавливается, а покоившийся отлетает. Это приводит к интересному эффекту – шарики как бы «умеют считать»: если одновременно отклонено один, два, три и т.д. шариков из нескольких, подвешенных в ряд, то отскакивает ровно столько же шариков с другой стороны ряда, а налетевшие шарики останавливаются. Это следует из законов сохранения импульса и энергии. При дальнейших отскоках начинают сказываться потери энергии, и постепенно в совместное движение приходят все подвешенные шарики. Демонстрация требует аккуратной предварительной настройки: костяные шарики в покое должны висеть вдоль одной горизонтальной линии, слегка касаясь друг друга.

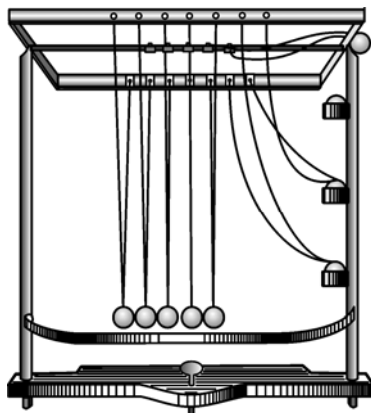


Рис. 4.16. Упругие и неупругие соударения шаров.

При дальнейших отскоках начинают сказываться потери энергии, и постепенно в совместное движение приходят все подвешенные шарики. Демонстрация требует аккуратной предварительной настройки: костяные шарики в покое должны висеть вдоль одной горизонтальной линии, слегка касаясь друг друга.

4.4.2. Соударения тележек на скамье с воздушной подушкой (проверка сохранения кинетической энергии при упругом ударе и измерение потерь энергии при неупругом ударе).

Опыты по сохранению или изменению кинетической энергии тележек на скамье с воздушной подушкой при их упругом и неупругом столкновении и при разных соотношениях масс тележек описаны в пункте 4.1.3.

4.4.3. Нелобовой упругий удар бильярдных шаров.

При нелобовом упругом ударе движущегося шара о неподвижный шары после удара, как нетрудно показать, должны разлетаться под углом 90° . Это демонстрируется при помощи небольшой бильярдной доски или непосредственно на горизонтальном аудиторном столе. На доске или

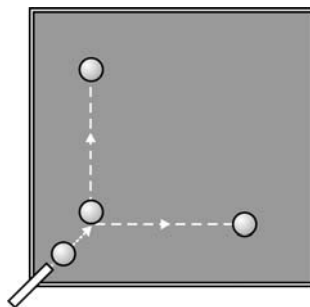


Рис. 4.17. Нелобовой упругий удар бильярдных шаров.

столе мелом делается метка, на которую ставится один из шаров, после чего производят удар кием по второму шару в направлении первого, но так, чтобы прицельная линия проходила не через его центр, а немного в стороне. В помощь демонстратору надо пригласить двух студентов из аудитории, которые будут ловить и останавливать шары перед их ударом о стенки бильярдной доски или падением со стола на пол. В тех местах, где шары остановлены, также надо сделать метки мелом, после чего соединить их с точкой, где находился неподвижный шар (см. рис. 4.17). Прямой угол между этими линиями проверяется угольником. Опыт следует повторить для нескольких различных прицельных расстояний и продемонстрировать, что во всех случаях разлет шаров происходит под углом 90° .

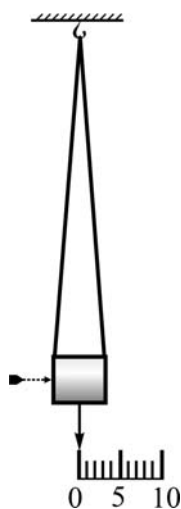


Рис. 4.18.

Баллистический маятник.

4.4.4. Баллистический маятник.

Следующая демонстрация служит для показа неупругого удара, а также пояснения баллистического метода измерения скорости пули. Баллистический маятник состоит из небольшого ящика с песком, подвешенного бифилярно (см. рис. 4.18). Снизу к ящику прикреплена стрелка-указатель, а около нее установлена шкала с крупными делениями, вдоль которой перемещается указатель при отклонении ящика. Масса ящика порядка $0,5-1,0$ кг, высота подвеса $1,5-2$ м. Рекомендуется внутри ящика, у задней стенки (между песком и деревом), поместить стальную пластинку толщиной не менее 1 мм, чтобы застраховаться от возможности пробивания пулей ящика насквозь. Выстрел производят параллельно рядам аудитории из пневматической винтовки, установленной в $1,5-2$ м перед ящиком, причем в направлении выстрела должна быть глухая капитальная стена.

Заряжают винтовку непосредственно перед выстрелом. Стрелять надо в метку, сделанную в центре передней стенки ящика. После попадания пули в ящик маятник отклоняется на некоторый угол, величину которого можно определить по перемещению стрелки-указателя. Зная массу ящика и пули, а также длину маятника и отклонение стрелки по шкале, можно вычислить скорость пули – около 150 м/с для пневматической винтовки.

4.5. Механическое равновесие (прибор А. Б. Млодзеевского⁷). Потенциальная яма и потенциальный барьер.

Для демонстрации опытов, в которых механическое равновесие и потенциальная энергия тел определяется не положением их центра тяжести, а другими параметрами, используется прибор А. Б. Млодзеевского. В прочную металлическую раму, укрепленную на деревянном основании, вставлен изогнутый стальной прут, по которому может перемещаться блок с крючком на обойме. К крючку прикрепляют стальную пружину, другой конец которой может прицепляться к крючку на левой или правой стойке рамы (см. рис. 4.19). В первом случае мы можем наблюдать устойчивое равновесие системы, когда при небольших отклонениях от положения равновесия система возвращается обратно, а во втором – неустойчивое, когда при отклонении от положения равновесия отклонение стремится увеличиться. При этом основную роль здесь играет потенциальная энергия упругой деформации пружины, а энергия в поле силы тяжести значительно меньше и в условиях опыта практически несущественна.

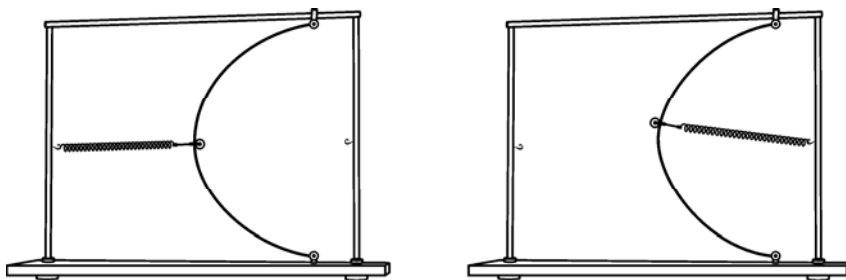


Рис. 4.19. Потенциальная яма и потенциальный барьер.

На левом рисунке 4.19 (первый опыт) блок на пруте находится в «потенциальной яме», и при небольших отклонениях от положения равновесия в системе возникают механические колебания. На правом рисунке 4.19 блок может занимать два устойчивых положения равновесия, при которых блок находится в самом верхнем или в самом нижнем положениях, когда пружина имеет минимальное растяжение и, следовательно, минимальную потенциальную энергию. Эти

⁷ А. Б. Млодзеевский (1883 – 1959) – советский физик, профессор МГУ. Блестящий лектор и демонстратор, автор учебников.

положения разделены «потенциальным барьером», для преодоления которого надо совершить работу по растяжению пружины.

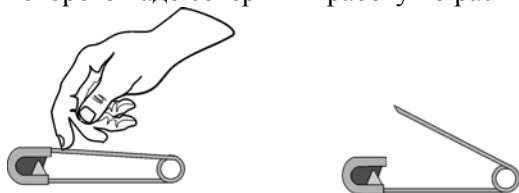


Рис. 4.20. Преодоление потенциального барьера на модели булавки.

Потенциальный барьер можно продемонстрировать также при помощи большой модели «английской» булавки (имеется в Кабинете физических демонстраций физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова). Для перевода острия булавки из закрытого положения в открытое и обратно надо преодолевать потенциальный барьер, совершая работу против упругих сил, возникающих при изгибе проволоки, из которой изготовлена булавка.

4.6. Шарик на горке сложного профиля.

Установка (см. рис. 4.21) позволяет продемонстрировать превращение потенциальной энергии в кинетическую и обратно при движении шарика по горке, имеющей сложный профиль с выступом.

Можно также проиллюстрировать понятия «потенциальной ямы» и «потенциального барьера», которыми являются в данном



Рис. 4.21. Шарик на горке сложного профиля.

случае два углубления и выступ на горке. При недостаточной для преодоления барьера механической энергии шарик совершает колебания вокруг дна ямы, а при сообщении ему достаточной энергии может преодолеть барьер, выйти из ямы и переместиться в другую, соседнюю яму.

Демонстрация может использоваться также при чтении раздела «Молекулярная физика» курса общей физики при обсуждении теплового расширения (ямы на горке несимметричны) и явления диффузии в твердых телах и жидкостях.

Глава 5

СИЛЫ ИНЕРЦИИ.

ДВИЖЕНИЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАЗНЫХ ТИПОВ СИЛ

В учебниках по разделу «Механика» курса общей физики и в программе этого курса описания движений тел под действием разных типов сил обычно выделяются в виде отдельных глав (см., например, [29 – 31]). В соответствии с этим в главе 5 данного учебного пособия приведены описания различных демонстрационных экспериментов, иллюстрирующих основные закономерности и особенности таких движений.

Вначале можно продемонстрировать опыты, объясняющие возникновение и проявление сил инерции различного типа в неинерциальных системах отсчета, и начинать надо с так называемых «поступательных» сил инерции.

5.1. Отвес на тележке.

На рельсах устанавливают тележку (см. выше демонстрацию 2.6.1). На тележке укрепляют небольшой штатив, на котором висит шар диаметром 15-20 мм. Тележка соединена нитью, перекинутой через блок на краю стола, с грузом, под действием которого она приводится в движение.

Сначала подбирают небольшой груз, который, опускаясь, заставляет тележку двигаться равномерно, без ускорения. Для обеспечения равномерного движения рекомендуется создать трение между нитью и поверхностью какого-нибудь мягкого предмета. Когда тележка трогается с места, шарик отвеса слегка отклоняется, а потом возвращается в положение равновесия. Чтобы начальное отклонение было минимальным или даже вовсе отсутствовало, тележку при трогании с места следует придерживать рукой. Затем к нити прикрепляют большой груз, который, опускаясь, заставляет тележку двигаться с ускорением. Под влиянием силы инерции отвес отклоняется на некоторый угол, причем тем больший, чем значительнее ускорение тележки (см. рис. 5.1).

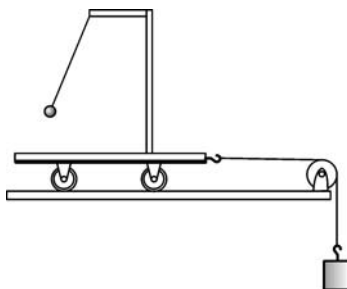


Рис. 5.1. Отвес на тележке.

5.2. «Прыгающий» шарик на равномерно или ускоренно движущейся тележке.

Электромагнит, «прыгающий шарик» и стеклянную пластину, описанные в демонстрации 4.3.2, устанавливают на тележке (см. описание предыдущей демонстрации и рис. 5.2)). Провода, подводящие ток к электромагниту, должны быть гибкими и достаточно длинными. Их спускают с высокого штатива, чтобы они не мешали движению тележки. К перекинутой через блок и прикрепленной к тележке нити подвешивают небольшой груз, который приводит тележку в равномерное движение. Размыкая цепь электромагнита, заставляют шарик упасть на стеклянную пластину и, замыкая цепь в момент подсакивания шарика, притягивают его вновь к электромагниту. То же проделывают при неподвижной тележке и показывают, что в обоих случаях опыт проходит одинаково. Подвесив затем к нити больший груз, заставляют тележку двигаться с ускорением. Теперь шарик при отскакивании от стеклянной пластины не достигает электромагнита, а вследствие действия силы инерции значительно отстает от него. Демонстрацию показывают в теневой проекции.

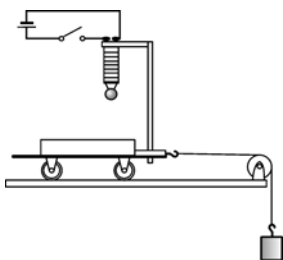


Рис. 5.2. «Прыгающий» шарик.

При неподвижной тележке и показывают, что в обоих случаях опыт проходит одинаково. Подвесив затем к нити больший груз, заставляют тележку двигаться с ускорением. Теперь шарик при отскакивании от стеклянной пластины не достигает электромагнита, а вследствие действия силы инерции значительно отстает от него. Демонстрацию показывают в теневой проекции.

5.3. Опыты Н. А. Любимова¹.

5.3.1. Свободное падение рамки с грузом на пружине.

Опыт Н. А. Любимова с падающей рамкой служит для демонстрации «невесомости», то есть отсутствия статического воздействия частей свободно падающей механической системы друг на друга. Прибор состоит из легкой алюминиевой рамки, к которой прикреплен лист из легкого сплава, окрашенный в белый цвет. Вдоль рам-

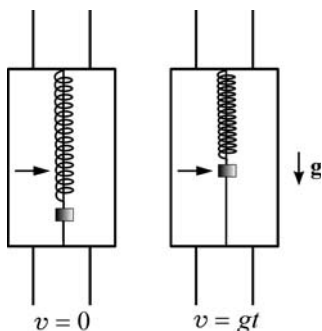


Рис. 5.3. Опыт Любимова.

¹ Н. А. Любимов (1830 – 1897) – русский физик и публицист, заслуженный профессор (1879) Московского университета.

ки крепится вертикальный стержень, по которому может скользить висящий на легкой пружине деревянный грузик (см. рис. 5.3). На тыльной стороне рамки крепятся четыре направляющих зажима, благодаря которым она может скользить вдоль двух вертикально натянутых между полом и балконом аудитории стальных проволок. Внизу около пола аудитории на проволоках висит тяжелая планка, обеспечивающая их натяжение и параллельность. На каждую проволоку внизу около планки надета спиральная пружина длиной 50-60 см, служащая для амортизации удара при падении рамки.

Демонстрацию проводят следующим образом. Надев на проволоки направляющие зажимы, подтягивают рамку вверх за шнур, перекинутый через блок и прикрепленный к крючку, зацепленному за верхнюю планку рамки. Затем рамку отпускают, и она свободно падает. При этом падении, поскольку ускорение рамки можно считать равным g , грузик, падающий вместе с рамкой с тем же ускорением, не действует своим весом на пружину, и она сокращается. Для того чтобы это сокращение было хорошо заметно, на белом фоне рамки приклеивают хорошо заметную черную метку (стрелку) напротив положения грузика, соответствующего нерастянутой пружине.

5.3.2. Свободное падение рамки с маятником.

Другой вариант опыта Любимова проводится с такой же рамкой, но с укрепленным на ней легким маятником, состоящим из стержня и плоской круглой шайбы на его конце. Подтянув рамку вверх, наблюдают колебания маятника, происходящие с определенным периодом (порядка 0,5 с). Если отпустить рамку в тот момент, когда маятник находится в одном из крайних положений, с наибольшим отклонением от положения равновесия, то скорость маятника в этот момент равна нулю, и при свободном падении рамки с ускорением g момент силы тяжести относительно точки подвеса маятника компенсируется моментом поступательной силы инерции, и маятник во время падения не колеблется.

Если же отпустить рамку в тот момент, когда маятник движется с некоторой скоростью (например, проходит через положение равновесия), то поскольку сумма моментов силы тяжести и силы инерции равна нулю, то маятник не колеблется, а вращается вокруг точки подвеса. За время падения он может совершить полный оборот вокруг точки подвеса.

5.3.3. Падение пружины.

Эксперимент, аналогичный опытам Любимова, можно продемонстрировать при помощи легкой пружины – для этого можно использовать так называемую «радужную» пружину, которая имеется в продаже. Если поднять спираль за один конец, то под влиянием веса витков спираль растягивается неодинаково: верхние витки, на которые действует вес всех остальных витков, растягиваются сильнее, чем нижние. Спираль поднимают на балкон или на высокую подставку и, продемонстрировав неодинаковое растяжение витков, роняют ее на пол. Теперь сила тяжести не растягивает витки, они сжимаются, и аудитория наблюдает свободное падение сжавшейся спирали.

5.3.4. Падение рамки с парашютом (установившаяся скорость).

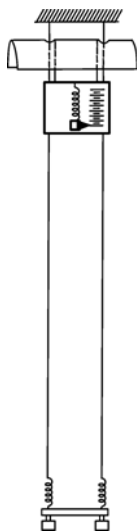


Рис. 5.4. Падение рамки с парашютом.

Эта демонстрация аналогична опыту Любимова (см. демонстрацию 5.3.1). К рамке, падающей вдоль вертикальных проволок, подвешивают на пружине грузик, снабженный стрелкой-указателем (см. рис. 5.4). Рамку прикрепляют к парашюту, представляющему собой полуцилиндрическую поверхность, сделанную из материи, натянутой на легкий проволочный каркас, причем торцевые поверхности полуцилиндра также должны быть затянуты материей. Направляющие проволоки пропускают через небольшие отверстия, сделанные в парашюте.

Рамка имеет шкалу: нижнее деление шкалы находится против стрелки-указателя, когда грузик висит свободно и пружина растянута, верхнее деление отмечает положение гири при нерастянутой пружине. Подняв парашют с рамкой вверх, обращают внимание аудитории на положение указателя (против нижней черты) и отпускают парашют с рамкой. Сначала прибор падает с ускорением; поэтому, как и в опыте Любимова, пружина сокращается, и указатель приближается к верхней черте. Затем парашют замедляет падение прибора, его скорость приобретает по-

стоянное значение, и грузик вновь растягивает пружину, а указатель его положения достигает нижней черты и может даже перейти ее.

5.4. Центробежные силы инерции.

После демонстрации поступательных сил инерции следует переходить к иллюстрации действия центробежных сил инерции.

5.4.1. Модель Земли на валу центробежной машины.

Модель Земли – шар из упругих пластинок – устанавливается на валу центробежной машины и приводится в быстрое вращение (см. рис. 5.5). При этом за счет центробежных сил инерции шар сплющивается, превращаясь в эллипсоид вращения, как и реальная планета Земля, вращающаяся вокруг своей оси.



Рис. 5.5. Вращение модели Земли.

5.4.2. Отвесы и свеча на вращающейся подставке.

В первом опыте на валу центробежной машины укрепляют деревянный диск диаметром 60-70 см, вдоль радиуса которого на металлических стойках висят отвесы (см. левый рис. 5.6). Первый отвес находится на оси вращения диска, поэтому на него при вращении диска не действует центробежная сила инерции, и он не отклоняется. На остальные отвесы действует центробежная сила инерции, пропорциональная расстоянию от оси вращения соответствующего отвеса, поэтому все шарики отклоняются на различные углы – тем большие, чем больше их расстояние от оси вращения. Шарик для отвесов лучше всего брать диаметром 15-20 мм.

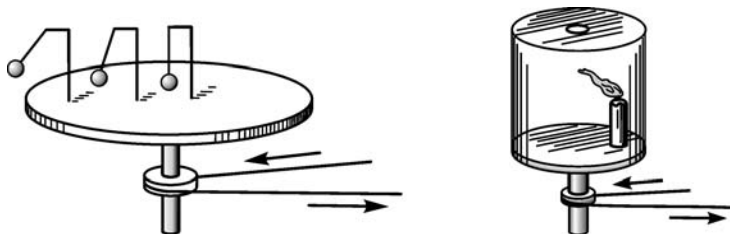


Рис. 5.6 Отвесы и свеча на вращающейся подставке.

Во втором опыте на валу центробежной машины устанавливают металлическую подставку радиусом 10-15 см, на которой укреплен стеклянный цилиндр такого же диаметра со съемной металлической крышкой (см. правый рис. 5.6). На подставку в стороне от оси ее вращения ставят зажженную стеариновую свечу, закрывают прибор крышкой и приводят его во вращение. Пламя свечи отклоняется к оси вращения. Эффект будет более заметен, если цилиндр со свечой установить на большой диск, как и отвесы в первом варианте опыта.

5.4.3. Параболическая поверхность вращающейся жидкости (см. также демонстрацию 8.6.1).

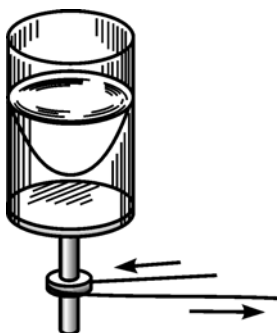


Рис. 5.7. Параболическая поверхность жидкости во вращающемся стакане.

На валу центробежной машины закрепляют подставку с большим цилиндрическим стеклянным стаканом (см. рис. 5.7), в который примерно до $1/3$ его высоты налита вода. Стакан вращают вначале медленно, а затем, по мере того как вода приходит во вращение, все быстрее. Тогда поверхность воды принимает форму параболоида, что достаточно хорошо видно аудитории. Для большей наглядности опыта рекомендуется пользоваться чистой водой, осветив вращающийся

стакан сверху лампой с абажуром, загораживающим аудиторию от прямого света. Когда поверхность воды примет форму параболоида, следует налить на нее сверху немного раствора флуоресцеина. В этом случае вследствие яркого свечения тонкого слоя раствора на поверхности жидкости параболоид будет ясно виден.

5.4.4. «Бегающая» цепочка.

Для этой демонстрации необходима прочная металлическая цепочка, сделанная из небольших звеньев длиной 8-10 мм. Концы цепочки соединяют так, чтобы получилось кольцо диаметром 15-20 см. На вал электродвигателя мощностью около 200 Вт, число оборотов которого регулируется реостатом и может доводиться до 3000-6000 в минуту, надевают деревянный или пластмассовый шкив. Толщина шкива 2-3 см, а диаметр его должен

быть таким, чтобы цепочка надевалась на него плотно (см. рис. 5.8).

Двигатель ставят на конце демонстрационного стола и, надев на шкив цепочку, приводят его в быстрое вращение. Когда скорость вращения устанавливается (что можно определить по характерному звуку), цепочку сталкивают специальным толкателем или деревянной дощечкой со шкива.

Быстро вращающаяся цепочка катится по столу, как упругое кольцо, и пробегает через весь демонстрационный стол. При достаточно гладкой поверхности стола цепочка вначале движется с проскальзыванием.

Если в аудитории есть два стола, разделенные промежутком, то на первом столе ставят небольшой трамплин (наклонную плоскость), с которого цепочка перепрыгивает на второй стол. Если на столе на некотором расстоянии от двигателя поставить деревянный ящик высотой 10–20 см, то катящаяся цепочка, ударившись об него, взлетает в воздух.

Опыт требует большой осторожности. Демонстратор не должен стоять в плоскости вращающегося шкива: если цепочка случайно разорвется и слетит со шкива, то удар ее может быть опасным. Бывает также, что цепочка соскакивает в обратную сторону. Сталкивать цепочку со шкива следует постепенно, слегка надавливая на нее толкателем или ударяя по ней деревянной дощечкой.

5.4.5. Картонная «пила».

На вал быстроходного электродвигателя (см. предыдущий опыт) насаживают между двумя металлическими дисками (диаметром 5–10 см каждый) картонный диск диаметром 15–20 см. Картон должен быть тонким, но прочным. Доведя скорость вращения диска до достаточно большой величины, приближают к нему деревянную (сосновую) планку толщиной около 1 см. Благодаря большой скорости вращения картон разрезает планку, обугливая ее края. Планку следует придвигать к диску плавно, держа ее двумя

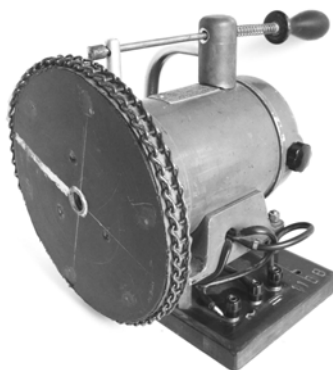


Рис. 5.8. Установка для демонстрации «бегающей» цепочки.

руками за один конец и избегая перекосов. Демонстратор при этом должен находиться в стороне от плоскости вращения диска.

5.4.6. Шарик в сферическом сосуде на центробежной машине.

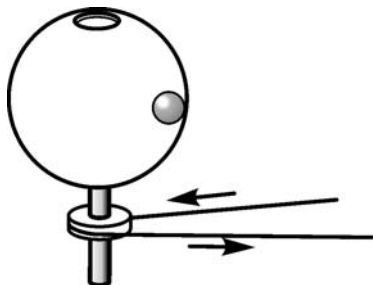


Рис. 5.9. Шарик в сферическом сосуде на центробежной машине.

На валу центробежной машины устанавливают стеклянный шарообразный сосуд (см. рис. 5.9), внутри которого находится легкий шарик (например, применяющийся для игры в настольный теннис). При вращении сосуда вследствие трения шарик начинает вращаться вместе с сосудом, и, наконец, их скорости становятся одинаковыми. Находясь под действием си-

лы тяжести, реакции стенки сосуда и центробежной силы инерции, шарик занимает положение равновесия где-то на боковой стенке сосуда. При увеличении скорости вращения сосуда шарик перемещается все выше и выше, и при достаточно большой скорости располагается вблизи экваториальной плоскости сосуда. После остановки сосуда шарик продолжает вращение. При любой скорости вращения сосуда существует второе положение равновесия шарика – на дне сосуда, на оси вращения. Однако это положение неустойчиво, и при малейшем смещении центра масс шарика относительно оси вращения он выходит из этого положения равновесия.

5.4.7. Вращение в горизонтальной плоскости прута со скользящим по нему грузиком.

На конец стального прута длиной 50-70 см и толщиной 5-8 мм навинчивают гайку. Вдоль прута может скользить надетый на него деревянный кубик с ребром длиной ~5 см. Экспериментатор берет прут в руку за тот конец, где нет гайки, и помещает кубик близко от руки. Затем вращает прут в горизонтальной плоскости. Кубик скользит вдоль прута и ударяется о гайку. Опыт можно повторить несколько раз, поднимая прут вверх и заставляя кубик возвратиться в исходное положение. Для безопасности (чтобы экспериментатор не взял случайно прут за гайку и кубик не полетел бы в аудиторию) можно навинтить гайки на оба конца прута. Полезно одновременно показать проявление

сил инерции и при поступательном движении прута. Для этого нужно резко двигать прут вдоль его длины.

5.4.8. Шары разной массы на вращающейся горизонтальной штанге.

На валу центробежной машины устанавливают металлическую раму, в которой закреплена горизонтальная штанга (см. рис. 5.10), изготовленная из стального или латунного прута диаметром 5-6 мм. Штанга должна быть совершенно ровной и хорошо

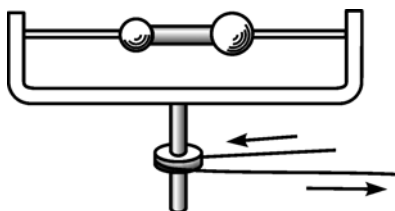


Рис. 5.10. Шары разной массы на вращающейся горизонтальной штанге.

отполированной, так как вдоль нее должны скользить с незначительным трением два пластмассовых или деревянных шара различного диаметра – у одного примерно 25-30 мм, у второго – 40-45 мм. Желательно, чтобы шары были разного цвета. Шары могут быть скреплены между собой достаточно прочным шнуром, зацепленным за небольшие крючки, ввинченные в шары. Однако в этом случае точки приложения сил инерции будут не на линии центров шаров. Поэтому лучше для «чистоты» демонстрации соединять шары при помощи латунной трубки, надеваемой на штангу. Внутренний диаметр трубки должен быть немного больше диаметра штанги. Шары прочно надевают на концы трубки.

Шары устанавливают так, чтобы середина трубки, которую следует отметить цветной чертой, находилась посередине штанги, на линии оси центробежной машины. При достаточной скорости вращения большой шар перетягивает, и трубка с обоими шарами соскальзывает на край штанги. Затем трубку с шарами устанавливают так, чтобы на оси машины находился центр масс обоих шаров (который желательно тоже отметить цветной чертой на трубке). Тогда при любой скорости вращения центробежные силы инерции уравниваются, и шары находятся в состоянии неустойчивого равновесия.

Если трубку сдвинуть так, чтобы центр масс шаров находился между осью машины и меньшим шаром, то при достаточно большой скорости вращения перетягивает меньший шар, и трубка соскальзывает в его сторону. Если шары скреплены не трубкой, а шнуром, то, демонстрируя уравнивание центробежных сил инерции, полезно показать разрыв шнура под действием этих сил

при большой скорости вращения вала машины. Для этого нужно заранее подобрать шнур соответствующей прочности. Положения шаров на штанге при всех опытах тоже надо подобрать заранее и отметить их.

5.4.9. Вращение шарика на спиральной пружине, конец которой прикреплен к оси (см. также демонстрацию 2.4.1).

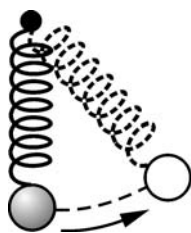


Рис. 5.11. Вращение шарика на пружине.

На вертикальный вал центробежной машины насаживается горизонтальный диск радиусом $\sim 10-15$ см (ось диска совпадает с осью вращения вала машины). На край диска кладется легкий деревянный шарик, к которому прикреплена мягкая спиральная пружина (см. рис. 5.11). Второй конец пружины прикрепляется к оси диска. При приведении диска во вращение шарик под действием центробежной силы инерции со-

скальзывает с его края, растягивает пружину и начинает двигаться по окружности, так как сила натяжения деформировавшейся пружины уравнивает центробежную силу инерции. Величина растяжения пружины тем больше, чем выше скорость вращения диска.

5.4.10. Вращение шариков разной массы в изогнутой трубке, наполненной маслом.



Рис. 5.12. Шарик в вращающейся изогнутой трубке с маслом.

Действие центробежных сил инерции можно продемонстрировать при помощи закрытой на концах изогнутой трубки, наполненной прозрачным маслом и помещенной на валу центробежной машины (см. рис. 5.12). В трубке находятся два шарика – тяжелый свинцовый и легкий пенопластовый. Пока трубка покоится, легкий шарик находится сверху, у конца трубки, а тяжелый – внизу, около изгиба трубки. При раскручивании трубки до достаточно большой угловой скорости тяжелый шарик поднимается вверх, к концу

трубки. При раскручивании трубки до достаточно большой угловой скорости тяжелый шарик поднимается вверх, к концу

трубки, так как действующая на него вдоль трубки проекция центробежной силы инерции превышает сумму проекций силы тяжести и силы давления более легкого масла. Легкий шарик при этом движется вниз, к оси вращения, за счет того, что проекция силы давления более тяжелого по сравнению с ним масла направлена вдоль трубки к оси вращения, а силой тяжести и центробежной силой инерции можно пренебречь. После остановки вращения тяжелый шарик снова опускается вниз, а легкий всплывает вверх по трубке.

5.4.11. Регулятор Уатта².

Демонстрируется принцип действия центробежных регуляторов, в частности, регулятора Уатта, который был применен автором для поддержания постоянных оборотов паровой машины. Тяжелые грузики, соединенные через систему рычагов и втулок с вертикальной осью, приводятся во вращение вокруг этой оси (см. рис. 5.13). Центробежные силы инерции вызывают отклонение грузиков от оси, тем большее, чем больше угловая скорость вращения системы. Рычаги меняют положение одной из втулок, и в регуляторе Уатта, соединенном с валом паровой машины, это перемещение через систему рычагов пе-



Рис. 5.13. Регулятор Уатта.

редавалось на дроссельную заслонку, регулирующую подачу пара и, следовательно, число оборотов машины. При увеличении угловой скорости вращения регулятора подача пара уменьшалась, а при уменьшении – увеличивалась, осуществляя, таким образом, отрицательную обратную связь, стабилизирующую скорость вращения вала машины.

² Дж. Уатт (1736 – 1819) – выдающийся шотландский инженер, изобретатель-механик, именем которого названа единица мощности (Ватт).

5.4.12. Самоцентрирующийся гибкий вал.

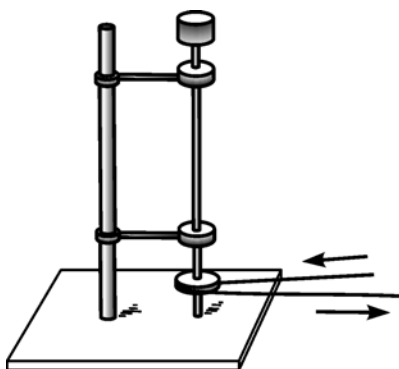


Рис. 5.14.

Самоцентрирующийся гибкий вал.

Для демонстрации самоцентрирования гибкого вращающегося вала собирают установку, изображенную на рис. 5.14. Стальной стержень длиной 60-80 см укрепляют вертикально, как показано на рисунке, двумя втулками, помещенными на расстоянии 10-15 см от верхнего и нижнего концов стержня. Эти втулки не должны препятствовать изгибанию стержня. На верхний конец стержня надевают

тяжелый (несколько килограммов) груз, слегка изгибающий стержень. На нижнюю часть стержня надевают шкив, через который перекинут ремень от электродвигателя, приводящего стержень во вращение. Скорость вращения двигателя постоянного тока регулируют реостатом. Вначале число оборотов стержня мало, и он сильно «бьет». При увеличении числа оборотов стержень самоцентрируется и начинает вращаться ровно, без биений. Снова снижая скорость вращения, наблюдают биения, прекращающиеся при малых скоростях вращения вала.

Демонстрация важна для понимания процессов, происходящих в разных технических устройствах, которые вращаются с переменной частотой, например, в турбинах электростанций: существуют режимы вращения, сопряженные с сильными вибрациями, и эти режимы при разгоне турбин следует проходить как можно реже и быстрее во избежание разрушения конструкции (пример – катастрофа на Саяно-Шушенской ГЭС, произошедшая в 2009 году).

5.5. Силы Кориолиса.

После демонстрации действия центробежных сил инерции можно переходить к опытам, иллюстрирующим проявление кориолисовых сил инерции.

5.5.1. Качение шарика по вращающемуся диску.

На шарик, катящийся по радиусу вращающегося круглого диска, действуют кориолисовы силы инерции, отклоняющие его от прямоли-

нейной траектории движения. Для проведения этой демонстрации используется диск, установленный в горизонтальное положение и приводимый во вращение электродвигателем (см. рис. 5.15, а также демонстрацию 1.6.5). Над диском устанавливается в радиальном направлении наклонный желоб, с которого скатывают круглый кусочек мела или шарик, натертый мелом, который оставляет след при качении по диску. Наблюдается движение шарика по радиусу при неподвижном столе и отклонение траектории шарика от радиуса при запуске шарика на вращающемся столе из центра к периферии и от периферии к центру. При вращении стола против часовой стрелки (как у Земли в северном полушарии) отклонение всегда происходит вправо от направления движения шарика.

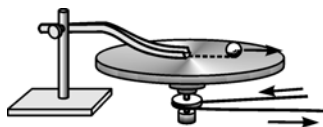


Рис. 5.15. Качение шарика по вращающемуся диску.

5.5.2. Поток воды во вращающейся системе отсчета³.

На диске, который может приводиться электродвигателем во вращение в ту или иную сторону вокруг своей оси, по диаметру укреплена гибкая резиновая трубка, через которую при помощи системы кранов и вращающихся сочленений можно пропускать в том или ином направлении водопроводную воду (см. рис. 5.16). При вращении диска на текущую воду действуют кориолисовы силы инерции, отклоняющие трубку от центра диска в одну или в другую сторону, в зависимости от направлений потока воды и вращения диска.

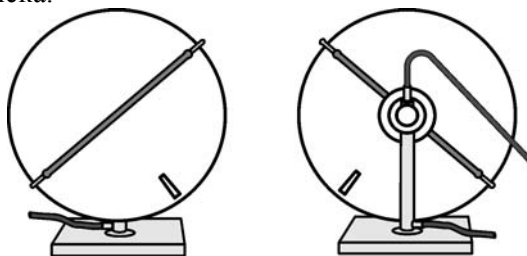


Рис. 5.16. Общий вид установки.

Опыт демонстрируется в стробоскопическом освещении. В диске для этого сделано отверстие, через которое проходит свет

³ Опыт поставлен С. Э. Хайкиным (1901 – 1968, профессор МГУ) и А. Б. Млодзеевским.

от конденсора проекционного фонаря, расположенного сзади установки. Этот свет отражается затем от зеркала, установленного на некотором расстоянии перед диском, и освещает его вспышками – по одной на каждый оборот диска. Это дает возможность хорошо наблюдать отклонение трубки.

5.6. Маятник Фуко⁴.

5.6.1. Модель маятника Фуко.

Перед демонстрацией опыта Фуко следует показать модель, состоящую из небольшого маятника, подвешенного над диском, вращающимся на центробежной машине или специальной подставке (см. рис. 5.17). Математический маятник, подвешенный над центром вращающегося стола, моделирует маятник Фуко и позволяет продемонстрировать сохранение плоскости качания маятника при вращении стола, над которым он подвешен. Диаметр диска 50-80 см, длина нити маятника 70-100 см, диаметр шарика 20-30 мм. Приведя маятник в колебания в плоскости дуги, к которой он подвешен, медленно вращают круг и показывают, что плоскость колебаний маятника по

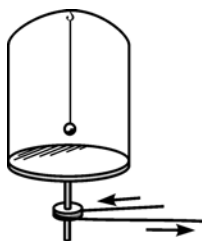


Рис. 5.17. Модель маятника Фуко.

отношению к аудитории остается неизменной, а по отношению к диску, соответствующему Земле (в опыте Фуко), на полюсе которой помещается маятник, эта плоскость поворачивается на угол 360° за один оборот диска.

5.6.2. Маятник с песком на центробежной машине.

Предыдущий опыт полезно повторить, подвесив на нити маятника вместо шарика небольшую емкость с песком, который может высыпаться из нее через отверстие в нижней части. При этом форма дорожки из высыпавшегося песка на диске центробежной машины демонстрирует различные виды траекторий маятника во вращающейся системе отсчета, получающиеся при разных начальных условиях его движения. Если маятник массой m отклонить на максимальный угол до дуги AA' , на которой он подвешен, и закрутить диск против часовой стрелки вместе с маятником, а затем от-

⁴ Ж. Б. Л. Фуко (1819 – 1868) – французский физик и астроном, член Парижской Академии Наук.

пустить его, то получаются траектории $ABCD\dots$, изображенные слева на рис. 5.18 (здесь ω_B – угловая скорость вращения диска, стрелками на траектории движения показаны направления относительной скорости $\mathbf{v}_{\text{отн}}$ движения маятника). Если же маятник толкнуть из положения равновесия, когда диск уже крутится в том же направлении (против часовой стрелки), то получаются траектории $ABC\dots$, изображенные справа на рис. 5.18. Это объясняется тем, что сила Кориолиса $\mathbf{F}_K = -2m(\omega_B \times \mathbf{v}_{\text{отн}})$, направленная в обоих

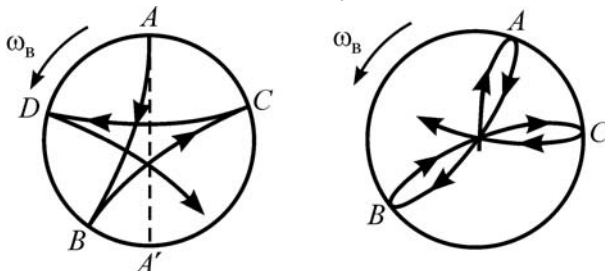


Рис. 5.18. Некоторые возможные траектории движения маятника Фуко.

случаях вправо по ходу движения маятника, в первом опыте, когда относительная скорость маятника в положении максимального отклонения равна нулю, отклоняет его от оси вращения при приближении к этой оси, а во втором опыте вызывает в положении максимального отклонения появление ненулевой тангенциальной скорости маятника относительно диска.

5.6.3. Опыт с маятником Фуко, подвешенным к потолку аудитории.

1-й вариант. К крючку, прочно закрепленному на потолке аудитории, подвешивают на кардановом подвесе стальную проволоку толщиной около 1 мм. К концу проволоки на высоте 20-30 см от пола прикрепляют тяжелый металлический шар диаметром 10-15 см. На высоте около 2 м от пола на проволоке делают разрыв со стыковочным узлом в виде гильзы диаметром 5-8 мм и длиной 5-6 см, свинчивающейся из двух частей (это облегчает сборку и разборку демонстрации). Проволоку с гильзой освещают дуговым проекционным фонарем, то есть источником света, близким к точечному. Вдоль экрана натягивают вертикально при помощи небольшого груза тонкий черный шнур, с которым должна совпадать тень проволоки неподвижного маятника. Шнур прикрепляют к середине верхней перекладины экрана. Шар маятника по экватори-

альной плоскости охватывают петлей из ленты, к которой привязана веревка, и оттягивают его перпендикулярно от экрана – приблизительно на 70-100 см (в зависимости от длины подвеса), веревку прикрепляют при этом к штативу. Тень подвеса маятника по-прежнему должна совпадать со шнуром на экране (этого достигают передвижением штатива). Пережигают спичкой веревку, оттягивающую маятник, приводя тем самым его в колебания; при этом тень подвеса на экране совпадает со шнуром, а тень гильзы перемещается по экрану вверх и вниз. Постепенно плоскость колебания маятника начинает смещаться, что можно заметить по отклонению от шнура тени гильзы вправо и влево. Через 5-10 минут это смещение становится хорошо заметным. Рекомендуется в конце лекционного часа вновь осветить маятник и показать образовавшееся к этому времени уже значительное смещение плоскости колебаний.

2-й вариант. Шар маятника снабжают снизу острием длиной 5-6 см. Амплитуда колебаний маятника должна быть большей, чем в первом случае: она должна доходить до 4-5 м, причем плоскость колебаний должна быть параллельна демонстрационным столам аудитории. На расстоянии примерно 3 м от положения равновесия маятника вблизи плоскости его колебаний справа по ходу его движения устанавливают деревянный брусок на подставке такой высоты, чтобы острие маятника могло его зацепить и сбить. После запуска колебаний (таким же способом, что и в первом варианте опыта) острие маятника должно проходить на минимальном расстоянии от бруска (в нескольких миллиметрах). После поворота плоскости колебаний на небольшой угол, через 10-20 их периодов, острие сбивает брусок.

5.7. Водяной маятник (опыт Хайкина).

Возникновение приливов.

Цель этого опыта, поставленного С. Э. Хайкиным, – показать, что приливная волна возникает из-за изменения ускорения различных точек объема жидкости. Применяемый в данном эксперименте водяной маятник (см. рис. 5.19) представляет собой стеклянный сосуд с плоскими стенками, до половины наполненный водой. Маятник висит на двух бифилярных подвесах. Сбоку, в направлении колебаний маятника, к нему следует прикрепить две несильные длинные пружины. Не прицепляя сначала пружин, отклоняют маятник в сторону на 40-50 см и отпускают его. После нескольких качаний уровень воды в маятнике устанавливается в положении равновесия, и вода относительно сосуда не движется. После этого к маятнику при-

цепляют с двух сторон пружины (см. рис. 5.20) и вновь приводят его в колебания. Колебания будут уже несвободными, так как пружины, растягиваясь и сжимаясь, сообщают маятнику дополнительно переменные ускорения. Под влиянием этих ускорений на поверхности воды образуется волна, иллюстрирующая возникновение приливной волны. При ярком освещении и слегка подкрашенной флуоресцентным красителем воде волна хорошо видна всей аудитории.

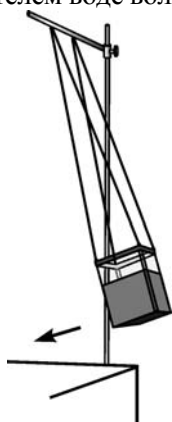


Рис. 5.19.
Водяной маятник.

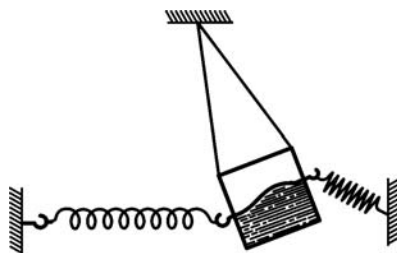


Рис. 5.20. Возникновение
«приливов».

Замечание: для этой демонстрации надо тщательно подбирать пружины.

5.8. Движение под действием центральной силы.

После демонстрации действия сил инерции можно показать примеры движения тел в поле центральных сил.

5.8.1. Движение стального шарика в поле магнита.

Движение в поле центральной силы притяжения можно продемонстрировать с помощью следующего прибора. Электромагнит, выполненный в виде обмотки с прямым сердечником, ставится на стол вертикально. Сердечник должен немного выступать за пределы обмотки, а его конец должен иметь коническую форму, чтобы служить «точечным» центром притяжения. Над электромагнитом устанавливается горизонтальное стекло, на котором стоит наклонный желобок, предназначенный для скатывания стального шарика (см. рис. 5.21). Обмотка включается в цепь постоянного тока, после чего шарик несколько раз скатывают с желобка с различной высоты.

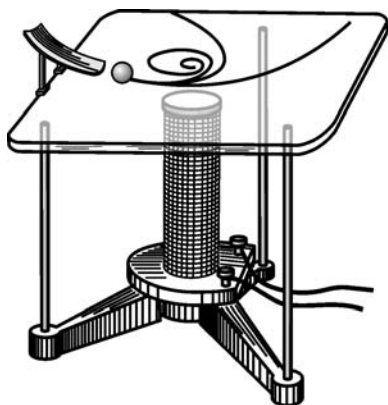


Рис. 5.21. Движение шарика в поле магнита.

поверхности стекла, меняя тем самым «прицельный параметр» движущегося шарика относительно оси электромагнита.

5.8.2. Движение шарика в параболической чаше.

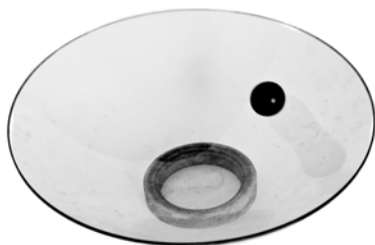


Рис. 5.22. Движение шарика в параболической чаше.

Движение в поле притягивающего силового центра можно смоделировать при помощи большой стеклянной или металлической чаши, имеющей параболическую форму (см. рис. 5.22). Маленький шарик кладется на наклонную стенку этой чаши, и ему сообщается некоторая начальная скорость. В зависимости от величины и направления этой скорости шарик будет двигаться по различным траекториям. Если начальная скорость не очень велика, то шарик будет описывать кривую, близкую к эллипсу. В случае большой начальной скорости шарик вылетит из чаши («оторвется» от «силового центра»).

5.8.3. Маятник с магнитом.

Для демонстрации движения в поле центральной силы отталкивания можно использовать прибор, который представляет

При этом шарик движется по поверхности стекла под действием силы притяжения к магниту, которую можно считать центральной. Вследствие этого траектория движения шарика искривляется – в зависимости от начальной скорости он может двигаться по гиперболе, параболе или по спирали, близкой к эллипсу. Вид траектории шарика можно изменять и другим способом – запуская шарик с желобка все время с одной и той же высоты, но каждый раз смещая желобок по

Движение в поле притягивающего силового центра можно смоделировать при помощи большой стеклянной или металлической чаши, имеющей параболическую форму (см. рис. 5.22). Маленький шарик кладется на наклонную стенку этой чаши, и ему сообщается некоторая начальная скорость. В зави-

собой маятник с магнитной вставкой, колеблющийся над другим постоянным магнитом 1 (см. рис. 5.23). Маятник 2 изготовлен из жесткого стержня D , вертикально подвешенного за один из концов на кардановом подвесе E , прикрепленном к штанге A вертикального штатива. Магнитная вставка делается в грузике, закрепленном на нижнем конце этого стержня. Магнит 1 крепится в точке C на конце штанги B штатива. Магниты должны быть расположены так, чтобы при вертикальном положении маятника между ними возникали силы отталкивания. Маятник выводят из положения равновесия и отпускают. При приближении к неподвижному магниту маятник начинает от него отталкиваться, вследствие чего возникают колебания, в ходе которых маятник многократно приближается к магниту и удаляется от него. В ходе этих колебаний груз маятника движется по кривым, похожим на гиперболы. Данный опыт демонстрирует, что в поле центральной силы отталкивания (в отличие от поля центральной силы притяжения) возможно движение только по гиперболической траектории.

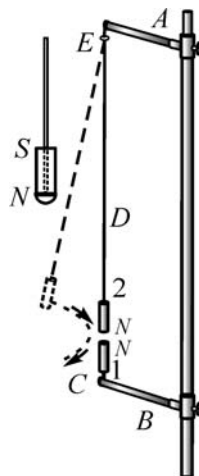


Рис. 5.23. Маятник с магнитом.

5.9. Силы трения.

После демонстрации движений тел в поле центральных сил можно переходить к опытам, иллюстрирующим свойства сил сухого и вязкого трения.

5.9.1. Сухое и вязкое трение – сравнение.

На демонстрационный стол ставят большую плоскую ванну с водой (размером не менее 80×100 см и высотой около 5 см). На края ванны вдоль ее длины кладут гладкую доску, на которой находится прямоугольный деревянный брусок с отполированными поверхностями. Брусок делают из легкого сухого дерева, например, сосны. В торец бруска ввинчивают крючок, на который надет тонкий шнур, перекинутый через блок, укрепленный на краю стола. К свободному концу шнура прикрепляют чашку для грузов (см. рис. 5.24) и подбирают такой груз, при котором начинается сколь-

жение бруска по доске. Вес этого груза равен максимальной силе трения покоя. Затем ставят на брусок груз, вес которого равен весу бруска. Для этого следует иметь на демонстрационном столе про-

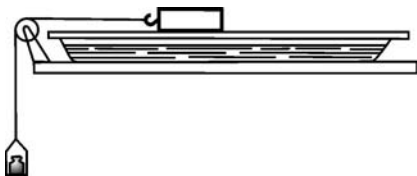


Рис. 5.24. Сравнение сил сухого и вязкого трения.

стые весы на 5 кг. На одну чашку кладут брусок, на другую – заранее подобранный груз, равный весу бруска. Показав аудитории, что весы находятся в равновесии, кладут брусок на доску, на него ставят груз и вновь подбирают такое число разновесок на чашке,

чтобы брусок начал скользить. Вес разновесок теперь будет вдвое больше, чем в первый раз (чтобы показать это, следует чашки с разновесками и добавочный груз положить на весы). Следовательно, коэффициент трения остается постоянным.

Для демонстрации вязкого трения снимают доску и кладут брусок прямо на поверхность воды. Тогда брусок начинает двигаться по воде под влиянием веса пустой чашки для разновесок. Сняв шнур с бруска, показывают, что брусок движется по воде даже в том случае, если слегка на него подуть.

5.9.2. Наклонный трибометр.

Наклонный трибометр – прибор для демонстрации основных закономерностей действия силы сухого трения – представляет собой наклонную плоскость, угол наклона которой к горизонту можно изменять (см. рис. 5.25). Плоскость фиксируется в выбранном наклонном положении при помощи крепежного винта.

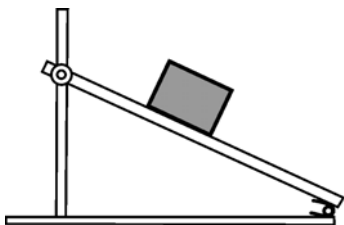


Рис. 5.25. Наклонный трибометр.

На нее кладется брусок, имеющий форму прямоугольного параллелепипеда. Две боковые грани этого бруска имеют площадь, примерно вдвое большую, чем две другие боковые грани. Все грани бруска, кроме одной, обладают одинаковой

степенью гладкости, а на эту последнюю грань наклеена шероховатая наждачная бумага. Кроме того, в одной из гладких граней бруска, находящейся напротив другой гладкой грани, сделаны углубления, в которые могут помещаться гирьки-разновесы. Вблизи верхней

части наклонной плоскости установлен маленький неподвижный блок, через который перекидывается нить. Эту нить можно прикреплять к бруску с помощью крючка, вделанного в его торцевую грань.

При показе демонстрации сначала устанавливают плоскость трибометра в горизонтальное положение, кладут на нее брусок на большую гладкую грань, и начинают медленно увеличивать угол наклона плоскости прибора. При некотором значении угла наклона брусок начинает скользить вниз. Заметив это значение угла, опыт повторяют, положив брусок на малую гладкую грань – скольжение начинается при том же самом значении угла наклона плоскости. Таким образом доказывается, что коэффициент трения скольжения не зависит от площади соприкасающихся поверхностей. Кроме того, из эксперимента следует, что скольжение начинается не сразу, что свидетельствует о наличии силы трения покоя. Затем этот же опыт проделывают, предварительно увеличив массу бруска с помощью разновесов, помещенных в углубления – скольжение вновь начинается при том же значении угла наклона плоскости. Это доказывает, что коэффициент трения скольжения не зависит от массы бруска. Наконец, опыт повторяют, положив брусок на шероховатую грань – скольжение начинается при большем значении угла наклона. Это подтверждает, что коэффициент трения скольжения зависит от свойств и степени обработки трущихся поверхностей.

Описанный прибор также позволяет продемонстрировать изменение характера и направления силы сухого трения при изменении направления равнодействующей внешних сил. Для показа такого опыта нужно положить брусок на плоскость на гладкую грань и привязать к вделанному в него крючку нить. Эта нить перебрасывается через укрепленный на плоскости блок, а к ее второму концу прикрепляется легкая чашечка для гирь. Угол наклона плоскости подбирается таким, чтобы при пустой чашечке брусок соскальзывал с плоскости вниз. Затем на чашечку кладется гирька такой массы, что скольжение бруска становится невозможным. Это показывает, что при малом модуле равнодействующей внешних сил сила трения скольжения переходит в силу трения покоя. Далее на чашечку кладутся дополнительные гири, в результате чего брусок начинает скользить по плоскости вверх – сила трения покоя переходит в силу трения скольжения, причем последняя меняет свое направление.

5.9.3. Транспортер.

Установка, изображенная на рис. 5.26, позволяет продемонстрировать основные закономерности, касающиеся сил сухого трения: наличие сил трения покоя и скольжения, их зависимость от силы нормального давления и свойств трущихся поверхностей, независимость силы трения скольжения от скорости относительного движения трущихся тел, а также явления заноса и застоя. Угол наклона поверхности ленты транспортера может изменяться, деревянный брусок можно класть на нее разными трущимися гранями, лента может быть неподвижной или двигаться при помощи электромотора с переменной скоростью, регулируемой реостатом. Для определения величины суммарной силы, действующей на брусок вдоль ленты, используется мягкая пружина-динамометр.

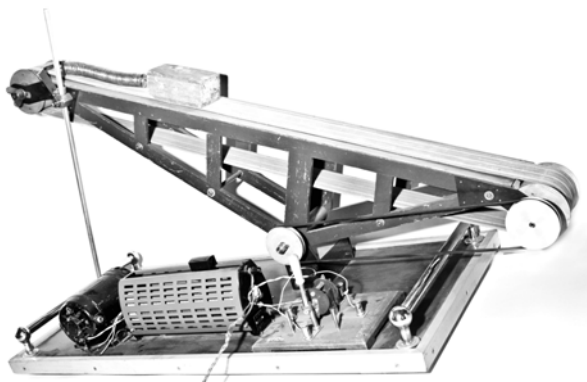


Рис. 5.26. Транспортер.

5.9.4. Явление заноса.

При помощи наклонного трибометра также можно продемонстрировать явление заноса. Для этого нужно положить на его плоскость брусок, найти критический угол, при котором брусок начинает съезжать с плоскости, и зафиксировать угол наклона плоскости чуть меньше критического. Затем нужно попытаться сдвинуть брусок с места в боковом направлении, действуя на него горизонтальной силой, направленной поперек наклонной плоскости. Это можно сделать, надавливая на боковую поверхность бруска пальцем, либо натягивая предварительно привязанную к бруску нить. В результате брусок сдвинется с места и начнет соскальзывать вниз. Такой результат опыта объясняется тем, что сила трения скольже-

ния при движении бруска не может превышать определенную, строго фиксированную, величину. Поэтому если при движении в одном направлении сила трения скольжения достигла максимума, то добавочное движение в другом направлении не приводит к изменению модуля силы трения, а ведет только к изменению ее направления. В связи с этим добавочное движение не встречает большого сопротивления. В рассматриваемом случае при сдвигании бруска в горизонтальном направлении вдоль наклонной плоскости на него начинает действовать сила трения скольжения, направленная горизонтально, в противоположную сторону. Так как эта сила имеет постоянное и максимально возможное значение, то тело уже не удерживается силами трения покоя от соскальзывания с плоскости и скатывается вниз. Аналогичным образом ведет себя автомобиль на дороге. При резком торможении сила трения скольжения действует в направлении, обратном направлению движения машины. Поэтому даже небольшое боковое усилие (например, боковой поворот или дефект дороги) может вызвать скольжение машины вбок, называемое заносом.

5.9.5. Явление застоя.

Прибор⁵, предназначенный для демонстрации явления застоя, представляет собой деревянную раму, по нижней стороне которой может скользить металлический цилиндр с прикрепленной к нему стрелкой (см. рис. 5.27). Эта сторона рамы натерта канифолью для увеличения коэффициента

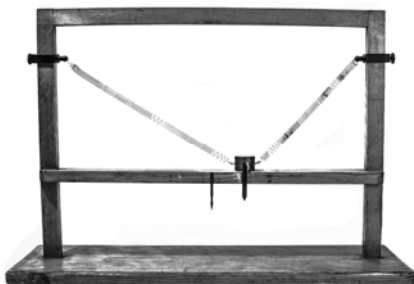


Рис. 5.27. Явление застоя.

трения. Цилиндр соединен двумя наклонными пружинами с боковыми сторонами рамы. На нижней стороне рамы в положении равновесия цилиндра сделана отметка. Если отклонить цилиндр на достаточно большое расстояние от метки и отпустить, то он, совершив несколько колебаний, остановится вблизи положения равновесия. При повторении этого опыта оказывается, что обычно цилиндр каждый раз останавлива-

⁵ Прибор предложен профессором физического факультета МГУ С. Э. Хайкиным.

ется в различных местах, на разных расстояниях от метки. Причиной этого является наличие силы трения покоя, благодаря которой цилиндр может стоять неподвижно в стороне от исходного положения, отмеченного меткой. Это и есть явление застоя. Зона, в которой возникает застой, называется зоной застоя. Из-за явления застоя в подвижных частях измерительных приборов, например, барометров, их показания могут быть не совсем точными. Можно продемонстрировать, что влияние силы трения покоя можно уменьшить, постучав по корпусу измерительного прибора – при постукивании по деревянной раме цилиндр трогается с места и заметно приближается к положению равновесия.

5.9.6. Направление силы трения при качении колеса.

Одним из трудных для понимания вопросов механики является вопрос о направлении силы трения при качении колеса, а именно понимание того, что направление силы трения между рельсами и «ведущими» колесами, то есть колесами, связанными с двигателем, и направление силы трения между рельсами и «ведомыми» колесами прямо противоположны. Разницу между направлениями сил трения в этих двух случаях легко показать с помощью следующего простого опыта⁶.

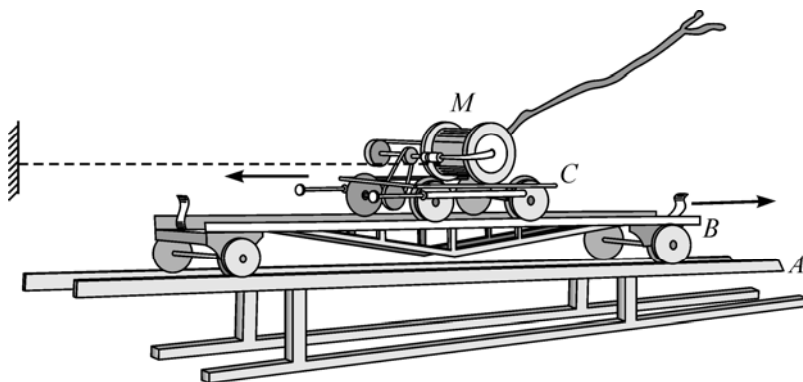


Рис. 5.28. Демонстрация направления силы трения при качении колеса при качении колеса.

На рельсах *A* (см. рис. 5.28) устанавливают длинную тележку *B*, снабженную в свою очередь рельсами, по которым может двигаться маленькая тележка *C*. На малой тележке укреплен электродвига-

⁶ Опыт поставлен и описан М. В. Малининым и С. И. Усагиным (1889 – 1979, сын И. Ф. Усагина, заведовал КФД физического факультета).

тель M , ось которого может быть соединена либо с колесами тележки C через шкив, либо с нитью, намотанной на ось и привязанной к упору на конце основных рельсов A (показано на рисунке пунктиром). В первом случае колеса тележки C вращает двигатель, и они являются ведущими. При движении тележки на них действует сила трения, направленная по ходу тележки C , а на длинную тележку B действует сила трения, направленная в противоположную сторону. Поэтому при включении двигателя тележки движутся в разные стороны. (Этот опыт можно использовать и для иллюстрации закона сохранения количества движения системы). Во втором случае при работе двигателя нить наматывается на ось и тянет тележку C к центру. Колеса тележки C теперь ведомые, на них действует сила трения, направленная против движения, а на тележку B , следовательно, действует сила трения, направленная в сторону движения тележки C . Поэтому при включении двигателя обе тележки движутся в одну и ту же сторону.

5.9.7. Падение шариков в воде и глицерине.

Демонстрируется различная величина сил вязкого трения в разных жидкостях – в воде и в глицерине, коэффициенты вязкости которых при комнатной температуре отличаются почти в тысячу раз. Опыт показывается в проекции или при помощи видеокамеры и видеопроектора. В плоскую вертикальную кювету с перегородкой (или в две кюветы) заливают воду и глицерин, и в них одновременно бросают маленькие тяжелые шарики, например, дробь, и наблюдают быстрое их падение в воде и очень медленное – в глицерине. Для повышения наглядности демонстрации надо бросать шарики много раз подряд – тогда по расстоянию между последовательно брошенными шариками в воде и в глицерине можно будет судить о различии установившихся скоростей их падения в этих жидкостях.

Демонстрация используется также при чтении раздела «Молекулярная физика» курса общей физики.

5.9.8. Всплывание пузырьков воздуха в жидкостях разной вязкости.

Демонстрацию, аналогичную предыдущей, можно показать при помощи подачи воздуха через трубки в тонкие пипетки, погруженные на дно двух-трех плоских прозрачных вертикальных кювет, в которые налиты разные жидкости, например, вода, масло и глицерин. Цепочки пузырьков, выходящих из пипеток в разных жидкостях, движутся с

разными постоянными (установившимися) скоростями, и расстояния между пузырьками в них сильно отличаются.

5.9.9. Внутреннее трение в газах (вращение на центробежной машине картонного диска под другим диском, висящим на нитях).

Для демонстрации наличия внутреннего трения в газах используется следующая установка (см. рис. 5.29). На вал центробежной

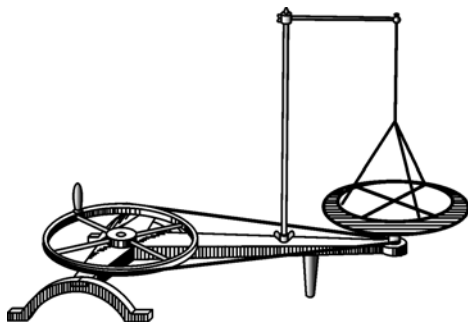


Рис. 5.29. Общий вид установки.

машины насаживается диск диаметром 50-60 см, а над ним соосно подвешивается на штативе на трех нитях второй диск, несколько меньшего диаметра. Нити на высоте 20-30 см над этим диском связываются узлом, и далее расходятся к трем отверстиям, просверленным по краю диска,

привязываются таким образом, чтобы он висел в горизонтальном положении. Расстояние между дисками должно быть как можно меньше, не более 1 см, но при вращении они не должны касаться друг друга. Раскрутив нижний диск в одну сторону, наблюдают постепенное закручивание верхнего диска в ту же сторону. Затем закручивают нижний диск в обратную сторону и наблюдают постепенное торможение вращения верхнего диска, его остановку и последующее закручивание в сторону вращения нижнего диска.

Демонстрация используется также при чтении раздела «Молекулярная физика» курса общей физики.

5.10. Реактивное движение.

После показа действия сил трения можно продемонстрировать движение тел при наличии реактивных сил.

5.10.1. Опыты на воздушной дорожке с отбором части воздуха из-под тележки.

На дорожку с воздушной подушкой (см. демонстрацию 1.3.2) устанавливается специальная тележка, из-под которой часть воздуха отбирается и направляется через поворотное сопло в любую

сторону [17] (см. рис. 5.30). Если направить сопло вдоль дорожки, то под действием реактивной силы струи воздуха тележка едет в направлении, противоположном движению этой струи; если направить сопло поперек дорожки, то тележка не двигается.



Рис. 5.30. Реактивная тележка на воздушной дорожке.

5.10.2. «Ракета» (см. также демонстрацию 9.5.2).

Демонстрируется полет модели ракеты под действием «реактивной силы», то есть силы реакции вытекающей из ракеты струи воды. В полый корпус «ракеты» заливается на $1/3$ объема вода, после чего через специальное пусковое устройство в ракету при помощи велосипедного насоса накачивается воздух до давления 2–3 атм. Установив ракету вертикально, нажимают спуск и наблюдают ее полет вверх, то есть в сторону, противоположную направлению истечения воды. Более безопасным и удобным для демонстрации в аудитории является запуск ракеты вдоль направляющей проволоки, натянутой наклонно от лабораторного стола к потолку аудитории. При этом на ракете вблизи ее головной и хвостовой частей закрепляются два проволочных кольца, сквозь которые продевается направляющая проволока (см. рис. 5.31).

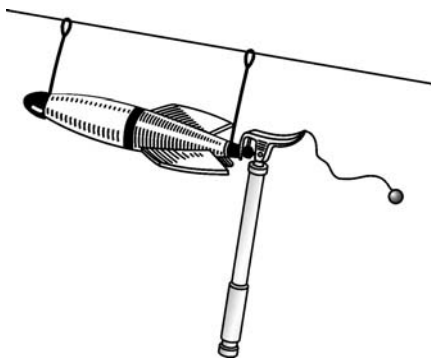


Рис. 5.31. «Ракета».

5.10.3. Реакция струи (водяной или воздушной) на лодке.

Силу реакции струи можно продемонстрировать при помощи следующего несложного опыта. В поддон длиной около 1 м наливают воду и пускают плавать в ней деревянную пластину, вырезанную в форме лодки. На эту «лодку» устанавливают сосуд с водой, снабженный в нижней части отверстием с горизонтальной трубкой, заткнутой пробкой, или подставку с горизонтальной трубкой, на один конец которой привязан надутый воздушный шарик, а другой

заткнут. После удаления пробки и в том, и в другом случае «лодка» начинает двигаться в сторону, противоположную направлению вытекающей из трубки струи воды или воздуха, демонстрируя, таким образом, действие реактивной силы.

5.10.4. Сегнерово⁷ колесо (см. также демонстрацию 9.5.4).

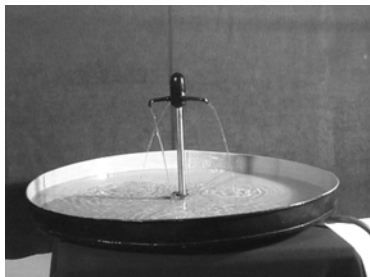


Рис. 5.32. Сегнерово колесо.

Реактивная сила, возникающая при вытекании струи воды из сопла, демонстрируется при помощи широко известного прибора – сегнерова колеса (см. рис. 5.32). Прибор состоит из поддона, в центре которого укреплена вертикальная трубка, в которую подается вода, и собственно «сегнерова» колеса, которое насажено на трубку с возможностью вращения вокруг ее оси. Насадка имеет несколько горизонтальных отростков с соплами, повернутыми вбок от оси, так что при подаче воды в систему «колесо» начинает быстро вращаться за счет действия реактивных сил со стороны вытекающей из него воды. Подобные устройства широко применяются, например, для равномерного полива газонов.

⁷ Я. А. Сегнер (1704 – 1777) – венгерский математик и физик, иностранный член Петербургской Академии Наук.

Глава 6 КОЛЕБАНИЯ

Важным типом движений, которые в рамках механики обычно выделяют в отдельный класс, являются механические колебания. Они происходят вблизи положения равновесия системы и представляют собой многократно повторяющиеся или приблизительно повторяющиеся движения (см., например, [28, Лекция 19]; [29, Глава 13]; [31, §135]). Колебания являются примером движений с переменным ускорением, и при малых отклонениях от положения равновесия часто характеризуются гармонической зависимостью смещения колеблющихся тел от времени.

При изложении лекционного материала по теме «Колебания» вначале рекомендуется демонстрировать собственные колебания в механических системах с малым затуханием, где они наиболее близки к гармоническим незатухающим колебаниям, и иллюстрировать зависимость периода таких колебаний от параметров системы.

6.1. Свободные колебания.

6.1.1. Вертикальные колебания груза на пружине.

Для демонстрации вертикальных колебаний груза необходимы две витые пружины, жесткости которых отличаются в четыре раза. Пружины подвешиваются на штативах в вертикальном положении, причем к их нижним концам должны быть припаяны горизонтальные проволочные стрелки, находящиеся на одном уровне при отсутствии нагрузки и направленные противоположно друг другу. Для проведения опыта нужно также изготовить из картона вертикальную шкалу с равноотстоящими метками, которая крепится на штативе таким образом, чтобы обе стрелки вначале указывали на нулевую отметку шкалы и не задевали друг друга (см. рис. 6.1).

Сначала демонстрируются колебания пружинных маятников по отдельности. Изменяя массы грузов, под-



Рис. 6.1. Общий вид установки.

вешиваемых к нижним концам пружин, нужно показать, что при увеличении массы груза период колебаний маятника возрастает, а при увеличении жесткости пружины – уменьшается.

После этого к пружинам подвешиваются такие грузы, чтобы деформации пружин $x_0 = mg/k$ при равновесии были одинаковыми (при этом масса m груза, подвешенного к пружине с меньшей жесткостью k , будет в четыре раза меньше, чем масса $M = 4m$ груза, подвешенного к более жесткой пружине с жесткостью $K = 4k$). Далее грузы выводят из нового положения равновесия, растянув их на одинаковую величину, после чего одновременно отпускают. Наблюдая за вертикальными колебаниями грузов, можно удостовериться, что их периоды колебаний совпадают. Этот факт объясняется тем, что период колебаний пружинного маятника может быть вычислен при помощи формулы

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K}} = 2\pi\sqrt{\frac{x_0}{g}}.$$

Из этой же формулы следует, что период колебаний такого пружинного маятника должен совпадать с периодом колебаний математического маятника длиной x_0 . Это можно продемонстрировать, изготовив при помощи штатива, отрезка нити и свинцового грузика математический маятник нужной длины, и сравнив период его колебаний с периодом колебаний любого из пружинных маятников (см. рис. 6.2).



Рис. 6.2. Сравнение периодов колебаний.

6.1.2. Крутильные колебания.

В опыте демонстрируется влияние момента инерции тела на период совершаемых им крутильных колебаний. Для показа опыта используется деревянная рейка, к середине которой крепится упругая стальная проволока. Свободный конец проволоки зажимается в штативе так, чтобы рейка свободно висела в горизонтальном положении. Затем на рейку на равных расстояниях от точки крепления проволоки подвешиваются грузы оди-

наковой массы (для большего удобства на рейке нужно заблаговременно сделать набор равноотстоящих друг от друга углублений-прорезей). При отклонении рейки в горизонтальной плоскости на небольшой угол наблюдаются крутильные колебания (см. рис. 6.3). Изменяя массы подвешенных грузов, либо перемещая грузы вдоль рейки, можно продемонстрировать увеличение периода крутильных колебаний с ростом момента инерции колеблющегося тела.

6.1.3. Сравнение продольных и крутильных колебаний.

Влияние момента инерции колеблющегося тела на период совершаемых им колебаний можно продемонстрировать также и другим способом. К штативу за один из концов крепится в вертикальном положении стальная витая пружина, к нижнему концу которой может подвешиваться тонкий однородный стержень. Сначала стержень подвешивают так, чтобы он располагался вдоль оси пружины (см. левый рис. 6.4). Повернув стержень на небольшой угол, наблюдают крутильные колебания. Затем стержень подвешивают за середину так, чтобы он располагался горизонтально (см. правый рис. 6.4), и вновь возбуждают крутильные колебания, повернув стержень в горизонтальной плоскости на небольшой угол. В этом случае период крутильных колебаний оказывается значительно больше, чем в предыдущем случае, что объясняется увеличением момента инерции колеблющегося тела.

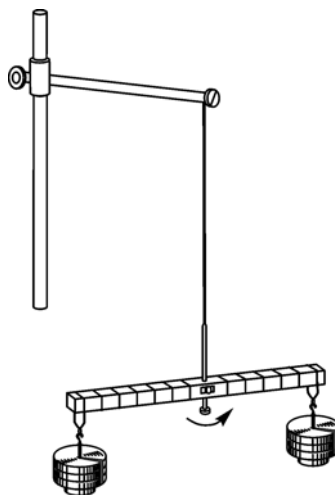


Рис. 6.3. Крутильные колебания.

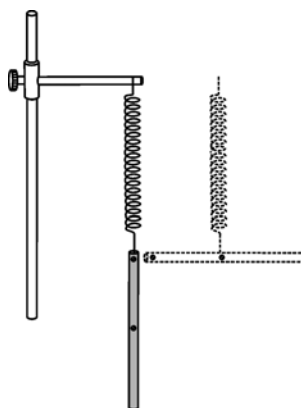


Рис. 6.4. Продольные и крутильные колебания.

При помощи этой же установки можно показать, что период продольных колебаний тела на пружине не зависит от момента инерции колеблющегося тела. Для этого нужно возбудить продольные вертикальные колебания при двух описанных выше положениях стержня и убедиться, что периоды будут совпадать.

6.1.4. Математические маятники.

Для демонстрации зависимости периода колебаний математического маятника от его длины и независимости периода колебаний такого маятника от массы его груза используется установка, основу которой составляет деревянная рама. К перекладине этой рамы на бифилярных подвесах различной длины крепятся одинаковые шары. Поочередно выводя получившиеся маятники из положения равновесия и наблюдая возникающие после этого колебания, можно убедиться, что с ростом длины математического маятника период его колебаний возрастает.

Если прикрепить к перекладине рядом друг с другом на подвесах одинаковой длины два шара одинаковых размеров с сильно различающимися массами (например, пробковый и свинцовый), то можно продемонстрировать независимость периода колебаний математического маятника от его массы. Два таких маятника будут иметь одинаковые периоды колебаний.

Для удобства юстировки описанной экспериментальной установки шары и рама должны быть снабжены маленькими проволочными петельками. Это даст возможность аккуратно регулировать длины плеч бифилярных подвесов.

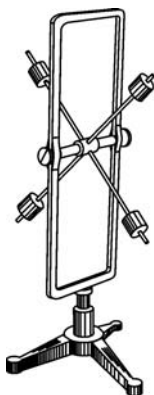


Рис. 6.5. Маятник Обербека.

6.1.5. Маятник Обербека (крестообразный физический маятник).

Для показа демонстрации используется крестообразный маятник Обербека (см. рис. 6.5), устройство которого описано в главе 3, демонстрация 3.1. При помощи этой установки можно демонстрировать зависимость периода колебаний физического маятника от его момента инерции, а также от положения центра масс маятника.

В ходе первой демонстрации изменяют момент инерции маятника при неизменном расстоянии от его центра масс до оси вра-

щения. Для этого сначала груз, находящийся на верхнем стержне, закрепляют вблизи втулки, а груз, находящийся на нижнем стержне – примерно у его середины. После этого грузы, находящиеся на горизонтальных стержнях, закрепляют вблизи концов стержней на одинаковых расстояниях от оси вращения, и наблюдают колебания получившегося физического маятника. Затем грузы, находящиеся на горизонтальных стержнях, перемещают к втулке и вновь закрепляют на одинаковых расстояниях от оси вращения. После этого снова наблюдают колебания физического маятника – их период значительно уменьшается по сравнению с первым случаем.

В ходе второй демонстрации изменяют расстояние между центром масс маятника и осью вращения, не меняя момент инерции. Для этого грузы, находящиеся на горизонтальных стержнях, закрепляют вблизи их концов на одинаковых расстояниях от оси вращения. Груз 1, находящийся на нижнем стержне, закрепляют на самом его конце, а груз 2, находящийся на верхнем стержне – на некотором (не очень большом) расстоянии от конца стержня (см. рис. 6.6.а). После этого наблюдают колебания получившегося физического маятника. Период этих колебаний достаточно велик, так как расстояние от центра масс маятника до оси вращения мало.

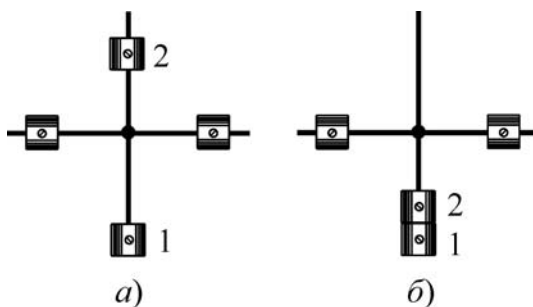


Рис. 6.6. Зависимость периода колебаний от положения центра масс маятника.

Затем груз 1, находящийся на конце нижнего стержня, снимают, и закрепляют его на самом конце верхнего стержня (момент инерции при этом не изменяется). Далее маятник поворачивают на 180° и вновь наблюдают его колебания (см. рис. 6.6.б). Период этих колебаний оказывается значительно меньшим, чем в предыдущем случае, так как расстояние от центра масс до оси вращения возрастает.

6.1.6. Физический маятник (центр качания, приведённая длина маятника).

Для демонстрации понятий «центр качания» и «приведённая длина» физического маятника используется маятник, изготовленный из большого однородного металлического листа неправильной формы. Центр масс маятника обозначен черной точкой C , нарисованной на этом листе (см. рис. 6.7). Вблизи одного из краев листа сверлится небольшое отверстие O , в которое вставляется металлический стержень, конец которого крепится в массивной вертикальной стойке так, чтобы стержень был горизонтален, а металличе-

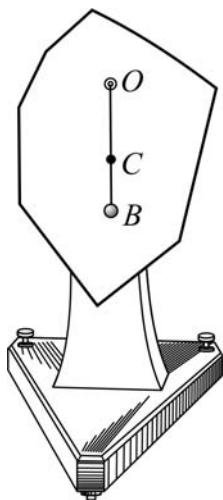


Рис. 6.7.

Приведенная длина
физического маятника.

ский лист мог совершать свободные колебания в вертикальной плоскости. В центре качания получившегося физического маятника сверлится второе отверстие, диаметр которого совпадает с диаметром первого. На тот же самый стержень подвешивается на тонкой нити маленький тяжелый шарик B так, чтобы он не касался листа. Длина этого математического маятника должна совпадать с приведенной длиной физического маятника, то есть при равновесии центр шарика должен находиться напротив оси нижнего отверстия, просверленного в пластине. Затем оба маятника отклоняют от положения равновесия на одинаковый не очень большой угол и одновременно отпускают. После этого можно наблюдать, что колебания

физического и математического маятников происходят синхронно, то есть маятники имеют одинаковый период. При изменении длины математического маятника синхронность колебаний нарушается. Далее маятники снимают со стержня, лист поворачивают на 180° и вешают его так, чтобы стержень проходил через второе отверстие. Вновь повесив на стержень математический маятник, имеющий длину, равную приведенной, опять наблюдают синхронные колебания математического и физического маятников. Этот опыт свидетельствует о том, что точка подвеса и центр качания физического маятника являются сопряженными точками, то есть меняются местами при подвешивании маятника в центре качания.

6.1.7. Колебания ножек камертона в стробоскопическом освещении.

Опыт позволяет продемонстрировать, что при звучании камертона его ножки колеблются, в результате чего в воздухе и возникает звуковая волна. Для наблюдения необходимы звучащий на низкой частоте камертон (он имеет большие, более удобные для наблюдения, ножки) и стробоскоп. Можно использовать как обычный, так и электрокамертон. Перед показом опыта нужно предварительно установить частоту световых вспышек стробоскопа, совпадающую с частотой звучания камертона. Затем аудитория затемняется, и возбуждаются колебания ножек камертона. При подобранной частоте вспышек ножки кажутся неподвижными. Если немного увеличить или уменьшить частоту вспышек стробоскопа, то можно будет наблюдать медленные колебания ножек камертона, причем эти колебания будут происходить по отношению друг к другу в противофазе.

6.1.8. Зависимость периода колебаний от «силы тяжести» – ферромагнитный маятник над магнитом.

Опыт позволяет продемонстрировать зависимость периода колебаний математического или физического маятника от силы тяжести. Для показа демонстрации нужно изготовить математический маятник (из ферромагнитного шарика) или физический маятник (из ферромагнитного стержня) и поместить его над электромагнитом или сильным постоянным магнитом. Сначала наблюдают колебания маятника при выключенном электромагните или убранном из-под маятника постоянном магните. Затем включают электромагнит или помещают под маятником постоянный магнит, тем самым моделируя увеличение силы тяжести, и наблюдают уменьшение периода колебаний маятника. Для удобства проведения опыта маятник можно подвесить на поворотной штанге, укрепленной на штативе: вначале штангу отворачивают от магнита и наблюдают обычные колебания в поле силы тяжести, а затем поворачивают штангу так, чтобы маятник оказался над магнитом, и наблюдают колебания при «увеличенной силе тяжести» (см. рис. 6.8).



Рис. 6.8.
Ферромагнитный маятник над магнитом.

6.1.9. Влияние среды на затухание колебаний маятника (шарик с лопастью и корыто с водой).

Для показа демонстрации используется маятник, изготовленный из тяжелого шарика, прикрепленного к горизонтальной рейке при помощи нитяного бифилярного подвеса. Сначала наблюдают свободные колебания этого маятника, оценивая степень их затухания. Затем снизу к маятнику прикрепляют лопасть, изготовленную из металлической пластинки (в нижней части шарика для этого

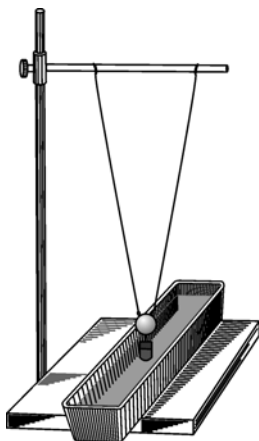


Рис. 6.9. Влияние среды на затухание колебаний маятника.

предусматривается отверстие, а лопасть снабжается штырьком соответствующего диаметра). При колебаниях маятника с лопастью из-за трения о воздух возрастает сила сопротивления, в результате чего затухание колебаний маятника увеличивается. Далее под маятником размещают емкость с водой так, чтобы лопасть была погружена в воду, а маятник при колебаниях не касался стенок емкости (см. рис. 6.9). В этом случае, поскольку трение о воду значительно больше, чем трение о воздух, затухание колебаний маятника еще более возрастает, и они могут стать аperiodическими.

6.1.10. Гармонические колебания (диск с шариками и стрелками в теневой проекции) в сравнении с колебаниями математического маятника.

Опыт позволяет продемонстрировать основные закономерности движения при гармонических колебаниях. Для показа демонстрации используется горизонтальный диск, в котором проделаны несколько отверстий (см. рис. 6.10). Ось диска снабжена конической насадкой для крепления на вал центробежной машины. Диск устанавливается на расстоянии 1,5-2 м от дугового фонаря так, чтобы на экране в затемненной аудитории получалась четкая теневая проекция, и тень плоскости диска на экране была горизонтальной. В одно из отверстий диска плотно вставляется стержень с насаженным на его верхний конец шариком. При вращении диска на центробежной машине тень шарика должна двигаться по экрану по прямой линии, совершая колебания.

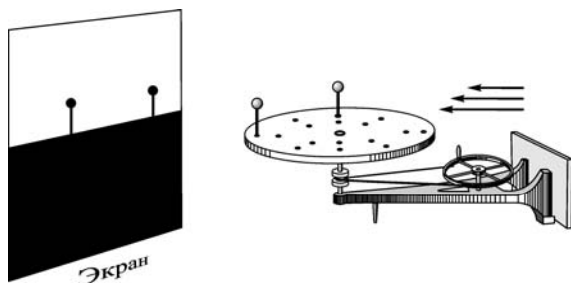


Рис. 6.10. Общий вид установки.

Для того чтобы убедиться в гармоничности этих колебаний, над осью вращения диска крепится на штативе нить математического маятника. Шарик маятника должен располагаться так, чтобы зрители могли одновременно наблюдать за его колебаниями и за движением тени шарика на экране (см. рис. 6.11). Качнув маятник таким образом, чтобы плоскость его колебаний была параллельна плоскости экрана, подбирают частоту вращения вала центробежной машины такой, чтобы периоды колебаний маятника и тени шарика на экране совпадали. При этом маятник и тень шарика движутся синфазно.

Для того чтобы продемонстрировать направление и характер изменения скорости при гармонических колебаниях, на стержне чуть ниже шарика крепится стрелка, вырезанная из плотного картона. Острие стрелки должно указывать в направлении движения шарика. При этом направление тени стрелки на экране соответствует направлению скорости колеблющейся точки, а изменение длины тени стрелки характеризует изменение модуля этой скорости. В те моменты, когда шарик движется параллельно экрану, длина тени стрелки максимальна – это соответствует прохождению колеблющейся точкой положения равновесия. В те моменты, когда шарик движется перпендикулярно экрану, длина тени стрелки становится минимальной (определяется размером поперечного сечения стрелки) – это соответствует остановке колеблющейся точки на максимальном удалении от положения равновесия.

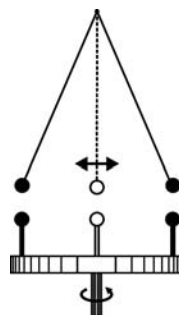


Рис. 6.11. Сравнение колебаний маятника и шарика на диске.

Если закрепить стрелку на стержне так, чтобы ее острие было направлено к центру вращающегося диска, то стрелка будет совпадать с направлением вектора центростремительного ускорения шарика. При этом направление тени стрелки и изменение длины тени будут соответствовать направлению вектора ускорения и изменению его модуля для колеблющейся точки. При движении шарика параллельно экрану, что соответствует прохождению колеблющейся тенью положения равновесия, длина тени стрелки будет минимальной, а при движении шарика перпендикулярно экрану, что соответствует наибольшему отклонению колеблющейся тени от положения равновесия – максимальной.

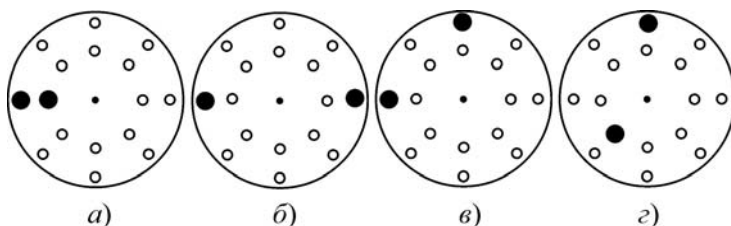


Рис. 6.12. Демонстрация понятий амплитуды и фазы гармонических колебаний.

Если установить на диске два одинаковых стержня с шариками, используя для этого разные отверстия, то можно продемонстрировать понятия амплитуды и фазы гармонических колебаний. При этом амплитуда колебаний тени шарика определяется расстоянием от стержня с шариком до оси диска, а разность фаз колебаний теней двух шариков – углом между радиусами, проведенными из центра диска к точкам крепления стержней с шариками (шарики обозначены на рисунках темными кружками). На рисунке 6.12 показаны варианты размещения шариков, соответствующие разности фаз колебаний их теней 0° (*a*), 180° (*b*), 90° (*v*) и 135° (*z*). При этом амплитуды колебаний теней в случаях *a*) и *z*) будут различными, а в случаях *b*) и *v*) – одинаковыми.

6.1.11. Колебания пластинки с грузом, закрепленной в тисках.

Для демонстрации зависимости свойств механической колебательной системы от различных параметров можно использовать

следующую простую демонстрацию. На столе устанавливаются тиски, в которые в вертикальном положении зажимается тонкая стальная пластинка. К верхнему концу пластинки прикрепляется деревянный шарик (см. рис. 6.13). Если изогнуть пластинку, выведя его из положения равновесия, то можно наблюдать постепенно затухающие колебания шарика. Зажимая пластинку в разных местах и повторяя опыт, можно убедиться, что при увеличении длины пластинки период колебаний также увеличивается. Это объясняется уменьшением эффективной жесткости системы (длинную пластинку изогнуть легче, чем короткую). Если снять шарик с пластинки и после этого возбудить ее колебания, то период колебаний (по сравнению с колебаниями при наличии шарика) уменьшится. Это можно объяснить уменьшением момента инерции колебательной системы. Наконец, можно продемонстрировать влияние упругих свойств системы на характер ее колебаний. Для этого нужно заменить стальную пластинку на картонную. Колебания шарика, закрепленного на такой пластинке, затухают гораздо быстрее – шарик совершает всего лишь 2–3 полных колебания. Это связано с тем, что деформации картона, в отличие от деформаций стали, являются лишь частично упругими, и при изгибании картонной пластинки часть механической энергии преобразуется в тепловую. Это эквивалентно действию в системе значительной силы трения, чем и объясняется возрастание затухания.

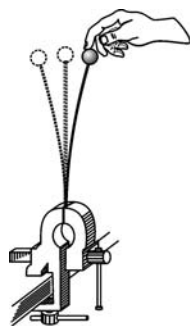


Рис. 6.13.
Колебания пластинки с грузом, закрепленной в тисках.

6.1.12. Колебания магнитной стрелки в постоянном магнитном поле.

Для наблюдения зависимости периода колебаний от величины возвращающей силы можно воспользоваться магнитной стрелкой, установленной на игольчатой опоре в горизонтальном положении. Рядом со стрелкой на одной высоте с ней на предметном столике размещается постоянный магнит. В положении равновесия стрелка ориентируется вдоль линий магнитного поля, создаваемого магнитом. После выведения стрелки из положения равновесия можно наблюдать ее колебания вокруг положения равновесия. Двигая столик с магнитом, можно изменять величину действующей на стрелку магнитной силы. При приближении магнита к стрелке

возвращающая магнитная сила увеличивается, и период колебаний уменьшается, а при удалении магнита от стрелки – наоборот, магнитная сила уменьшается, и период колебаний увеличивается.

6.1.13. Колебания столба жидкости в U-образной трубке.



Рис. 6.14. Колебания столба жидкости в U-образной трубке.

Для показа демонстрации необходима U-образная вертикальная стеклянная трубка, в которую примерно до половины высоты налита подкрашенная вода. Одно из колен трубки должно быть открыто в атмосферу. На выход другого колена необходимо надеть отрезок гибкого шланга, к свободному концу которого должна герметично присоединяться медицинская спринцовка (см. рис. 6.14). При показе опыта вначале необходимо, слегка надавив на спринцовку, создать в коленах трубки перепад уровней жидкости. После этого нужно пережать пальцами шланг и отсоединить от него спринцовку. При освобождении шланга в U-образной трубке возникнут колебания жидкости, которые будут затухать из-за наличия вязкости. Доливая в трубку воду (при этом увеличивается колеблющаяся масса) и повторяя опыт, можно показать, что период колебаний жидкости в трубке увеличивается.

При помощи этой демонстрации можно также показать влияние вязкости жидкости на затухание колебаний. Для этого необходимо иметь две одинаковые U-образные трубки, в одну из которых налита вода, а в другую (до того же уровня) – какая-либо вязкая жидкость (масло или автомобильная тормозная жидкость). Для одновременного возбуждения колебаний отрезки шлангов, идущие от колен трубок с водой и с маслом, нужно соединить через трубку-тройник, к выходу которого подсоединяется спринцовка. Возбуждая колебания описанным выше способом, можно удостовериться, что их период не зависит от плотности налитой в трубку жидкости, но колебания вязкой жидкости гораздо быстрее затухают из-за действия большей силы вязкого трения.

При помощи этой демонстрации можно также показать влияние вязкости жидкости на затухание колебаний. Для этого необходимо иметь две одинаковые U-образные трубки, в одну из которых налита вода, а в другую (до того же уровня) – какая-либо вязкая жидкость (масло или автомобильная тормозная жидкость). Для одновременного возбуждения колебаний отрезки шлангов, идущие от колен трубок с водой и с маслом, нужно соединить через трубку-тройник, к выходу которого подсоединяется спринцовка. Возбуждая колебания описанным выше способом, можно удостовериться, что их период не зависит от плотности налитой в трубку жидкости, но колебания вязкой жидкости гораздо быстрее затухают из-за действия большей силы вязкого трения.

В другом варианте опыта используется устройство типа плотницкого уровня (см. рис. 6.15), состоящее из двух прозрачных трубок, соединенных резиновым шлангом. В эту систему наливается вода примерно до середины трубок, после чего можно возбудить колебания столба жидкости. Для этого надо поднять одну из трубок вверх вместе со штативом и затем быстро опустить ее вниз, или пережать пальцами шланг, подняв трубку, и освободить его после опускания штатива на стол. При этом можно наблюдать до 10 затухающих колебаний водяного столба. Как показывает несложный расчет, период

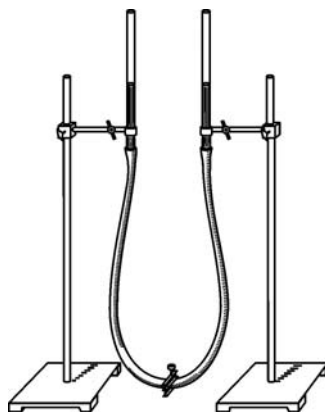


Рис. 6.15. Колебания жидкости в трубках, соединенных шлангом.

колебаний равен $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, где l – полная длина столба жидкости,

g – ускорение свободного падения. Полезно повторить опыт, взяв шланг длиной в несколько метров – при этом период колебаний увеличивается, достигая нескольких секунд. Если уменьшить проходное сечение шланга, сжав его зажимом, то трение увеличится, и затухание колебаний будет происходить быстрее; при этом можно продемонстрировать и аperiodический режим движения столба жидкости.

6.2. Запись колебаний.

После демонстрации зависимости периода колебаний от параметров колебательных систем можно переходить к показу серии опытов по записи колебаний.

6.2.1. Маятник с песком: с затуханием и без него.

Для показа этой демонстрации используется специальный прибор¹, который представляет собой физический маятник, изготовленный из легкого металла в виде равнобедренной треугольной рамы (см. рис. 6.16). Высота рамы составляет ~1 м, длина ее осно-

¹ Разработан сотрудником КФД В. С. Егоровым.

вания AB – 30-40 см. Рама подвешивается в вертикальном положении на горизонтальную ось CD , проходящую через основание. Ось, в свою очередь, крепится к массивному демонстрационному штативу. К нижнему углу рамы подвешивается тяжелая коническая воронка, в которую может засыпаться мелко просеянный песок.

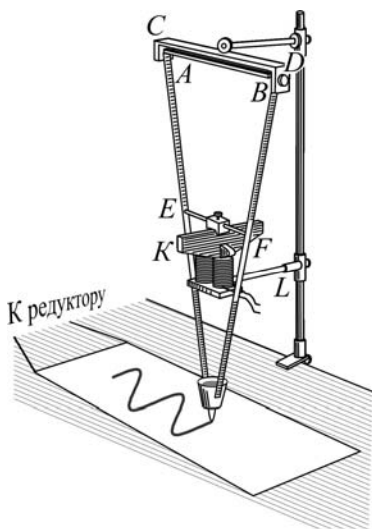


Рис. 6.16. Маятник с песком.

Под воронкой на столе располагается бумажная полоса, к краю которой прикреплены длинные нити.

Перед демонстрацией незатухающих колебаний отверстие воронки закрывается пальцем, и в нее насыпается песок. После этого маятник выводят из положения равновесия и отпускают, одновременно открыв отверстие воронки. При возникших колебаниях маятника песок высыпается из воронки тонкой струйкой, оставляя на бумаге прямолинейный след. Если начать двигать бумажную полосу под маятником с постоянной скоростью в направлении, перпендикулярном плоскости колебаний, то струя высыпавшегося песка будет оставлять на бумаге след в виде синусоиды. Двигать бумажную полосу можно вручную, либо намотав прикрепленные к ней нити на вал редуктора, соединенного с электродвигателем. Изменяя скорость движения ленты (например, регулируя реостатом силу тока в обмотке электродвигателя), можно менять степень растянутости синусоиды.

Для показа затухающих колебаний на раму маятника устанавливается горизонтальная перекладина EF , к которой крепится массивная вертикальная медная пластина K (см. рис.). Под пластиной на дополнительном держателе L к штативу крепится электромагнит, расположенный таким образом, чтобы при колебаниях маятника пластина перемещалась между полюсами магнита, не касаясь их. При включенном электромагните в колеблющейся пластине индуцируются токи Фуко, и на нее действует тормозящая сила, пропорциональная скорости. Вследствие этого маятник совершает

затухающие колебания, и амплитуда синусоиды, изображаемой на бумаге струей песка, постепенно уменьшается. Изменяя при помощи реостата силу тока в обмотке электромагнита, можно наблюдать колебания с различной степенью затухания – вплоть до аperiодического режима.

Следует отметить, что при выключенном электромагните можно наблюдать незатухающие колебания с различными частотами – для изменения частоты достаточно снять с маятника (или прикрепить к нему) медную пластину, использующуюся для получения затухающих колебаний.

6.2.2. Бесконтактный электрокамертон, развертка с зеркального барабана.

Данный демонстрационный прибор позволяет осуществлять оптическую «запись» колебаний. Для этого используются бесконтактный электрокамертон и зеркальный вращающийся барабан.

Электрокамертон изготавливается из обычного камертона с собственной частотой колебаний 50-100 Гц, между ветвями которого располагается электромагнит с электронным прерывателем [8]. Камертон прикрепляется к массивному штативу при помощи специальных винтов и зажимов, которые позволяют устанавливать его в нужном положении по высоте и углам поворота (см. рис. 6.17). Электромагнит крепится к тому же штативу на рейке вблизи стебля камертона на расстоянии, равном примерно $1/3$ длины ветвей камертона. На торцы ветвей камертона привинчиваются небольшие металлические зеркала (диаметром ~ 20 мм). Питание электрокамертона осуществляется от сети ~ 220 В, 50 Гц (детали электрической схемы камертона приведены в описании демонстрации 6.4.7).

Зеркальный барабан делается на основе прямой призмы, основания которой являются правильными многоугольниками. К бо-

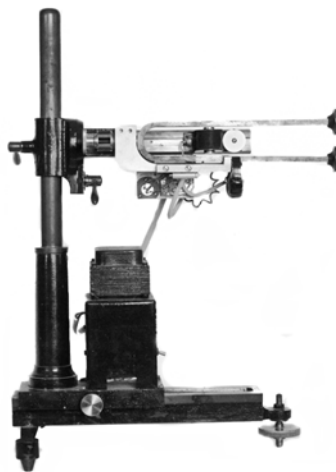


Рис. 6.17. Электрокамертон.

ковым граням призмы приклеиваются зеркала. Затем призма устанавливается на вертикальную ось, совпадающую с ее осью симметрии, и снабжается механизмом, позволяющим вращать ее с помощью электромотора вокруг этой оси.

При подготовке демонстрации электрокамертон закрепляется в таком положении, чтобы зеркала на его ветвях совершали колебания в вертикальной плоскости, а зеркальный барабан устанавливается так, чтобы ось его вращения была вертикальной (см. рис. 6.18). На одно из зеркал (D) электрокамертона направляется узкий горизонтальный пучок света, который после отражения от зеркала должен попасть на зеркальную поверхность барабана E , а отразившись от нее – на экран F в аудитории. Пучок

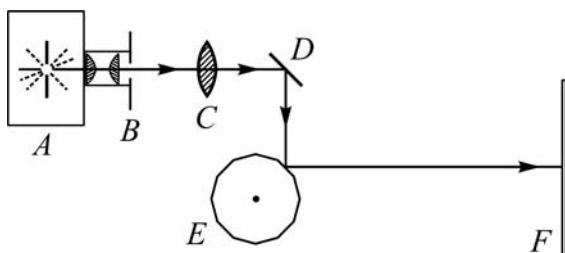


Рис. 6.18. Оптическая схема установки.

света может быть получен при помощи проекционного фонаря A с диафрагмой B , вставленной в темный конус, либо при помощи лазера. Перед зеркалом D электрокамертона следует расположить собирающую линзу C , двигая которую, нужно получить на экране четкое изображение светового пятна. Правильность сборки и настройки установки проверяется следующим образом: при вращении зеркального барабана (электрокамертон выключен) светлое пятно на экране должно превращаться в горизонтальную линию, а при колебаниях электрокамертона (барабан неподвижен) – в вертикальную линию. Длина этой линии должна составлять ~ 30 - 40 см.

При одновременном вращении зеркального барабана и колебаниях зеркала камертона светлое пятно на экране превращается в отрезок синусоиды. Для успеха демонстрации вращение барабана должно быть достаточно быстрым, равномерным и синхронизированным с колебаниями камертона. Барабан можно приводить во вращение при помощи ручного привода или электромотором с регулируемым числом оборотов.

6.2.3. Шлейфовый осциллограф.

«Шлейфовые», или электромеханические осциллографы применялись, в основном, до изобретения электронных осциллографов при исследовании различного типа вибраций в технических конструкциях. Чувствительными элементами в них являются так называемые «шлейфы», то есть витки на упругих подвесах, снабженные маленькими зеркальцами и помещенные в поле электромагнитов или постоянных магнитов. Лучи света, отраженные от этих зеркал, при подаче исследуемых периодических напряжений на «шлейфы» колеблются и далее либо разворачиваются при помощи вращающегося зеркального барабана (как в предыдущей демонстрации) или призмы, давая изображение на экране, либо фокусируются на рулонной фотобумаге, которая протягивается с постоянной скоростью. Это дает возможность записывать и изучать различные типы вибраций, возникающих при работе техники, в том числе – авиационной, и добиваться надежной и безаварийной работы этих устройств. В музее Кабинета физических демонстраций физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова имеется экземпляр шлейфового осциллографа такого типа (с вращающейся призмой), который можно показывать на лекциях (см. рис. 6.19).



Рис. 6.19. Шлейфовый осциллограф.

6.2.4. Осциллографическая запись колебаний груза на пружине.

Для демонстрации этого опыта постоянный магнит подвешивается внутри специальной рамы на двух спиральных жестких пружинах так, чтобы он мог совершать вертикальные колебания, двигаясь в канале проволочной катушки A (см. рис. 6.20). Верхняя сторона рамы B и крепление катушки K делаются подвижными для облегчения регулировки установки. Концы обмотки катушки присоединяются к вертикально отклоняющим пластинам электронного осциллографа (вход Y).

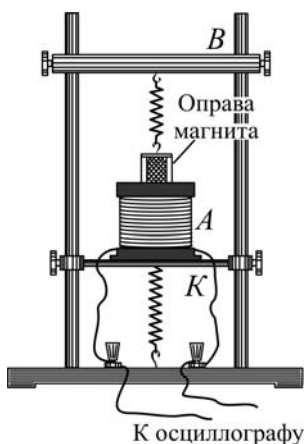


Рис. 6.20. Общий вид установки.

Если оттянуть магнит вниз и отпустить, то он начнет совершать колебания в канале катушки, вследствие чего в ней будет индуцироваться переменная ЭДС. В результате луч на экране осциллографа будет совершать колебания, изображая вертикальную линию. При включении генератора горизонтальной развертки осциллографа (по оси X) на его экране появляется отрезок синусоиды. При помощи регулировочных ручек осциллографа следует установить такое усиление сигнала, подаваемого на вход Y , и такую частоту развертки вдоль оси X , чтобы отрезок синусоиды был неподвижен, хорошо виден и занимал практически весь экран.

Для показа демонстрации в большой аудитории можно использовать демонстрационный осциллограф с большим экраном, либо видеокамеру и проекционный аппарат. Собственную частоту колебаний системы нужно подбирать такой, чтобы используемый осциллограф давал возможность наблюдать переменный сигнал соответствующей частоты. При регулировке установки нужно следить за тем, чтобы магнит при колебаниях не касался внутренних стенок канала.

После показа классических опытов по записи колебаний можно перейти к демонстрации современных экспериментов на линии с персональным компьютером, расширяющих возможности иллюстрации и анализа колебательных движений.

6.2.5. Запись колебаний с использованием датчика углового перемещения.

Демонстрационная установка представляет собой массивную вертикальную раму, на которой установлены два подшипника с закрепленной в них горизонтальной поворотной осью. На одном из свободных концов этой оси перпендикулярно к ней жестко закреплен стальной стержень. Расстояние от оси вращения получившегося физического маятника (см. рис. 6.21) до нижнего конца стержня составляет около 600 мм. На стержне с помощью прижимного винта закреплен латунный груз массой ~ 250 г. Положение груза на стержне можно изменять. К верхнему концу стержня прикреплена указательная стрелка, перемещающаяся при колебаниях маятника по шкале с ценой деления 1° . Конструкция маятника допускает его максимальное отклонение на углы до $\pm 60^\circ$, а период его колебаний (в зависимости от положения груза и наличия дополнительных насадок, служащих для постановки различных экспериментов) лежит в пределах от ~ 1 с до $\sim 1,5$ с.

Для показа при помощи этой установки автоматизированных демонстрационных экспериментов изготовлен датчик углового перемещения, основой которого служит манипулятор «мышь» оптического типа [19]. Конструкция датчика показана на рисунке 6.22 (вид установки сзади). Основу системы регистрации составляет закрепленный на втором конце поворотной оси маятника дюралюминиевый цилиндр диаметром ~ 120 мм с по-

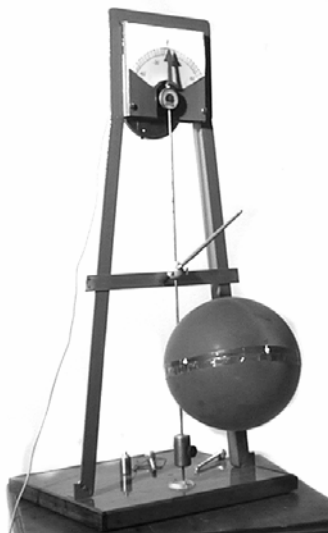


Рис. 6.21. Общий вид установки с насадками.

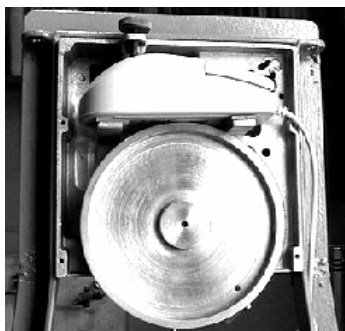


Рис. 6.22. Датчик углового перемещения.

лированной отражающей боковой поверхностью, на которой прикреплена прозрачная пластиковая пленка с нанесенной на ней периодической системой полос. Ширина полос $\sim 0,04$ мм, период $\sim 0,25$ мм. Система полос наносится на пленку путем печати на лазерном принтере с разрешением 600 точек на дюйм. На небольшом расстоянии от цилиндра закреплен оптический манипулятор «мышь», так, что лучи из его выходного окна попадают на боковую поверхность цилиндра, покрытую пленкой, отражаются от нее и поступают на приемник, расположенный в том же окне «мышь». Расстояние от окна до отражающей поверхности может изменяться с помощью специального регулировочного винта в пределах $0,5 \div 1,0$ мм, что позволяет точно сфокусировать на ней пучок света. При колебаниях маятника его ось поворачивается, система полос перемещается мимо окна «мышь», аналогично тому, как это происходит при движении «мышь» по плоской подложке. В результате с манипулятора на компьютер поступает цифровой сигнал, однозначно определяющий величину отклонения маятника. Измерение времени осуществляется системными часами компьютера. Таким образом, используя данный датчик углового перемещения, можно экспериментально получать зависимость угловой координаты маятника φ от времени t при различных условиях. Дискретность данного датчика составляет $1/16$ градуса, или около четырех угловых минут (такая величина дискретности позволяет надежно фиксировать детали колебаний, происходящих с амплитудой $\sim 0,5^\circ$).

Для постановки автоматизированных демонстрационных экспериментов с использованием данной установки создана специальная компьютерная программа. [22, 27] Она позволяет проводить калибровку датчика углового перемещения, осуществлять установку нулевого значения угловой координаты, устанавливать время записи экспериментальных зависимостей, а также осуществлять их обработку и представление результатов.

Заметим, что автоматизированные демонстрационные эксперименты по изучению механических колебаний можно ставить также с использованием датчика силы [21], к которому подвешивается груз на пружине.

6.2.5.1. «Осциллографическая» запись колебаний.

Демонстрируется наиболее простой опыт, показывающий общий ход колебательного процесса. Установка при этом работает в режиме осциллографической записи произвольных движений маятника. Это дает возможность показать перед началом демонстрации более сложных экспериментов, что компьютерная программа действительно обрабатывает реальные данные, поступающие непосредственно от установки. Для демонстрации этого факта достаточно покачать маятник рукой, наблюдая на экране получающуюся зависимость $\varphi(t)$. Пример произвольной зависимости, которая может получиться в результате такой демонстрации, показан на рис. 6.23.

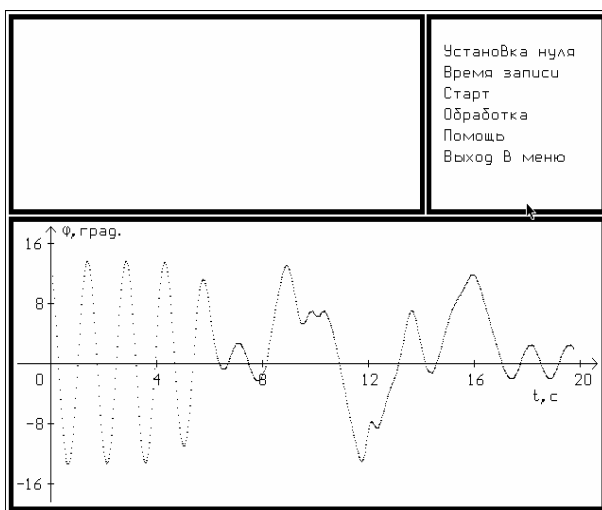


Рис. 6.23. Запись произвольных колебаний маятника.

6.2.5.2. Получение зависимостей кинематических характеристик от времени и фазовых портретов колебаний.

Перед началом показа этих демонстраций необходимо провести пробный эксперимент, выбрав соответствующий пункт меню программы. Для этого нужно заставить маятник в течение примерно 10 секунд совершать свободные колебания с небольшой амплитудой ($\sim 10^\circ$). После этого в результате автоматической обработки полученной зависимости $\varphi(t)$ будет найдена частота ω_0 , которая будет использоваться в дальнейшем в качестве опорной для построения фазовых портретов. При всех измене-

ниях конфигурации маятника, приводящих к изменению частоты его колебаний, пробный эксперимент нужно повторять.

Затем можно приступить к демонстрации, запустив маятник и выбрав пункт меню «Старт». В качестве примера результатов измерений на рис. 6.24 приведены зависимости, полученные при наблюдении колебаний, близких к гармоническим. Сверху на экране в режиме реального времени при колебаниях выводятся разными цветами три кинематические зависимости $\varphi(t)$, $\dot{\varphi}(t)$ и $\ddot{\varphi}(t)$, что позволяет проводить их визуальное сравнение; слева внизу выводится фазовый портрет $\dot{\varphi}(\varphi)$, имеющий вид эллипса; наконец, справа внизу выводится фазовая зависимость $\ddot{\varphi}(\varphi)$, показывающая, что при гармонических колебаниях возвращающий момент силы пропорционален угловому смещению маятника.

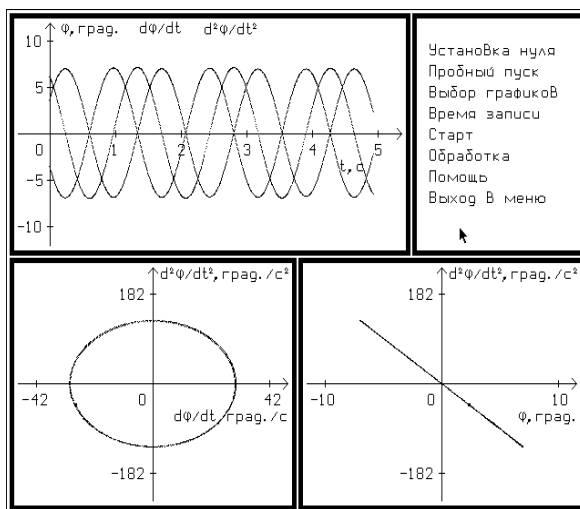


Рис. 6.24. Кинематика гармонических колебаний.

При необходимости можно отключить отображение фазовых портретов. В этом случае вид экрана несколько изменяется. На нем в процессе эксперимента друг под другом одновременно выводятся зависимости $\varphi(t)$, $\dot{\varphi}(t)$ и $\ddot{\varphi}(t)$, (время измеряется в долях периода колебаний), а также зависимости $\varphi^2(t)$ и $\dot{\varphi}^2(t)$, пропорциональные потенциальной и кинетической энергиям маятника (см. рис. 6.25). Для удобства пояснения результатов демонстрации через проме-

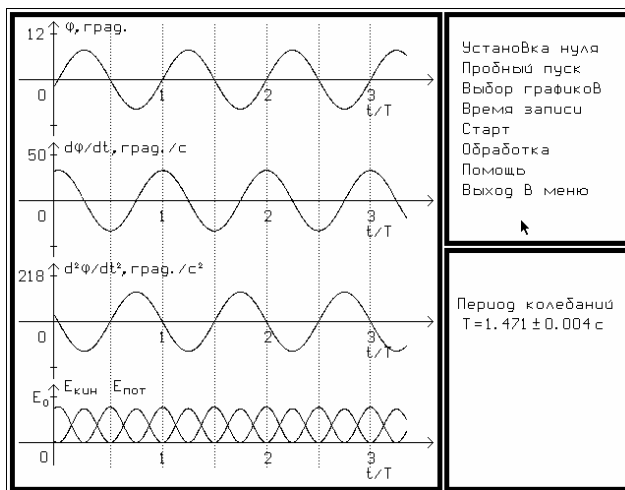


Рис. 6.25. Другой возможный вид экрана при записи гармонических колебаний.

жутки времени, равные половине периода колебаний, через все графики автоматически проводятся вертикальные пунктирные линии, позволяющие видеть, что скорость опережает по фазе смещение на $\pi/2$, а ускорение – на π . Кроме того, из графиков видно, что потенциальная и кинетическая энергии колеблются в противофазе друг к другу, а их сумма сохраняется.

6.2.5.3. Изучение затухающих колебаний при наличии различных типов сил трения.

Данные демонстрации позволяют не только показать зависимость угловой координаты маятника φ от времени t при наличии различных типов сил трения (вязкого трения, пропорционального скорости или квадрату скорости, а также «сухого» трения), но и по виду зависимости $\varphi(t)$ установить тип силы трения, действующей на маятник при определенных условиях проведения опыта. Эксперимент основан на получении зависимости амплитуды A затухающих колебаний от времени t . Как известно, в случае вязкого трения, пропорционального скорости, линейной по времени будет функция $\ln A(t)$; в случае вязкого трения, пропорционального квадрату скорости, линейной по времени будет функция $1/A(t)$; наконец, в случае «сухого» трения сама зависимость $A(t)$ будет линейной по времени. Следовательно, анализируя указанные зависимости, можно установить тип силы трения, действовавшей на маятник.

В данной установке «сухое» трение реализуется при помощи дополнительной насадки в виде кисточки, которая крепится на стержне маятника и трется о специальную пластинку, прикрепленную к раме маятника параллельно плоскости его качания (показаны на рис. 6.21). Вязкое трение о воздух реализуется путем крепления к маятнику легкого протяженного предмета, роль которого может играть воздушный шарик диаметром $\sim 15\text{--}20$ см (см. рис. 6.21). При этом в случае малых (по сравнению с размерами предмета) амплитуд колебаний трение о воздух пропорционально скорости, а в случае больших амплитуд – квадрату скорости.

В ходе эксперимента сначала в режиме изучения кинематики колебательного движения записывается зависимость $\varphi(t)$. При этом можно наблюдать за поведением фазовых портретов в случае наличия затухания. Затем проводится обработка полученной зависимости: определяются ее экстремумы (получаемые при этом экспериментальные точки соответствуют функции $A(t)$), после чего на мониторе одновременно строятся зависимости $A(t)$, $1/A(t)$ и $\ln A(t)$. Далее каждая из полученных зависимостей аппроксимируется прямой линией по методу наименьших квадратов (МНК). По величине отображаемых рядом с графиками коэффициентов корреляции r можно судить о том, какая из трех зависимостей наиболее близка к линейной, а значит, какой тип силы трения преобладал во время колебаний маятника. На рисунках 6.26 – 6.28 приведены результаты экспериментов в случаях вязкого (пропорционального скорости и квадрату скорости) и «сухого» трения.

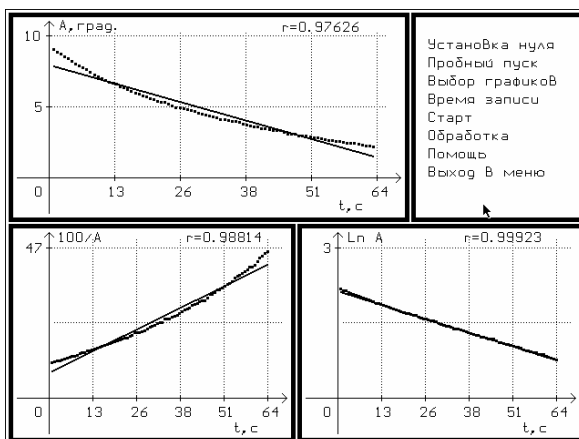


Рис. 6.26. Колебания при наличии сил вязкого трения, пропорционального скорости.

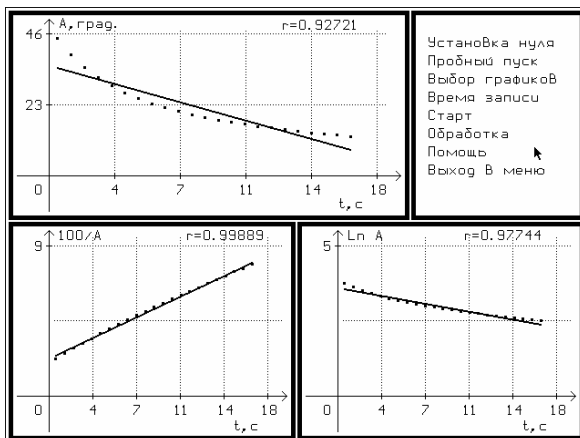


Рис. 6.27. Колебания при наличии сил вязкого трения, пропорционального квадрату скорости.

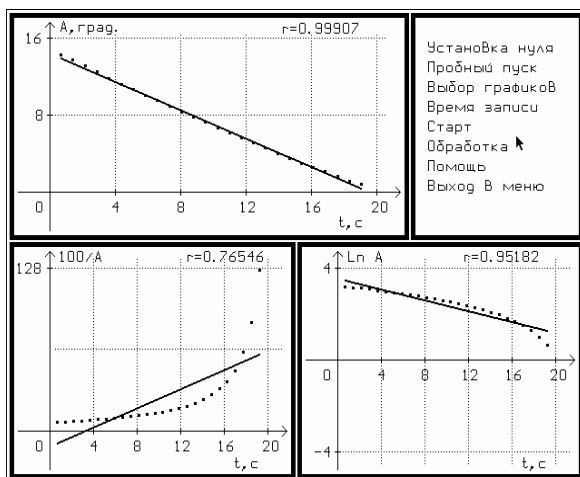


Рис. 6.28. Колебания при наличии сил сухого трения.

Отметим, что здесь же могут быть продемонстрированы колебания при наличии сильного «сухого» трения, которое создается при помощи упомянутой выше насадки в виде кисточки. Если кисточку поставить достаточно близко к пластинке, о которую она трется, то маятник, качнувшись несколько раз, останавливается в произвольном месте внутри так называемой «зоны застоя». График зависимости $\varphi(t)$ после этого превращается в горизонтальную прямую, не совпадающую с осью абсцисс.

6.3. Вынужденные колебания.

После демонстрации и записи собственных колебаний различных механических систем можно переходить к показу вынужденных колебаний.

6.3.1. Прибор Н. М. Конопаткина для демонстрации вынужденных колебаний.

Установка позволяет продемонстрировать явление резонанса при колебаниях груза на пружине (см. рис. 6.29). Наверху массивной стойки установлен электродвигатель с редуктором, приводящим в движение рычаги, связанные с пружиной и с указателем. Верхний конец пружины колеблется с частотой, которую можно плавно изменять при помощи реостата, регулирующего число оборотов двигателя. Нижний конец пружины также снабжен указателем (белые куски пенопласта на рисунке). Это позволяет наблюдать сильное увеличение амплитуды колебаний груза при совпадении частоты вынуждающей силы с собственной частотой колебаний груза на пружине, а также проследить

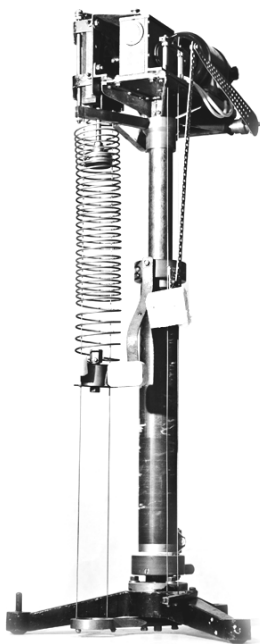


Рис. 6.29. Общий вид установки.

(качественно) изменение сдвига фаз между силой и смещением при прохождении через резонансную частоту. Для устранения раскачивания груза из стороны в сторону в установке имеются направляющие в виде вертикальных стальных проволок, вдоль которых скользит планка с отверстиями, скрепленная с грузом.

6.3.2. Вынужденные колебания математических маятников («пуговицы»).

К деревянной раме на двух одинаковых коротких нитях подвешивают легкую горизонтальную планку. К этой планке на нитях разной длины прикрепляют 5-6 одинаковых легких предметов (пуговиц или кусочков пенопласта). К краю планки, кроме того, прикрепляют на нити тяжелый шарик (например, свинцовый), который при колебаниях будет играть роль возбудителя колебаний (см. рис. 6.30). Длина подвеса этого последнего маятника должна совпадать с длиной подвеса одного из легких маятников. При приведении тяжелого маятника-возбудителя в колебательное движение его колебания через раскачивающуюся планку передаются легким маятникам-«приемникам» колебаний: они начинают раскачиваться, то есть совершают вынужденные колебания. При показе опыта демонстрируются следующие закономерности: 1) амплитуды и фазы вынужденных колебаний всех маятников-«приемников» различны; 2) с максимальной амплитудой колеблется маятник-«приемник», длина которого равна длине маятника-возбудителя, и разность фаз колебаний этих маятников равна $\pi/2$; 3) при собственной частоте колебаний маятника-«приемника», много большей собственной частоты колебаний маятника-возбудителя, два этих маятника колеблются в фазе; 4) при собственной частоте колебаний маятника-«приемника», много меньшей собственной частоты колебаний маятника-возбудителя, два этих маятника колеблются в противофазе.

В большой лекционной аудитории опыт удобнее демонстрировать в теневой проекции или в видеопроекции. При этом желательно добиться, чтобы в положении равновесия все маятники проецировались на экран вдоль одной вертикальной линии.

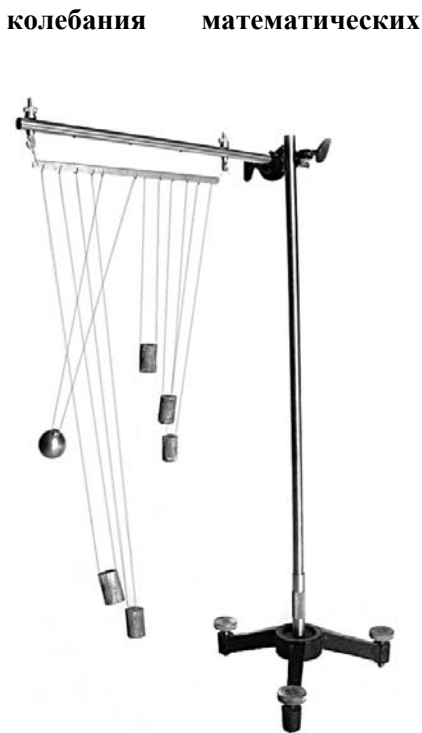


Рис. 6.30. Вынужденные колебания «пуговиц».

6.3.3. Язычковые частотомеры.

Язычковый частотомер представляет собой набор тонких плоских ферромагнитных пластинок-«язычков» (см. левый рисунок 6.31), имеющих различную толщину и расположенных вертикально в один ряд. Концы всех пластинок прочно прикреплены к основанию. Пластинки подобраны так, что каждая из них имеет разную собственную частоту колебаний, и расположены в порядке возрастания этих частот. Над концами пластинок размещена шкала прибора, отградуированная в единицах измерения частоты – Герцах. По деревянному основанию вдоль пластинок может перемещаться электромагнит, обмотка которого питается переменным током. Если медленно двигать электромагнит по основанию, то сильнее всего будет раскачиваться тот «язычок», собственная частота колебаний которого равна удвоенной частоте переменного тока в обмотке. Его колебания будут сопровождаться хорошо слышимым звуком низкой частоты. При питании электромагнита от промышленной сети переменного тока сильнее всего возбуждаются колебания пластинки, собственная частота которой равна 100 Гц. Если в наличии имеется мощный генератор звуковой частоты, то можно продемонстрировать возникновение резонанса и на других частотах.

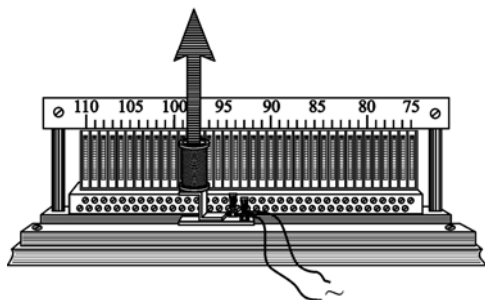


Рис. 6.31. Язычковые частотомеры.

Технические частотомеры (см. правый рисунок 6.31) устроены в принципе так же, как демонстрационный частотомер, но гораздо меньше по размерам и отградуированы непосредственно в значениях частоты переменного напряжения.

6.3.4. Колебания электродвигателя, подвешенного на пружине (моды колебаний).

Для демонстрации этого опыта² электродвигатель постоянного тока подвешивается на спиральной пружине к массивному

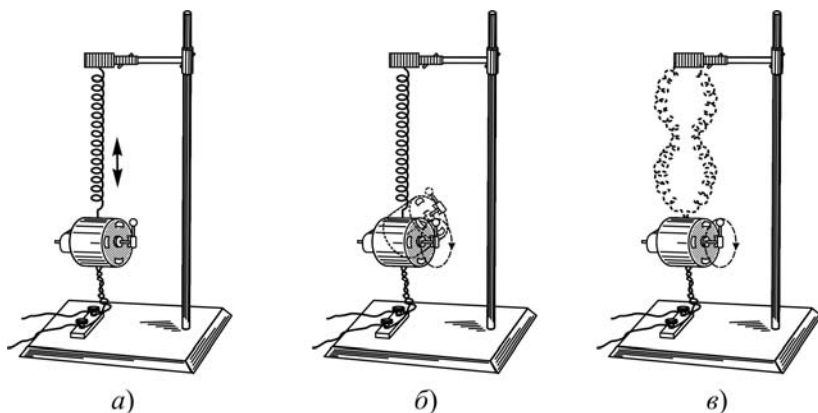


Рис. 6.32. Моды колебаний электродвигателя на пружине.

штативу. На вал двигателя несимметрично крепится небольшой стержень, который при вращении создает периодические «толчки», играющие роль вынуждающей силы. Двигатель подключают к сети при помощи гибких проводов через систему реостатов с разными сопротивлениями, обеспечивающих плавное изменение частоты вращения двигателя.

Прибор позволяет наблюдать несколько резонансов, соответствующих разным собственным частотам (модам) колебательной системы. Первый резонанс наблюдается при небольшой частоте вращения двигателя (около 100 об/мин). Соответствующее этому резонансу движение представляет собой колебания груза на пружине вверх и вниз, в продольном направлении (см. рис. 6.32 а). Частота этого резонанса определяется жесткостью пружины и массой двигателя. При увеличении частоты вращения двигателя эти колебания постепенно исчезают, а затем, когда частота вращения возрастает примерно в два раза, начинает наблюдаться второй резонанс. Он связан с поперечными колебаниями пружины. Двигатель в этом случае начинает колебаться вокруг горизонтальной оси, которая проходит примерно через его центр масс (рис. 6.32 б). Дальнейшее увеличение частоты вращения двигателя приводит к

² Опыт предложен М. А. Грабовским и В. С. Егоровым.

исчезновению и этого резонанса, но при частотах порядка нескольких сотен оборотов в минуту последовательно наблюдаются новые резонансы, связанные с возникновением стоячих поперечных волн на спиральной пружине. При этом двигатель остается практически неподвижным, а пружина интенсивно колеблется, и на ней устанавливаются одна, две, три и более полуволн (рис. 6.32 в).

6.3.5. Резонанс камертонов с шариком-индикатором (см. также демонстрацию 11.1.2).

Для показа этой демонстрации необходимы два одинаковых камертона среднего размера (например, частотой 440 Гц) с резонаторными ящиками и сделанный из бусинки легкий шарик-индикатор, подвешенный на штативе. Первый камертон ставят на стол и устанавливают рядом с ним штатив таким образом, чтобы подвес был практически вертикален, а шарик едва касался верхнего конца одной из ножек камертона (см. рис. 6.33). При



Рис. 6.33. Резонанс камертонов.

этом плоскости колебаний шарика и ножек камертона должны совпадать. Затем второй камертон берут за ножку, ударяют по его вилке молоточком с резиновым наконечником («билкой»), чтобы возбудить звучание, и подносят звучащий камертон к первому камертону, стоящему на столе (открытые концы резонаторов камертонов при этом

должны располагаться напротив друг друга). Второй камертон вследствие резонанса с первым камертоном начинает звучать. Его колеблющаяся ножка ударяет по шарик-индикатору, который высоко подскакивает на подвесе, доказывая наличие колебаний первого камертона (по звуку определить наличие этих колебаний нельзя, так как оба камертона звучат одновременно).

6.3.6. Гироскоп с резонирующими пластинками.

Для показа этой демонстрации используется гироскоп, закрепленный на конических опорах внутри кольцевой оправы, к которой прикреплены деревянная ручка и «гребенка», представляющая собой набор упругих металлических пластинок различной длины (см. рис. 6.34). Незакрепленные концы пластинок загнуты под прямым углом и окрашены в белый цвет для большего удобства наблюдения.

Гироскоп раскручивают вручную при помощи наматываемой на его вал прочной нити. Вращающийся гироскоп немного вибрирует в оправе, создавая вынуждающую силу, которая раскачивает пластинки. Из-за трения частота вращения гироскопа плавно уменьшается. Если частота вращения гироскопа близка к собственной частоте колебаний какой-либо пластинки, то наблюдается резонанс – незакрепленный конец этой пластинки начинает колебаться с большой амплитудой. При уменьшении частоты вращения гироскопа последовательно наблюдаются резонансы всех пластинок – начиная от самой короткой и заканчивая самой длинной. Если две соседние пластинки имеют близкие собственные частоты колебаний, то удается наблюдать биения – энергия возникших вынужденных колебаний этих пластинок последовательно перераспределяется между ними, что приводит к поочередному возрастанию и уменьшению амплитуд колебаний пластинок.

Из-за небольших размеров гироскопа его рекомендуется демонстрировать в проекции на экран при помощи видеокамеры и проекционного аппарата. Можно также воспользоваться теневой проекцией.



Рис. 6.34. Гироскоп с резонирующими пластинками.

6.3.7. Колебания фундамента двигателя.

На небольшом столике укрепляется двигатель *C* постоянного тока, питаемый через реостат. На вал двигателя несимметрично крепится небольшая пластинка *A*, необходимая для усиления вибраций двигателя (см. рис. 6.35). Перемещая ручку реостата, медленно увеличивают частоту вращения вала двигателя. При совпадении

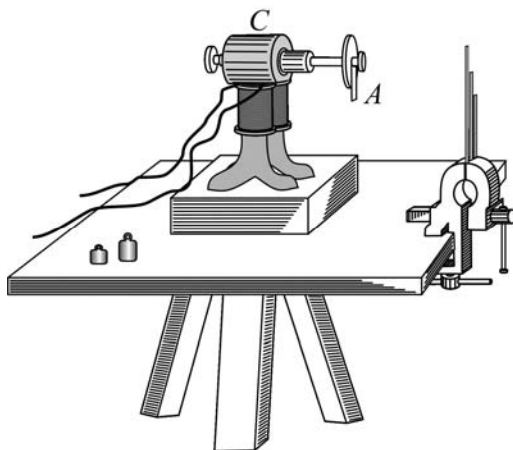


Рис. 6.35. Колебания фундамента двигателя.

указанной частоты с собственной частотой колебаний системы двигатель-стол наступает резонанс, выражающийся в усилении вибрации крышки стола, ее дребезжании и сползании по крышке положенных на нее мелких предметов. При дальнейшем увеличении частоты вращения вала двигателя резонанс исчезает.

Для большей наглядности можно дополнительно укрепить на краю стола тиски и зажать в них «гребенку» из металлических пластинок различной длины (аналогичную той, которая используется при показе демонстрации 6.3.6). При увеличении частоты вращения вала двигателя пластинки последовательно начинают колебаться – начиная с самой длинной и заканчивая самой короткой.

6.3.8. Вынужденные колебания струны с электрокамертоном.

Для показа демонстрации используется струна или упругая бечевка, расположенная горизонтально. Один конец струны прикрепляется к неподвижному штативу, а второй – к специальной металлической насадке, прикрепленной к концу ножки электрокамертона (см. описание демонстрации 6.4.7). При этом струна должна быть слегка натянута, а колебания насадки должны происходить в направлении, перпендикулярном струне. Если включить электрокамертон, возбудив колебания, и начать медленно отодвигать его от штатива, тем самым сильнее натягивая струну, то при совпадении одной из собственных частот колебаний струны с частотой ко-

лебаний камертона струна приходит в интенсивное поперечное колебательное движение. В этом случае возникает резонанс, при котором на длине струны укладывается целое число полувольт (см. рис. 6.36). При дальнейшем увеличении натяжения струны последовательно наблюдаются другие резонансы, а число уместающихся на длине струны полувольт каждый раз уменьшается на одну до тех пор, пока не возбудится основная мода струны, соответствующая установлению на ней половины длины волн.

Опыт можно демонстрировать и в обратном порядке, заранее подобрав начальную силу натяжения струны, при которой резонанс

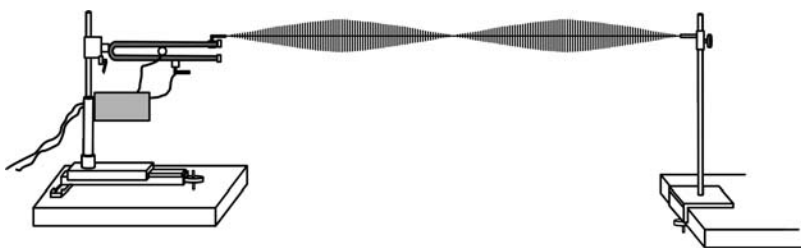


Рис. 6.36. Вынужденные колебания струны с электрокамертоном.

уже невозможен. В этом случае при медленном приближении камертона к штативу (и уменьшении силы натяжения струны) будут последовательно наблюдаться основная мода, а затем – высшие моды колебаний.

Для большего удобства наблюдения колебаний струны ее рекомендуется расположить на фоне черной доски или черной материи, и освещать под малым углом к струне параллельным пучком света от проекционного фонаря. Если вместо струны используется бечевка, ее нужно предварительно натереть мелом.

Демонстрация используется также при показе стоячих волн на струне (см. 10.4.1).

6.3.9. Качающиеся часы.

Небольшие механические часы-будильник, подвешенные так, как показано на рисунке 6.37, представляют собой физический маятник. Если частота колебаний балансира часов близка к собственной частоте колебаний такого физического маятника, то под действием систематических толчков балансира весь корпус часов может начать колебаться.

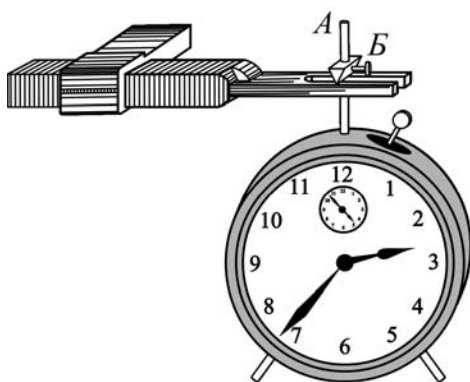


Рис. 6.37. Качающиеся часы.

чтобы ребро призмы опиралось на плоскую горизонтальную стальную пластину, укрепленную в штативе. Если демонстратору удалось подобрать условия, упомянутые выше, то часы раскачаются и будут колебаться относительно опоры как маятник до тех пор, пока не кончится завод пружины будильника (сутки и более). Для удобства демонстрации этого опыта в большой аудитории рекомендуется на стержень *А* насадить длинную тонкую трубочку-стрелку и использовать при показе эксперимента теневую проекцию.

На лекции этот опыт ставится следующим образом: у будильника снимается чашка звонка, а вместо нее к корпусу часов прикрепляется небольшой стержень *А*. На этот стержень насаживается маленькая призма *Б*, закрепляемая на подобранной высоте с помощью бокового винта. Часы с заведенной пружиной располагаются так,

6.4. Автоколебания.

После показа вынужденных колебаний можно переходить к демонстрации автоколебательных систем, в которых подача энергии, необходимой для компенсации потерь, управляется посредством обратной связи самой колебательной системой, что обеспечивает ее незатухающие колебания.

6.4.1. Анкерные часовые механизмы – маятниковый (Гюйгенса) и балансирный.

Типичным и хорошо всем известным примером автоколебательной системы являются механические часы. В коллекции Кабинета физических демонстраций физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова они представлены в виде часовых механизмов с маятником (см. левый рис. 6.38) и с балансиром (см. правый рис. 6.38).

В обоих случаях источником энергии для этих механизмов служит поднятая вверх гиря. В первом механизме подача энергии в систему регулируется качающимся маятником, при каждом колебании которого немного поворачивается шестерня, на ось которой намотана поддерживающая гирию нить. Угол поворота шестерни регулируется соединенным с маятником анкером – качающейся изогнутой конструкцией, зубцы которой периодически зацепляются за зубцы шестерни, позволяя ей поворачиваться лишь на небольшой фиксированный угол. При каждом попадании зубца анкера между зубцами шестерни она останавливается, а анкер (вместе с маятником) получает толчок, что и позволяет поддерживать незатухающие колебания. Во втором механизме частота подачи энергии в автоколебательную систему задается балансиром – крутильным маятником в виде массивного кольца, приводимого в движение спиральной пружиной. При каждом колебании анкер, соединенный с балансиром, дает возможность немного повернуться шестерне, на оси которой намотана поддерживающая гирию нить, в результате чего гиря немного опускается, а балансир получает толчок, компенсирующий потери его энергии на трение.



Рис. 6.38. Часовые механизмы – маятниковый (слева) и балансирный (справа).

6.4.2. Спираль с током на железном сердечнике.

Прибор представляет собой легкую спиральную цилиндрическую пружину, подвешенную вертикально за один из своих концов к штативу. Ко второму концу пружины прикрепляется проводящий шарик с заточенным металлическим стерженьком на конце. Под

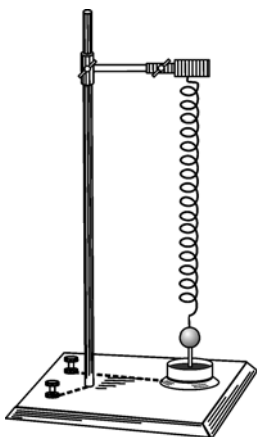


Рис. 6.39. Спираль Роже.

шариком размещается металлическая чашечка с налитой в нее ртутью (см. рис. 6.39). Высоту штатива регулируют так, чтобы шарик был немного погружен в ртуть. Для показа демонстрации необходим источник постоянного тока (лучше всего аккумулятор), одна клемма которого подключается через ключ к верхнему концу спирали, а вторая – к чашечке с ртутью. При протекании электрического тока по виткам спирали между ними возникает магнитное взаимодействие, вследствие чего витки притягиваются друг к другу, спираль сокращается, шарик приподнимается из ртути, и электрический контакт

прерывается. Как только это происходит, ток перестает протекать по спирали, магнитное взаимодействие витков исчезает, спираль под действием веса шарика вновь растягивается, и шарик погружается в ртуть. Далее описанные процессы повторяются, то есть возникают незатухающие автоколебания, которые поддерживаются благодаря наличию источника постоянного напряжения, вызывающего периодическое протекание тока по спирали и компенсирующего затраты на трение. Описанный прибор представляет собой классическое устройство, называемое «спиралью Роже». Его недостатком является необходимость использования ртути, которая в настоящее время запрещена для применения в учебном процессе, так что данный опыт можно показывать только в видеозаписи.

Этот же эксперимент можно поставить и в несколько другом варианте, допускающем применение менее мощного источника тока и не требующем использования ртути. Штатив нужно удлинить, а верхний конец пружины прикрепить к горизонтальному кольцу, которое, в свою очередь, крепится к штативу с помощью стержня с прижимным винтом (см. рис. 6.40). Через это кольцо внутрь спирали пропускается вертикальный железный сердечник с большой

магнитной проницаемостью, также закрепленный на штативе (необходимо следить, чтобы сердечник не касался витков спирали). Благодаря наличию сердечника магнитное взаимодействие между витками спирали значительно возрастает, что позволяет использовать меньшую силу тока. Вместо ртутного контакта используется механический контакт. Он представляет собой упругую медную скобу *A*, о которую ударяется острое стержня, прикрепленного к колеблющемуся на пружине шарик. Для улучшения работы прибора можно и к скобе, и к острию припаять кусочки платины. Если этого не сделать, то места контакта будут довольно быстро обгорать, что потребует их регулярной чистки или замены скобы и стержня с острием.

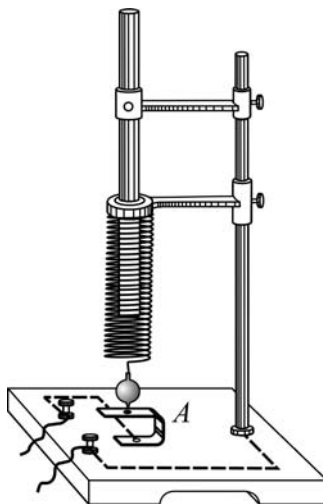


Рис. 6.40. Другой вариант опыта со спиралью Роже.

6.4.3. Биметаллическая пластинка с лампочкой.

Автоколебательный процесс можно продемонстрировать с помощью простой системы, представляющей собой лампу накаливания, подключаемую к сети ~ 220 В через размыкатель (см. рис. 6.41). Размыкатель состоит из упругой вертикальной биметаллической пластинки *A* из инвара и латуни, закрепленной в эбонитовом держателе *B*, и упирающегося в ее плоскую поверхность проводящего регулировочного винта *C*. Нижняя часть пластинки (примерно $2/3$ ее длины) охвачена тонким каркасом из слюды, на который намотана никелиновая проволока. Один конец этой проволоки подключается к лампе, а

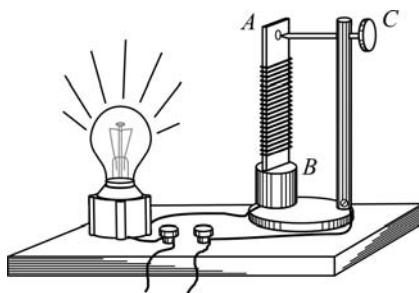


Рис. 6.41. Автоколебательная система с биметаллической пластинкой.

второй – к биметаллической пластинке – так, чтобы лампа, проволока, пластинка и регулировочный винт оказывались соединенными последовательно. При протекании тока через лампу никелиновая проволока нагревается и нагревает биметаллическую пластинку, вследствие чего она изгибается и перестает касаться регулировочного винта. В результате электрическая цепь размыкается, и лампа гаснет, после чего биметаллическая пластинка остывает, разгибается и вновь замыкает цепь. Затем описанные процессы периодически повторяются, и лампа через примерно равные промежутки времени гаснет и снова загорается. Такого рода устройства используются в указателях поворотов и в аварийной сигнализации на автомобилях.

6.4.4. Набор органных труб (см. также демонстрацию 11.1.7).

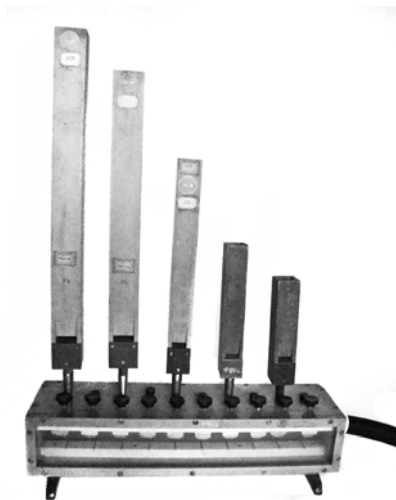


Рис. 6.42. Набор органных труб.

Примером акустической автоколебательной системы является органная труба. Особенно эффектно выглядит набор органных труб разной длины. Эти трубы вставляются в отверстия специального ящика, снабженного клавишами и клапанами, которые дают возможность подавать сжатый воздух в одну или несколько труб сразу (см. рис. 6.42). Источником сжатого воздуха может служить воздуходувка, компрессор либо баллон со сжатым воздухом или другим негорючим газом (азотом или аргоном). Собрав установку, нужно последовательно пода-

вать газ в разные органные трубы в порядке уменьшения их длин, демонстрируя повышение тона издаваемого трубой звука при уменьшении ее длины. Если в запасе имеются подходящие органные трубы, то с их помощью можно сыграть гамму или, при наличии соответствующего навыка, исполнить какую-либо простейшую мелодию.

6.4.5. «Ревун» (сирена Клемана-Дезорма³).

Круглая пластина с отверстием в центре, предназначенным для подвода газа, подвешивается к штативу в горизонтальном положении. Под ней на небольшом расстоянии подвешивается другая (сплошная) пластина. Пластины соединяются друг с другом при помощи штырьков, которые позволяют нижней пластине свободно перемещаться в вертикальном направлении. К отверстию через припаянную к нему трубку подсоединяется шланг для подачи сжатого газа от компрессора или из баллона. Газ растекается между пластинами и выходит наружу. При этом за счет падения давления в потоке нижняя пластина прижимается атмосферным давлением к верхней и перекрывает отверстие. Из-за этого поток газа прекращается, давление между пластинами возрастает, и нижняя пластина возвращается в исходное состояние; далее процесс повторяется. Таким образом, возникают автоколебания нижней пластины, и она, часто ударяясь о верхнюю пластину, издает громкий звук. Для визуализации потока газа можно подавать в установку углекислоту из баллона и использовать подсветку от вольтовой дуги (см. рис. 6.43).

Демонстрация используется также в разделе «Гидро- и аэродинамика» (см. 9.3.2).

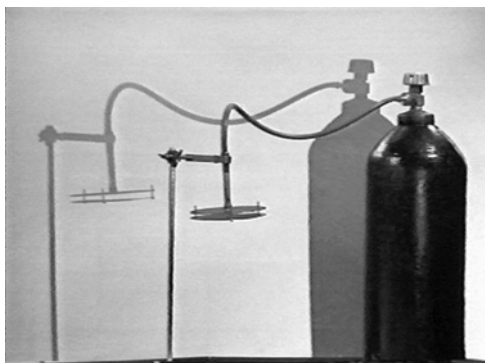


Рис. 6.43. Сирена Клемана-Дезорма.

6.4.6. Маятник Фруда⁴ (на валу).

Маятник представляет собой металлический стержень A , верхний конец которого может крепиться при помощи круговой скобы, стягиваемой болтами, к наружному кольцу B большого шарикоподшипника. Во внутреннее кольцо шарикоподшипника запрессован диск, к центру которого жестко прикреплен вал, приводимый во вращение электромотором M (см. рис. 6.44). Мотор подключается к постоянному напряжению через реостат и вращает вал через редуктор.

³ Н. Клеман (1779 – 1843) – французский физик и химик; Ш. Дезорм (1777 – ?), заводчик из г. Вербери (Франция).

⁴ У. Фруд (1810 – 1879) – английский инженер.

На нижний конец стержня насаживается легкий диск *C*, который прижимается к стержню боковым винтом. Двигая этот диск по стержню, можно изменять частоту собственных колебаний маятника. Для изменения силы трения на вал можно крепить гайкой специальную металлическую демпфирующую шайбу с разрезами, которая прижимается к наружному кольцу подшипника. Крепление шайбы и регулировка степени ее давления на кольцо осуществляется с помощью специальной гайки.

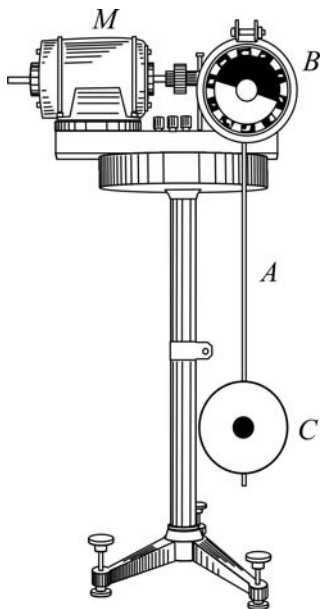


Рис. 6.44. Маятник Фруда.

Данная установка позволяет показать несколько демонстраций по теме «Колебания».

6.4.6.1. Свободные колебания маятника.

Опыты демонстрируются при выключенном двигателе. Сначала демпфирующая шайба снимается, маятник отклоняется на небольшой угол и отпускается. При этом наблюдаются колебания со сравнительно небольшим затуханием. Затем, перемещая по стержню диск и по-разному прижимая к кольцу подшипника демпфирующую шайбу, можно наблюдать свободные колебания при различных соотношениях собственной частоты и коэффициента затухания.

6.4.6.2. Автоколебания маятника.

Для показа этих демонстраций демпфирующая шайба снимается, а диск крепится на стержне в таком положении, чтобы период собственных колебаний маятника был равен примерно 1,5 с. Затем включается электродвигатель и устанавливается частота вращения вала маятника примерно 1 об/с. Если после этого немного отклонить маятник и предоставить его самому себе, то он начнет раскачиваться, и через некоторое время его угловое отклонение достигнет 90° (или даже больше). Такие колебания маятника могут быть стабильными, но может случиться и так, что маятник раскачается так сильно, что начнет вращаться вместе с валом, совершая полные обороты.

Для получения более устойчивого автоколебательного режима нужно в несколько раз увеличить скорость вращения вала. Теперь маятник уже не будет сам раскачиваться из положения равновесия. Но если отклонить маятник на угол около 90° и отпустить, то сначала возникнут быстро затухающие колебания, а затем при некоторой не очень большой амплитуде затухание исчезнет, и маятник будет продолжать колебаться без затухания. Такое поведение маятника объясняется тем, что момент сил трения, действующий на кольцо B , сильно (и нелинейно) зависит от относительной скорости вращения наружного и внутреннего колец подшипника. При малых относительных скоростях момент силы трения раскачивает маятник, при больших – тормозит его колебания, а при некоторой промежуточной относительной скорости вращения маятник может колебаться без затухания (как будто он висит на «идеальном подвесе»). Именно последний вариант и реализуется в данном случае.

6.4.6.3. Релаксационные колебания маятника.

Для показа этой демонстрации на вал маятника надевается демпфирующая шайба, которая довольно сильно прижимается гайкой к внешнему кольцу подшипника для создания значительного трения. Электродвигатель включается так, чтобы вал маятника вращался с частотой примерно 1 об/с. Теперь колебания маятника будут релаксационными. Маятник, увлекаясь большой силой трения, сначала будет двигаться вместе с внешним кольцом подшипника, отклоняясь от положения равновесия на угол 50° - 70° , а затем будет срываться вниз, доходить практически до положения равновесия и снова начинать подниматься вверх. Если уменьшить давление шайбы на кольцо, то можно получить и промежуточные условия возбуждения колебаний, вплоть до возврата к автоколебательному режиму.

6.4.7. Бесконтактный электрокамертон.

Камертоны с электромеханическим возбуждением находят применение в целом ряде демонстраций, однако в стандартной схеме контакты, прерывающие большие токи через обмотку электромагнита, работают ненадежно и часто выходят из строя.

Модернизированная схема (см. рис. 6.45) бесконтактного возбуждения автоколебаний камертона, разработанная в Кабинете физических демонстраций физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова, надежна, не требует настройки перед каждой демонстрацией и обеспечивает стабильную работу прибора [8].

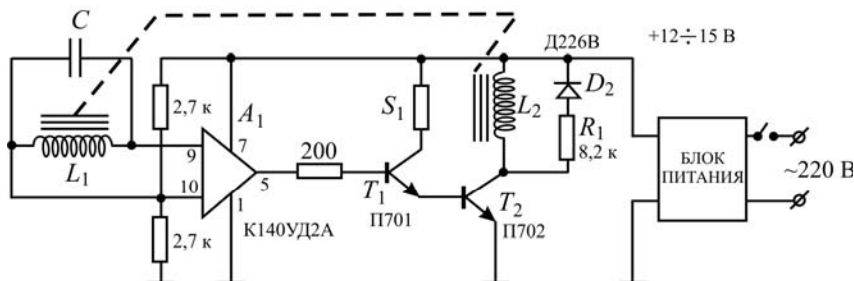


Рис. 6.45. Принципиальная схема управления бесконтактным электрокамертоном.

Камертон раскачивается электромагнитом L_2 при пропускании через него импульсов тока, формируемых схемой управления. Положительная обратная связь осуществляется при помощи катушки L_1 , намотанной на кольцеобразный постоянный магнит с прорезью, в которую наполовину входит нижняя ветвь камертона. Работа схемы происходит следующим образом: при включении питания на выходе микросхемы A_1 , работающей в ключевом режиме, формируется положительное напряжение, которое обеспечивает открытое состояние транзисторов T_1 и T_2 . При этом через электромагнит L_2 течет ток 4-5 А, и ветви камертона притягиваются. В катушке L_1 возникает сигнал, пропорциональный скорости движения ветвей камертона, причем такой полярности, что на выходе A_1 поддерживается положительное напряжение. После максимального сближения ветвей камертона знак сигнала с катушки L_1 изменяется, и на выходе A_1 устанавливается нулевое напряжение. Транзисторы запираются, камертон возвращается к положению равновесия, проходит его, и после наибольшего отклонения ветвей на выходе A_1 вновь появляется положительное напряжение, и процесс повторяется.

Диод D_1 и резистор R_1 служат для ограничения ЭДС самоиндукции, возникающей в L_2 при запираии T_2 , что может привести к выходу из строя микросхемы A_1 . Емкость C препятствует возникновению высокочастотной генерации. Катушка L_1 содержит 5000 витков провода диаметром 0,1 мм, катушка L_2 – 250 витков провода диаметром 0,8 мм, намотанного на сердечник с диаметром 12 мм из мягкого железа. Транзистор T_2 установлен на радиаторе площадью ~ 200 см². Амплитуду колебаний можно изменять регулировкой напряжения питания, а частоту в некоторых пределах – при помощи перегрузок, навешиваемых на ветви камертона. Схема возбуждения и блок питания закрыты кожухами и помещены на штативе

камертона. Блок питания включается в сеть (~ 220 В), а штатив заземляется при помощи отдельного провода.

В Кабинете физических демонстраций физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова имеется несколько электрокамертонов такого типа, с разными частотами колебаний. Они используются при демонстрации различных лекционных экспериментов в разделах «Колебания», «Волны» и «Акустика» (см. демонстрации 6.3.8, 6.7.3, 10.4.1, 11.1.3).

6.4.8. Стол Н. Е. Жуковского (доска на роликах).

Демонстрируется возникновение автоколебаний под действием сил трения. Прибор представляет собой два параллельных ролика A_1 и A_2 , вращающиеся в противоположных направлениях (как показано на рисунке 6.46) при помощи двигателя, соединенного с редуктором. Сверху на ролики кладется доска B с грузом, снабжен-

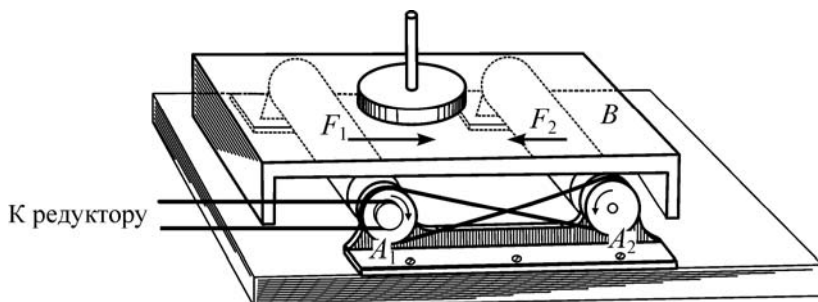


Рис. 6.46. Стол Н. Е. Жуковского.

ная небольшими бортиками, которые препятствуют ее соскальзыванию с роликов. Если доска расположена немного несимметрично относительно осей роликов (например, смещена в сторону левого ролика), то сумма сил трения F_1 и F_2 , действующих на доску со стороны роликов, направлена вправо, и доска под ее действием будет смещаться вправо, к положению равновесия. Пройдя по инерции положение равновесия, доска окажется смещенной в сторону правого ролика, и сумма сил трения F_1 и F_2 , действующих на доску со стороны роликов, теперь будет направлена влево. Под действием этих сил доска остановится, а затем начнет двигаться влево. Далее эти процессы будут повторяться, то есть возникнут автоколебания, период которых зависит от коэффициента трения между доской и роликами и от массы доски.

6.4.9. Скрипичная струна и смычок.

Возникновение автоколебаний струны демонстрируется следующим образом. Скрипичная струна натягивается на специальном деревянном ящике – «сонометре» (см. рис. 6.47), позволяющем определять высоту тона звука. Смычок из конского волоса натирается канифолью для увеличения коэффициента трения. Если провести смычком по струне, то в ней возбуждятся стоячие волны, и она зазвучит. Высота основного тона звучания струны будет определяться силой ее натяжения. Струну можно заставить звучать по-другому, не меняя ее натяжения. Для этого нужно подставить под струну призматическую подпорку («кобылку»), в месте нахождения которой будет локализован узел стоячей волны. Благодаря этому можно заставить звучать струну на одном из обертонов.

Демонстрация используется также в разделе «Волны» (см. 10.4.8).



Рис. 6.47. Струна на сонометре и смычок.

6.4.10. Колебания пластинки под струей воды (опыт А. Б. Млодзеевского).

Демонстрируется возникновение автоколебаний под действием равномерного потока воды. Тонкая упругая стальная пластинка с лопаткой на конце укрепляется в штативе над раковиной или над корытом для сбора воды. На лопатку из трубки с сужением на конце направляется струя воды. Под действием струи пластинка начинает колебаться со своей собственной частотой. Опыт хорошо получается, если эта частота близка к 1 Гц. В большой аудитории демонстрацию нужно показывать в проекции на экран.

6.4.11. Возбуждение натянутой резиновой трубки потоком воздуха.

Тонкая резиновая трубка длиной около 3 м горизонтально натягивается между двумя хорошо закрепленными штативами (см. рис. 6.48). Если на эту трубку вблизи одного из ее концов на-

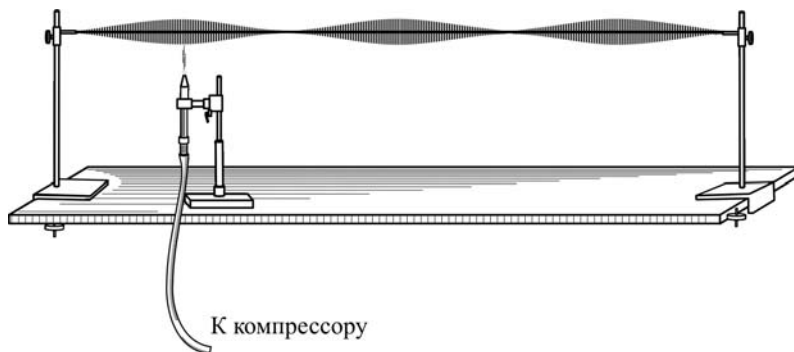


Рис. 6.48. Автоколебания резиновой трубки в потоке воздуха.

править снизу сильный поток воздуха, подаваемый от компрессора через шланг с узким соплом на конце, то при определенном натяжении трубки она придет в колебательное движение. На трубке установится стоячая волна, причем между точками крепления трубки к штативам будет укладываться целое число полувольт.

Для того чтобы получить на трубке определенное число полувольт, нужно продувать струю воздуха в месте, в котором должна находиться одна из предполагаемых пучностей стоячей волны, и коснуться трубки пальцем в месте, где должен находиться один из предполагаемых узлов. Например, если продувать воздух на расстоянии одной четверти длины трубки от ее конца и коснуться трубки пальцем посередине, то возникнут колебания, соответствующие первому обертому системы (на трубке будут уместиться две половины длины волны).

Для того чтобы колебания трубки были лучше видны, трубку нужно осветить вдоль ее длины параллельным пучком света от проекционного фонаря. Опыт также можно показывать в теневой проекции на экран.

Демонстрация используется также в разделе «Волны» (см. 10.4.2).

6.4.12. Прибор Рухардта⁵ с компьютерной моделью автоколебательной системы.



Рис. 6.49. Прибор Рухардта.

Прибор Рухардта, предназначенный для наблюдения автоколебаний и измерения показателя адиабаты у газов, устроен следующим образом [18] (см. рис. 6.49). Стекло́нная бутылка объемом ~ 5 -10 литров установлена на подставке. В ее нижней части имеется патрубков с небольшим отверстием для подвода газа. Газ в бутылку подается по шлангу от воздуходувки, либо от баллона со сжатым газом через редуктор. На шланге установлен регулировочный зажим, а также противопылевой фильтр. В горловину бутылки через резиновую пробку вставлена вертикальная стеклянная трубка длиной ~ 35 см. Внутри нее находится цилиндр из дюралюминия диаметром ~ 10 мм и массой ~ 5 г с проточками на боковой поверхности. В средней части трубки имеется узкий пропи́л размерами $0,5 \times 1,5$ мм. На трубку

вблизи пропи́ла надевается пластмассовое колечко, передвижением которого регулируется отток газа из бутылки. Сверху трубка прикреплена к вертикальной стойке при помощи специального наконечника с отверстиями. Этот наконечник предотвращает выброс цилиндра из трубки в случае резкого повышения давления в бутылке, и при смещении вниз может закрывать трубку. К стойке также крепится подключаемый к компьютеру фотодатчик, служащий для точного определения периода колебаний цилиндра при измерении показателя адиабаты у разных газов. Прибор комплектуется барометром.

При подаче в бутылку газа через патрубок давление в ней возрастает, и цилиндр начинает двигаться по трубке вверх. После того, как цилиндр проходит мимо пропи́ла в трубке, излишки газа выходят из бутылки. При дальнейшем движении цилиндра вверх (по инерции) давление в бутылке падает, и цилиндр опускается вниз, перекрывая пропи́л, после чего давление в бутылке вновь начинает

⁵ Е. Рухардт – немецкий физик; метод измерения γ предложен в 1929 г.

расти, и далее весь процесс повторяется. Подбирая напор подаваемого в бутылку газа и манипулируя зажимом на шланге и колечком на трубке, можно добиться установления симметричных автоколебаний цилиндра в трубке вблизи места пропила. Можно показать, что эти автоколебания близки к гармоническим колебаниям.

Для изучения автоколебаний, происходящих в приборе Рухардта, в Кабинете физических демонстраций физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова была создана компьютерная программа, позволяющая моделировать автоколебания при различных условиях, а также в автоматическом режиме измерять период автоколебаний и показатель адиабаты у различных газов. Программа позволяет задавать значения массы цилиндра m , объема бутылки V , диаметра цилиндра d , длины трубки l , атмосферного давления p_0 и абсолютных погрешностей всех этих величин при измерениях показателя адиабаты γ у разных газов.

При моделировании автоколебаний, возникающих в приборе Рухардта, можно выбирать показатель адиабаты, а также вид силы трения, действующей на цилиндр при его движении в трубке. Выбор возможен из следующего набора сил трения: вязкое, пропорциональное скорости; вязкое, пропорциональное квадрату скорости; «сухое»; линейная комбинация «сухого» трения и вязкого, пропорционального скорости.

При работе программы на мониторе компьютера отображаются графики трех различных зависимостей, получающихся при моделировании автоколебаний: график зависимости скорости v колеблющегося в трубке цилиндра от его координаты x (фазовый портрет колебаний), график зависимости координаты цилиндра x от времени t , график зависимости действующей на цилиндр силы F от его координаты x . В случае последнего графика можно выбирать, какая из зависимостей действующей на цилиндр силы от его координаты будет при моделировании выводиться на монитор. Выбор возможен между зависимостями возвращающей силы от координаты и суммарной силы от координаты. Типичный результат работы моделирующей программы представлен на рисунке 6.50, из которого следует, что после начала колебательного процесса график зависимости скорости цилиндра от его координаты стремится к эллиптическому предельному циклу, что свидетельствует о гармоничности установившихся автоколебаний. При этом период T смоделированных автоколебаний цилиндра приближается к периоду T_0 установившихся гармонических колебаний, который может быть рассчитан при помощи простой формулы, полученной Рухардтом:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m(V + Sl)}{\gamma p S^2}} \quad \text{где } p = p_0 + mg/S, \quad S = \pi d^2/4.$$

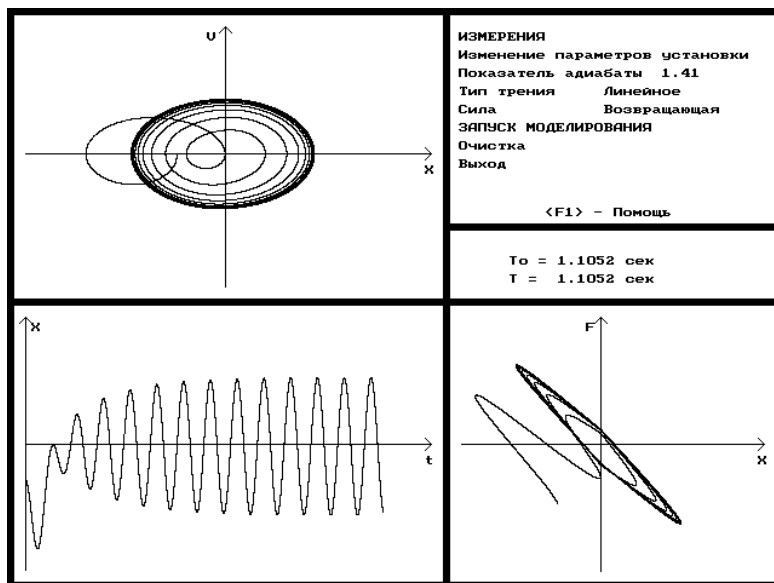


Рис. 6.50. Вид экрана монитора компьютера при моделировании автоколебаний в приборе Рухардта.

Процесс моделирования можно в любой момент прервать. Если этого не сделано, то отображение результатов моделирования продолжается до тех пор, пока график зависимости координаты от времени не достигнет предельного значения по оси абсцисс. Изменяя какие-либо параметры системы, процесс моделирования можно многократно повторять. При этом вновь получаемые графики отображаются другими цветами, что позволяет визуально сравнивать результаты моделирования при различных параметрах установки.

Реальные измерения при помощи прибора Рухардта в Кабинете физических демонстраций физического факультета МГУ проводятся для следующих газов и дают для них значения γ с точностью $\sim 0,5\%$: воздух ($\gamma \approx 1,407$); аргон ($\gamma \approx 1,636$); углекислота ($\gamma \approx 1,303$).

Прибор используется также при чтении раздела «Молекулярная физика» курса общей физики.

6.4.13. Китайский «гусь» («пьющая утка»).

Демонстрационный прибор, выполненный в виде птицы, состоит из стеклянной колбочки (туловище «гуся»), в которую налит подкрашенный эфир, и впаянной в нее трубочки-шеи, которая соединяет туловище «гуся» с его стеклянной головой. Нижний конец трубочки немного не достает до дна колбочки. Вся эта система герметична, воздух изнутри «гуся» откачан, а над поверхностью жидкого эфира находится его насыщенный пар. К шее «гуся» прикреплена ось, опирающаяся на сделанные из пластмассы «ноги», так что центр тяжести системы находится чуть ниже точки опоры (см. рис. 6.51). Благодаря этому «гусь» может совершать колебания вокруг оси. На голову и клюв «гуся» наклеен слой ткани. Вся система установлена на пластмассовой подставке. Перед «гусем» закреплена съемная чашечка, в которую может наливаться вода.

При показе демонстрации нужно наклонить голову «гуся» к чашечке и аккуратно смочить ткань, которой обклеены голова и клюв, водой из стакан. При этом вода должна пропитать всю ткань, а чашечка наполниться почти до краев. Затем нужно вернуть «гуся» в исходное положение и слегка подогреть нижнюю часть колбочки с эфиром, взявшись за нее пальцами. Во время нагревания столбик эфира в трубочке будет подниматься. Нагрев нужно прекратить, когда столбик эфира поднимется до головы «гуся». Примерно через 10-15 секунд после этого модель начнет работать – «гусь» сам наклонится к чашечке, «попьет воды», после чего начнутся его колебания вокруг положения равновесия, в ходе которых «гусь» будет все больше и больше наклоняться к чашечке до тех пор, пока его клюв вновь не погрузится в воду. Далее этот процесс будет повторяться, то есть возникнут автоколебания. Дождавшись, пока колебания «гуся» установятся, нужно вылить воду из чашечки и вернуть ее на прежнее место. Колебания будут продолжаться с прежней частотой, и



Рис. 6.51. «Пьющая утка».

«гусь» будет «пить» из уже пустой чашки. Если, придерживая «гуся» рукой, налить на ткань из пипетки эфир или спирт, набранный из пузырька, то после этого «гусь» начнет колебаться значительно быстрее и будет чаще «пить» из по-прежнему пустой чашки.

Описанные явления объясняются тем, что при колебаниях «гуся» его голова охлаждается за счет испарения воды, которой пропитана влажная ткань. Вследствие этого пары эфира в голове конденсируются, давление внутри нее падает, и жидкий эфир через трубочку засасывается из туловища в голову. Когда эфир поднимается по трубочке достаточно высоко, центр масс «гуся» смещается вверх, и он наклоняется к чашечке, чтобы «попить». При этом клюв «гуся» окунается в воду, в результате чего ткань на голове «гуся» все время поддерживается влажной. Но, когда «гусь» принимает горизонтальное положение, происходит пробулькивание паров эфира из туловища в голову. При этом эфир перетекает из головы обратно в туловище, центр масс вновь опускается, и «гусь» снова начинает колебаться. Модель работает до тех пор, пока голова «гуся» остается мокрой. Колебания прекратятся только тогда, когда «гусь» «выпьет» из чашки всю воду и ткань на его голове высохнет. Поэтому «гусь» в течение некоторого времени может «пить» воду и из пустой чашечки. Наливание на ткань эфира или спирта делает процесс испарения более интенсивным и ускоряет охлаждение головы «гуся», вследствие чего эфир засасывается из туловища в голову быстрее, что и приводит к увеличению частоты колебаний.

Определяющую роль в работе данного устройства играет испарение жидкости с ткани, которой оклеены голова и клюв «гуся». Если испарение отсутствует, что может наблюдаться при стопроцентной влажности окружающего воздуха, то модель работать не будет. Это можно продемонстрировать, накрыв пьющего «гуся» герметичным стеклянным колпаком. Через некоторое время после этого водяной пар под колпаком станет насыщенным, и колебания «гуся» прекратятся.

Модель вследствие малости ее размеров рекомендуется показывать в видеопроекции. Данный эксперимент также можно демонстрировать в качестве модели теплового двигателя при чтении раздела «Молекулярная физика» курса общей физики.

6.4.14. Опыт Дарлингга⁶.

В высокий стеклянный стакан наливается вода, в которую затем добавляется анилин так, чтобы на дне стакана образовался анилиновый слой толщиной 1-2 см (см. рис. 6.52). Стакан нагревается на мощной электрической плитке или на газовой горелке, снабженной рассекателем пламени (его можно заменить огнеупорной прокладкой). Анилин не смешивается с водой и имеет



Рис. 6.52. Опыт Дарлингга.

плотность немного большую, чем вода, поэтому изначально он находится внизу. При нагревании плотность анилина уменьшается, и его крупные капли всплывают на поверхность воды. Через некоторое время они охлаждаются за счет теплообмена с верхними непрогретыми слоями воды и опускаются вниз, после чего через некоторое время процесс повторяется. Всплывание и опускание анилина будет происходить до тех пор, пока вода в стакане не прогреется вдоль всей его высоты до достаточно высокой температуры.

Эту демонстрацию также можно показывать в качестве примера, иллюстрирующего работу теплового двигателя при чтении раздела «Молекулярная физика» курса общей физики.

6.5. Релаксационные колебания.

Одним из видов автоколебаний при наличии больших потерь энергии за период колебаний являются релаксационные колебания. Их можно продемонстрировать после показа автоколебаний при помощи следующих несложных приборов.

6.5.1. «Корыто».

Из оцинкованной жести делается корыто A в виде несимметричной призмы. С помощью тонких упругих металлических полос, сделанных из бронзы или из латуни, оно крепится к двум вертикальным стойкам B_1 и B_2 . Они, в свою очередь, крепятся к массивной подставке C , которая дает возможность ставить прибор на края

⁶ См., напр., книгу: Ч. Р. Дарлинг. Капли, их образование и движение. Три популярные лекции. – Изд-во Академии наук СССР, М.–Л., 1937.

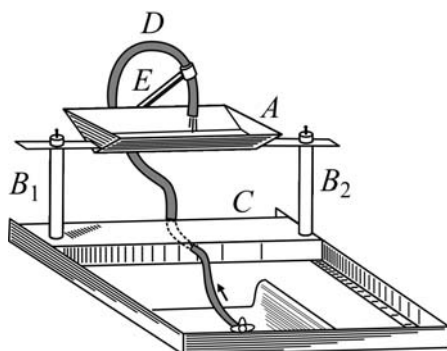


Рис. 6.53. Релаксационные колебания «корыта».

водопроводной раковины (см. рис. 6.53). Полосы прикрепляются к корыту примерно на расстоянии $1/4$ его высоты. С помощью изогнутой металлической трубки D , подсоединенной через шланг к крану водопровода, в корыто равномерно наливается вода. По мере наполнения корыта его центр масс поднимается и смещается в сторону более широкой грани

призмы. В некоторый момент корыто теряет равновесие и переворачивается; при этом из него выливается вода. Затем под действием упругих закрученных полос корыто возвращается в исходное состояние. Возникающие при этом собственные колебания пустого корыта гасятся резиновой полоской-демпфером E , натянутой у края корыта в положении его равновесия. Далее описанный колебательный процесс повторяется. Период релаксационных колебаний можно изменять, регулируя поступление воды в корыто.

6.5.2. Сифон.

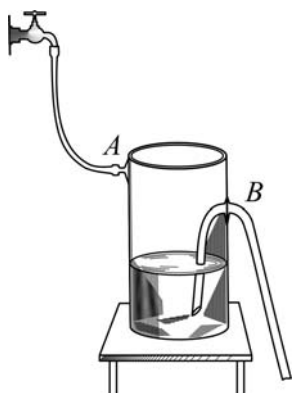


Рис. 6.54. Релаксационные колебания воды в сифоне.

В боковые стенки стеклянного сосуда впаиваются две стеклянные трубки. Первая трубка A – короткая и прямая – впаивается в верхнюю часть стенки сосуда, имеет небольшое сечение и служит для подачи в него воды. Вторая трубка B существенно большего сечения изгибается под большим углом и впаивается местом изгиба в среднюю часть стенки сосуда так, чтобы получился сифон (см. рис. 6.54). Внутренний конец этой трубки, находящийся немного выше дна сосуда, должен быть предварительно срезан под острым углом. Изготовленный таким образом сосуд закрепляется

возле водопроводной раковины. Через первую трубку в сосуд с посто-

янной скоростью подается вода из водопровода. При наполнении сосуда уровень воды доходит до места крепления второй трубки, после чего начинает работать сифон. Поскольку сечение второй трубки значительно превышает сечение первой трубки, вода быстро выливается из сосуда в раковину. Когда уровень воды опускается до наклонного среза на конце второй трубки, в нее попадает воздух, столб воды во второй трубке разрывается, сифон перестает действовать, и сосуд вновь начинает наполняться. Период возникающих в этой системе релаксационных колебаний уровня воды можно регулировать, изменяя напор поступающей в сосуд воды, либо меняя объем сосуда путем погружения в него какого-либо предмета.

6.5.3. Грузик с ниткой на валу.

Электродвигатель постоянного тока *A* вращает через редуктор *B* шкив *C*, расположенный в вертикальной плоскости. На шкив надевается веревочная петля, к которой прикреплен небольшой тяжелый груз (см. рис. 6.55). Из-за трения между шкивом и петлей груз сначала поднимается вверх. Затем созданный поднятым грузом момент силы превышает момент сил трения, петля начинает проскальзывать по шкиву, и груз срывается вниз, двигая петлю в направлении, противоположном направлению вращения шкива. Далее эти процессы повторяются, в результате чего наблюдаются релаксационные колебания груза, состоящие из медленного подъема груза на некоторую высоту и его последующего быстрого возвращения в исходное положение. Колебания груза в этой системе несколько несимметричны – положение равновесия смещено относительно вертикали, проходящей через ось шкива, в направлении его вращения. В этом легко убедиться, изменив направление вращения шкива – в результате положение равновесия груза сместится в другую сторону.

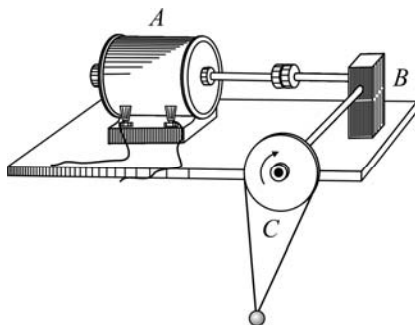


Рис. 6.55. Релаксационные колебания грузика с ниткой на валу.

6.6. Связанные колебания.

После показа релаксационных колебаний можно перейти к опытам, демонстрирующим связанные колебания в системах с несколькими степенями свободы и иллюстрирующим понятие мод, или нормальных колебаний связанных систем.

6.6.1. Связанные маятники, нормальные колебания.

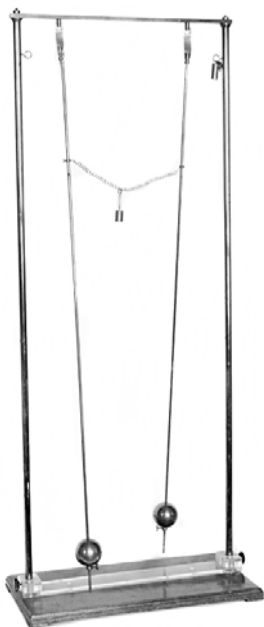


Рис. 6.56. Связанные маятники.

На прочной раме (см. рис. 6.56) подвешиваются два маятника, представляющих собой длинные (~1 м) тонкие легкие металлические стержни, на нижних концах которых закреплены тяжелые металлические шары (диаметром ~5 см). Шары крепятся к стержням при помощи боковых винтов, благодаря чему их можно перемещать вдоль стержней. Верхние концы стержней прикрепляются к раме посредством тонких упругих металлических пластинок, изгибание которых обеспечивает колебания маятников только в плоскости, перпендикулярной раме. Маятники соединяются между собой нитью (или пружинкой), которая оттягивается вниз небольшим грузиком – это обеспечивает упругую связь между маятниками. Для безопасности при переноске установки нижние концы стержней фиксируются в отверстиях на специальной планке, которая может перемещаться

вдоль вертикальных стоек рамы. При помощи этой установки можно продемонстрировать несколько опытов.

Сначала шары укрепляют на одинаковом расстоянии от точек подвеса стержней, обеспечивая равенство собственных частот колебаний маятников. Затем приводят в колебательное движение один из маятников. Через небольшое время постепенно начинает раскачиваться второй маятник. По мере роста амплитуды его колебаний амплитуда колебаний первого маятника уменьшается и, в конце концов, первый маятник останавливается, а второй маятник при этом колеблется с максимальной амплитудой. Далее амплитуда колебаний первого маятника вновь начинает возрастать, а амплитуда колебаний второго

маятника – уменьшаться, и это происходит до тех пор, пока система не вернется в исходное состояние, в котором первый маятник раскачивается с максимальной амплитудой, а второй маятник покоится. После этого описанные процессы повторяются. Амплитуда колебаний маятников в данном опыте изменяется точно так же, как при биениях, наблюдаемых при сложении двух колебаний с близкими частотами.

Затем можно продемонстрировать парциальные колебания системы связанных маятников. Для этого первый маятник приводят в колебательное движение, удерживая при этом рукой второй маятник. Затем аналогично наблюдают колебания второго маятника при удерживаемом в покое первом маятнике. В случае, если шары прикреплены к стержням на одинаковых высотах, парциальные частоты колебаний каждого из связанных маятников одинаковы.

При специальном выборе начальных условий можно заставить систему связанных маятников колебаться гармонически (такие колебания называются нормальными колебаниями, или «модами» колебаний). В данном случае нормальные колебания можно наблюдать при отклонении обоих маятников на одинаковый угол в одну сторону (первое нормальное колебание) и при отклонении обоих маятников на одинаковый угол в противоположные стороны (второе нормальное колебание). Частота первого нормального колебания меньше, чем второго.

Описанные эксперименты можно демонстрировать, изменяя разные параметры системы. Передвигая шары по стержням, можно менять парциальные частоты. Изменяя массу грузика, оттягивающего нить, либо передвигая по стержням муфты, к которым крепятся концы нити, можно менять силу связи между частями колебательной системы.

Эти же эксперименты можно продемонстрировать и при помощи другой, более простой, установки (см. рис. 6.57). Она представляет собой раму, к которой на одинаковых нитях подвешены два маленьких свинцовых шарика, соединенные мягкой горизонтальной пружиной. На этой установке, помимо описанных выше опытов, во время которых колебания маятников происходят перпендикулярно плоскости рамы, можно показать еще и коле-

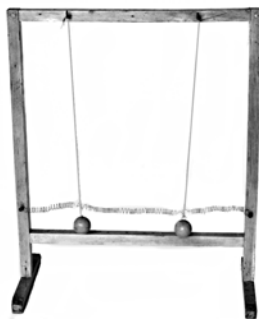


Рис. 6.57. Колебания связанной системы с четырьмя степенями свободы.

бания шаров в плоскости рамы, то есть можно наблюдать связанные колебания в системе с двумя степенями свободы у каждого маятника.

6.6.2. «Двойной» маятник.

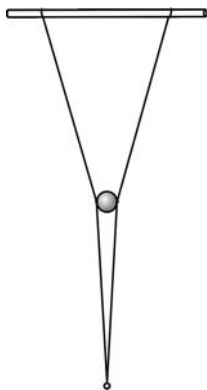


Рис. 6.58. «Двойной» маятник.

На двух прочных одинаковых нитях, образующих бифилярный подвес, подвешивается тяжелый (свинцовый или стальной) шар диаметром 5-6 см. Места крепления нитей к шару должны находиться на двух его диаметрально противоположных точках. К большому шару на двух таких же нитях аналогичным образом подвешивается маленький тяжелый шарик (диаметром около 1 см) так, чтобы оба бифилярных подвеса находились в одной вертикальной плоскости (см. рис. 6.58). Если отклонить большой шар на малый угол и отпустить, то колебания верхнего шара вскоре передадутся нижнему более легкому шару, и в результате

последний начнет интенсивно раскачиваться (амплитуда его колебаний может достигать 60° - 70°). При этом амплитуда колебаний нижнего шарика будет изменяться в широких пределах, а верхний шар будет колебаться с практически неизменной амплитудой. Такое поведение системы связано с тем, что массы шаров сильно различаются, и поэтому переход энергии от большого шара к малому шару практически не сказывается на колебаниях большого шара.

6.6.3. Маятник Уилберфорса⁷ (переход продольных колебаний в крутильные и обратно).

На длинной «мягкой» спиральной пружине подвешивается специальным образом изготовленный груз (см. рис. 6.59). Груз представляет собой удлиненный металлический цилиндр, на боковой стороне которого в двух взаимно перпендикулярных радиальных направлениях укреплены четыре стержня с резьбой. На эту резьбу накручиваются массивные шайбы, которые позволяют регулировать момент инерции цилиндра при его крутильных колебаниях. Крепление верхнего конца пружины к штативу и нижнего конца пружины к основанию цилиндра должно обеспечивать соосность

⁷ Л. Р. Уилберфорс (1861 – 1944) – британский физик; маятник предложен им в 1896 году.

всей системы. При показе демонстрации нужно оттянуть груз вниз и отпустить его, после чего начинаются продольные колебания пружины и груза (вверх и вниз). При этом витки пружины закручиваются и раскручиваются, благодаря чему груз начинает совершать помимо продольных еще и крутильные колебания. Амплитуда крутильных колебаний будет все больше возрастать, а амплитуда продольных колебаний – все больше уменьшаться. При правильно подобранном соотношении параметров системы продольные колебания в некоторый момент вообще исчезают, и груз совершает лишь крутильные колебания, амплитуда которых максимальна. Груз в этот момент находится около положения равновесия системы, то есть на уровне своего начального положения – точки O на рисунке. Далее амплитуда крутильных колебаний начинает уменьшаться, а продольных – увеличиваться. В итоге крутильные колебания совсем прекращаются, и система вновь совершает лишь продольные колебания, после чего описанные выше процессы повторяются.

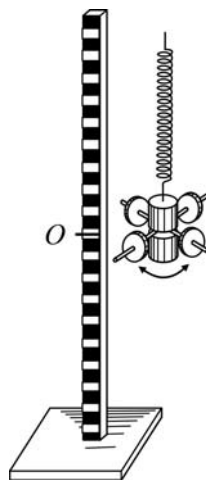


Рис. 6.59.
Маятник
Уилберфорса.

6.6.4. Динамический демпфер С. Э. Хайкина.

Опыт иллюстрирует вынужденные колебания связанной системы в случае, когда частота вынуждающей силы совпадает с одной из парциальных частот системы.

На деревянной подставке (см. рис. 6.60) крепится электромагнит, конец сердечника которого выступает наружу. Вблизи этого конца сердечника находится стальная пластинка, закрепленная снизу и нагруженная сверху небольшим специально подобранным грузом. Собственная частота колебаний этой пластинки с грузом должна быть чуть больше 100 Гц. Если питать обмотку

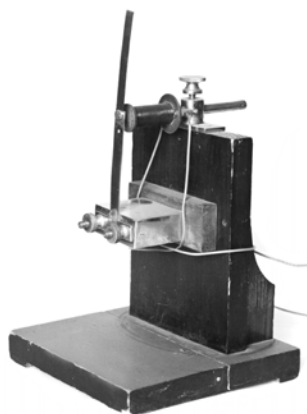


Рис. 6.60. Динамический демпфер С. Э. Хайкина.

электромагнита переменным током частотой 50 Гц, то пластинка приходит в вынужденные колебания, происходящие на частоте вынуждающей силы (она в данном случае равна 100 Гц, так как перемагничивание сердечника происходит дважды за период изменения силы тока в обмотке). Эти колебания происходят с достаточно большой амплитудой, поскольку частота вынуждающей силы близка к собственной частоте колебаний пластинки. Если теперь прикрепить к верхнему концу пластинки другую пластинку, собственная частота колебаний которой точно равна 100 Гц, и вновь возбудить колебания системы, подав питание на обмотку электромагнита, то первая пластинка будет покоиться, а вторая, наоборот, начнет сильно вибрировать. Опыт выглядит очень неожиданно и поучительно – на совершенно покоящейся нижней пластинке сильно колеблется вторая пластинка, называемая *динамическим демпфером*. Успокоение нижней пластинки объясняется тем, что верхняя пластинка колеблется в противофазе с нижней пластинкой и поэтому гасит ее колебания. Справедливость этого утверждения легко продемонстрировать, задержав верхнюю пластинку (например, коснувшись ее конца пальцем). В этом случае обе пластинки придут в колебательное движение с частотой вынуждающей силы.

6.6.5. Уменьшение качки корабля.

Качку корабля, возникающую при волнении на море, можно уменьшить при помощи специальных сообщающихся между собой резервуаров с водой, находящихся в трюме. Качающийся на волнах корабль и переливающаяся между резервуарами вода образуют связанную колебательную систему. При этом перетекающая из одного резервуара в другой вода играет для корабля роль динамического демпфера.

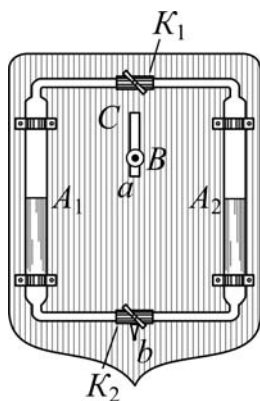


Рис. 6.61. Уменьшение качки корабля.

Проиллюстрировать это явление можно с помощью следующей установки (см. рис. 6.61). Два длинных цилиндрических стеклянных сосуда A_1 и A_2 емкостью около 0,5 л каждый крепятся скобами на прямоугольном деревянном щите C вдоль его противоположных сторон. Сосуды соединяются друг с другом изо-

гнутыми трубками, идущими по щиту вдоль его периметра. Трубки должны быть снабжены кранами (K_1 и K_2) и перекрываемым отводом b , служащим для наполнения сосудов и слива из них воды. Через узкую щель a , симметрично прорезанную в щите параллельно сосудам, проходит закрепленная в штативе горизонтальная ось V , на которую щит вешается так, чтобы сосуды занимали вертикальное положение. Подвешивание щита на оси осуществляется с помощью специальной втулки с гайкой, благодаря чему можно быстро двигать щит относительно оси в некоторых пределах, изменяя тем самым положение центра масс системы относительно оси. Трение во втулке должно быть мало, чтобы щит с сосудами мог совершать свободные колебания относительно оси.

Перед показом опыта нужно залить в сосуды воду примерно до половины и перекрыть оба крана на трубках. Затем щит отклоняется от положения равновесия на небольшой угол и отпускается, после чего вся система (состоящая из щита и сосудов с водой) начинает колебаться в вертикальной плоскости. Так как закрытые краны не позволяют воде перетекать из сосуда в сосуд, то система колеблется как единое целое, и ее колебания затухают из-за трения по прошествии примерно 10-15 периодов. Если открыть краны и вновь отклонить щит на тот же угол, то система ведет себя по-другому. Из-за того, что вода при открытых кранах может перетекать из одного сосуда в другой, и колебания воды происходят в противофазе с колебаниями щита, весь прибор быстро останавливается, совершив лишь 1-2 полных колебания. Если же, регулируя положение центра масс прибора, подобрать частоту свободных колебаний всего прибора в точности равной собственной частоте колебаний столба воды в сосудах, то колебания системы будут затухать еще быстрее. При таких условиях щит будет останавливаться, возвратившись в положение равновесия, к концу первого полупериода колебаний.

6.6.6. Изучение связанных колебаний и спектральный анализ колебательных процессов с использованием датчика углового перемещения.

С помощью автоматизированной установки, используемой для показа демонстраций, описанных в пункте 6.2.5, можно также проводить спектральный анализ различных типов колебательных зависимостей, полученных в эксперименте [22, 27]. При этом на мониторе отображаются изучаемая зависимость $\varphi(t)$ и два спектра, получаемые с использованием современного авторегрессионного метода и Фурье-

метода (для сравнения). Программа позволяет: задавать ширину частотного интервала, в пределах которого будет вестись спектральный анализ; выбирать, какие спектры будут отображаться (какой-либо один или оба одновременно); задавать масштаб для отображения спектра (линейный или логарифмический); указывать, какая часть спектра будет выводиться на экран (весь спектр целиком в заданном частотном интервале или только небольшой участок вблизи главного максимума).

Все демонстрации этого типа показываются в следующей последовательности. Сначала записывается изучаемая зависимость $\varphi(t)$, затем происходит вычисление выбранных спектров и их отображение в заданном виде. Одновременно со спектрами автоматически выводятся значения частот, соответствующих главным максимумам спектров. Проведение спектрального анализа колебаний также позволяет продемонстрировать ряд закономерностей нелинейных колебательных процессов, таких как возникновение высших гармоник и комбинационных частот, а также неизохронность колебаний (см. пункт 6.10).

6.6.6.1. Спектр цуга («куска» синусоиды).

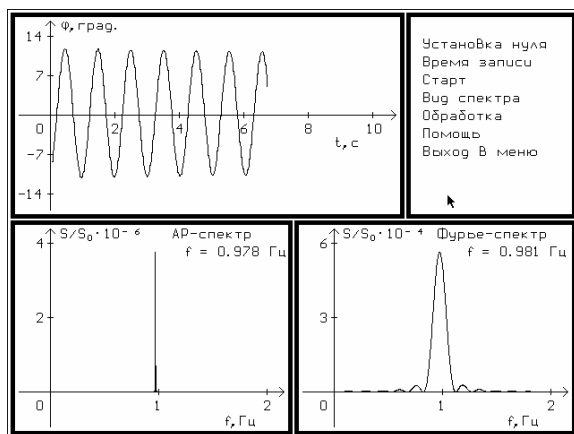


Рис. 6.62. Спектр «цуга» гармонических колебаний.

«Цугом» называется отрезок синусоиды. Он получается в результате записи гармонических колебаний маятника в течение 6–8 секунд. При обработке «цуга» с помощью преобразования Фурье получается зависимость спектральной плотности энергии колебаний от частоты, описываемая функцией «sinc в квадрате» (рис. 6.62).

Эта зависимость имеет главный максимум при значении частоты, соответствующей частоте синусоиды, от которой взят отрезок, и множество побочных максимумов и минимумов. Программа обработки позволяет продемонстрировать эквидистантность минимумов полученной зависимости. Для этого значения частот, соответствующих выбранным с помощью манипулятора «мышь» минимумам, выводятся на экран. Слева для сравнения может выводиться спектр того же отрезка синусоиды, вычисленный при помощи авторегрессионного метода.

6.6.6.2. Связанные колебания, биения, моды.

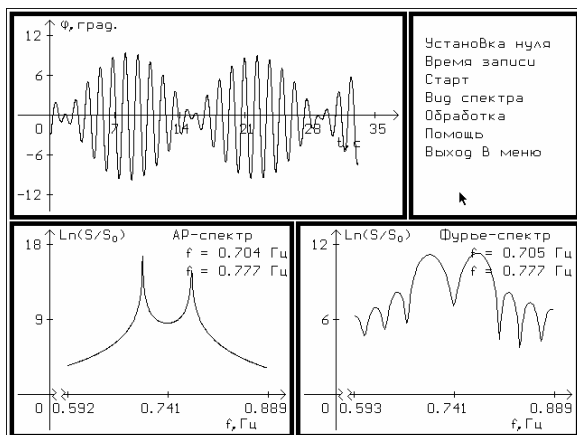


Рис. 6.63. Спектр биений.

Связанные колебания демонстрируются следующим образом. На основной маятник недалеко от его оси вращения крепится насадка в виде стерженька, параллельного этой оси. К нему на нитях бифилярно подвешивается грузик, так что получается дополнительный маятник с движущейся точкой подвеса, связанный с основным маятником. При соответствующем подборе частот колебаний обоих маятников в этой системе могут быть реализованы биения. Получаемая в ходе эксперимента зависимость $\varphi(t)$ и результат ее спектрального анализа представлены на рисунке 6.63. На графике зависимости $\varphi(t)$ ясно видно изменение фазы колебаний в конце каждого периода биений («выворот фазы») – по окончании периода биений маятник не пересекает положение равновесия, а начинает двигаться в обратную сторону.

Снизу представлены графики зависимостей спектральной плотности энергии от частоты, рассчитанные авторегрессионным методом и при помощи преобразования Фурье (для удобства наблюдения они выведены с использованием логарифмического масштаба по оси ординат и масштабированы так, чтобы на экране была видна только область пиков). Здесь, в частности, хорошо заметно преимущество авторегрессионного метода перед методом Фурье: спектры, полученные при помощи первого метода, имеют острые пики и не содержат так называемых «боковых лепестков». Следует отметить, что этот и описываемые ниже эксперименты по данной теме могут демонстрироваться в качестве модельных при чтении раздела «Оптика» курса общей физики.



Рис. 6.64. Прибор
Ю. Р. Шарапова.

Если при приведении в колебательное движение описанных выше связанных маятников правильно подобрать начальные условия, то можно наблюдать моды колебаний. При этом оба маятника будут гармонически колебаться с постоянными амплитудами, и на мониторе будет фиксироваться обычная синусоида, соответствующая одному из нормальных колебаний. Подобная зависимость $\varphi(t)$ свидетельствует о том, что существуют такие режимы колебаний связанных маятников, при которых в спектре имеется только одна частота – это можно непосредственно проверить, проведя спектральный анализ сигнала. Можно продемонстрировать, что биения (как и любые другие связанные колебания) представляют собой суперпозицию нормальных колебаний. Для этого достаточно сначала получить спектр биений (см. рис. 6.63), а

затем поочередно возбудить две различные моды и, вычислив соответствующие им спектры, продемонстрировать, что значения частот мод совпадают со значениями частот, соответствующих пикам на графике, полученном для биений.

6.6.7. Вынужденные колебания в связанной системе с двумя степенями свободы⁸.

На массивном штативе высотой ~ 2 м укреплен в вертикальном положении тонкий стальной стержень, на который надеты два одинаковых цилиндрических груза с отверстиями и три стальные пружины, одна из которых находится между грузами (см. рис. 6.64). Верхний конец самой верхней пружины закреплен, а к нижнему концу самой нижней пружины присоединен рычаг кривошипно-шатунного механизма, приводимого в движение электромотором с редуктором, частота вращения которого регулируется ЛАТРом. Равновесные положения грузов отмечены белыми метками на стойке штатива.

Прибор позволяет наблюдать вынужденные колебания в системе с двумя степенями свободы, в том числе резонансы на нормальных частотах, соответствующие синфазным или противофазным колебаниям грузов, резонанс на парциальной частоте, когда верхний груз стоит на месте, а также общий случай колебаний на частотах, не совпадающих с резонансными.

6.7. Параметрическое возбуждение колебаний.

После демонстрации связанных колебаний можно перейти к показу опытов, иллюстрирующих параметрическое возбуждение колебаний.

6.7.1. Параметрическое возбуждение маятника.

Небольшой тяжелый шарик *A* диаметром 2-3 см прикрепляют к концу прочной нити длиной 1,5-2 м. Нить перекидывают через неподвижный блок *B*, закрепленный на высоком штативе (см. рис. 6.65). Если свободный конец нити закрепить и качнуть получившийся маятник, то он будет совершать затухающие колебания.

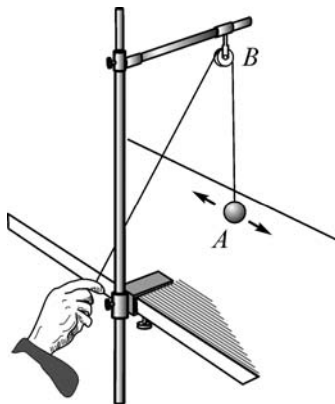


Рис. 6.65. Параметрическое возбуждение маятника.

⁸ Демонстрация предложена профессором физического факультета МГУ В. П. Кандидовым, прибор изготовлен Ю. Р. Шапаровым.

Маятник можно заставить раскачиваться со все более возрастающей амплитудой, если периодически изменять один из параметров этой колебательной системы – длину маятника. Для этого нужно освободить закрепленный конец нити и, приведя маятник в колебательное движение, дважды за период колебаний укорачивать и затем удлинять нить на одну и ту же величину. Укорачивать нить нужно тогда, когда маятник проходит положение равновесия, а удлинять – когда он находится в наибольшем удалении от положения равновесия. Действуя таким образом, можно раскачать маятник до очень больших угловых амплитуд – до 90° и более.

Данное явление объясняется тем, что при укорачивании нити маятника сила ее натяжения совершает положительную работу, и маятник получает механическую энергию, а при удлинении нити сила ее натяжения, наоборот, совершает отрицательную работу, и маятник отдает механическую энергию. Так как в нижней точке траектории сила натяжения нити маятника максимальна, то за период колебаний маятник накапливает некоторую энергию. Если этот прирост энергии маятника превышает его потери вследствие трения, то амплитуда колебаний маятника возрастает.

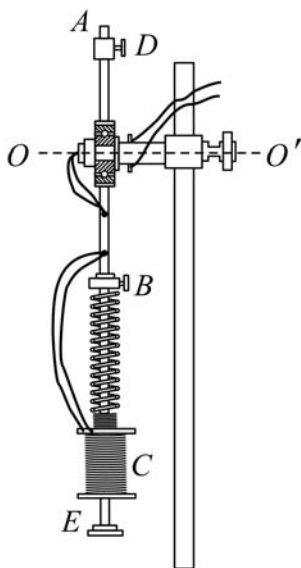


Рис. 6.66. «Качели» М. А. Грабовского.

6.7.2. «Качели» М. А. Грабовского.

Известным примером параметрического возбуждения колебаний является раскачивание качелей – стоящий на них человек в определенные моменты времени приседает и выпрямляется, изменяя момент инерции системы, что и приводит к возрастанию амплитуды ее колебаний.

Для демонстрации этого явления в Кабинете физических демонстраций физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова М. А. Грабовским был разработан следующий прибор (см. рис. 6.66). Составной металлический стержень AE подвешен и может свободно колебаться на горизонтальной оси OO' , проходящей на расстоянии 20–25 см от его верхнего конца.

Верхняя часть стержня изготовлена из малоуглеродистой стали, а нижняя – из латуни. Обе части имеют одинаковый диаметр и прочно соединены между собой торцами. На стержень надета спиральная пружина, на нижнем конце которой висит цилиндрическая катушка *C*. Верхняя часть пружины крепится к стержню при помощи подвижной муфты *B* с боковым винтом. Муфта должна быть закреплена в таком положении, чтобы нижний конец стальной части стержня входил в канал катушки примерно на половину ее длины. При таком расположении катушки она при протекании через нее электрического тока поднимается на 10–12 см, уменьшая момент инерции системы, и опускается обратно при выключении тока, увеличивая момент инерции системы. На верхнем конце стержня над осью крепится передвигной груз *D*, который увеличивает период собственных колебаний маятника и позволяет изменять его.

Демонстрацию начинают с того, что маятнику сообщают небольшое начальное отклонение. Затем с частотой, в два раза превышающей частоту собственных колебаний маятника, в определенные моменты времени включают и выключают ток в катушке при помощи ключа, тем самым периодически изменяя момент инерции системы и раскачивая ее до значительных амплитуд. Для большего удобства показа демонстрации прибор можно снабдить скользящим контактом, который будет автоматически включать и выключать ток в катушке при ее колебаниях.

6.7.3. Параметрическое возбуждение струны электрокамертоном (опыт Мельде⁹) в стробоскопическом освещении.

Опыт Мельде (см. рис. 6.67) по параметрическому возбуждению струны осуществляется при помощи электрокамертона с бесконтактным возбуждением (см. описание демонстрации 6.4.7). Один конец струны или шнура зажимается на конце высокого хорошо закрепленного штатива, другой привязывается к специальной насадке на ветви камертона. Струна натягивается вертикально, ветви камертона колеблются также в вертикальном направлении, периодически изменяя силу натяжения струны. Камертон и струна (или шнур) освещаются снизу при помощи стробоскопа.

Демонстрация проводится в затемнённой аудитории. Включив камертон и изменяя натяжение струны при помощи регулировочного

⁹ Ф. Мельде – во второй половине XIX в. профессор физики в г. Марбург (Германия).

винта на основании штатива камертона, можно наблюдать поочередно параметрическое возбуждение нескольких поперечных мод колебаний струны. Частоту вспышек стробоскопа нужно установить либо равной, либо слегка отличающейся от частоты колебаний камертона – тогда при «неподвижных» или «медленно колеблющихся» ветвях камертона видны сразу два положения струны, движущейся с удвоенной частотой. Полезно обратить внимание на то, что плоскость поляризации колебаний струны при таком возбуждении находится в произвольном положении: обычно она с течением времени медленно вращается; этот эффект особенно заметен при наблюдении первой моды – основного тона струны.

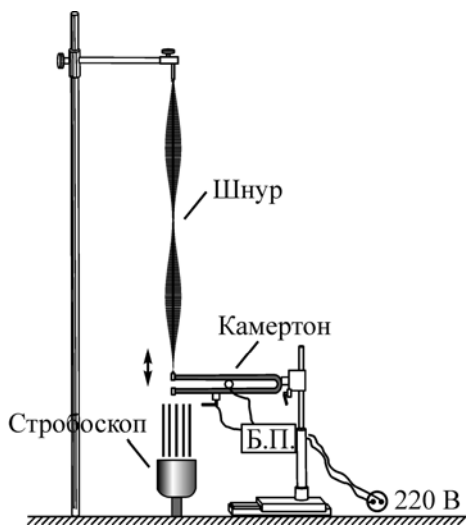


Рис. 6.67. Опыт Мельде.

6.7.4. Параметрическое возбуждение струны из-за нагрева переменным током.

Тонкую нихромовую проволоку длиной 2-3 м закрепляют одним концом в штативе. Другой ее конец перебрасывают через закрепленный во втором штативе неподвижный блок. К этому концу прикрепляют чашку с грузами и регулируют высоту расположения блока так, чтобы проволока была натянута горизонтально. Через проволоку пропускают переменный ток частотой 50 Гц, достаточно сильный для ее нагревания. При этом проволока приходит в колебательное движение, которое вызывается быстрыми (происходящими 100 раз в секунду) изменениями внутренних напряжений, связанными с колебаниями температуры проволоки. При определенном натяже-

нии, которое можно плавно регулировать массой положенных на чашку гирь, проволока может прийти в состояние параметрического резонанса, и на ней установится стоячая волна.

Если переменный ток будет нагревать проволоку до красного каления, то наблюдать установившуюся на ней стоячую волну удобно в затемненной аудитории. При этом места проволоки, где находятся узлы стоячей волны, будут светиться ярче других, а места, где находятся пучности – более тускло (при удачном подборе условий проведения опыта пучности могут быть совершенно темными).

6.7.5. Маятник Г. С. Горелика¹⁰.

Маятник Г. С. Горелика представляет собой подвешенный к штативу на пружине груз, у которого частота продольных колебаний (вверх-вниз) вдвое больше частоты раскачивания вправо-влево (см. рис. 6.68). При возбуждении одного из этих типов колебаний (например, вверх-вниз) у такого маятника начинается параметрическое возбуждение другого типа колебаний (вправо-влево), и возникают биения, то есть продольные колебания периодически превращаются в поперечные, и обратно. Плоскость качания при биениях меняется от периода к периоду случайным образом. Опыт можно показывать и в другой последовательности: сначала отклонить маятник вбок, и затем наблюдать переход возникших качаний маятника в продольные колебания и обратно.

Как показывает несложный расчет, для выполнения необходимого соотношения между частотами продольных и поперечных колебаний груз должен растягивать пружину в положении равновесия таким образом, чтобы удлинение пружины составляло $1/3$ расстояния от точки подвеса до центра масс груза при нерастянутой пружине. Действительно, для того, чтобы маятник вел себя указанным образом, необходимо, чтобы частота колебаний груза как пружинного маятника (в вертикальном направлении) вдвое превосходила частоту его колебаний как математического маятника (в горизонтальном направлении): $\omega_1 = \sqrt{k/m} = 2\omega_2 = 2\sqrt{g/l}$. Здесь k – жесткость пружины, m – масса груза, l – длина пружины в растяну-

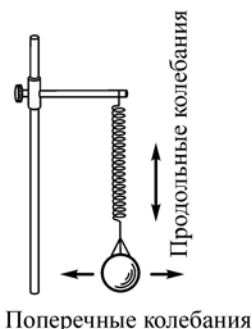


Рис. 6.68. Маятник Г. С. Горелика.

¹⁰ Г. С. Горелик (1906 – 1957) – советский радиофизик, профессор МГУ.

том состоянии (после подвешивания груза). Учитывая, что $mg = k(l - l_0)$, где l_0 – длина пружины в нерастянутом состоянии,

получаем: $\frac{g}{l - l_0} = \frac{k}{m} = 4\frac{g}{l}$, откуда $l - l_0 = \frac{1}{3}l_0$.

6.8. Сложение колебаний.

Далее можно перейти к опытам, демонстрирующим сложение колебаний, происходящих как по одному направлению, так и во взаимно перпендикулярных направлениях.

6.8.1. Механическая модель (деревянные синусоиды).

Прибор для моделирования сложения двух синусоидальных колебаний (см. рис. 6.69) представляет собой деревянный щит с вертикальной задней стенкой, перед которой расположен набор из нескольких десятков длинных деревянных стержней квадратного сечения (50 см × 1 см × 1 см). Каждый из стержней удерживается в вертикальном положении двумя металлическими держателями, которые прикреплены к нему снизу и сверху. Держатели могут двигаться вместе со стержнями вверх и вниз вдоль вертикальных прорезей, сделанных в задней стенке щита. Длины стержней неодинаковы – они подобраны так, что при расположении нижних концов

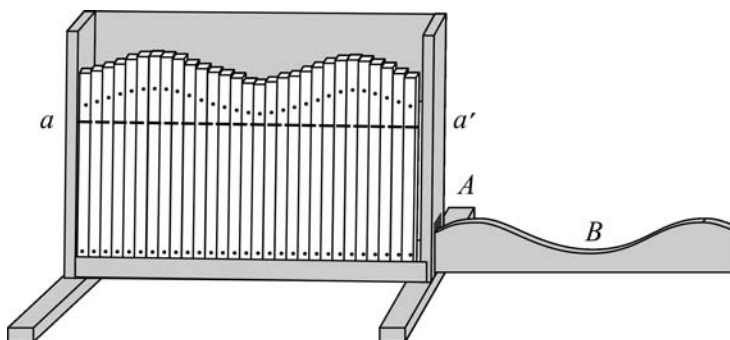


Рис. 6.69. Механическая модель сложения колебаний.

стержней на одной горизонтали верхние концы стержней выстраиваются вдоль линии, повторяющей очертания синусоиды. По боковой поверхности стержней со стороны зрителей краской нанесена горизонтальная линия aa' , параллельная основанию прибора. В боковой стенке прибора вблизи нижних заостренных концов стерж-

ней сделано отверстие A , предназначенное для пропускания специальных шаблонов B .

Шаблоны, использующиеся для показа демонстрации, изготавливаются из тонких досок. Одно ребро шаблона должно быть ровным, а второе должно повторять очертания синусоиды. Если пропускать такой шаблон через боковое отверстие прибора, то стержни будут приподниматься, и нарисованная на стержнях линия будет повторять профиль шаблона. Верхние же концы стержней будут изображать другую линию, соответствующую сумме двух складываемых синусоид – той, которую очерчивает шаблон и той, которую очерчивали верхние концы стержней до пропускания шаблона. Результат сложения колебаний будет зависеть от соотношения амплитуд, периодов и разности фаз складываемых синусоид. В частности, если шаблон очерчивает синусоиду того же периода и той же фазы, что и верхние концы стержней, результатом сложения будет также синусоида. Если периоды синусоид шаблона и концов стержней совпадают, но эти синусоиды сдвинуты по фазе на половину длины волны, то результатом сложения будет прямая линия. Полезно также продемонстрировать сложение других синусоид с различными амплитудами, периодами и разностями фаз.

6.8.2. Сложение колебаний двух электрокамертонов.

Для показа этого опыта используется установка, описанная в п. 6.2.2., которую нужно дополнить еще одним электрокамертоном с укрепленным на нем зеркалом. Оптическая схема установки (вид сверху) изображена на рисунке 6.70. Параллельный пучок света от проекционного фонаря последовательно отражается от зеркал,

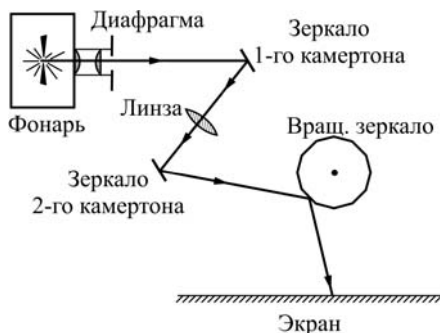


Рис. 6.70. Оптическая схема установки.

закрепленных на ветвях двух электрокамертонов, после чего отражается от грани зеркального барабана и попадает на экран. На пути светового пучка между первым и вторым камертоном ставится собирающая линза, которая позволяет получить на экране четкое изображение светового пятна. Ветви обоих камертонов должны двигаться так, чтобы прикрепленные к их торцам зеркала колебались в вертикальной плоскости.

Опыт начинается со сложения колебаний камертонов одной частоты. Сначала приводят в колебательное движение первый камертон, и на экране возникает светлая вертикальная линия. При вращении зеркального барабана она развертывается в синусоиду. Затем первый камертон выключают и возбуждают колебания второго камертона, в результате чего при вращении зеркального барабана на экране также получается синусоида. При подготовке демонстрации желательно добиться, чтобы получаемые в обоих случаях синусоиды были одинаковыми по амплитуде. Если это выполнено, то после включения обоих камертонов при вращении зеркального барабана на экране получится синусоида с амплитудой в пределах от нуля до удвоенной амплитуды колебаний одного камертона, в зависимости от сдвига фаз колебаний камертонов. Аналогичным образом осуществляется сложение колебаний камертонов с отношением частот $1 : 2$, $1 : 3$ и т.д.

Следует отметить, что при использовании камертонов, имеющих близкие, но все же несколько различающиеся частоты, на экране наблюдаются биения. Для устранения этого недостатка нужно при подготовке демонстрации в аудитории уравнивать частоты колебаний электрокамертонов путем медленного перемещения металлической насадки на одной из ветвей настраиваемого камертона. Подгонку частот нужно проводить, следя за получаемой на экране картиной сложения колебаний, и стремясь к тому, чтобы она приобрела вид синусоиды.

6.8.3. Сложение колебаний от двух генераторов на осциллографе.

Для демонстрации при помощи осциллографа сложения двух колебаний, происходящих вдоль одной прямой, собирается установка, схема которой приведена на рисунке 6.71. В состав установки входят два генератора переменного тока звуковой частоты, к выходам которых через ключи подсоединены катушки L_1 и L_2 , индуктивно связанные с катушкой L_3 . Выводы этой катушки подсоединены к

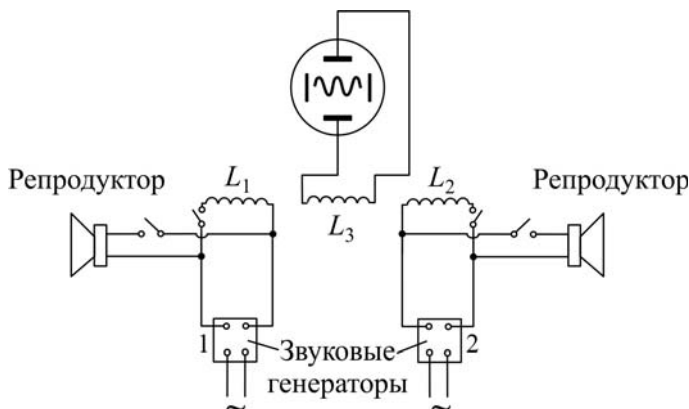


Рис. 6.71. Электрическая схема установки.

вертикальным отклоняющим пластинам электронного осциллографа (вход Y). Кроме того, к выходам генераторов могут подключаться репродукторы, которые нужны для настройки генераторов на одинаковую частоту (при совпадении частот выдаваемых генераторами гармонических сигналов репродукторы звучат в унисон). После настройки генераторов репродукторы отсоединяются, и сначала к первому генератору подключается катушка L_1 . При этом в катушке L_3 возникает ЭДС индукции, в результате чего на экране осциллографа (при выключенной горизонтальной развертке) появляется светлая вертикальная полоса. Установив размер этой полосы примерно в $1/3$ высоты экрана осциллографа, нужно отключить от первого генератора катушку L_1 и подключить ко второму генератору катушку L_2 , после чего повторить описанные операции. Далее нужно одновременно подключить к соответствующим генераторам обе катушки и наблюдать на экране осциллографа результат сложения колебаний – вертикальную полосу вдвое большей высоты, если фазы колебаний совпадают. Опыт нужно повторить, включив горизонтальную развертку осциллографа – в этом случае на его экране будут видны синусоиды с различными амплитудами.

После того, как на экране осциллографа получен результат сложения колебаний от двух генераторов, рекомендуется повернуть одну из катушек (например, катушку L_1) на 180° . При этом синусоида на экране превратится в прямую горизонтальную линию, что соответствует сложению двух гармонических функций, имеющих одинаковые частоты и амплитуды, но сдвинутых между

собой по фазе на 180° . В заключение, вернув катушку L_1 в исходное положение, нужно продемонстрировать результат сложения двух колебаний с разными частотами. Для этого необходимо изменить частоту одного из генераторов.

В связи с тем, что экран осциллографа имеет небольшие размеры, рекомендуется демонстрировать увеличенное изображение экрана при помощи видеопроекции, либо использовать для показа опыта специальный демонстрационный осциллограф.

6.9. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний.

6.9.1. Опыт с шаром (конический маятник).

Деревянный шар диаметром ~ 10 см подвешивается к потолку аудитории на прочной бечевке. Шар нужно отклонить в сторону на $1 - 1,5$ м и дать ему возможность свободно колебаться. После этого демонстратор наносит по колеблющемуся шару удар деревянным молотком в направлении, перпендикулярном плоскости колебаний. В зависимости от того, в какой момент нанесен этот удар, шар в результате произошедшего сложения колебаний может начать двигаться по различным траекториям – по прямой линии, по окружности или по эллипсу. Направление движения шара по этим траекториям также зависит от фазы исходного колебания, в которой был нанесен удар.

Показ опыта требует предварительной тренировки демонстратора; особенно важно научиться наносить удар по шару точно в тот момент, когда шар проходит положение равновесия. Начальное колебание шара также можно вызывать ударом молотка – это даст возможность сделать сообщаемые шару во взаимно перпендикулярных направлениях импульсы примерно одинаковыми. Все наносимые по шару удары должны быть центральными.

6.9.2. Маятник с песком.

Для показа демонстрации используется массивная воронка, подвешенная к укрепленной на штативе горизонтальной планке на двух длинных одинаковых нитях a и b , образующих бифилярный подвес. Для того чтобы с помощью этой воронки было возможно наблюдать сложение взаимно перпендикулярных колебаний, нити ее подвеса пропускаются через маленькое колечко c (см. рис. 6.72). Полученный в результате маятник может совершать колебания относительно планки, к которой прикреплены нити подвеса (основная плоскость колебаний), а также в перпендикулярной плоскости,

проходящей через колечко (дополнительная плоскость колебаний). Период первых колебаний будет больше периода вторых колебаний.

Показ демонстрации нужно начинать с соотношения частот колебаний 1 : 2 (необходимое соотношение частот нужно подбирать перед началом демонстрации, передвигая колечко по нитям и определяя периоды соответствующих колебаний при помощи секундомера).

В воронку насыпается мелкий песок, ее отверстие затыкается пальцем, воронка отклоняется от положения равновесия в основной плоскости колебаний и отпускается. При отпускании воронки ей нужно сообщить дополнительный горизонтальный импульс, который может быть направлен в любую сторону. В зависимости от направления этого импульса воронка опишет ту или иную фигуру, которую изобразит высыпавшийся из отверстия воронки песок (под воронкой нужно заблаговременно положить лист плотной белой бумаги или картона). В частности, если импульс сообщен в дополнительной плоскости колебаний, то высыпавшийся из воронки песок опишет восьмерку. Передвигая колечко по нитям подвеса воронки, можно получить фигуры, соответствующие другим отношениям частот колебаний воронки во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Для того чтобы получаемая на листе бумаги песчаная линия не смазывалась при повторном движении воронки, рекомендуется насыпать в нее не очень много песка (его должно хватать на один-два полных цикла движения). Не следует подвешивать воронку очень высоко над бумагой. Песок, используемый для демонстрации, нужно предварительно промыть, просушить и просеять.

6.9.3. Биения при сложении взаимно перпендикулярных колебаний (опыт А. Б. Млодзеевского).

При помощи установки, описанной в предыдущем пункте, можно продемонстрировать биения, возникающие при сложении двух взаимно перпендикулярных колебаний, незначительно отличающихся по частоте. Для показа этой демонстрации нужно под-

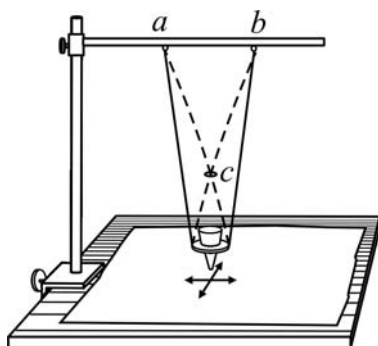


Рис. 6.72. Маятник с песком.

нять колечко, через которое пропущены нити подвеса, как можно выше, приблизив его почти к месту крепления нитей. В результате этого частоты колебаний маятника в основной и в дополнительной плоскости будут почти одинаковыми. Засыпать в воронку песок для показа этой демонстрации не нужно.

Маятник отклоняют на некоторый угол в основной плоскости колебаний и отпускают. В момент, когда маятник при колебаниях проходит одно из крайних положений, по нему наносят удар в направлении, перпендикулярном плоскости его движения, заставляя начать колебаться в дополнительной плоскости. После этого маятник начинает двигаться по горизонтально расположенной окружности. Но через некоторое время из-за того, что вследствие несовпадения частот колебаний в основной и в дополнительной плоскости разность фаз между складывающимися взаимно перпендикулярными колебаниями непрерывно изменяется, маятник начинает двигаться по эллипсу. Этот эллипс постепенно превращается в прямую линию, что свидетельствует о разности фаз между колебаниями, равной π . Затем прямая линия вновь начинает превращаться в эллипс и, в конце концов, маятник опять начинает двигаться по окружности (это происходит при разности фаз между колебаниями, равной $3\pi/2$). Интересно отметить, что теперь маятник движется по окружности в направлении, противоположном тому, в котором он двигался в момент начала демонстрации. Далее описанные процессы повторяются, причем при каждом переходе через прямолинейную траекторию направление движения маятника по орбите изменяется на противоположное.

6.9.4. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний с помощью двух стальных плоских пластинок с прорезями.

К массивной прямоугольной металлической подставке со скошенными под углом 45° краями прикрепляются нижними концами две упругие стальные пластинки, немного сдвинутые по ширине подставки относительно друг друга. К верхнему концу каждой из пластинок прикрепляется металлический диск, плоскость которого перпендикулярна плоскости пластинки (см. рис. 6.73). В каждом из дисков вдоль его диаметра, лежащего в плоскости соответствующей пластинки, сделана узкая прямоугольная прорезь; при этом прорези располагаются перпендикулярно друг другу. Если смотреть на прибор со стороны длинного основания при покоящихся дисках, то ви-

ден только передний диск и просвет в виде маленького квадратного отверстия, находящегося в месте пересечения прорезей.

Демонстрация показывается в частично или полностью затемненной аудитории. Прибор располагается перед конденсором проекционного фонаря, и при помощи объектива на экране получается резкое изображение темного диска и светлого квадратного отверстия в нем. Если теперь отклонить одну

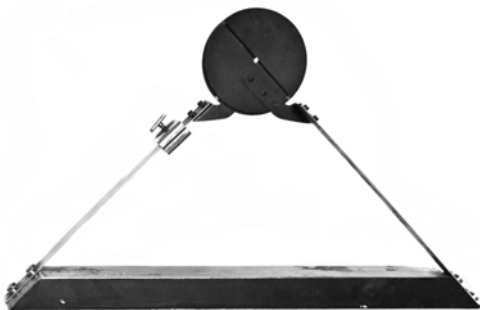


Рис. 6.73. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний на дисках с прорезями.

из пластинок на небольшой угол и отпустить, предоставив ей возможность совершать колебания, то на экране появится светлая полоса, расположенная под углом 45° к горизонту. Остановив первую пластинку и приведя в колебательное движение вторую пластинку, также можно наблюдать на экране светлую полосу, расположенную под углом 90° к наблюдавшейся ранее полосе. Заставляя колебаться обе пластинки одновременно, можно наблюдать на экране картину сложения взаимно перпендикулярных колебаний. Результат этого сложения будет зависеть от начальных условий возбуждения, то есть от разности фаз складываемых колебаний. Так, при одновременном отклонении пластинок вниз или вверх на экране будет наблюдаться светлая вертикальная полоса. При начальном отклонении одной пластинки вверх, а второй – вниз на экране будет наблюдаться светлая горизонтальная полоса. При другой разности фаз на экране будет наблюдаться окружность или эллипс.

Получение на экране устойчивых картин возможно только тогда, когда разность фаз между колеблющимися пластинками не меняется, что возможно только при строгом совпадении собственных частот колебаний пластинок. В противном случае, что практически всегда наблюдается в данном эксперименте, проецируемая на экран картина будет плавно изменяться со временем: прямая линия будет превращаться в эллипс, затем в окружность, затем будет вновь вытягиваться в линию и т.д. Для уравнивания частот колебаний пластинок на одной из них при помо-

щи прижимного винта укрепляется маленький грузик, передвижением которого и изменяется частота ее колебаний.

6.9.5. Фигуры Лиссажу¹¹ на стержнях прямоугольного сечения с разными соотношениями сторон.

Установка (см. рис. 6.74) представляет собой массивное горизонтальное основание, на котором в вертикальном положении закреплено за нижние концы несколько (от 6 до 10) стержней одинаковой длины. Стержни имеют прямоугольное сечение. Соотношение длин сторон сечения для каждого из стержней различно. На верхних концах стержней закреплены маленькие полированные шарики, повышающие удобство наблюдения за колебаниями стержней. Каждый из стержней может совершать колебания в двух взаимно перпендикулярных направлениях вдоль сторон сечения стержня, причем отношение частот этих колебаний равно отношению длин сторон сечения.



Рис. 6.74. Общий вид установки.

Если отклонить шарик на конце какого-либо из стержней на некоторый угол вдоль диагонали сечения и отпустить, то стержень будет совершать одновременно оба указанных колебания, и описываемая шариком траектория будет соответствовать результату сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний с разными частотами.

Для удобства показа и объяснения демонстрации при изготовлении установки используют стержни с отношениями длин сторон сечения, равными отношениям целых чисел (например: $1 : 1$, $1 : 2$, $1 : 3$, $2 : 3$, $3 : 4$, $3 : 5$. и др.). При колебаниях этих стержней шарики на их концах описывают фигуры Лиссажу, характерные для выбранного отношения частот колебаний.

Из-за малости размеров колеблющихся шариков и небольших амплитуд их колебаний демонстрацию рекомендуется показывать в видеопроекции.

¹¹ Ж. А. Лиссажу (1822 – 1880) – французский математик, член-корреспондент Парижской Академии Наук.

6.9.6. Наблюдение фигур Лиссажу на электронном осциллографе.

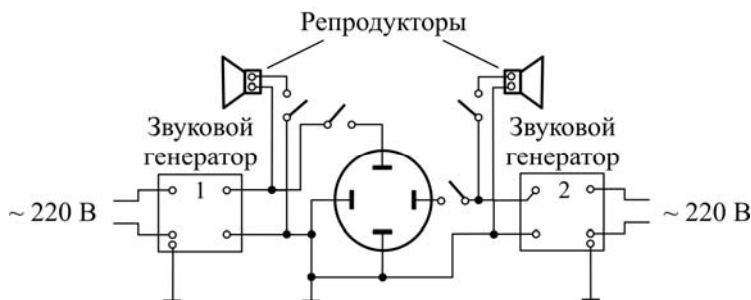


Рис. 6.75. Электрическая схема установки.

Данная демонстрация показывается при помощи установки, схема которой изображена на рисунке 6.75. В состав установки входят два генератора переменного тока звуковой частоты, к выходам которых через ключи подсоединены репродукторы, используемые для настройки генераторов на одинаковую частоту (при совпадении частот выдаваемых генераторами гармонических сигналов репродукторы звучат в унисон). После настройки генераторов репродукторы от них отсоединяются. Опыт демонстрируется в следующей последовательности. Сначала сигнал с выхода первого генератора подается на вертикальные отклоняющие пластины осциллографа. Появившийся при этом на экране светлый вертикальный отрезок при помощи ручек управления осциллографом растягивают так, чтобы он занимал примерно $2/3$ высоты экрана. Затем первый генератор отсоединяют от вертикальных пластин осциллографа, и подсоединяют второй генератор к горизонтальным отклоняющим пластинам осциллографа (горизонтальная развертка осциллографа при этом должна быть выключена). Появившийся при этом на экране светлый горизонтальный отрезок при помощи ручек управления осциллографом растягивают так, чтобы его размер совпадал с размером наблюдавшегося ранее вертикального отрезка. Затем вновь подключают первый генератор к вертикальным пластинам – в результате на экране осциллографа наблюдается результат сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний, имеющих одинаковые частоты и амплитуды. В зависимости от разности фаз между этими колебаниями картина на экране будет представлять собой отрезок прямой линии, эллипс или окружность. Поскольку на практике указанная разность фаз практически всегда

плавно изменяется, то картина на экране будет претерпевать медленные изменения – отрезок прямой линии будет медленно трансформироваться в эллипс, который, в свою очередь, будет превращаться в окружность, затем снова в эллипс, в отрезок и т.д. Следует отметить, что демонстрируемое явление может быть использовано на практике для определения частоты неизвестного гармонического сигнала, если имеется генератор опорного напряжения известной частоты, которую можно изменять. Появление на экране отрезка прямой, эллипса или окружности свидетельствует о том, что частота неизвестного сигнала совпала с опорной частотой.

Далее можно наблюдать результат сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний, имеющих различные частоты. При изменении частоты сигнала, выдаваемого одним из генераторов, луч на экране осциллографа начинает описывать замысловатые фигуры. Следует обратить внимание на то, что площадь, в которую вписываются все эти фигуры, точно совпадает с площадью квадрата, в ко-

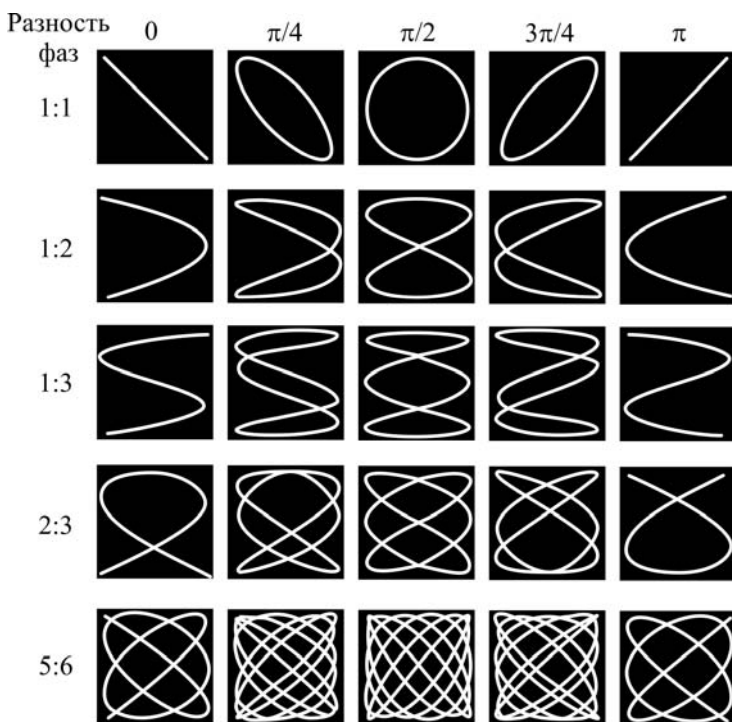


Рис. 6.76. Различные фигуры Лиссажу.

тору была вписана окружность, наблюдавшаяся при равенстве частот генераторов. В тех случаях, когда отношение частот генераторов будет давать простую дробь ($1 : 2$, $1 : 3$, $2 : 3$, $5 : 6$ и др.), луч на экране будет описывать замкнутую фигуру – одну из фигур Лиссажу (см. рис. 6.76). Вид этих фигур зависит от разности фаз сигналов, а отношение их частот равно отношению чисел точек касания фигур к сторонам прямоугольника, в который они вписаны. Вследствие небольшого непостоянства разности фаз между сигналами генераторов эти фигуры, подобно наблюдавшемуся ранее эллипсу, будут медленно видоизменяться, как бы вращаясь на экране, но эти изменения будут гораздо менее существенными, чем изменения, наблюдающиеся при варьировании частоты одного из генераторов.

В связи с тем, что экран осциллографа имеет небольшие размеры, рекомендуется демонстрировать увеличенное изображение экрана при помощи видеопроекции, либо использовать для показа опыта специальный демонстрационный осциллограф.

6.9.7. Фигуры Лиссажу, получаемые при развертке лазерного луча в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Демонстрация фигур Лиссажу обычно проводится с помощью электронного осциллографа или двух электрокамертонов, отклоняющих узкий световой луч. Описание первого из этих методов приведено в пункте 6.9.6. Второй метод демонстрации полностью аналогичен описанному в пункте 6.8.2. с тем лишь отличием, что нужно повернуть второй камертон на 90° , чтобы его ветви колебались в плоскости, перпендикулярной плоскости колебаний ветвей первого камертона, и не требуется использовать зеркальный барабан.

Оба метода имеют некоторые недостатки. В первом случае – это небольшой размер изображения, во втором – невозможность плавного изменения частоты колебаний и сложность настройки аппаратуры.

Улучшенный вариант этой демонстрации, реализованный в Кабинете физических демонстраций физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова, свободен от указанных недостатков [10]. Изображение фигур Лиссажу получается на большом экране или просто на стене аудитории с помощью развертки лазерного луча двумя специально приспособленными для этой цели головками от приборов магнитоэлектрической системы.



Рис. 6.77. Общий вид прибора.

Прибор для получения фигур Лиссажу (см. рис. 6.77) выполнен в виде отдельного блока с кожухом из оргстекла размером около $5 \times 10 \times 20 \text{ см}^3$ и установлен на подвижном штативе с массивным основанием. Схема работы прибора приведена на рис. 6.78, из которого ясен и смысл переделки головок. К подвижным рамкам приклеиваются легкие зеркальца (желательно наружного напыления) и удаляются стрелки с противовесами. Луч лазера направляется на зеркало 1, прикрепленное к рамке, колеблющейся вокруг вертикальной оси. К этой рамке подводится напряжение сети ($\sim 220 \text{ В}$, 50 Гц) через разделительные конденсаторы C_1 и C_2 , величина которых подбирается таким образом, чтобы луч не выходил за пре-

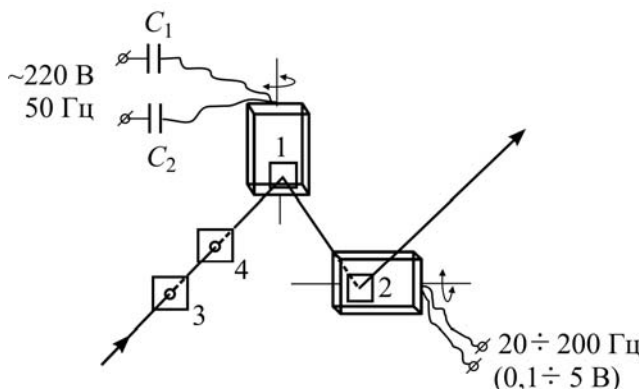


Рис. 6.78. Схема работы прибора.

делы второго зеркала. Расстояние между зеркалами 1 и 2 выбирается минимально возможным для достижения максимального угла отклонения луча первым зеркалом. Ось вращения второго зеркала с рамкой горизонтальна. К рамке подводится переменное напряжение от генератора звуковой частоты ($20 \div 200$ Гц). На общем с отклоняющими головками основании установлены две круглые диафрагмы 3 и 4, проходя через которые, луч лазера попадает точно в центр первого зеркала; это облегчает юстировку прибора. В неотклоненном состоянии зеркала 1 и 2 устанавливаются так, чтобы входящий и выходящий из прибора лучи были приблизительно параллельны. Это достигается предварительной регулировкой углового положения зеркал при помощи корректоров «нуля» на головках. При таком расположении зеркал легко получить изображение фигур Лиссажу в нужном месте экрана, ориентируясь по первоначальному направлению используемого луча лазера.

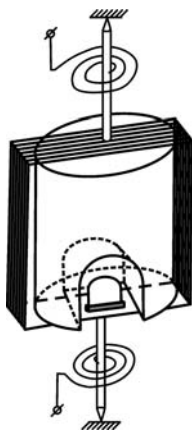


Рис. 6.79. Схема переделки рамки.

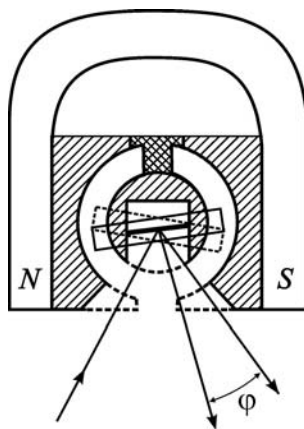


Рис. 6.80. Схема переделки магнитной системы головок.

На рис. 6.79 и рис. 6.80 показаны схемы переделки рамки и магнитной системы головок, используемых в приборе. Зеркало размером 8×8 мм приклеено эпоксидным клеем параллельно плоскости рамки в центре внутренней поверхности ее каркаса. Для зеркала в сердечнике выфрезерован паз; удалена также часть магнитопровода на пути светового луча, ограниченная пунктирной линией на рис. 6.80. Спиральные пружины, служащие одновременно токовводами, укорочены для устранения нежелательных резонансных явлений, возникающих в них в рабочем диапазоне частот.

Увеличение жесткости пружин практически не сказывается на размахе колебаний рамки, поскольку на используемых звуковых частотах ($20 \div 200$ Гц) амплитуда обратно пропорциональна квадрату частоты колебаний и ограничивается в основном лишь инерционностью рамки с зеркалом. В связи с этим для поддержания заданного размера фигур Лиссажу при увеличении частоты необходимо увеличивать и амплитуду сигнала, подаваемого на рамку от звукового генератора. Рабочие углы φ отклонения луча у описываемого прибора составляет 5° - 10° и ограничиваются, в основном, размерами используемых зеркал и расстоянием между головками, которое составляет около 40 мм.

Поскольку частота колебаний первой рамки прибора фиксирована и равна 50 Гц, то различные неподвижные фигуры Лиссажу наблюдаются на экране при подаче от генератора на вторую рамку гармонического напряжения, имеющего частоту 25 Гц, 50 Гц, 75 Гц, 100 Гц и т.д. Необходимо отметить, что качество получаемых с помощью данного прибора фигур весьма высоко (см. рис. 6.81 – 6.84) в силу практически полной развязки каналов горизонтального и вертикального отклонения луча и характера частотной характеристики головок.

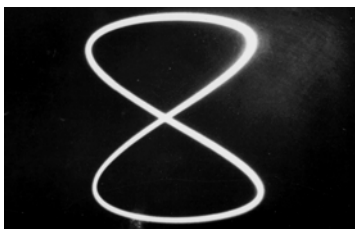


Рис. 6.81. Отношение частот по горизонтали и вертикали 2:1.



Рис. 6.82. Отношение частот 1:1.



Рис. 6.83. Отношение частот 1:3.

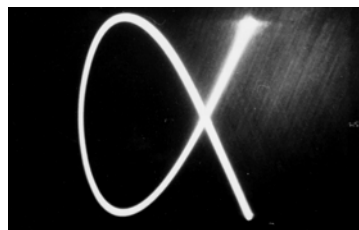


Рис. 6.84. Отношение частот 3:2.

6.10. Нелинейные колебания.

При помощи автоматизированной экспериментальной установки, применяемой для показа экспериментов, описанных в пунктах 6.2.5 и 6.6.6, можно демонстрировать ряд особенностей нелинейных колебаний – таких, как возникновение высших гармоник и комбинационных частот, а также наличие зависимости частоты колебаний физического маятника от их амплитуды (неизохронность колебаний) [22, 27].

6.10.1. Получение высших гармоник.

Для получения колебательного процесса, содержащего вторую гармонику, к маятнику прикрепляется длинный тонкий резиновый амортизатор, второй конец которого привязывается к установленному на столе штативу. Штатив располагается таким образом, чтобы в положении равновесия маятника амортизатор был практически горизонтален, не натянут и находился в плоскости колебаний. В получившейся системе колебания происходят при наличии несимметричной нелинейной возвращающей силы. Когда маятник отклоняется в сторону штатива, амортизатор провисает и никак не влияет на колебания. Когда же маятник отклоняется в другую сторону, амортизатор растягивается и создает дополнительную возвращающую силу. В результате в спектре колебательного процесса (см. рис. 6.85) помимо первой гармоники наблюдается ярко выраженная вторая гармоника. Гармоники высших порядков также присутствуют в спектре, но они гораздо слабее двух первых и поэтому практически не видны даже при отображении спектра в логарифмическом масштабе по оси ординат.

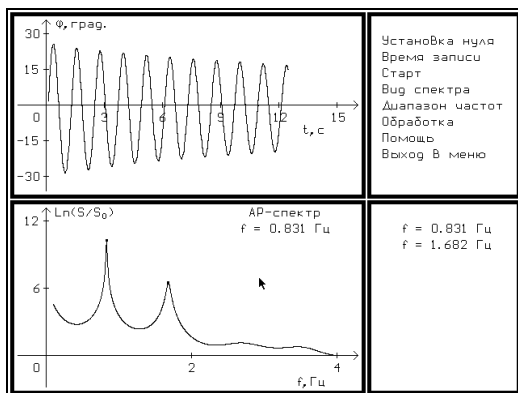


Рис. 6.85. Получение второй гармоники.

Колебательный процесс, содержащий гармоники с более высокими номерами, можно получить следующим образом. Перпендикулярно плоскости качания маятника в стороне от положения его равновесия натягивается узкая резиновая лента. При колебаниях маятник должен упираться в нее и отскакивать. Место расположения резиновой ленты, силу ее натяжения и амплитуду колебаний маятника нужно выбирать таким образом, чтобы большую часть периода колебаний маятник двигался свободно, а время взаимодействия с лентой было мало по сравнению с периодом. При выполнении этих условий зависимость угловой координаты маятника от времени (см. рис. 6.86) будет состоять из «склеенных» между собой кусков синусоиды с «обрезанными» минимумами или максимумами – в зависимости от того, с какой стороны от маятника натянута резиновая лента. Спектр таких сильно нелинейных колебаний включает в себя, как видно из рисунка, достаточно большое число гармоник.

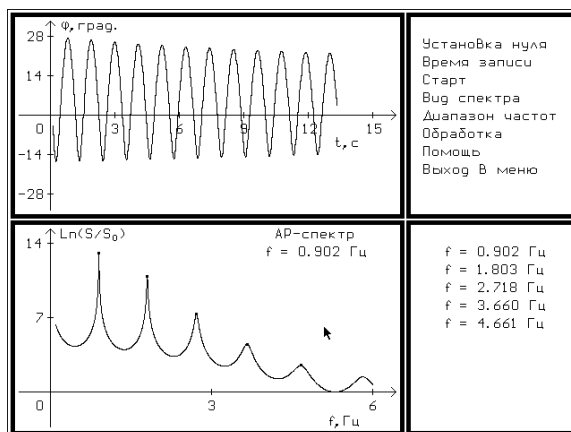


Рис. 6.86. Получение высших гармоник.

Для получения колебательного процесса, содержащего только нечетные гармоники, необходимо создать симметричную нелинейную возвращающую силу. Для этого нужно натянуть перпендикулярно плоскости колебаний две резиновые ленты так, чтобы они располагались симметрично относительно положения равновесия маятника. При этом следует действовать так же, как при подготовке описанной выше демонстрации по получению высших гармоник. Получаемая при таких колебаниях зависимость угловой координаты маятника от времени будет близка к пилообразному сигналу, состоящему из треугольных импульсов (см. рис.6.87).

Спектральный анализ этих колебаний позволяет обнаружить сильно выраженные первую, третью и пятую гармоники.

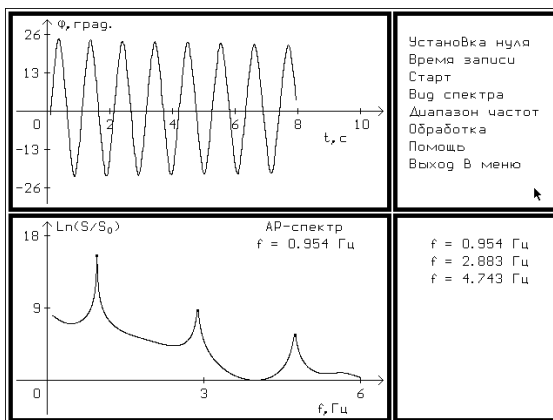


Рис. 6.87. Получение нечетных гармоник.

6.10.2. Комбинационные частоты.

Известно, что при нелинейном взаимодействии связанных маятников в спектре колебаний, кроме частот f_1 и f_2 , соответствующих линейной связи, появляются комбинационные частоты $f_1 + f_2$ и $f_1 - f_2$. Это явление можно продемонстрировать следующим образом.

На основном маятнике ниже места крепления дополнительного маятника, применяемого для получения связанных колебаний, устанавливается дополнительная насадка в виде короткого горизонтального стержня. Этот стержень крепится таким образом, что нитяной подвес дополнительного маятника при колебаниях может об него ударяться. В результате взаимодействие колеблющихся маятников становится нелинейным, а зависимость $\varphi(t)$ для каждого из маятников приобретает достаточно сложный характер. Пример такой кривой изображен в верхней части рисунка 6.88. В нижней части рисунка 6.88 приведен результат спектрального анализа этой зависимости авторегрессионным методом (при обработке Фурье-методом из-за наличия большого количества боковых лепестков получающийся результат интерпретировать сложно). Видно, что кроме основных частот $f_1 = 0,733$ Гц и $f_2 = 1,019$ Гц в спектре имеются и комбинационные частоты $f^{(-)} = 0,287$ Гц $\approx f_2 - f_1$ и $f^{(+)} = 1,748$ Гц $\approx f_1 + f_2$.

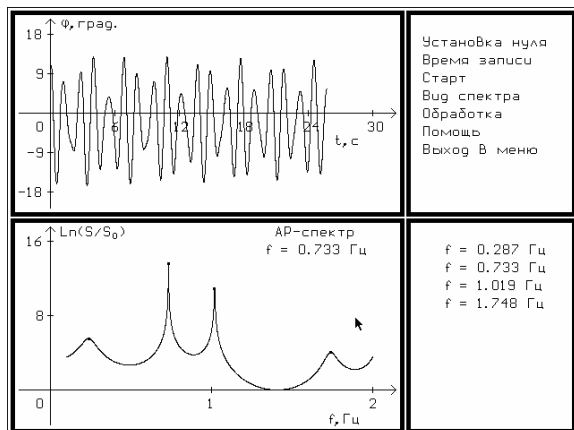


Рис. 6.88. Получение комбинационных частот.

Отметим, что комбинационные частоты в описанной системе далеко не всегда хорошо заметны. Для получения ярко выраженных комбинационных частот необходимо специально подбирать определенное соотношение между моментами инерции маятников и их длинами, а также место расположения дополнительной насадки.

6.10.3. Зависимость частоты собственных колебаний от амплитуды (неизохронность колебаний).

Этот интересный и методически важный эксперимент демонстрируется следующим образом. Маятник отклоняется на достаточно большой начальный угол ($\sim 60^\circ$) и отпускается, после чего в течение 10 секунд записывается зависимость $\varphi(t)$. Вид этой зависимости во время ее записи можно наблюдать на мониторе. Затем путем обработки полученной зависимости определяются амплитуда колебаний a (это можно сделать с достаточно высокой точностью из-за малости затухания) и соответствующая ей частота колебаний f . За время, в течение которого происходит обработка ($\sim 20 \div 30$ секунд), амплитуда колебаний немного уменьшается из-за затухания. Поэтому, проводя эти измерения несколько раз подряд, можно получить набор частот колебаний, соответствующих различным амплитудам. Как известно, зависимость частоты колебаний маятника f от их амплитуды a (в радианах) при не очень больших углах отклонения описывается формулой $f = f_0(1 - a^2/16)$, где f_0 – частота малых (изохронных) колебаний. Целью данного эксперимента является проверка этой формулы. Поэтому в ходе демонст-

рации последовательно получаемые экспериментальные точки автоматически отображаются на графике, по осям которого откладываются квадрат амплитуды и соответствующая ей частота. Эти оси показываются на мониторе в течение всех промежутков времени, пока идет обработка очередной записанной зависимости $\varphi(t)$. Кроме того, на монитор с использованием различных цветов выводятся спектры обрабатываемых зависимостей $\varphi(t)$ и отображаются частоты основной и третьей гармоник. Число анализируемых зависимостей $\varphi(t)$, используемых для получения зависимости $f(a^2)$, задается перед началом демонстрации. По окончании эксперимента на мониторе

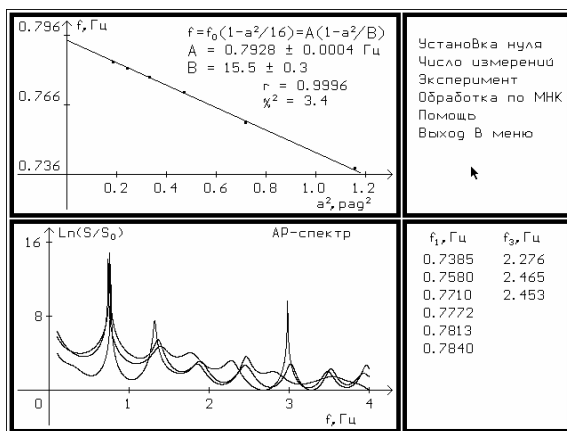


Рис. 6.89. Зависимость частоты от амплитуды колебаний маятника

отображается весь набор экспериментально полученных точек зависимости $f(a^2)$. После его обработки по МНК строится аппроксимирующая эту зависимость прямая (см. рис. 6.89). Здесь же выводятся значения коэффициента корреляции, параметра χ^2 , и значения констант A и B в зависимости $f = A(1 - a^2/B)$. Согласно приведенной выше формуле, константа B должна быть равна 16 (в данном примере она получилась равной $15,5 \pm 0,3$, что близко к требованиям теории). Константа A дает значение частоты колебаний при малых амплитудах.

Глава 7 УПРУГИЕ СВОЙСТВА ТЕЛ

Изучение механики сплошных сред в курсе общей физики обычно начинается с механики упругих тел (см., например, [28, лекция 15], [30, глава X], [31, глава XIV]), а показ демонстраций по этой теме рекомендуется начинать с закона Гука и типов однородных и неоднородных деформаций.

7.1. Закон Гука.

7.1.1. Модель кристалла NaCl (шарики с пружинами).

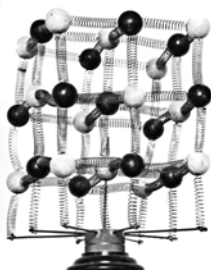


Рис. 7.1. Модель кристалла NaCl.

Модель, собранная из белых и черных шариков, соединенных пружинами (см. рис. 7.1), служит для демонстрации происхождения упругих сил при деформациях кристаллической решетки твердых тел, а также для демонстрации различных типов деформаций.

В разделе «Молекулярная физика» курса общей физики модель может использоваться для демонстрации тепловых колебаний решетки твердых тел. В этом случае основание модели следует трясти, вызывая колебания «решетки».

7.1.2. Пружинный динамометр.



Рис. 7.2. Демонстрация закона Гука.

Демонстрируется пропорциональность растяжения стальной спиральной пружины числу подвешенных на ней одинаковых грузов, то есть справедливость закона Гука. Пружина снабжена стрелкой, показывающей деформацию на расположенной рядом шкале с равномерно нанесенными делениями (см. рис. 7.2). Вначале производится постепенное нагружение, а затем разгружение пружины; гистерезис и остаточная деформация при этом отсутствуют.

Установка используется также в разделе «Колебания» (см. 6.1.1).

7.2. Типы деформаций (растяжение-сжатие, сдвиг; изгиб, кручение).

7.2.1. Модель из пластин с пружинами.

Модель деформируемого твердого тела состоит из нескольких пластмассовых квадратных пластинок, соединенных по углам упругими элементами – одинаковыми пружинами (см. рис. 7.3). С помощью этой модели демонстрируются основные типы однородных и неоднородных деформаций: растяжение-сжатие (сжатие или растяжение системы происходит, когда силы прикладываются в центре верхней пластины в перпендикулярном к ней направлении), сдвиг (сила прикладывается к верхней пластине параллельно ее плоскости), изгиб (система изгибается, если вектор момента внешних сил, приложенных к верхней пластине, направлен параллельно ей) и кручение (вектор момента внешних сил, приложенных к верхней пластине, направлен перпендикулярно к ней). При этом во всех случаях нижнюю пластину системы следует удерживать в неподвижном состоянии, прижимая ее рукой к столу.

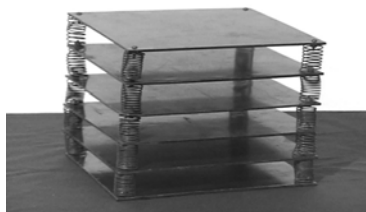


Рис. 7.3. Модель из пластин с пружинами.

7.2.2. Резиновые модели: брусок с нанесённой сеткой и брусок со штырьками.

Неоднородные деформации – изгиб и кручение – демонстрируются при помощи резиновых моделей: бруска прямоугольного сечения с нарисованной на нем сеткой с квадратными ячейками и длинного бруска квадратного сечения, через который продеты металлические штырьки (см. рис. 7.4).

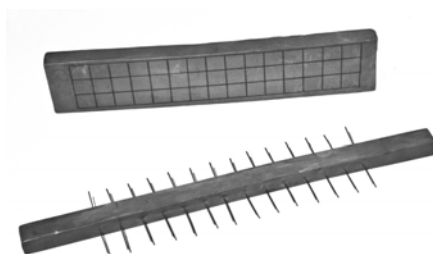


Рис. 7.4.
Резиновые модели упругих тел.



Рис. 7.5. Деформация изгиба.

Сетка и штырьки позволяют продемонстрировать распределение деформаций в теле. Изгибая брусок с сеткой, наблюдают изменение размеров и формы ячеек в разных местах бруска (см. рис. 7.5). Изгибая брусок со штырьками дугой в плоскости штырьков, наблюдают уменьшение расстояния между концами штырьков с внутренней стороны дуги и увеличение этого расстояния с внешней стороны (см. рис. 7.6), что говорит о сжатии внутренних и растяжении внешних слоев резины. Поворачивая верхнюю часть бруска со штырьками относительно нижней вокруг его оси, по положению штырьков наблюдают распределение деформаций в бруске при его кручении (см. рис. 7.7).



Рис. 7.6. Деформация изгиба.



Рис. 7.7. Деформация кручения.

7.2.3. Деформация висящего тела.



Рис. 7.8. Деформация висящего тела.

Наблюдается неоднородная деформация растяжения свободно висящего тела – мягкой массивной пружины, подвешенной за конец на штативе (см. рис. 7.8). Хорошо заметно, что деформация, как и сила натяжения пружины, нарастает снизу вверх – приблизительно по линейному закону. Для демонстрации удобнее всего использовать имеющуюся в продаже длинную «радужную» пружину, подвешенную на штативе достаточной высоты.

7.2.4. Деформация кручения неоднородного вала.

Угол φ закручивания однородного упругого вала под действием вращающего момента M , направленного вдоль оси вала, пропорционален, как показывает несложный расчет, этому моменту, длине вала l , и обратно пропорционален модулю сдвига G материала и геометрическому «моменту инерции» I_p поперечного сечения вала:

$\varphi = \frac{Ml}{GI_p}$. Для цилиндрического вала радиусом R имеем:

$$I_p = \int_0^R r^2 dS = \int_0^R r^2 \cdot 2\pi r dr = \frac{1}{2} \pi R^4, \text{ поэтому при закручивании состав-$$

ного вала, состоящего из двух частей, выполненных из одинакового материала, одинаковой длины и разных радиусов R_1 и R_2 , углы закручивания каждой части вала под действием одного и того же момента сил M должны относиться следующим образом:

$$\frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^4.$$

Для демонстрации этого эффекта используется прибор – модель вала, состоящего из двух частей разного диаметра. Два прямых куска стальной проволоки одинаковой длины (около 0,7 м) и разного диаметра (около 2 и 4 мм) сварены встык так, что их оси совпадают. На концах проволок и в месте их сварки перпендикулярно к ним припаяны три параллельных стрелки-указателя длиной около 15 см. Вал устанавливается в горизонтальном положении так, что конец толстой проволоки жестко закреплен, а стык и конец тонкой проволоки могут свободно вращаться в опорах (см. рис. 7.9).

Опыт демонстрируется в теневой проекции: вначале на экране получают три совпадающих тени стрелок, освещая прибор вдоль оси вала, затем поворачивают конец тонкой проволоки за стрелку на угол 50° – 70° и наблюдают различие (приблизительно в 16 раз) в углах кручения у двух частей вала. Для сравнения демонстрируется опыт

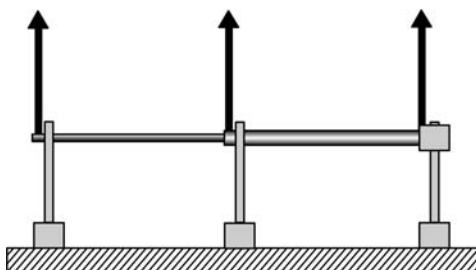


Рис. 7.9. Кручение неоднородного вала.

с однородным валом диаметром 2-3 мм, снабженным такими же стрелками-указателями на его концах и посередине. В этом случае углы кручения у обеих половинок вала одинаковы.

7.3. Упругая и остаточная деформация.

После показа упругих деформаций можно перейти к демонстрации опытов, в которых при превышении предела упругости у образцов различных материалов наблюдаются пластические деформации и появляется остаточная деформация.

7.3.1. Свинцовая, медная и стальная пластинки, зажатые в тисках.

Для различных материалов предел упругости достигается при разных величинах деформации. Это можно показать при помощи следующей демонстрации. В тисках зажимают за концы в вертикальном положении три сложенные вместе пластинки одинаковой длины, изготовленные из различных материалов – свинца, меди и стали. Если подвергнуть пластинки одинаковой деформации изгиба, нажав на них в горизонтальном направлении пальцем, то после снятия нагрузки свинцовая пластинка останется в сильно деформированном состоянии, медная пластинка

будет иметь значительно меньшую остаточную деформацию, а стальная пластинка вернется в исходное положение (см. рис. 7.10). Это объясняется тем, что при одинаковой деформации у свинцовой пластинки мы заходим в область пластической деформации глубже, чем у медной, а стальная пластинка еще остается в пределах области упругих деформаций.

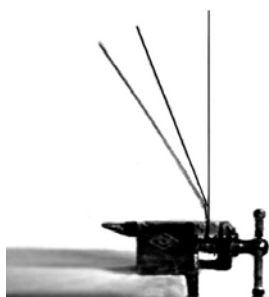


Рис. 7.10. Пределы упругости у свинца, меди и стали.

7.3.2. Прибор для растяжения проволоки со шкалой и стрелкой.

Вертикальная стойка высотой около 2 м закрепляется струбциной на демонстрационном столе. В верхней части к ней прикреплена медная проволока диаметром 0,6-0,8 мм, которая внизу обернута вокруг блока, снабженного стрелкой-указателем длиной

около 1 м. К нижнему концу проволоки подвешиваются грузы. При нагружении проволоки блок поворачивается, и стрелка смещается вдоль шкалы с делениями (см. рис. 7.11). Масса грузов и длина стрелки должны быть подобраны так, что при добавлении каждого следующего груза (по 1 кг) стрелка в пределах упругих деформаций смещалась на одно деление. После достижения предела текучести (при нагрузке больше 4-5 кг) грузы снимаются, и наблюдается появление остаточной деформации – стрелка не возвращается к исходному положению.

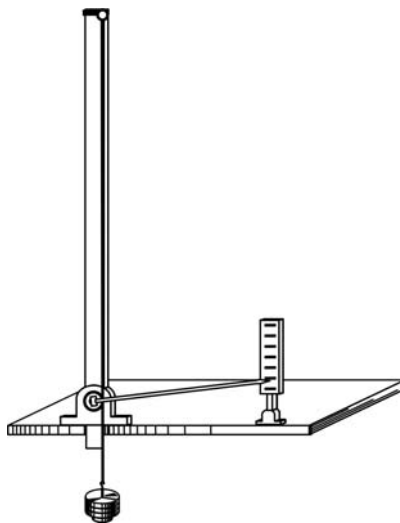


Рис. 7.11.
Растяжение медной проволоки.

7.4. Стрела прогиба.

Количественные соотношения для стрел прогиба балок демонстрируются при помощи установки, состоящей из шкалы с делениями, груза и двух штативов, в зажимах которых могут закрепляться один или оба конца длинной деревянной балки прямоугольного сечения с соотношением сторон 2 : 3 (см. рис. 7.12). Для демонстрации малых стрел прогиба в большой аудитории используются видеокамера и телевизионный монитор.

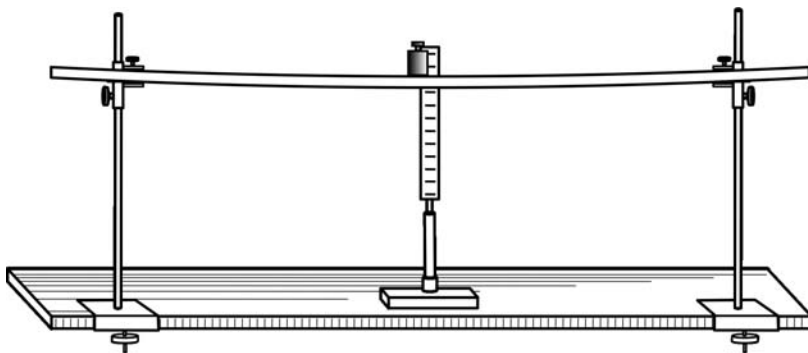


Рис. 7.12. Демонстрация стрелы прогиба балки.

Стрела прогиба u легкой горизонтальной балки прямоугольного сечения длиной l с вертикальной h и горизонтальной b сторонами, изготовленной из материала с модулем Юнга E , при закреплении одного конца («консоль») и приложении к другому концу силы P может быть определена по формуле: $u = \frac{4Pl^3}{Ebh^3}$. После поворота балки на 90° вокруг горизонтальной оси стрела прогиба уменьшается в $(b/h)^2 = 1,5^2 = 2,25$ раза.

При опоре балки на оба конца и приложении той же силы посередине стрела прогиба уменьшается по сравнению с консольным способом крепления в 16 раз, если концы свободно лежат на опорах, и в 64 раза, если концы закрепляются.

Наблюдаемые на установке стрелы прогиба при различных способах крепления балки в пределах ошибок согласуются с приведенными выше данными теоретического расчета. Балка длиной около 1 м изготовлена из бальсового дерева и имеет в сечении размер 14×21 мм. При нагружении гирькой массой 100 г для консольного способа крепления получаются стрелы прогиба около 40 и 80 мм (при двух возможных положениях сторон сечения h и b). При опоре на концы для второго положения сечения получаются стрелы прогиба около 5 мм (свободные концы балки) и около 1 мм (закрепленные концы).

Для качественной демонстрации зависимости стрелы прогиба от способа крепления концов балки можно использовать метровую стальную или деревянную линейку. Концы линейки кладут на подставку, а гирьку ставят на середину линейки. Если прижать оба конца линейки к подставке тяжелыми грузами, то стрела прогиба уменьшается. Если же прижать только один конец линейки, а грузик подвесить ко второму концу, то стрела прогиба резко увеличивается.

7.5. Прочность пустотелой трубки (опыт Умова).

Данный опыт, предложенный Н. А. Умовым¹, демонстрирует прочность балки на изгиб в зависимости от формы ее поперечного сечения. Для демонстрации берется лист бумаги, который сам по себе не обладает большой прочностью на изгиб и, будучи закреплен за

¹ Н. А. Умов (1846 – 1915) – русский физик, заведовал кафедрой физики в Московском университете.

один край (то есть консольно), гнется даже под собственным весом без какой-либо внешней нагрузки. Затем лист сворачивается в трубку (диаметром около 40 мм), которая просовывается в проволочное кольцо, снабженное крюком, и кладется концами на две опоры (см. рис. 7.13). Если постепенно увеличивать нагрузку на трубку, подвешивая на крюк грузы, то она может выдержать значительный вес: в зависимости от плотности используемой для опыта бумаги балка ломается при нагрузке от 1 до 2 кг.



Рис. 7.13. Опыт Н. А. Умова.

7.6. Изменение поперечного сечения образца при растяжении.

Демонстрируется уменьшение сечения цилиндрического куска резины при растяжении. Кусок толстой (диаметром 20-30 мм) вакуумной резиновой трубки длиной около 0,5 м подвешивается на штативе за верхний конец (см. рис. 7.14). На трубку плотно надето металлическое кольцо, удерживающееся силами трения. Если потянуть трубку рукой за нижний конец, то она растягивается, при этом ее диаметр уменьшается, и кольцо соскальзывает вниз. Затем трубку переворачивают и повторяют опыт, подвесив ее за другой конец.



Рис. 7.14. Изменение поперечного сечения образца при растяжении.

7.7. Зависимость упругих свойств от температуры (резина и стальная пружина).

Установка для демонстрации зависимости упругих свойств от температуры представляет собой весы, вместо одной из чашек которых к коромыслу прикрепляется в вертикальном положении либо резиновая лента, либо стальная пружина. Нижний конец ленты или пружины крепится к основанию весов, после

чего весы уравниваются грузами. Далее лента или пружина слегка подогреваются по всей длине газовой горелкой, и стрелка весов отклоняется, демонстрируя противоположное изменение упругих свойств резины и стали при нагревании: у резины упру-

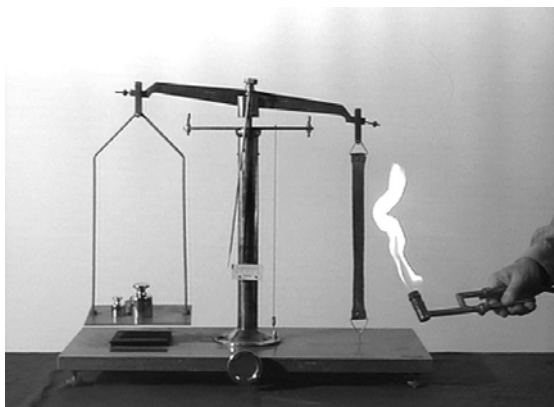


Рис. 7.15. Нагревание резины.

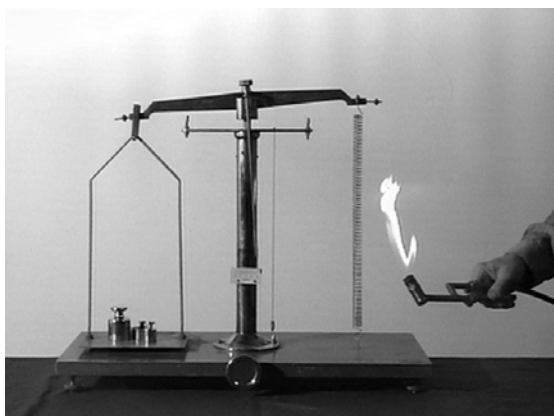


Рис. 7.16. Нагревание стальной пружины.

гость возрастает с ростом температуры, а у стали – уменьшается, что приводит к сокращению резиновой ленты и удлинению пружины при нагревании под действием постоянной нагрузки (см. рис. 7.15 и 7.16). После остывания стрелка весов возвращается к исходному положению, что говорит об отсутствии остаточных деформаций. При сильном локальном нагревании горелкой стальная пружина теряет упругие свойства и подвергается

необратимой пластической деформации – нагретый виток сильно растягивается и после остывания более не сжимается до исходного состояния.

7.8. Зависимость упругих свойств от времени воздействия; среда Максвелла² и среда Кельвина-Фохта³.

Деление веществ на упругие и пластичные (или вязкие) среды достаточно условно. Одно и то же вещество может одновременно проявлять и упругие, и пластические свойства, причем его поведение различается в зависимости от времени воздействия. В последнее время появилось много высокомолекулярных полимерных материалов, которые позволяют продемонстрировать этот эффект.

Для демонстрации используются два разноцветных шарика – светлый, скатанный из упругопластичной среды (среда Максвелла) и темный желеобразный, изготовленный из вязкоупругой среды (среда Кельвина-Фохта) (см. рис. 7.17). При медленном надавливании пальцем первый шарик ведет себя, как неупругая среда, не восстанавливает свою форму после снятия нагрузки и медленно растекается по столу, как жидкость. Напротив, второй шарик после надавливания восстанавливает свою форму и не растекается. При быстрых воздействиях, например, при ударе о стол после броска шариков, их поведение противоположно: первый хорошо отскакивает от стола, почти не теряя скорости, а второй расплющивается в лепешку, растекаясь по столу после удара, как упавшая капля жидкости, и только потом постепенно возвращается к исходной шарообразной форме.

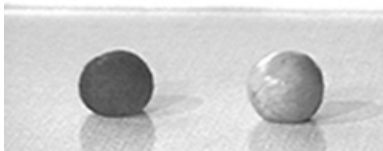


Рис. 7.17. Упругопластичный и вязкоупругий шарики.

² Дж. К. Максвелл (1831 – 1879) – британский физик и математик, член Лондонского королевского общества.

³ У. Томсон, лорд Кельвин (1824 – 1907) – британский физик, член Лондонского королевского общества; В. Фохт (1850 – 1919) – немецкий физик, работал в Геттингенском университете.

Глава 8 ГИДРО- И АЭРОСТАТИКА

Теоретический материал по данной теме курса общей физики изложен, например, в следующих учебниках: [28, лекция 16], [30, глава XII], [31, глава XV]. Ее изучение должно сопровождаться экспериментами, иллюстрирующими понятие давления, условия равновесия сплошной среды, законы Паскаля и Архимеда, условия плавания тел и изменение давления с высотой.

8.1. Давление внутри жидкости.

8.1.1. Мембранный манометр.

Тонкая резиновая пленка натянута на короткий цилиндрический стакан, соединенный трубкой с U-образным манометром. При погружении стакана в большой сосуд с водой манометр регистрирует увеличение давления, пропорциональное глубине погружения (см. рис. 8.1). Стакан установлен на оси, что позволяет поворачивать мембрану и исследовать распределение давления внутри жидкости в разных направлениях при постоянной глубине погружения. Демонстрируется независимость давления от направления, то есть справедливость закона Паскаля¹.

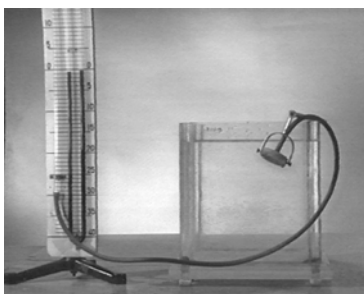


Рис. 8.1. Мембранный манометр.

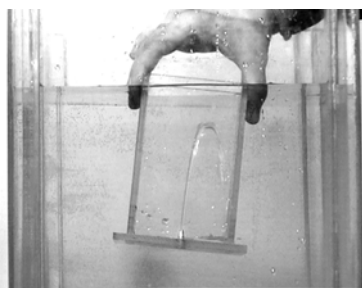


Рис. 8.2. Фонтан из дна сосуда.

8.1.2. Образование фонтана из отверстия в дне сосуда, погруженного в воду.

Открытый сверху прозрачный сосуд с маленьким отверстием в дне, заткнутым резиновой пробкой, частично погружают в большой прозрачный сосуд с водой (см. рис. 8.2). После удаления пробки из отвер-

¹ Б. Паскаль (1623 – 1662) – французский математик и физик.

ствия начинает бить фонтан воды, почти достигающий уровня воды в большом сосуде. Опыт демонстрирует наличие избыточного давления на некоторой глубине внутри жидкости.

8.2. Закон Паскаля.

8.2.1. Шар Паскаля.

Шар Паскаля (см. рис. 8.3) представляет собой сферический сосуд, снабженный со всех сторон в диаметральной плоскости соплами малого диаметра. К сосуду припаян насос в виде цилиндрической трубки с поршнем. После заполнения шара водой и надавливания на поршень из отверстий сопел вытекают струйки воды. Одинаковая длина струек доказывает справедливость закона Паскаля, то есть независимость давления от направления. Опыт полезно показать дважды, располагая сопла сначала в горизонтальной, а затем в вертикальной плоскости.

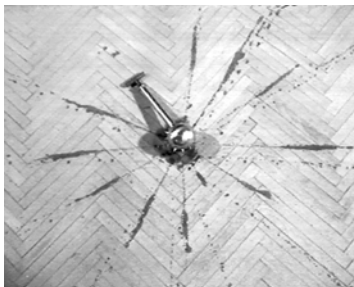


Рис. 8.3. Шар Паскаля.

8.2.2. Сосуд с манометрическими трубками.

В закрытый прозрачный сосуд через уплотнительные прокладки в крышке вставлены три открытые сверху стеклянные трубки, нижние концы которых находятся на одном уровне, но отогнуты в различных направлениях: вверх, вниз и вбок (см. левый рис. 8.4). В крышке сосуда имеется еще одно отверстие, через которое в сосуд можно наливать жидкость и нагнетать воздух. Сосуд заполняется подкрашенной жидкостью выше уровня отверстий в трубках, и внутрь него при помощи шприца нагнетается небольшое количество воздуха. После этого жидкость во всех

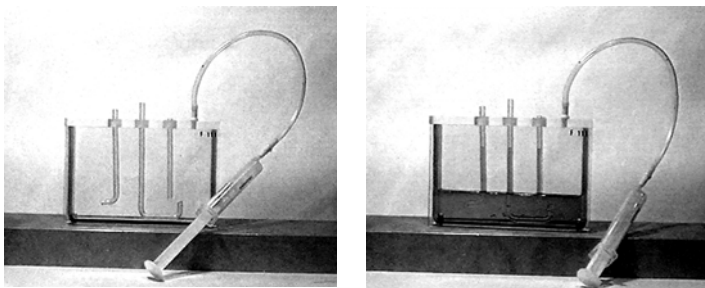


Рис. 8.4. Сосуд с манометрическими трубками.

трех трубках поднимается на одинаковую высоту, демонстрируя независимость давления от направления (см. правый рис. 8.4).

8.2.3. Гидравлический пресс и опыты с ним.

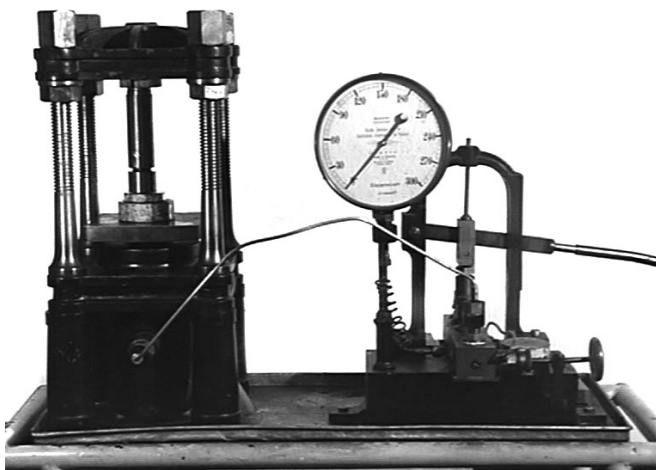


Рис. 8.5. Гидравлический пресс.

Одним из устройств, использующих закон Паскаля, является гидравлический пресс (см. рис. 8.5). Он состоит из двух сообщающихся цилиндрических сосудов – малого и большого диаметра. Сосуды заполнены машинным маслом и закрыты поршнями. Цилиндр малого диаметра снабжен клапанами и используется как насос. При надавливании рычагом на его поршень давление в системе повышается, и поршень рабочего цилиндра, который имеет большой диаметр, может со значительной силой давить на объект, помещаемый между ним и прочной станиной прибора. В технике такие прессы используются для штамповки деталей из металлов и пластмасс, а также для пресования различных материалов.

В нашем случае усилие прессы может достигать 15 Тонн. Это позволяет демонстрировать разрушение деревянных брусков при сдавливании не только поперек, но и вдоль волокон древесины, когда необходимое для превышения предела прочности усилие значительно больше. Демонстрируется также пластическая деформация и последующее растрескивание цилиндрического образца из оргстекла при сдавливании вдоль оси цилиндра. В последнем случае видно

(см. рис. 8.6), что плоскости растрескивания наклонены к оси примерно под углом 45° , при котором максимальны сдвиговые напряжения в образце. Можно продемонстрировать прессование различных рыхлых образцов, например, ваты, в специальных стальных пресс-формах.

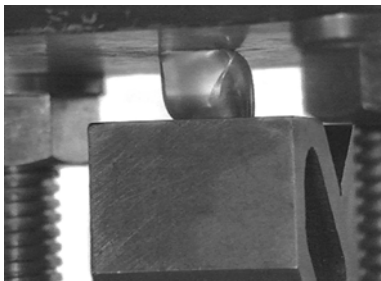


Рис. 8.6. Растрескивание цилиндрического образца.

8.3. Давление жидкости на стенки сосуда.

8.3.1. Сосуд Мариотта².

Сосуд Мариотта позволяет обеспечить постоянную скорость вытекания струек воды из сосуда. Для этого в сосуд с водой, в боковой стенке которого есть несколько маленьких отверстий, погружается сверху трубочка, пропущенная через герметичный сальник в горловине сосуда. Отверстия в стенке сосуда могут закрываться пробками. Скорость вытекания струйки воды из сосуда определяется разностью высот нижнего конца трубочки и отверстия, из которого вытекает струйка, и сохраняет постоянное значение до тех пор, пока трубочка остается погруженной в воду, поскольку из-за подсасывания воздуха внутрь сосуда при вытекании воды давление на нижнем конце трубочки постоянно и равно атмосферному. Из трубочки при этом выходят пузырьки воздуха, и хорошо заметно, что параболическая форма струи не изменяется с течением времени (см. рис. 8.7). Скорость вытекания легко регулируется перемещением трубочки вверх или вниз. Если конец трубочки находится на уровне или ниже соответствующего отверстия, то жидкость из него не вытекает. Когда конец трубочки находится выше уровня воды в сосуде, скорость струек по мере вытекания воды падает.



Рис. 8.7. Сосуд Мариотта.

² Э. Мариотт (1620(?) – 1684) – французский физик, член Парижской Академии наук.

8.3.2. Прибор Паскаля (гидростатический парадокс).

Прибор состоит из трех открытых сверху и снизу стеклянных сосудов – цилиндрического и двух усеченных конических (конусом вверх и конусом вниз), штатива и весов с плоской чашкой. Сосуды по очереди закрепляются в штативе таким образом, чтобы их открытые снизу основания упирались в чашку весов. На другую чашку помещаются гири. Сосуды имеют одинаковые площади оснований, которые должны быть тщательно отшлифованы для плотного прилегания к плоской чашке весов; для улучшения уплотнения можно использовать смазку. При проведении эксперимента в сосуды наливается вода и демонстрируется, что отрыв чашки весов от нижнего основания сосудов происходит при разной массе налитой воды – у сосуда с конусом, сужающимся вверх, она меньше массы гирь на другой чашке весов, у сосуда конусом, сужающимся вниз, – больше, а у цилиндрического – равна ей. В то же время отрыв происходит при одинаковом уровне воды во всех трех сосудах, что доказывает то, что давление на дно сосуда определяется не массой, а уровнем воды, налитой в сосуд. Демонстрация этого эксперимента в таком виде требует тщательной подготовки и занимает много времени.

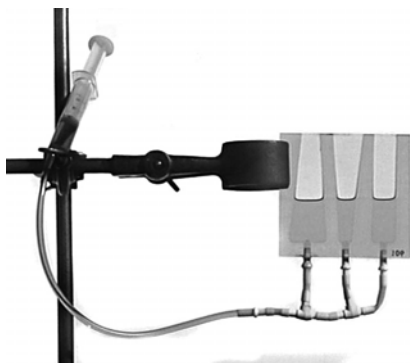


Рис. 8.8. Диапанель для демонстрации гидростатического парадокса.

Упрощенный вариант демонстрации представляет собой прозрачную диапанель, внутри которой имеются три полости соответствующей формы, соединенные между собой в нижней части трубками (см. рис. 8.8). Диапанель устанавливается в вертикальном положении, внутрь нее напускается подкрашенная жидкость, затем панель с зер-

калами для поворота светового потока устанавливается на кодоскоп, и в проекции на экран демонстрируется, что уровень жидкости во всех трех сосудах одинаков при одинаковом давлении в их нижней части, хотя количества жидкости в сосудах различны. Давление жидкости и ее уровень в сосудах можно изменять при помощи шприца, из которого жидкость напускается снизу в диапанель через гибкую трубку. Вместо кодоскопа можно использовать видеокамеру с проектором.

8.4. Сжимаемость жидкости.

8.4.1. Пьезометр Вайнгольда³.

Пьезометр Вайнгольда служит для демонстрации сжимаемости жидкостей (идея опыта была предложена в свое время Эрстедом⁴) и устроен следующим образом (см. рис. 8.9). В замкнутый прочный цилиндр с прозрачными стеклянными стенками можно накачивать насосом воздух, создавая давление в 2–3 атмосферы. Внутри цилиндра закреплены два вертикально расположенных стеклянных капилляра длиной около 100 мм и диаметром около 1 мм: один запаян сверху и заполнен воздухом, а к другому сверху припаяна стеклянная сфера объемом около 100 см^3 , заполненная исследуемой жидкостью, в данном случае – дистиллированной водой. Нижние концы обоих капилляров погружены в чашку со ртутью, которая заполняет и часть объема второго капилляра. Первый капилляр служит для измерения давления воздуха в цилиндре: при повышении давления до двух атмосфер воздух в этом капилляре сжимается вдвое, и ртуть поднимается на половину его высоты. При этом уровень ртути во втором капилляре поднимается всего на ~ 5 мм, так что сжимаемость воды, то есть относительное уменьшение ее объема при увеличении давления на одну атмосферу, очень мала и составляет примерно $1/20000$.

Дистиллированная вода, используемая в опыте, должна быть тщательно обезгажена путем длительного кипячения. Пьезометр весьма чувствителен к нагреванию, поэтому при проецировании на экран между прибором и фонарем надо устанавливать тепловой фильтр, например, кювету с водой.



Рис. 8.9. Пьезометр Вайнгольда.

³ А. Ф. Вайнгольд (1841 – 1917) – немецкий физико-химик, работал в гг. Лейпциг и Хемниц.

⁴ Г. Х. Эрстед (1777 – 1851) – датский физик, член Лондонского Королевского общества и Парижской Академии.

8.4.2. Искра в жидкости.

Малую величину сжимаемости жидкости, то есть ее практическую несжимаемость, можно продемонстрировать при помощи следующего опыта. Конденсатор большой емкости (около 100 мкФ) заряжается от высоковольтного источника питания до напряжения в 2-3 кВ и подключается к двум близко расположенным электродам, между которыми проскакивает искра и выделяется запасенная в конденсаторе энергия. Электроды опущены в стеклянный стакан (см. рис. 8.10). Если стакан пуст, то при разряде с ним ничего не происходит, а если заполнить его водой, то возникающая в ней после проскакивания искры ударная волна разрушает стакан. Опыт продельвается также с алюминиевым цилиндром (корпусом от электролитического конденсатора), заполненным водой. После разряда он раздувается и лопаается. Эксперимент демонстрирует принципы электроэрозионной обработки материалов и штамповки деталей при помощи ударных волн в жидкости, а также работу струйных принтеров, где капли чернил выбрасываются из сопла при проскакивании микроскопических искр внутри чернил.

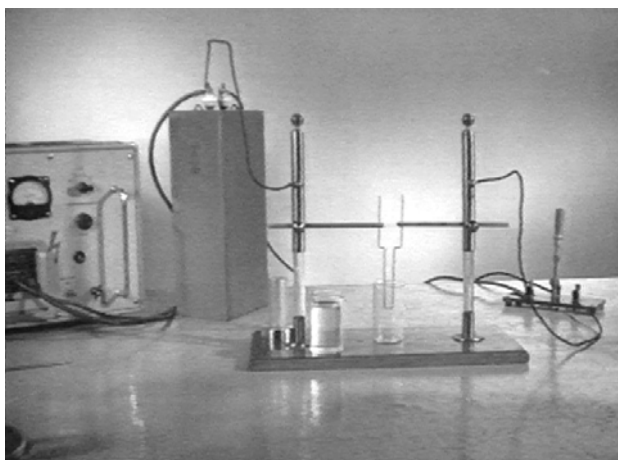


Рис. 8.10. Искра в жидкости – общий вид установки.

8.4.3. Простреливание сосуда с водой.

Два пластмассовых стакана, наполовину заполненных водой, ставят на подставку и простреливают с расстояния 2-3 м пулями из пневматической винтовки (см. рис. 8.11). Вначале стреляют по одному из стаканов выше уровня воды: при этом в нем появляются две дырки, но сам он не разрушается. После выстрела по другому стака-



Рис. 8.11. Простреливание сосуда с водой.

ну ниже уровня воды он лопается, поскольку при попадании в него пули вода не успевает подняться и сжимается на величину объема пули, что приводит к резкому возрастанию давления на стенки стакана и его разрыву. При этом в месте попадания на стенке стакана остается отпечаток свинца, как при ударе пули о твердую преграду.

При показе демонстрации надо соблюдать особую осторожность. Стрелять следует в сторону стены аудитории, противоположной зрителям; позади стакана надо поставить пулеулавливатель, например, картонную коробку, заполненную листами мягкого картона. Ни в коем случае нельзя стрелять вхолостую – это приводит к порче винтовки!

8.5. Закон Архимеда.

8.5.1. «Ведерко» Архимеда.

Справедливость закона Архимеда может быть легко продемонстрирована на весах при помощи так называемого «ведерка» Архимеда (см. рис. 8.12), которое представляет собой два тонкостенных цилиндра, плотно вставляющихся друг в друга, так что внутренний объем внешнего цилиндра-«ведерка» точно равен объему вставленного в него закрытого цилиндра. Оба цилиндра подвешиваются к коромыслу весов друг над другом и уравниваются гириями, помещаемыми на другую чашку весов. Нижний закрытый цилиндр помещается в высокий стакан, в который наливается вода до тех пор, пока она не накроет весь нижний цилиндр. Равновесие весов при этом за счет появления вытал-

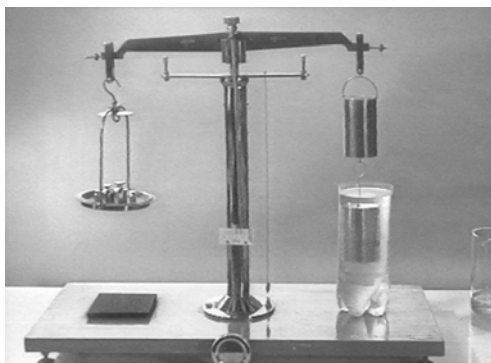


Рис. 8.12. «Ведро» Архимеда.

веса, то есть что справедлив закон Архимеда в его оригинальной формулировке.

8.5.2. Демонстрация по Эйхенвальду⁵ на весах с гидростатическим взвешиванием.

Одним из стандартных методов определения объема и плотности тел сложной формы является гидростатическое взвешивание, основанное на законе Архимеда. Принцип таких измерений можно продемонстрировать следующим образом. Возьмем в качестве исследуемого тела, например, 100-граммовую гирьку из стандартного набора

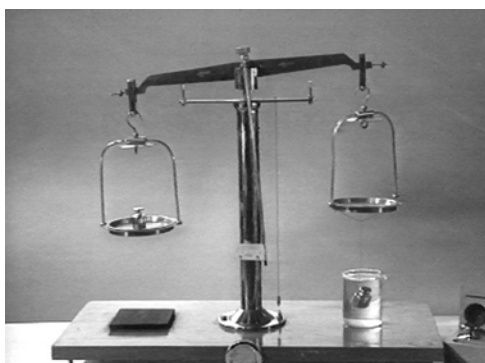


Рис. 8.13. Гидростатическое взвешивание.

разновесов. Поместим ее на одну чашку весов, а на другую поставим вторую такую же гирьку. Весы при этом будут уравновешены, то есть масса гирьки равна 100 г. Под чашкой весов, на которой находится исследуемая гирька, поставим стакан с дистиллированной водой, плотность которой известна и составляет около 1 г/см^3 , и опустим гирьку в

квивающей силы нарушается, т.е. погруженный цилиндр «теряет в весе». Затем верхнее «ведерко», находящееся выше уровня воды в стакане, заполняется доверху водой, после чего равновесие весов восстанавливается. Это говорит о том, что «тело, погруженное в жидкость, теряет в своем весе столько, сколько весит вытесненная им вода», то есть что справедлив закон Архимеда в его оригинальной формулировке.

⁵ А. А. Эйхенвальд (1863 – 1944) – русский физик, преподавал в Московском университете.

воду на тонкой проволоке, прикрепленной к чашке. Равновесие весов нарушится (см. рис. 8.13), и его можно восстановить, добавив на данную чашку разновесы. В данном случае оказывается, что их масса составляет около 11,2 г, то есть объем гирьки равен $11,2 \text{ см}^3$. Таким образом, плотность гирьки равна $100/11,2 \approx 8,9 \text{ г/см}^3$ – это плотность латуни, из которой изготовлена гирька.

8.5.3. «Присасывание» тела к дну сосуда.

Выталкивающая сила (сила Архимеда) действует на тело, погруженное в жидкость, только в том случае, если жидкость окружает тело со всех сторон, в том числе и снизу. В противном случае может наблюдаться явление «присасывания» тела к дну сосуда. Это можно продемонстрировать при помощи парафиновой шайбы с гладкой нижней поверхностью.

Шайба опускается в прозрачный сосуд с водой, на дне которого лежит гладкая стеклянная пластина из зеркального стекла. Плотность парафина несколько меньше плотности воды, поэтому шайба плавает на поверхности. Если погрузить шайбу на дно, плотно прижав ее к стеклянной пластине и выдавив из-под нее всю воду (это можно сделать, так как парафин не смачивается водой), то шайба под действием давления находящегося над ней столба воды «присосется» к дну сосуда (см. рис. 8.14). Ее можно двигать по дну проволоочным крючком – шайба не будет всплывать. Для того чтобы оторвать шайбу от дна и заставить ее вновь всплыть, требуется приложить некоторое усилие. Отметим, что явление, подобное описанному, может возникать, когда подводная лодка ложится на грунт. После этого ей бывает достаточно трудно оторваться от дна и всплыть.

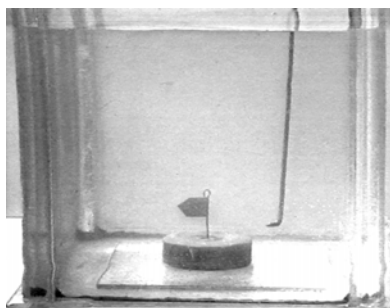


Рис. 8.14. «Присасывание» парафиновой шайбы к дну сосуда.

8.6. Распределение давления в жидкости при её вращении.

Следующие эксперименты демонстрируют распределение давления в жидкости, находящейся в неоднородном потенциальном

поле, складывающемся из поля центробежных сил инерции и поля силы тяжести.

8.6.1. Жидкость в цилиндрическом сосуде (см. также демонстрацию 5.4.3).

Распределение давления во вращающейся жидкости можно продемонстрировать при помощи прозрачного стеклянного цилиндра с водой, установленного на валу центробежной машины. При раскручивании цилиндра жидкость за счет вязкого трения о стенки также постепенно раскручивается, и ее первоначально плоская свободная поверхность в установившемся режиме приобретает форму параболоида вращения (см. рис. 8.15). На оси

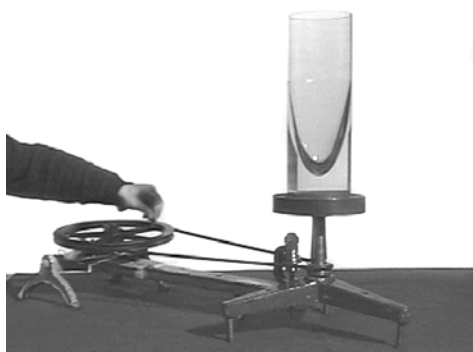


Рис. 8.15. Вращение жидкости в цилиндрическом сосуде.

центробежной машины столб воды имеет минимальную высоту, а при удалении от оси его высота растет пропорционально квадрату расстояния. Это говорит о том, что давление внутри вращающейся жидкости минимально на оси вращения и нарастает по параболическому закону по мере удаления от этой оси. Если увеличивать скорость вращения

жидкости, то параболоид вытягивается и становится более «острым», достигая при некоторой угловой скорости дна сосуда. Параболическую форму поверхности вращающейся жидкости можно продемонстрировать также и в плоском сосуде.

8.6.2. Легкий и тяжелый шарики в изогнутой трубке с маслом на центробежной машине (см. также демонстрацию 5.4.10).

Распределение давления во вращающейся жидкости можно продемонстрировать и при помощи закрытой на концах изогнутой трубки, заполненной прозрачным маслом и помещенной на валу центробежной машины. В трубке находятся два шарика – тяжелый свинцовый и легкий пенопластовый. Пока трубка покоится, легкий шарик находится наверху, у конца трубки, а тяжелый – внизу, около изгиба трубки. При раскручивании трубки тяжелый

шарик «тонет» (см. рис. 8.16), то есть движется в область с максимальным давлением – вверх, к концу трубки, а легкий движется в направлении, противоположном градиенту давления, то есть в область с минимальным давлением – вниз, к оси вращения. После остановки вращения тяжелый шарик снова опускается вниз, а легкий всплывает вверх по трубке.



Рис. 8.16. Шарик в трубке с маслом на валу центробежной машины.

8.7. Плавание тел.

8.7.1. «Картезианский водолаз».

Тела, погруженные в жидкость, плавают в том случае, если их средняя плотность равна плотности жидкости. Плаучесть тела можно регулировать, изменяя его среднюю плотность. Например, в подводных лодках это делают, продувая балластные цистерны. Этот принцип плавания тел под водой можно продемонстрировать при помощи устройства, называемого «картезианским водолазом»⁶.

Прибор устроен следующим образом (см. рис. 8.17). В герметично закрытом резиновой мембраной стеклянном цилиндре, наполненном водой, плавает перевернутая пробирка, частично заполненная воздухом. В нижней части пробирки через затыкающую ее пробку пропущена стеклянная трубка с оттяжками, кото-

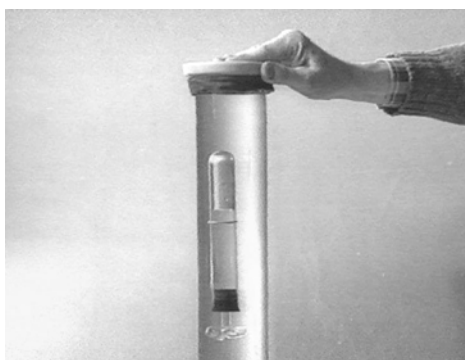


Рис. 8.17. «Картезианский водолаз».

⁶ Назван по имени Р. Декарта (1596 – 1650), французского математика и физика.

рые изогнуты под прямым углом и образуют сопла сегнера колеса (см. демонстрацию 5.10.4). При нажатии на мембрану сверху давление внутри жидкости увеличивается, жидкость затекает в пробирку, средняя плотность пробирки с жидкостью увеличивается, и «водолаз» тонет. При уменьшении давления на мембрану жидкость вытекает из пробирки, объем воздуха в ней увеличивается, и «водолаз» всплывает.

Истечение воды из сопел сегнера колеса при всплытии «водолаза» приводит к его закручиванию. Этот эффект используют для создания забавной игрушки. «Водолаз» выдувается из стекла в виде полого чертика, а трубочка, через которую втекает и вытекает вода, делается в виде хвоста, обернутого вокруг тела чертика. Если поместить такую игрушку в закрытую пластиковую бутылку из-под газированной воды, наполненную водой, то при сдавливании бутылки чертик будет тонуть, а при уменьшении давления на бутылку он будет всплывать и при этом быстро вращаться. Следует отметить, что затекание жидкости внутрь «картезианского водолаза» не приводит к его закручиванию.

8.7.2. Прогибание поверхности воды под металлическим диском.

Обычно считается, что тела плавают на поверхности жидкости, если их средняя плотность меньше плотности жидкости. При этом влиянием малых сил поверхностного натяжения пренебрегают. Однако иногда они могут играть важную роль. Примером является плавание на поверхности воды стальной иголки, смазанной маслом и не смачиваемой из-за этого водой. Поверхность прогибается, увеличивая объем вытесненной несмачиваемой иголкой воды и обеспечивая ее плавучесть, хотя плотность иголки значительно превышает плотность воды.



Рис. 8.18. Плавание металлического диска с грузом.

Другим примером, более подходящим для демонстрации в большой аудитории, является следующий опыт. На поверхность воды, налитой в широкую кювету, кладут тонкий алюминиевый диск диаметром около 30 см, покрытый для уменьшения смачивания тонким слоем масла или парафина. Диск прогибает поверхность воды

и плавает, даже если поставить на его центр груз массой 50-100 г (см. рис. 8.18). Подсчет показывает, что основную роль в этом случае играют выталкивающие силы, возникающие из-за прогибания поверхности жидкости, а силы поверхностного натяжения явно недостаточны для удержания диска с грузом на плаву. Для аккуратного опускания диска на воду следует использовать трифилярный подвес, закрепляя его нити симметрично на краю диска; при этом надо следить, чтобы под диском не оставалось воздушных пузырей.

8.7.3. Шарик Галилея.

Восковой шарик (диаметром около 5 см) имеет плотность $0,95-0,99 \text{ г/см}^3$ и плавает на поверхности воды. Если внутрь него вдавить металлический грузик, чтобы средняя плотность шарика чуть-чуть превысила плотность воды, то шарик тонет, если его бросить в сосуд с водой. Если же аккуратно положить шарик на поверхность воды, которая не смачивает воск, то шарик останется на плаву, немного прогибая поверхность воды вокруг себя. Утонувший в большом сосуде с водой шарик можно поднять на поверхность, не прикасаясь к нему, если погрузить в воду перевернутый вверх дном стакан и накрыть им шарик, лежащий на дне (см. рис. 8.19). При этом шарик начинает плавать на поверхности воды внутри стакана, и его можно аккуратно поднять до уровня воды в сосуде, а затем осторожно убрать стакан. При этом, чтобы шарик снова не утонул, надо не создавать больших волн на поверхности. Поэтому для показа опыта удобно использовать химический стакан, имеющий оттянутый «носик» – такой стакан легко отрывается от поверхности воды, почти не возмущая ее.

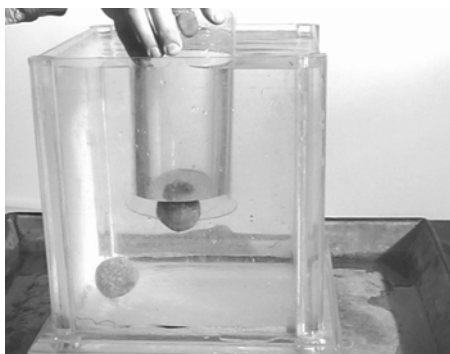


Рис. 8.19. Шарик Галилея.

8.7.4. Остойчивость, метацентрическая высота.

Условия устойчивого плавания тел на поверхности и внутри жидкости существенно отличаются. Если тело полностью погружено в жидкость, то оно будет устойчиво («стойчиво») плавать, только если его центр масс расположен ниже центра давления –

точки приложения силы Архимеда, находящейся в центре масс вытесненной жидкости. При плавании тел на поверхности жидкости это условие не является обязательным: плавание может быть устойчивым, даже если центр масс тела лежит выше центра давления. Теория устойчивости кораблей при качке была разработана известным русским ученым, академиком А. Н. Крыловым (1863 – 1945). Для того чтобы тело плавало устойчиво, при качке должен возникать момент сил, возвращающий его к положению равновесия. При наклоне плавающего тела центр давления смещается, и момент сил будет возвращающим, если линия приложения силы Архимеда пересекает линию, проведенную вертикально через центр масс при не отклоненном положении тела, выше центра масс. Точка пересечения этих линий называется «метацентром», а ее высота над центром масс тела – «метацентрической высотой». Таким образом, плавание будет устойчивым, если метацентрическая высота положительна. Ее величина определяется соотношением размеров тела и положением его центра масс, а для однородных тел – соотношением размеров и отношением их плотности к плотности жидкости.

Для демонстрации зависимости устойчивого положения плавающего тела от соотношения его размеров используются деревянные цилиндры одинаковой высоты и плотности, но разного диаметра. Цилиндры вертикально опускаются в воду, налитую в большой прозрачный сосуд (см. рис. 8.20). Они устойчиво плавают в разных положениях: если диаметр цилиндра заметно превышает его высоту, после отпускания его ось остается вертикальной, а если

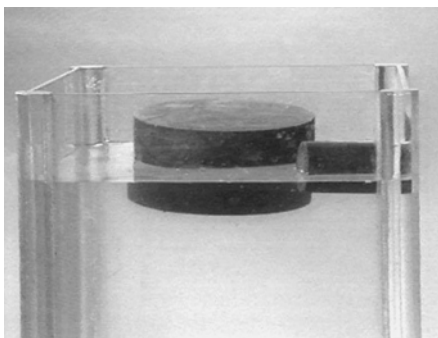


Рис. 8.20. Устойчивое плавание цилиндров с разным соотношением диаметра и высоты.

диаметр меньше высоты – ось цилиндра принимает горизонтальное положение. Это объясняется тем, что при наклоне от вертикального положения у первого цилиндра центр давления смещается сильно, и метацентрическая высота положительна, а у второго – слабо, и она отрицательна. При горизонтальном положении оси второго цилиндра ее наклон приводит уже к сильному изменению по-

ложения центра давления, и метацентрическая высота становится положительной, а плавание в таком положении – устойчивым.

Зависимость метацентрической высоты от положения центра масс плавающего тела демонстрируется при помощи цилиндрического поплавка, вдоль оси которого продет стержень. По концам стержня, выступающим из поплавка, можно передвигать два одинаковых грузика и закреплять их в разных положениях (см. рис. 8.21).

Если грузики расположены симметрично у концов стержня, то поплавок устойчиво плавает в горизонтальном положении. Если же сместить один из грузиков к торцу цилиндра, то центр масс поплавка сместится в сторону от центра давления, возникнет опрокидывающий момент сил (метацентрическая высота станет отрицательной), и поплавок повернется и займет

вертикальное устойчивое положение. Опыт иллюстрирует опасность перемещения массивных грузов на кораблях, особенно если груз находится на палубе: при этом метацентрическая высота резко изменяется, и корабль может потерять остойчивость и перевернуться.

8.7.5. Непотопляемость корабля.

Данный опыт позволяет продемонстрировать «непотопляемость корабля» при получении пробоины в случае сохранения его остойчивости. Метод, предложенный академиком А. Н. Крыловым, иллюстрируется на модели, представляющей собой прозрачный цилиндрический сосуд, разделенный на три одинаковых отсека (см. рис. 8.22).

Отсеки имеют отверстия, плотно закрываемые резиновыми пробками. Пустой сосуд устойчиво плавает в горизонтальном положении. Если



Рис. 8.21. Демонстрация зависимости метацентрической высоты от положения центра масс плавающего тела.

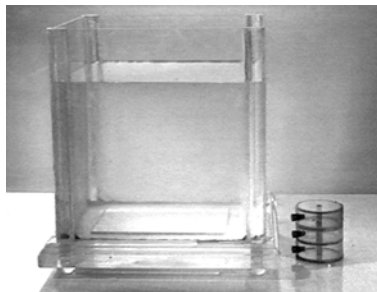


Рис. 8.22. Непотопляемость корабля.

образовалась «пробоина», и один из крайних отсеков заполнился водой, цилиндр теряет остойчивость и переворачивается в вертикальное положение. Чтобы вернуть ему остойчивость, заполняют водой другой крайний отсек. Тогда, потеряв в плавучести, цилиндр возвращается в горизонтальное положение. Так же поступают в случае получения пробоины кораблем, разделенным на герметичные отсеки: затопляют симметричный отсек, корабль не теряет остойчивости и может быть отбуксирован в порт для ремонта.

8.8. Атмосферное давление.

8.8.1. Опыт Торричелли⁷.

В классическом опыте Торричелли пустота над уровнем ртути в запаянном конце трубки возникает лишь в том случае, когда длина трубки в миллиметрах превышает атмосферное давление, выраженное в миллиметрах ртутного столба (см. рис. 8.23).

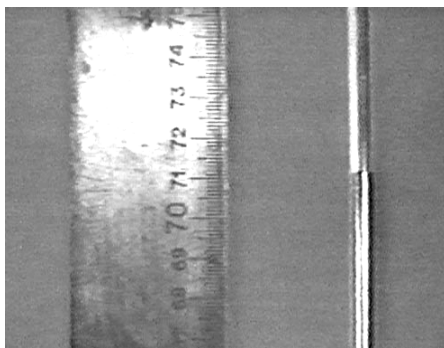
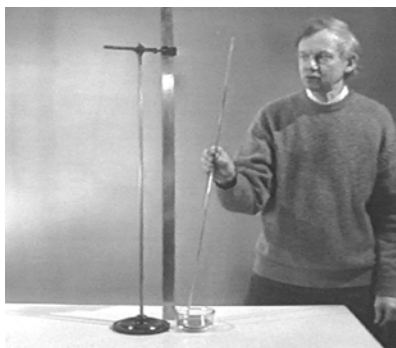


Рис. 8.23. Опыт Торричелли демонстрирует М. В. Семенов.

Одним из вариантов опыта является демонстрация U-образного ртутного манометра высотой около 200 мм под стеклянным колоколом форвакуумного насоса (см. рис. 8.24). Пока не включена откачка, пустое пространство над уровнем ртути в трубке отсутствует. После включения насоса давление под колоколом падает, и когда оно достигнет разности высот столбиков ртути в сообщающихся трубках манометра, над ртутью в первоначально полностью заполненной трубке появляется «торричеллиева пустота», объем которой растет по мере откачки пространства под колоколом. После выключения насоса при медленном напуске воздуха

⁷ Э. Торричелли (1608 – 1647) – итальянский математик и физик.

под колокол наблюдается увеличение разности высот ртути в коленах манометра – до тех пор, пока пустота не исчезнет.

Проведение опытов со ртутью на лекциях не разрешается по правилам техники безопасности, поэтому указанные демонстрации могут быть показаны только в видеозаписи. Величина атмосферного давления может быть измерена на лекции при помощи точного барометра-анероида, имеющегося в Кабинете физических демонстраций физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

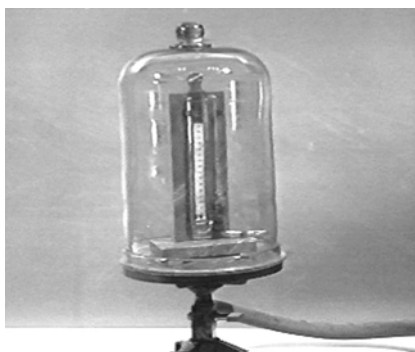


Рис. 8.24. U-образный манометр под колоколом форвакуумного насоса

8.8.2. Магдебургские полушария.

Опыт, доказывающий большую величину атмосферного давления, был впервые проведен в 1654 году в Германии немецким



Рис. 8.25. Опыт с Магдебургскими полушариями (старинная гравюра).

ученым и инженером Отто фон Герике⁸ (см. рис. 8.25). При помощи сконструированных им насосов он откачал воздух между двумя герметичными полушариями диаметром около 1 м, плотно пригнанными друг к другу и соединенными через уплотнительную прокладку. Далее полушария пытались оторвать друг от друга при помощи лошадей, которые растягивали их в разные стороны. Даже 4 пары лошадей с каждой стороны не смогли этого сделать, пока внутренний объем полушарий не был сообщен с атмосферой через специальный клапан.

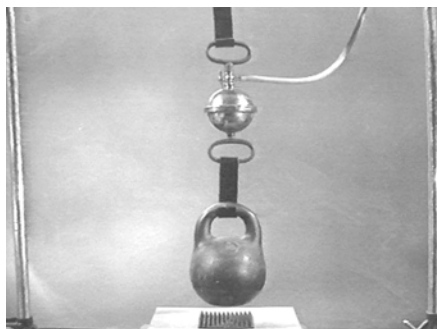


Рис. 8.26. Современный вариант опыта с Магдебургскими полушариями.

В Кабинете физических демонстраций физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова для проведения данного опыта используются полушария диаметром около 12 см, так что предельная нагрузка, еще не отрывающая их друг от друга, составляет примерно 100 кг. На одном из полушарий имеется кран для откачки и последующего напуска воздуха. Стык полушарий про-

мазывается вакуумной смазкой, затем они соединяются, подвешиваются на штатив и откачиваются форвакуумным насосом. После откачки к нижнему полушарию подвешивается двухпудовая гиря (32 кг, см. рис. 8.26), и она висит до тех пор, пока между полушариями не будет напущен воздух. При проведении опыта на небольшом расстоянии под гирей устанавливается резиновая прокладка, амортизирующая удар при падении гири.

8.8.3. Раздавливание банки атмосферным давлением.

Красивый опыт по действию атмосферного давления, описанный в свое время в книге Я. И. Перельмана⁹ «Занимательная физика», можно продемонстрировать, вскипятив воду в металлической банке, которую можно плотно закрыть крышкой. Для прове-

⁸ О. фон Герике (1602 – 1686) – немецкий физик, с 1646 г. бургомистр Магдебурга (Германия).

⁹ Я. И. Перельман (1882 – 1942) – российский, советский учёный, популяризатор физики, математики и астрономии

дения опыта годятся, например, двухсотграммовые жестяные банки из-под растворимого кофе. Для хорошего уплотнения крышка банки смазывается вакуумной смазкой.

В банку наливается небольшое количество воды, и она нагревается горелкой. Когда вода закипит, и ее пары полностью вытеснят весь воздух из банки, нагрев прекращается, и банка плотно закрывается крышкой. Затем банку поливают холодной водой, водяные пары в ней конденсируются, и давление внутри резко падает. Если в банке практически не осталось воздуха, то давление в ней после охлаждения до комнатной температуры может уменьшиться в несколько десятков раз. В результате банка сплющивается атмосферным давлением (см. рис. 8.27).

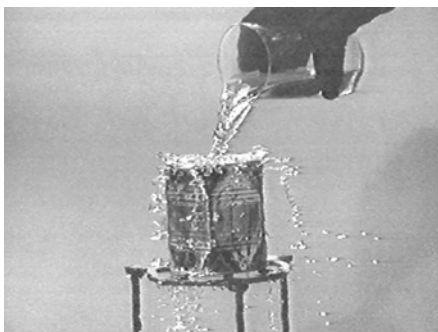


Рис. 8.27. Сплющивание банки атмосферным давлением.



Рис. 8.28. Переворачивание стакана с водой, накрытого бумагой.

8.8.4. Опыт с переворачиванием стакана с водой, накрытого бумагой.

Простой опыт, демонстрирующий наличие атмосферного давления, заключается в переворачивании полного стакана с водой, накрытого куском плотной вошеной бумаги. При этом вода из стакана не выливается, поскольку на бумагу снизу действует сила атмосферного давления (см. рис. 8.28). Силы поверхностного натяжения в данном случае не могут удерживать бумагу, поскольку она покрыта воском и не смачивается водой. Для большей эффективности на дно стакана перед показом опыта можно положить небольшую гирьку или десяток монет. После переворачивания они окажутся на бумаге, которая, несмотря на это, будет держаться на стакане.

8.8.5. Разрывание бумаги, накрывающей откачиваемый цилиндр.

Металлический или стеклянный цилиндр, открытый с одного конца, снабжается на другом конце трубкой, к которой можно присоединять шланг, идущий к форвакуумному насосу. Цилиндр накрывается листом плотной бумаги, которая прихватывается кольцевой резинкой по его периметру. После включения насоса бумага втягивается внутрь цилиндра и разрывается, демонстрируя наличие атмосферного давления, действующего на нее снаружи.

8.8.6. Перекачка воды и раздувание резинового шарика под колоколом воздушного насоса.

В стеклянную колбу, частично заполненную подкрашенной жидкостью, вставлена через пробку изогнутая трубка, одним концом упирающаяся в дно колбы, а другим – в дно пустого стакана, в который она опущена. К середине трубки для увеличения наглядности опыта привязан слабо надутый завязанный воздушный шарик. Вся система накрывается прозрачным стеклянным колоколом, из-под которого можно откачивать воздух форвакуумным насосом (см. рис. 8.29). После

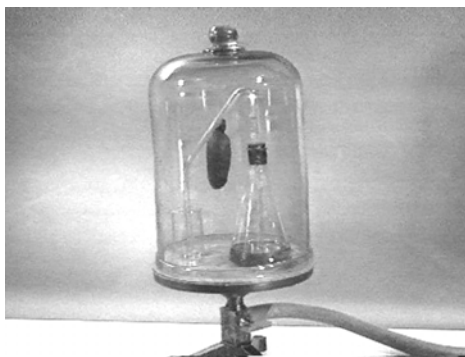


Рис. 8.29. Перекачка воды под колоколом форвакуумного насоса.

начала откачки воздух, остающийся в колбе, выжимает жидкость через трубку в стакан, а воздушный шарик раздувается; после окончания откачки воздух, напускаемый под колпак, перегоняет жидкость обратно из стакана в колбу и сжимает шарик. Демонстрацию опыта полезно повторить несколько раз.

8.8.7. Зависимость давления от высоты.

В длинный цилиндрический стеклянный сосуд с небольшими отверстиями у концов через припаянную посередине трубку напускается метан из газовой сети. Выходящий из отверстий газ поджигается. Пока сосуд горизонтален, длина языков пламени одинакова. Если сосуд наклонить, то за счет разницы плотностей воздуха и

метана (метан примерно вдвое легче воздуха) длина языков пламени станет неодинаковой. Разность давлений внутри и снаружи сосуда, от которой зависит скорость выхода газа, будет на разных концах сосуда различна: внизу меньше, чем при горизонтальном положении сосуда, поскольку давление воздуха нарастает при уменьшении высоты быстрее, чем у метана, а наверху больше, поскольку давление метана при увеличении высоты падает медленнее, чем у воздуха. Поэтому на нижнем конце сосуда язык пламени при наклоне уменьшается, а на верхнем – увеличивается (см. рис. 8.30); затем сосуд вновь приводится в горизонтальное положение, и опыт повторяется с наклоном сосуда в другую сторону.

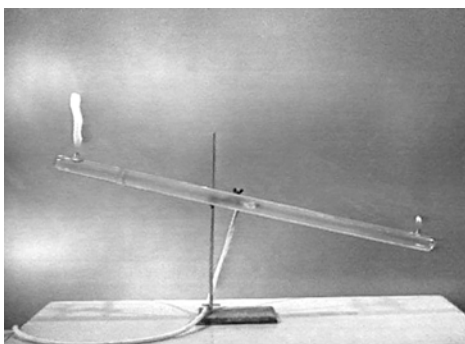


Рис. 8.30. Зависимость давления газа от высоты

Демонстрация используется также при чтении раздела «Молекулярная физика» курса общей физики.

8.8.8. Подъём мыльных пузырей, заполненных метаном.

Возникновение

подъемной силы, действующей на мыльный пузырь, заполненный метаном, можно по аналогии с предыдущей демонстрацией объяснить тем, что разность давлений легкого метана и вдвое более тяжелого воздуха на верхней поверхности пузыря больше, чем на нижней. Это приводит к

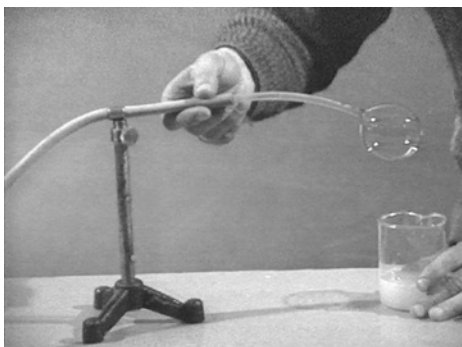


Рис. 8.31. Мыльные пузыри с метаном.

появлению направленной вверх суммарной силы, действующей на оболочку пузыря, и к подъему пузыря в воздухе. Пузыри выдуваются из мыльного раствора через трубку, присоединенную к газовой сети (см. рис. 8.31). После демонстрации полета пузырей

можно поднести к одному из них зажженную зажигалку и наблюдать вспышку сгорающего в воздухе метана, находившегося внутри мыльного пузыря.

8.8.9. Газовый сифон.

Тяжелые газы, попадающие в атмосферу, могут накапливаться в низинах, подземных выработках, коммуникациях и т.д. Особенно это касается углекислого газа, который ядовит и не поддерживает ни жизни, ни горения. Поэтому все места возможного скопления опасных газов должны хорошо проветриваться. Опыт, демонстрирующий перетекание углекислоты в низкие места, проводится следующим образом.

Два цилиндрических стеклянных сосуда устанавливаются на разной высоте и соединяются сифонной трубкой; в верхний сосуд напускается углекислый газ из баллона. Когда уровень углекислоты, которая тяжелее воздуха, достигает сгиба сифона на краю верхнего сосуда, подача газа прекращается, и он постепенно перетекает через сифон в нижний сосуд. Чтобы увидеть, как это происходит, наверху вблизи сгиба сифонной трубки помещается горящая свечка, и в нижний сосуд опускается палочка с прикрепленными к ней на разной

высоте тремя горящими свечками: по мере подъема уровня углекислоты в сосуде свечки по очереди гаснут (см. рис. 8.32). После продувки нижнего сосуда воздухом опыт повторяется, но перетекание газа фиксируется уже не при помощи свечек, а визуально, при освещении установки светом вольтовой дуги, поскольку показатели преломления воздуха и углекислого газа заметно отличаются.

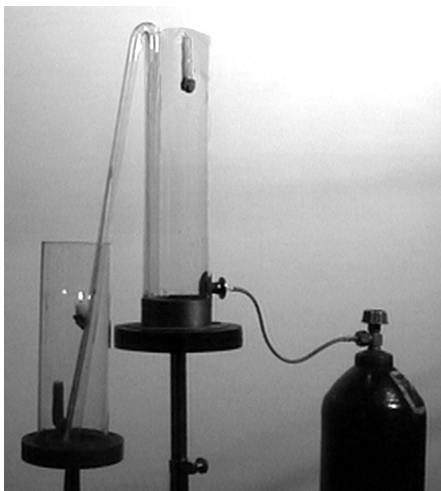


Рис. 8.32. Газовый сифон.

8.8.10. Плавание легкого «судна» в кювете с тяжелым газом.

Если газ имеет плотность, значительно превышающую плотность воздуха, то можно добиться плавания легких предметов в прозрачной кювете с таким газом. В качестве этого газа можно использовать, например, хладагенты типа фреона или так называемый «электрический газ» (SF_6). Они не горючи, не ядовиты и относительно недороги. Кювета заполняется газом из баллона почти доверху, после чего в нее помещают надутый воздухом резиновый шарик или «судно», сделанное из легкой бытовой алюминиевой фольги, и они плавают.

Глава 9 ГИДРО- И АЭРОДИНАМИКА

После демонстрации основных закономерностей поведения жидкостей и газов в равновесии рекомендуется переходить к показу опытов, иллюстрирующих законы гидро- и аэродинамики. Теоретический материал по этой теме изложен в учебниках, например, [28, лекция 17], [30, глава XII], [31, глава XVI]. Вначале можно продемонстрировать эксперименты, показывающие принципиальное отличие разных типов течения жидкостей или газов – ламинарного и турбулентного.

9.1. Ламинарное и турбулентное течения жидкости (прибор Поля–Колбанова¹).

Прибор для наблюдения ламинарного и турбулентного течения жидкости, а также для наблюдения обтекания различных тел потоком жидкости устроен следующим образом (см. левый рис. 9.1). На кодоскопе установлена под небольшим углом к горизонту плоская кювета с прозрачным дном, по которой стекает поток воды, скорость которого можно регулировать. Над верхним концом кюветы установлена емкость с подкрашенной жидкостью, снабженная рядом трубочек с отверстиями малого диаметра, через которые эта жидкость поступает в поток воды в

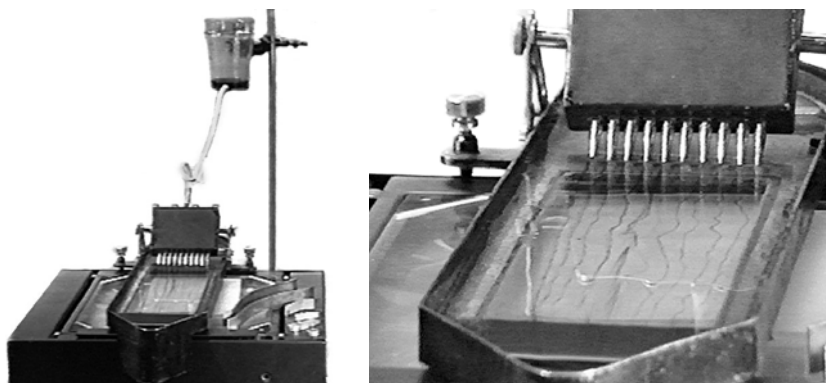


Рис. 9.1. Прибор Поля–Колбанова.

¹ Р. В. Поль (1884 – 1976) – профессор Геттингенского университета, автор широко известных учебников, в которых описано большое число остроумных лекционных экспериментов; М. В. Колбанов (1901(?) – 1950) – с 1919 г. лаборант, лекционный ассистент, заведующий (с 1930 г.) Кабинетом физических демонстраций физического факультета МГУ.

кювете (см. правый рис. 9.1). Характер движения подкрашенных струек в потоке наблюдается в проекции на большом экране.

Если скорость потока мала, то наблюдается ламинарное течение жидкости, при котором все подкрашенные струйки параллельны друг другу, и жидкость, текущая вдоль них, не перемешивается (см. левый рис. 9.2). При увеличении скорости потока ламинарность течения нарушается: вначале появляются колебания подкрашенных струек, затем появляются завихрения, струйки начинают хаотически двигаться и перемешиваться, то есть поток жидкости турбулизируется (см. правый рис. 9.2). Таким образом, для данных условий опыта существует критическая скорость потока v , при которой ламинарное течение превращается в турбулентное, то есть критическое число Рейнольдса

$$Re = \frac{\rho v l}{\eta}$$
, где ρ – плотность, η – динамическая вязкость жидкости, а l – характерный размер, в данном случае – толщина слоя жидкости в потоке (2-4 мм). Критическое значение $Re \approx 1000$, откуда для воды получаем $v \approx 30$ см/с, что согласуется с условиями нашего опыта.

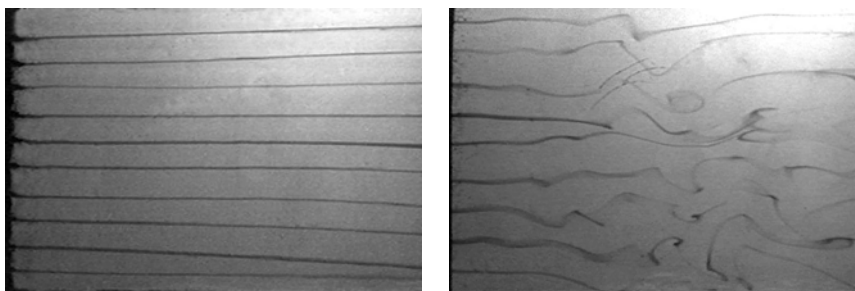


Рис. 9.2. Ламинарное и турбулентное течения жидкости в приборе.

9.2. Обратимость ламинарного течения («фазовая память»).

При ламинарном течении жидкости ее слои не перемешиваются, поэтому, если провести все перемещения частиц жидкости в обратном направлении, то картина их взаимного расположения должна восстановиться, то есть ламинарное течение является обратимым.

Для демонстрации этого явления используется следующая установка (см. рис. 9.3). Внутри приклеенного к подставке полого прозрачного цилиндра из оргстекла высотой около 20 см установлен соосно второй – сплошной цилиндр, который можно вращать вокруг оси за ручку, выведенную вверх через крышку первого цилиндра.



Рис. 9.3. Демонстрация ламинарного течения жидкости.

Между цилиндрами имеется радиальный зазор толщиной около 1 см, в который залита вязкая жидкость – глицерин. При помощи шприца с длинной насадкой из трубочки через отверстие в крышке в середину слоя глицерина между цилиндрами вводится вертикальный столбик подкрашенного глицерина диаметром около 1 мм. После этого

внутренний цилиндр начинают вращать за ручку, считая число проделанных оборотов. Полоска подкрашенного глицерина при этом размазывается, и после 5-10 оборотов становится совершенно незаметной при наблюдении сбоку. Затем вращают ручку на то же количество оборотов в обратном направлении и наблюдают практически полное восстановление столбика подкрашенного глицерина после возвращения системы к исходному положению, то есть к исходной фазе вращения. Потом повторяют опыт, вращая ручку в другом направлении.

Следует заметить, что глицерин весьма гигроскопичен, и его надо хранить в плотно закрытом сосуде. Лучше всего использовать только что открытые банки с заводским уплотнением, а если это невозможно, то перед использованием глицерин надо хорошо перемешать, чтобы устранить возможные градиенты плотности, возникающие при поглощении его поверхностными слоями паров воды. Подкрашенный глицерин также должен быть свежим и иметь плотность, близкую к плотности глицерина, используемого для проведения опыта. После окончания эксперимента глицерин надо слить, а установку тщательно промыть водой и высушить.

9.3. Уравнение Бернулли².

После показа основных типов течения можно переходить к иллюстрации эффектов, возникающих при течении идеальной, или

² Д. Бернулли (1700 – 1782) – швейцарский математик, механик и физиолог, почетный член Петербургской Академии наук.

невязкой жидкости, то есть к следствиям, вытекающим из уравнения Бернулли.

9.3.1. Трубка с сужением.

Если поток газа или жидкости пропустить через трубку переменного сечения, то согласно уравнению Бернулли в суженных ее частях давление будет ниже, чем в широких, а скорость потока – выше. Для демонстрации этого явления используется стеклянная трубка с сужением в средней части. Перпендикулярно к ней припаяны три манометрические трубочки – две в широких частях трубки и одна – в суженной.

Вначале трубку закрепляют в штативе в горизонтальном положении, а манометрические трубочки направляют вниз и погружают в кювету с водой. При пропускании через трубку потока газа из манометрических трубочек выходят пузырьки – обильно из крайних и в меньшем количестве из средней (см. левый рис. 9.4), что свидетельствует о меньшем давлении в суженной части трубки.

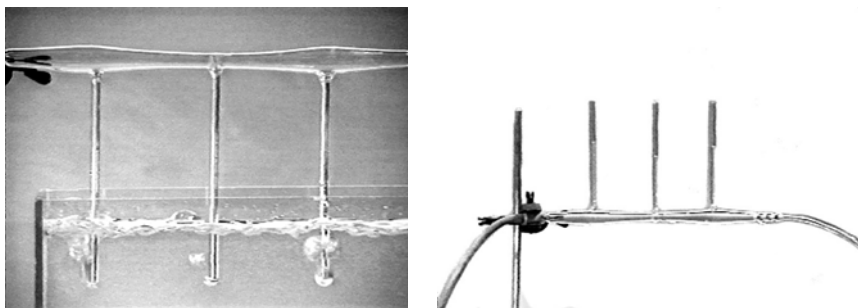


Рис. 9.4. Трубка с сужением.

Затем манометрические трубочки направляют вверх, а по трубке пускают поток воды. Наблюдают более высокие уровни воды в крайних трубочках по сравнению со средней (см. правый рис. 9.4). При увеличении расхода воды давление в трубке повышается, и из манометрических трубочек начинают вытекать фонтанчики воды – более низкий из средней и более высокие – из крайних.

9.3.2. Сирена Клемана-Дезорма (см. также демонстрацию 6.4.5).

Под круглой горизонтальной пластиной с отверстием в центре для подвода газа подвешена на небольшом расстоянии вторая пластина (см. рис. 9.5). Если через отверстие пропускается газ, растекающийся между пластинами и выходящий наружу, то за счет па-

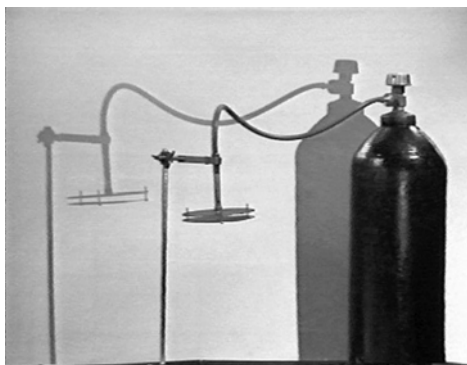


Рис. 9.5. Сирена Клемана–Дезорма.

дения давления в потоке нижняя пластина прижимается атмосферным давлением к верхней и перекрывает отверстие, из-за этого поток газа прекращается, давление между пластинами возрастает, и нижняя пластина возвращается в исходное состояние; далее процесс повторяется. Таким образом, возникают автоколебания нижней пластины,

и она издает громкий звук. Для визуализации потока газа можно подавать в установку углекислоту из баллона и использовать подсветку от вольтовой дуги.

9.3.3. Парение шарика в струе газа или жидкости.

Согласно уравнению Бернулли давление в струе газа или жидкости ниже, чем в окружающем воздухе. Для демонстрации этого факта струя сжатого газа или воды из сопла направляется вверх, и в нее помещается шарик для настольного тенниса (см. рис. 9.6). За счет гидродинамического напора струи снизу и пониженного давления в струе шарик устойчиво «парит» в воздухе даже при некотором отклонении струи от вертикали. Для наблюдения за поведением шарика на него полезно нанести черные точки.

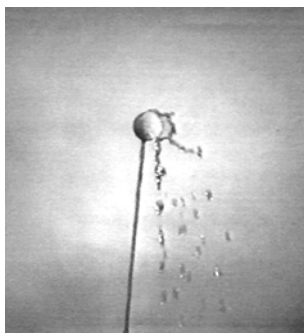
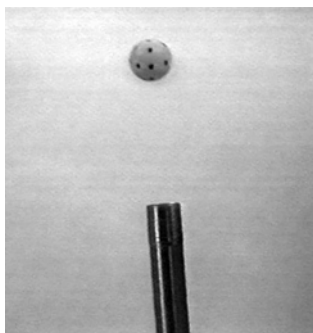


Рис. 9.6. Парение шарика в струе газа и в струе жидкости.

9.3.4. Парение шарика в трубке переменного сечения.

Демонстрируется засасывание шарика для настольного тенниса в стеклянную трубку переменного сечения при продувании через нее потока газа. Если струю газа пропустить через такую трубку, то согласно уравнению Бернулли в ее суженной части давление будет ниже, чем в широкой, а скорость потока газа – выше. Первая половина трубки имеет диаметр около 10 мм, а вторая – около 40 мм. В трубку, держа ее расширенным концом вверх, кладут шарик и пускают струю газа. Шарик при этом притягивается к месту сужения трубки, где давление газа ниже. Затем трубку можно перевернуть даже отверстием вниз, и шарик будет парить в трубке у места сужения, не вываливаясь из нее (см. рис. 9.7).

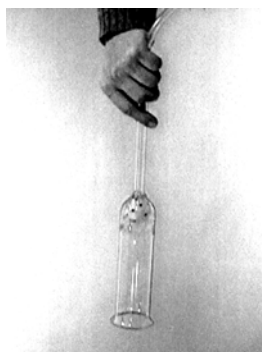


Рис. 9.7. Шарик в трубке с расширением.

9.3.5. Втягивающее действие струи (шарик на подвесе).

Подвесив шарик для настольного тенниса к штативу на нитке, можно продемонстрировать втягивание его в струю газа. Для этого струю газа из сопла, идущую вверх под углом к горизонту, аккуратно приближают к шару сбоку. Шарик втягивается в струю, и нитка отклоняется от вертикали (см. рис. 9.8).



Рис. 9.8. Втягивание шарика в струю газа.

9.3.6. Пульверизатор и водоструйный насос.

Втягивающее действие струи используется при работе пульверизаторов и водоструйных насосов.

Пульверизатор (см. рис. 9.9) состоит из сопла, в которое подается воздух под давлением, и трубки, верхний конец которой расположен около сопла, а нижний погружен в сосуд с распыляемой жидкостью. Жидкость через трубку засасывается в струю и распыляется

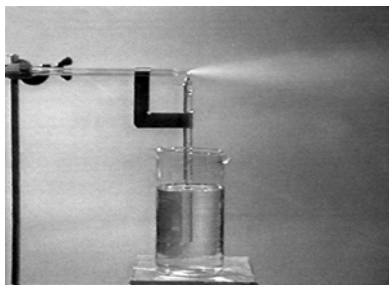


Рис. 9.9. Пульверизатор.

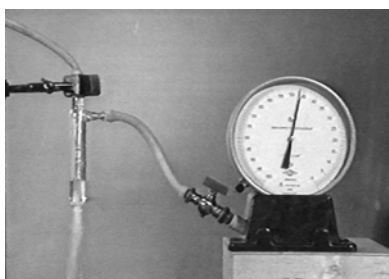


Рис. 9.10. Водоструйный насос.

на мелкие капли. Количество распыляемой жидкости регулируется путем изменения давления газа, подаваемого в сопло.

В водоструйном насосе струя жидкости, выходящая с большой скоростью из сопла, втягивает воздух из окружающего сопло сосуда и вместе с пузырьками воздуха выходит из него через воронку с отводящей трубкой (см. рис. 9.10). При этом в сосуде создается разрежение, которое можно измерить при помощи подсоединенного к насосу вакуумметра. Для используемого в демонстрации насоса это разрежение при максимальном расходе воды достигает 0,5 атм. Водоструйные насосы просты по устройству, имеют большую производительность,

не содержат движущихся деталей и часто используются в лабораториях, когда не требуется создание больших разрежений.

9.4. Статическое и динамическое давление в потоке жидкости и газа.

9.4.1. Трубки Пито и Прандтля.

В широкую стеклянную трубку, по которой можно пропускать поток воды, впаяны две манометрические трубки. У одной из них конец отогнут и направлен в сторону набегающего потока – это трубка Пито³, – а у другой плоскость среза на конце параллельна потоку. При пропускании потока воды через широкую трубку вода в манометрических трубках устанавливается на разных уровнях, которые зависят от скорости v потока (см. рис. 9.11). В трубке Пито давление на входе и, соответственно, высота подъема столбика воды определяется, согласно уравнению Бернулли, суммой давления внутри жидкости p и «скоростного напора», равного $\rho v^2 / 2$,

³ А. Пито (1695 – 1771) – французский математик и гидравлик.

где ρ – плотность жидкости, а во второй трубке – только давлением p , так что динамическое давление больше статического. Поэтому комбинация двух таких манометрических трубок, называемая трубкой Прандтля⁴, позволяет по разности давлений в них определять скорость потока жидкости или газа, обтекающего трубки. Разность высот подъема жидкости в трубках зависит от скорости потока квадратичным образом, так что данный датчик скорости набегающего на трубки потока является нелинейным. При проведении эксперимента хорошо заметно, что с ростом скорости потока эта разность начинает расти все быстрее.

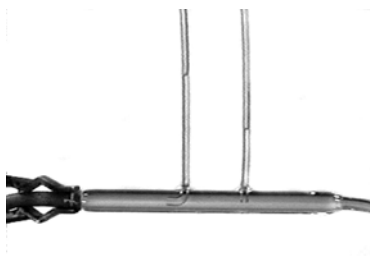


Рис. 9.11. Трубки Пито и Прандтля.

Трубка Прандтля обычно используется в авиации для определения скорости самолета относительно воздуха и выполняется в виде двух соосных трубок, внутренняя из которых открыта наружу, навстречу набегающему потоку воздуха, а внешняя закрыта спереди и имеет отверстия по бокам.

9.4.2. Гидравлический удар.

Гидравлический удар при движении жидкости возникает из-за ее малой сжимаемости, когда движущаяся жидкость резко останавливается. Это явление легко продемонстрировать при помощи пластиковой бутылки из-под газированной воды, полностью заполнив ее водой и бросив с небольшой высоты на твердое основание. При этом вся масса воды в бутылке останавливается, возникает резкое увеличение давления, и вода из горлышка бутылки выбрасывается вверх на высоту, значительно превышающую ту, с которой была брошена бутылка (см. рис. 9.12). На этом же эффекте основан известный способ вышибания пробки из бутылки при резком ударе по ее дну.

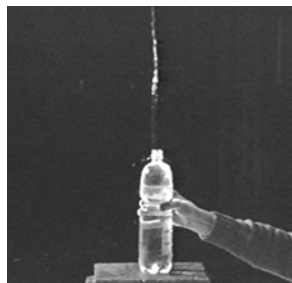


Рис. 9.12. Гидравлический удар – опыт с бутылкой.

⁴ Л. Прандтль (1875 – 1953) – немецкий учёный в области механики.

Явление гидравлического удара можно продемонстрировать и другим способом. Небольшая стеклянная воронка закрепляется в штативе на высоте около метра над столом и соединяется куском резинового шланга с наконечником, имеющим на конце сужение диаметром 1–2 мм. Наконечник помещается на 30–50 см ниже воронки, его конец затыкается пальцем и направляется вертикально вверх, а в воронку наливается вода. При этом между заткнутым наконечником и водой в шланге образуется воздушная пробка. После открывания отверстия в наконечнике вода начинает вытекать из воронки, встречает на своем пути сужение, и в результате резкого торможения возникает гидравлический удар. При этом из наконечника вверх бьет тонкий фонтан, поднимающийся на высоту, значительно превышающую уровень воды в воронке (см. рис. 9.13). Поскольку такой фонтан возникает лишь на очень короткое время, после чего его высота уменьшается так, что он немного не достигает уровня воды в воронке, опыт следует

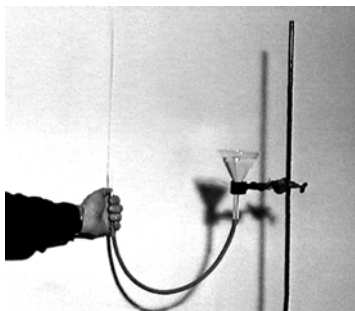


Рис. 9.13. Гидравлический удар – опыт с воронкой.

повторить несколько раз. Для этого надо слить воду из шланга обратно в воронку, подняв его конец выше воронки, чтобы образовалась воздушная пробка, и заткнув отверстие в наконечнике, снова опустить его вниз и затем открыть. Эту демонстрацию следует показывать при ярком электрическом освещении, чтобы мелкие капли, на которые разбивается вылетевшая из узкого отверстия струя воды, блестели и были хорошо видны из аудитории.

9.4.3. Сифон, не требующий засасывания.



Рис. 9.14. Сифон, не требующий засасывания.

Явление гидравлического удара можно использовать для создания сифона, не требующего засасывания для начала переливания жидкости из одного сосуда в другой, установленный на более низком уровне. На входе трубки такого сифона имеется расширенная часть, которую погружают в верхний сосуд, заполненный жидкостью, предварительно заткнув

нижнее отверстие сифона пальцем (см. рис. 9.14). После открывания трубки жидкость устремляется в ее широкую часть, и при достижении сужения за счет резкого торможения возникает гидравлический удар, то есть увеличение давления, выбрасывающее жидкость по узкой части трубки выше уровня в верхнем сосуде и далее через изгиб сифонной трубки, после чего сифон начинает работать – переливать жидкость в нижний сосуд. Если опустить широкую часть сифона в верхний сосуд, не закрывая нижнего отверстия сифона, то переливания жидкости не происходит – сифон не работает.

9.5. Реакция струи.

9.5.1. Сосуд с водой на тележке.

На тележку, которая может легко перемещаться по горизонтальным рельсам, уложенным на лабораторном столе, ставят высокий сосуд с водой, у которого имеется отверстие в нижней части боковой стенки, заткнутое пробкой. Если отверстие направлено вдоль рельсов, то после вынимания пробки тележка под действием силы реакции вытекающей струи движется в направлении, противоположном направлению истечения воды (см. рис. 9.15). Сила реакции струи (реактивная сила) возникает из-за нескомпенсированности сил давления жидкости на переднюю и заднюю (по отношению к направлению вытекания) стенки сосуда.



Рис. 9.15. Сосуд с водой на тележке.

9.5.2. Полет «ракеты» (см. также демонстрацию 5.10.2).

Демонстрируется полет модели ракеты под действием силы реакции вытекающей из нее струи воды. В полый корпус ракеты заливается на $1/3$ объема вода, после чего через специальное пусковое устройство в ракету при помощи велосипедного насоса накачивается воздух до давления 2-3 атм.

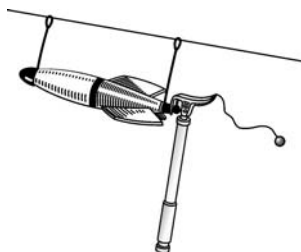


Рис. 9.16. Полет «ракеты».

Установив ракету вертикально, нажимают спуск и наблюдают ее полет вверх, то есть в сторону, противоположную направлению истечения воды. Более безопасным и удобным для демонстрации в аудитории является запуск ракеты вдоль направляющей проволоки, натянутой наклонно от лабораторного стола к потолку аудитории (у балкона). При этом на ракете вблизи ее головной и хвостовой частей закрепляются два проволочных кольца, сквозь которые продевается направляющая проволока (см. рис. 9.16).

9.5.3. Отклонение изогнутой трубки при истечении из нее воды.

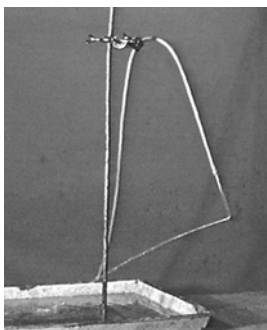


Рис. 9.17. Сила реакции струи.

К водопроводному крану длинным резиновым шлангом присоединяют кусок стеклянной или металлической трубки, изогнутой под прямым углом. Шланг перекидывают через горизонтальную штангу, укрепленную на штативе над лабораторным столом так, чтобы свешивающийся конец шланга со вставленной в него изогнутой трубкой находился над сливной раковиной или кюветой, установленной на столе для приема воды. При вытекании воды трубка, висящая на гибком шланге, отклоняется в сторону, противоположную направлению истечения воды (см. рис. 9.17).

9.5.4. Сегнерово колесо (см. также демонстрацию 5.10.4).

Реакцию вытекающей струи можно продемонстрировать при помощи широко известного прибора – сегнерова колеса (см. рис. 9.18). Однако более интересным для демонстрации является проведение опыта

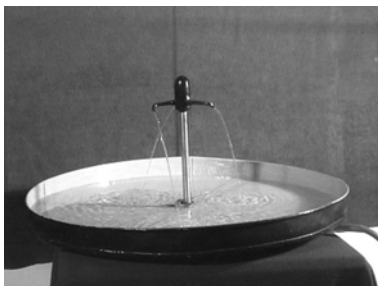


Рис. 9.18. Сегнерово колесо.

та в обратном порядке: оказывается, что если создать такие условия, при которых вода будет не вытекать из изогнутых трубок колеса, а засасываться в них, то колесо не будет вращаться.

Прибор для проведения этого опыта по конструкции близок к сегнерову колесу: надо лишь создать возможность от-

качки сосуда, из которого вытекает вода. Для этого верхнее отверстие сосуда закрывают большой пробкой, через которую пропущена трубка с краном (см. рис. 9.19). Весь прибор ставят в центр плоской кюветы, заполненной водой до такого уровня, чтобы изогнутые трубки сегнера колеса были полностью погружены в воду. Закрыв эти трубки пробками и откачав сосуд до низкого давления (около 0,1 атм), закрывают кран, отсоединяют шланг для откачки, вынимают пробки и наблюдают втекание воды из кюветы в сосуд под действием атмосферного давления. Никакого вращения при этом не возникает. Затем открывают кран наверху сосуда, сообщаящий его с атмосферой, вода начинает вытекать из трубок сегнера колеса обратно в кювету, и оно начинает вращаться. Надо заметить, что для большей убедительности опыта вытекание воды из трубок должно происходить так же, как и засасывание – при их полном погружении в воду, налитую в кювету.

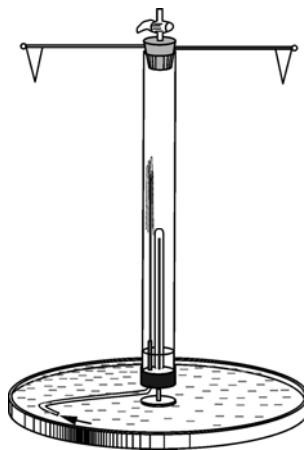


Рис. 9.19. «Обратное» сегнерово колесо.

9.6. Эффект Магнуса⁵.

9.6.1. Тележка с вращающимся цилиндром (модель судна Флетнера).

Если в поток газа поместить вращающийся цилиндр, ось которого перпендикулярна направлению потока, то за счет вязкого трения цилиндр увлекает пограничный слой газа, и скорость обтекания цилиндра потоком в направлении вращения становится больше, чем в отсутствие вращения, а давление – меньше. С другой стороны цилиндра, где скорость вращения направлена в сторону, противоположную направлению скорости потока, скорость обтекания становится меньше, а давление – больше. Появляется разность давлений и сила, действующая на цилиндр в направлении, перпендикулярном потоку. Описанное явление называется эффектом Магнуса.

⁵ Г. Г. Магнус (1802 – 1870) – немецкий физик и химик, член Берлинской Академии, член-корреспондент Санкт-Петербургской Академии наук.

Один из вариантов использования этого эффекта для приведения в движение морских судов предлагался в 1924 году Флетнером⁶. Модель роторного судна Флетнера работает следующим образом. На легкой тележке установлен в вертикальном положении цилиндрический ротор, приводимый во вращение электромотором. Сбоку от тележки установлены вентиляторы, создающие «ветер», дующий перпендикулярно направлению возможного движения тележки.

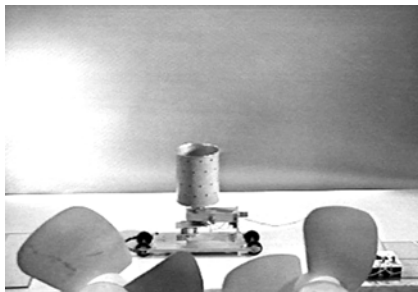


Рис. 9.20. Модель судна Флетнера.

Благодаря эффекту Магнуса на цилиндр действует сила, и тележка приходит в движение (см. рис. 9.20). При изменении направления вращения ротора сила также меняет свое направление, и тележка начинает двигаться в противоположную сторону.

9.6.2. Скатывание легких цилиндров с наклонной плоскости.

Другой вариант демонстрации эффекта Магнуса состоит в скатывании легких тонкостенных бумажных или пенопластовых цилиндров с наклонной плоскости, поднятой на некоторую высоту над полом (см. рис. 9.21). Цилиндр при скатывании закручивается вокруг своей оси, и скорость его верхних точек направлена против набегающего потока воздуха.

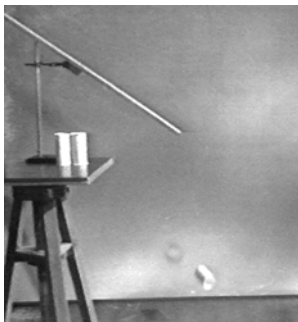


Рис. 9.21. Скатывание цилиндров.

Поэтому во время падения на него действует сила, дополнительно искривляющая его траекторию вниз и назад. В результате падение происходит не по параболе, а по более искривлённой линии; горизонтальная составляющая скорости цилиндра в полете уменьшается и даже может изменить знак. Для сравнения скатываются также сплошные цилиндры гораздо большей массы, чем бумажные. На полет массивных цилиндров малые по сравнению с силой тяжести аэродинамические силы почти не оказы-

⁶ А. Флетнер (1885 – 1961) – немецкий судостроитель и изобретатель.

вают влияния, и они летят по параболе. Для более устойчивого движения бумажных цилиндров к их торцам можно приклеить бумажные диски несколько большего диаметра, чем диаметр этих цилиндров.

9.6.3. Полет вращающегося цилиндра («мёртвая петля»).

На летящее в воздухе вращающееся тело действует в поперечном направлении сила, изменяющая направление его полета. Для демонстрации этого явления используется бумажный цилиндр-катушка, на который наматывается лента, привязанная к деревянной линейке. Цилиндр с намотанной лентой ставится горизонтально на аудиторный стол (см. левый рис. 9.22), после чего с помощью резкого рывка линейки вдоль стола ему сообщают вращение и некоторую начальную скорость, причем линейная скорость вращения снизу цилиндра должна быть направлена против набегающего потока воздуха. Тогда сила, возникающая из-за эффекта Магнуса, направлена вверх, и цилиндр «взмывает» над столом, описывает «мертвую петлю» (см. правый рис. 9.22) и далее летит, плавно снижаясь. Опыт полезно также воспроизвести в видеозаписи в замедленном темпе.



Рис. 9.22. Полет вращающегося цилиндра.

9.6.4. «Резаный» мяч.

Искривленная траектория полета «резаного», то есть подкрученного при ударе мяча также объясняется эффектом Магнуса. Для демонстрации полета закрученного мяча используется следующая установка (см. рис. 9.23). На вертикальную ось электродвигателя постоянного тока, укрепленного на массивном штативе, насажена резиновая трубка. На нее кладется шарик от настольного тенниса, который поджимается сверху к торцу трубки подпружиненным диском. На стойке прибора имеется стальная пружина

со спусковым механизмом, которая может с определенной силой ударять по шарик. В начале опыта наносят удар по неподвижному шарик и наблюдают его полет в одном направлении. Затем включают электродвигатель, раскручивают шарик и наносят удар уже по вращающемуся шарик. При этом шарик летит уже в несколько ином направлении, а траектория его движения искривляется. Переключив направление вращения электродвигателя, повторяют опыт, закрутив шарик в другую сторону.



Рис. 9.23. Общий вид установки.

9.7. Течение вязкой жидкости.

9.7.1. Падение давления вдоль трубы.

При течении вязкой жидкости по трубе постоянного сечения давление падает вдоль трубы по линейному закону. Для демонстрации этого явления к большому стеклянному сосуду с подкрашенной водой в нижней части присоединена горизонтальная труба с краном на конце, к которой припаян ряд вертикальных стеклянных манометрических трубок, открытых сверху. Пока кран закрыт, вода во всех трубках и в сосуде стоит на одном уровне. После открывания крана начинается вытекание воды, и вдоль трубы быстро устанавливается линейное распределение давления, наблюдаемое на манометрических трубках (см. рис. 9.24). Для увеличения наглядности опыта можно после открывания крана подливать в сосуд воду через шланг, подобрав напор так, чтобы ее уровень оставался примерно на одной высоте. В этом случае уровни жидкости в манометрических трубках также не будут меняться с течением времени, давая устойчивую картину распределения давления вдоль трубы при вытекании жидкости.

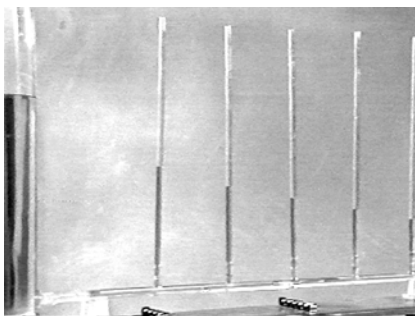


Рис. 9.24. Падение давления вдоль трубы при течении по ней воды.

Для увеличения наглядности опыта можно после открывания крана подливать в сосуд воду через шланг, подобрав напор так, чтобы ее уровень оставался примерно на одной высоте. В этом случае уровни жидкости в манометрических трубках также не будут меняться с течением времени, давая устойчивую картину распределения давления вдоль трубы при вытекании жидкости.

9.7.2. Распределение скоростей по сечению потока.

При ламинарном течении вязкой жидкости по трубе скорости отдельных слоев жидкости неодинаковы: скорость максимальна на оси трубы и минимальна у стенок. Распределение скоростей в цилиндрической трубе, как установил в свое время Пуазейль⁷, близко к параболическому. Для демонстрации этого в прозрачный вертикальный сосуд достаточной высоты наливают глицерин, а поверх него – слой того же глицерина, подкрашенного чернилами. После открытия крана внизу сосуда наблюдается изгибание границы между окрашенной и неокрашенной частями жидкости в соответствии с распределением скоростей по сечению потока в трубе (см. рис. 9.25). Наблюдение опыта ведется на просвет, в проекции на экран; для чего сосуд должен иметь прямоугольное сечение, а внутреннее отверстие в нем – круглое; сосуд можно изготовить из полированного оргстекла.

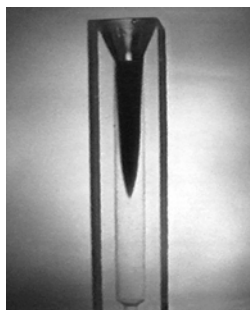


Рис. 9.25. Распределение скоростей по сечению ламинарного потока жидкости в трубе.

9.8. Вихри.

9.8.1. «Смерч» в воронке с водой.

Известно, что вытекание жидкости из сосуда с отверстием в дне, например, из ванны, неустойчиво по отношению к образованию вихрей. Это можно продемонстрировать на примере вытекания воды из большой воронки. Если заполнять заткнутую снизу воронку струей воды, придавая таким образом вращение всему объему воды в воронке, то после открытия воронки в ней быстро образуется красивый вихрь (см. рис. 9.26), внешне напоминающий смерчи-торнадо, возникающие иногда во время гроз и ураганов. По мере вытекания воды вихрь растет,



Рис. 9.26. «Смерч» в воронке с вытекающей из нее водой.

⁷ Ж. Л. М. Пуазейль (1799 – 1869) – французский врач и физик, член Французской медицинской академии.

пронизывает всю толщу воды в воронке, а воздух с шумом засасывается в него.

9.8.2. «Смерч», возбуждаемый магнитной мешалкой.



Рис. 9.27. «Смерч», возбуждаемый магнитной мешалкой.

Для приготовления однородных смесей жидкостей часто используют магнитные мешалки. Модель такой мешалки устроена следующим образом (см. рис. 9.27). Внизу под дном цилиндрического стеклянного сосуда на вертикальной оси электродвигателя постоянного тока помещен перпендикулярно этой оси сильный постоянный магнит, а в сосуде параллельно ему – ферромагнитный стержень, который может быть заключен в химически стойкую оболочку. Если включить двигатель, то стержень в сосуде будет увлекаться магнитом и вращаться, размешивая жидкость. Преимуществом такой мешалки является то, что вращение передается внутрь жидкости без непосредственного контакта с ней деталей внешнего привода, а направление вращения можно менять, добиваясь закручивания жидкости в разные стороны и более тщательного ее перемешивания. Налив в сосуд воду, демонстрируют возникновение в ней вихря при включении электродвигателя мешалки.

9.8.3. Кольцевые вихри в воздухе (дымовые кольца).



Рис. 9.28. Общий вид установки.

«Пушка» для стрельбы дымовыми кольцами устроена следующим образом (см. рис. 9.28). На одном конце металлического цилиндра имеется круглое отверстие, которое можно закрывать крышкой, а на другом натянута упругая резиновая мембрана. В крышке имеется небольшое отверстие для заполнения «пушки» дымом. Удобно использовать для этого зажженную сигарету, вставленную на специальном мундштуке в стек-

лянную трубку. На конец трубки надет резиновый шланг, через который подается от насоса воздух, а из конца мундштука, где находится фильтр сигареты, дым выходит внутрь «пушки». После ее заполнения дымом крышку открывают, и при ударах по мембране получаются устойчивые дымовые кольца (см. рис. 9.29), скорость движения которых зависит от силы ударов по мембране. Для того, чтобы кольцевые вихри были хорошо видны, аудиторию затемняют, а сами кольца подсвечивают сбоку лампой. «Пушка» установлена на поворотном столе, что позволяет производить ее точное нацеливание. Можно, например, погасить дымовым кольцом горящую свечу или сбить легкий предмет с подставки. При некоторой сноровке удастся выпускать сначала медленно движущееся кольцо, а затем – быстрое, так, что второе проходит сквозь первое.



Рис. 9.29. Дымовые кольца в воздухе.

9.8.4. Кольцевые вихри в жидкости.

Для демонстрации кольцевых вихрей в жидкости можно использовать большую прямоугольную кювету с чистой водой, в которую погружена изогнутая трубка с водой, подкрашенной марганцовокислым калием или цветными чернилами (см. левый рис. 9.30).

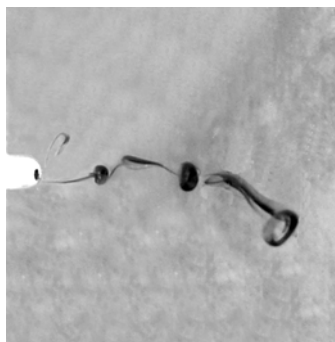
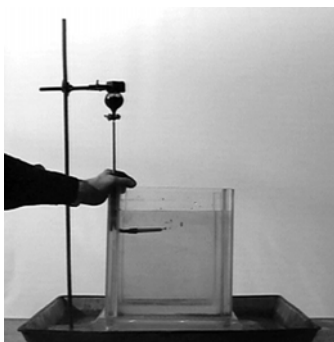


Рис. 9.30. Кольцевые вихри в жидкости.

Подкрашенная вода поступает в трубку из воронки с краном, укрепленной на штативе над кюветой, через резиновую трубку. Заполнив систему,

закрывают кран, после чего при резком сдавливании пальцами резиновой трубки из отверстия на конце изогнутой трубки выходят цветные кольцевые вихри, распространяющиеся в воде (см. правый рис. 9.30). Опыт демонстрируется в проекции на большом экране при помощи видеокамеры. Изгиб трубки следует направить таким образом, чтобы вихри проецировались на экран в форме эллипсов. Можно показать, как и в случае дымовых колец, прохождение одного кольца через другое, а также столкновение колец со стенкой сосуда и их разрушение.

9.8.5. Полукольцевые вихри у поверхности жидкости (по Гельмгольцу⁸, «весло»).

При гребле веслами на поверхности воды после гребка часто бывают видны воронкообразные углубления, движущиеся по воде и сохраняющиеся в течение некоторого времени. Вращение частиц воды в этих углублениях происходит в противоположные стороны. Углубления представляют собой окончания полукольцевых вихрей, образующихся около поверхности воды при гребле из-за больших градиентов скорости вблизи краев весел. Продемонстрировать это явление можно при помощи плоской прозрачной кюветы с водой, установленной на кодоскопе. Если сфокусировать на экране поверхность воды, а затем совершить не слишком сильный гребок чайной ложкой (см. левый рис. 9.31), то по краям ложки будут четко видны бегущие в сторону ее движения углубления (см. правый рис. 9.31). Заметим, что вихри образуются не каждый раз, и демонстратор перед показом опыта должен потренироваться в их получении.

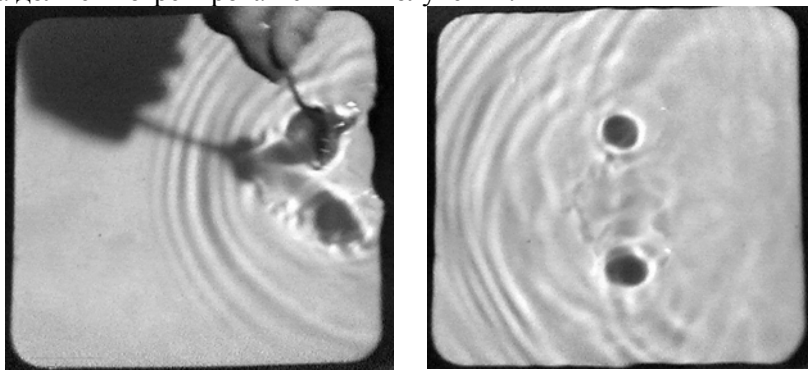


Рис. 9.31. Полукольцевые вихри у поверхности жидкости.

⁸ Г. Л. Ф. фон Гельмгольц (1821 – 1894) – немецкий физик, член Прусской (Берлинской) Академии наук.

9.9. Диск Рэля⁹.

Прибор представляет собой легкий диск, который может свободно вращаться вокруг вертикальной оси, укрепленной на штативе (см. рис. 9.32). Диск обдувается потоком воздуха от вентилятора. При этом устойчивым является такое положение диска, когда его плоскость расположена перпендикулярно набегающему потоку. Положение диска вдоль потока воздуха неустойчиво. Это объясняется тем, что когда диск расположен поперек потока, его обтекание происходит симметричным и устойчивым образом, а при отклонении от этого положения симметричность обтекания нарушается, и возникает момент аэродинамических сил, стремящийся вернуть диск в исходное положение.

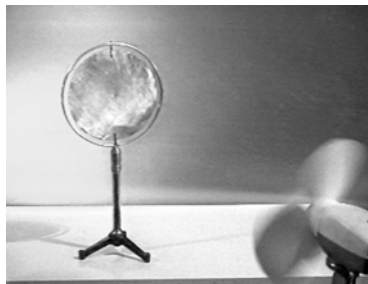


Рис. 9.32. Диск Рэля.

9.10. Явление «подсасывания».

9.10.1. Свеча за диском, обдуваемым воздухом.

Поток воздуха от вентилятора направляется на горящую свечу и сдувает ее пламя в сторону движения воздуха. Если поставить перед свечой перпендикулярно потоку диск, то пламя отклоняется в противоположную сторону – к диску (см. рис. 9.33). Это объясняется тем, что в потоке воздуха за диском образуются завихрения, в которых воздух вблизи оси диска движется в направлении, противоположном исходному, то есть к диску. Заднюю сторону обдуваемого потоком тела называют «подсасывающей стороной», поскольку вблизи нее наблюдается обратное движение части потока. То же самое происходит, когда мы несем свечу, прикрывая ее от набегающего потока воздуха ладонью: пламя от-

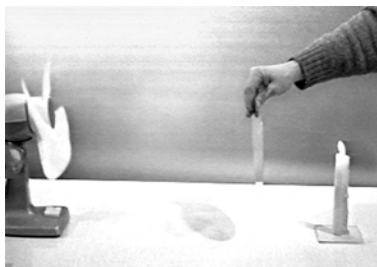


Рис. 9.33. Явление «подсасывания».

⁹ Дж. У. Стретт, лорд Рэлей (1842 – 1919) – британский физик, член Лондонского королевского общества, лауреат Нобелевской премии.

клоняется в сторону ладони. Этим же эффектом объясняется и загрязнение задних поверхностей грузовиков и автобусов прямоугольной формы при их движении по дорогам в мокрую погоду.

9.10.2. Реактивная тележка с отражательной заслонкой на воздушной дорожке – движение «назад».

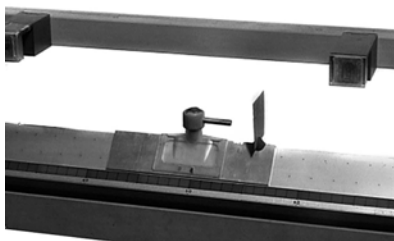


Рис. 9.34. Реактивная тележка с заслонкой.

На дорожку с воздушной подушкой устанавливается специальная тележка [17], у которой часть воздуха из-под тележки отбирается и направляется через поворотное сопло в любую сторону. Если направить сопло вдоль дорожки, то под действием реактивной силы струи воздуха тележка едет в направлении, противоположном движению этой струи. Затем на

тележке перпендикулярно соплу прикрепляется на куске пластилина легкая пластинка, перекрывающая поток воздуха (см. рис. 9.34). После этого направление движения тележки меняется на противоположное, поскольку поток отражается от заслонки, а за ней образуется область разрежения, в которую подсасывается окружающий воздух.

9.11. Физические основы авиации.

Для демонстрации физических принципов, лежащих в основе возникновения подъемной силы крыла самолета, полезно показать следующие опыты.

9.11.1. Демонстрация обтекания тел на приборе Поля–Колбанова.

В приборе Поля–Колбанова (см. демонстрацию 9.1) в плоской кювете создается ламинарный поток воды, в который введены струйки окрашенной жидкости. Это позволяет наблюдать явления, возникающие при обтекании тел различной формы. В поток вводятся поочередно изогнутая пластина, цилиндр, каплевидное тело (острым концом назад и вперед), модель крыла самолета. Наблюдается их обтекание потоком, отклонение потока крылом при разных

углах атаки, срыв потока при критическом угле и образование вихрей (см. рисунки 9.35).

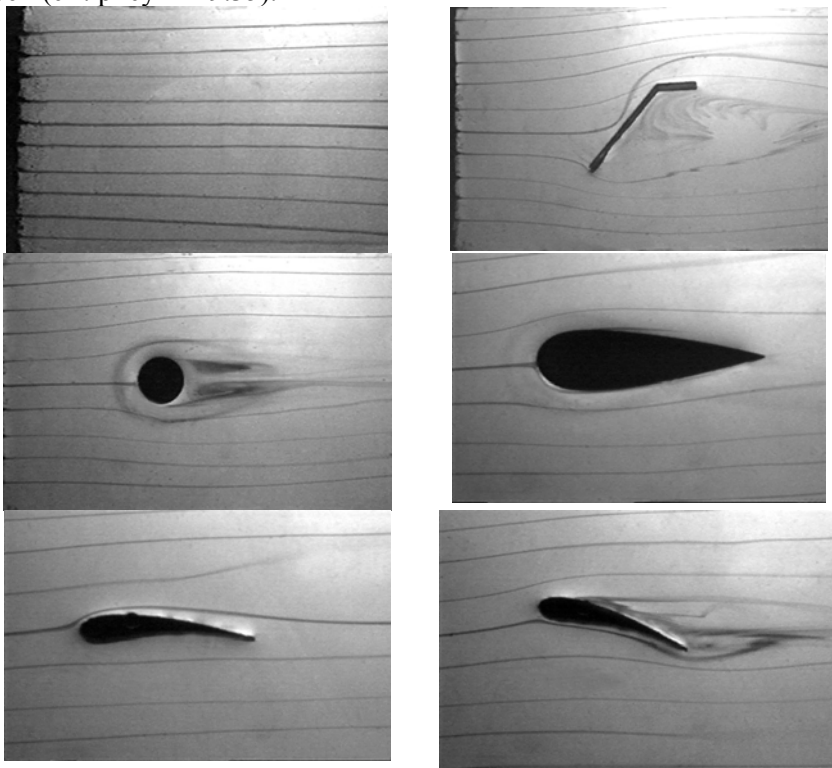


Рис. 9.35. Обтекание различных тел в приборе Поля–Колбанова.

9.11.2. Возникновение подъемной силы крыла.

Возникновение подъемной силы у крыла самолета демонстрируется при помощи диапанели (см. рис. 9.36). Поток воздуха от воздуходувки может направляться поворотным соплом под разными углами на модель крыла, изготовленную из прозрачной пластмассы. Внутри модели, установленной в вертикальном положении, имеется маленький U-образный манометр с подкра-

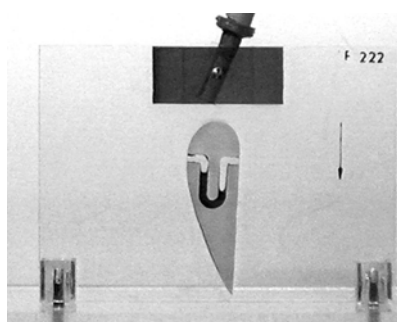


Рис. 9.36. Диапанель с манометром.

шенной жидкостью, который фиксирует разность давлений между выпуклой («верхней») и плоской («нижней») поверхностями крыла. Если поток обтекает крыло под некоторым углом, меньшим критического угла атаки, то манометр показывает, что давление «под» крылом выше, чем «над» крылом. Таким образом, за счет этой разности давлений у крыла возникает подъемная сила. С ростом угла атаки она растет, достигает максимума, а после перехода через критический угол при срыве потока резко падает, что хорошо видно по показаниям манометра.

9.11.3. Опыты с аэродинамической трубой.

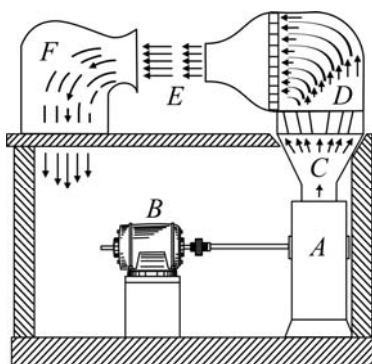


Рис. 9.37. Схема установки.

Модель аэродинамической трубы¹⁰ устроена следующим образом (см. рис. 9.37). Внутри закрытого со всех сторон деревянного стола установлен мощный вентилятор *A* с электродвигателем *B*. Поток воздуха выходит через конус *C* и специальный диффузор *D* наружу, в рабочее пространство трубы *E*, и затем втягивается через приемную трубу *F* обратно внутрь стола, к вентилятору. В поток воздуха между диффузором и прием-

ной трубой можно помещать различные тела, закрепляя их на специальных аэродинамических весах, устанавливаемых на столе. Опыты с аэродинамическими весами проводятся в теневой проекции.

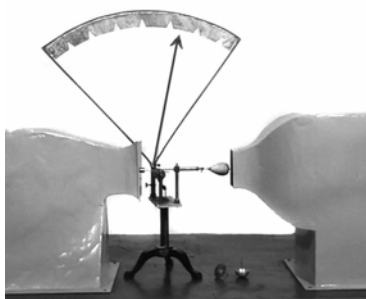


Рис. 9.38.

Аэродинамические веса.

Для демонстрации лобового сопротивления тел различной формы используют аэродинамические веса, изображенные на рисунке 9.38. Исследуемые тела одинакового поперечного сечения (диск, полусферическая чашка и каплевидное тело) по очереди помещают в поток воздуха, закрепляя их на весах при помо-

¹⁰ Разработана профессором С. П. Стрелковым (1905 – 1974).

щи тонких алюминиевых стерженьков, связанных через систему рычагов с указательной стрелкой. Наблюдают уменьшение силы лобового сопротивления при переходе от обдувания чашки со стороны вогнутой поверхности к диску, выпуклой чашке, каплевидному телу острием вперед и острием назад. Весы предварительно регулируются таким образом, чтобы отклонение стрелки для всех тел не выходило за пределы шкалы прибора. Для одного из тел (например, диска) демонстрируют влияние скорости потока на величину лобового сопротивления. Для снижения скорости потока воздуха уменьшают напряжение, подаваемое на электромотор вентилятора.

Различие лобового сопротивления у выпуклых и вогнутых в направлении потока чашек используется в анемометре – приборе, служащем для определения скорости ветра. Демонстрационный анемометр устроен следующим образом (см. рис. 9.39). На вертикальной оси счетчика числа оборотов закреплены три легкие полусферические чашки, при помещении которых в поток воздуха начинается вращение оси, причем всегда в одну сторону, независимо от направления ветра. Это объясняется тем, что заметное аэродинамическое сопротивление оказывает только та чашка, которая обращена вогнутой стороной к потоку.

Подъемная сила крыла самолета демонстрируется при помощи аэродинамических весов, изображенных на рисунке 9.40. Модель крыла помещается в поток воздуха под разными углами, и подъемная сила оценивается по отклонению стрелки весов. Наблюдается рост этой силы по мере увеличения угла атаки до $\sim 30^\circ$, а затем ее уменьшение.

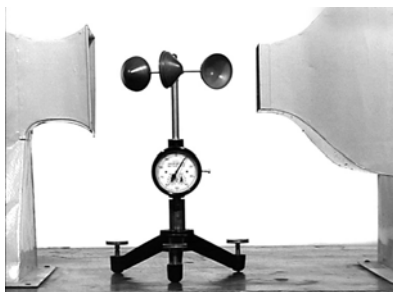


Рис. 9.39. Анемометр.

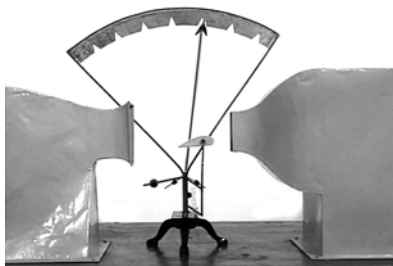


Рис. 9.40. Демонстрация подъемной силы крыла.

9.11.4. Демонстрация силы тяги пропеллера.

Сила тяги пропеллера демонстрируется при помощи тележки с воздушным винтом на горизонтальной оси, которая расположена вдоль возможного направления движения тележки и установлена в подшипниках (см. рис. 9.41). На другом конце оси находится массивный маховик и катушка, на которую наматывается шнурок, используемый для раскрутки винта. Тележку с раскрученным винтом ставят на горизонтальный стол, и вращающийся винт увлекает ее за собой, «ввинчиваясь» в воздух.



Рис. 9.41. Демонстрация силы тяги пропеллера.

9.11.5. Модель вертолета; авторотация.

Воздушный винт вертолета, вращающийся вокруг вертикальной оси, «ввинчивается» в воздух и, отбрасывая его вниз, создает силу тяги, направленную вверх. Это можно продемонстрировать при помощи модели, устроенной следующим образом (см. рис. 9.42). На стальную ось с рукояткой надевают катушку, которая может свободно вращаться на оси. В верхний торец катушки вбивают два небольших стальных стерженька, которые



Рис. 9.42. Модель винта вертолета.

вставляются в отверстия в пропеллере, изготовленном из металла или пластмассы. Удерживая ось в вертикальном положении и раскрутив пропеллер при помощи нитки, намотанной на катушку, наблюдают его взлет на высоту нескольких метров. Для безопасного проведения опыта пропеллер должен быть снабжен ограждающим кольцом, прикрепленным к концам его лопастей.

Для демонстрации полета вертолета можно использовать также готовые модели с радиоуправлением, имеющиеся в продаже в настоящее время (см. рис. 9.43).

В случае отказа двигателя вертолетный винт используют, как парашют – для уменьшения скорости падения. Для этого его переводят в режим так называемой «авторотации», устанавливая лопасти под строго определенным углом. Возникновение вращения винта при его падении из-за взаимодействия с набегающим потоком воздуха можно продемонстрировать следующим образом (см. рис. 9.44). Из тонкой алюминиевой полосы изготавливают большой пропеллер, прикрепляют к нему для стабилизации легкую ось с грузиком на конце и сбрасывают эту конструкцию с балкона аудитории. Во время спуска пропеллер раскручивается и действует, как парашют, замедляя падение.



Рис. 9.43. Модель вертолета с радиоуправлением.

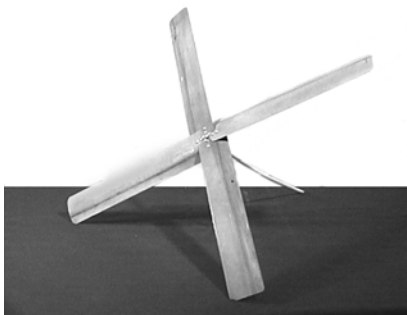


Рис. 9.44. Модель для демонстрации авторотации.

9.12. Измерение коэффициентов лобового сопротивления у тел различной формы.

Для постановки экспериментов используется оборудование, входящее в состав скамьи с воздушной подушкой (см. демонстрацию 1.3.2). Основной частью экспериментальной установки является установленная вертикально при помощи отвеса планка (см. рис. к демонстрации 1.5.3) с датчиками типа «световые ворота», количество которых может быть увеличено до десяти. Расстояние между крайними датчиками составляет $\sim 1,6$ м, координаты всех датчиков (относительно самого верхнего) определены с точностью $\sim 0,5$ мм. Над верхним датчиком закреплен электромагнитный пускатель, выполненный в виде сердечника с обмоткой, позволяющий аккуратно, без начальной скорости, отпускать тела вращения различной формы так, чтобы они падали, сохраняя вертикальное по-

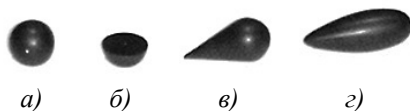


Рис. 9.45. Тела, используемые при измерении коэффициентов лобового сопротивления.

ложение своих осей, и пролетали через все датчики. Тела, выполненные из немагнитных материалов, просверлены вдоль осей, и в отверстия вклеены тонкие ферромагнитные стерженьки, которые притягиваются к заостренному концу сердечника пускателя. Под нижним датчиком расположен улавливатель, в который попадают падающие тела. Моменты срабатывания датчиков определяются при помощи компьютера с точностью ~ 15 мкс.

Описанная установка позволяет наблюдать падение различных тел в воздухе и определять моменты времени, в которые эти тела имеют заданные координаты, соответствующие координатам датчиков. Таким образом, для каждого тела может быть получен набор точек $x_i(t_i)$, лежащих на зависимости координаты x данного тела от времени t (моменты времени t_i выбираются посередине периодов затемнения каждого из датчиков). Далее при помощи специально разработанного алгоритма компьютер проводит обработку полученных данных. Данный алгоритм позволяет извлекать из зависимости $x_i(t_i)$ информацию о коэффициенте лобового сопротивления γ соответствующего тела.

Для постановки этого демонстрационного эксперимента написана специальная компьютерная программа [25, 27]. Перед началом эксперимента нужно выбрать тело, для которого будет измеряться коэффициент лобового сопротивления. В данной демонстрации используются осесимметричные тела из следующего набора (см. рис. 9.45): шар (а), а также ориентированные по-разному (двумя способами) относительно набегающего потока воздуха полушарие (б), полушарие с конусом (в) и каплевидное тело (г) – всего возможны семь вариантов. После указания тела его изображение выделяется на мониторе ярким цветом, и рядом отображаются название данного тела, его масса и площадь поперечного сечения.

Далее необходимо закрепить тело в пускателе и бросить его вдоль линейки датчиков. В случае если измерения прошли успешно, на мониторе появятся экспериментальные точки, соответствующие графику зависимости временной задержки Δt от координат

датчиков x . Величина Δt рассчитывается как разность момента времени, в который тело достигло данного датчика, и момента времени, в который тело достигло бы этого датчика, падая в вакууме с известным ускорением g . Выбор такой формы представления экспериментальных данных связан с тем, что зависимость $x(t)$ для тела, падающего в воздухе, очень слабо отличается от аналогичной зависимости при падении в вакууме, вследствие чего эти две зависимости при изображении на одном графике были бы практически неотличимы друг от друга. В случае если ось тела в полете отклонилась от вертикали, программа предлагает повторить измерения.

При обработке полученных данных на мониторе изображаются экспериментальные точки и строятся несколько графиков зависимостей $\Delta t(x)$, соответствующих случаям падения выбранного тела при различных значениях коэффициента лобового сопротивления C_x , в том числе кривая, наилучшим образом аппроксимирующая полученные точки. Найденное таким образом значение C_x выводится под изображением соответствующего тела. Программа позволяет измерять C_x как несколько раз для одного и того же тела, так и последовательно для каждого тела из набора. В последнем случае результаты предыдущих измерений все время сохраняются под изображениями соответствующих тел.

На рисунках показаны несколько типичных экспериментальных зависимостей, получающихся в ходе демонстрационных экспериментов: на рис. 9.46 приведены результаты измерения C_x для шара; на

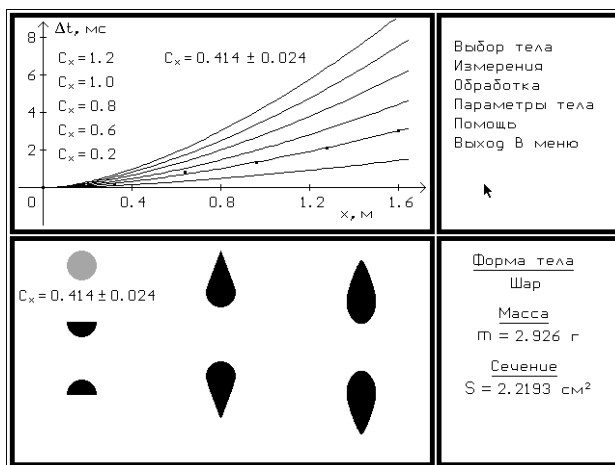


Рис. 9.46. Результаты измерений C_x для шара.

рис. 9.47 и рис. 9.48 – для полушария при двух различных направлениях набегающего воздушного потока; наконец, на рис. 9.49 – результаты для каплевидного тела при его обтекании со стороны скругленного конца. На этих рисунках показаны также значения C_x , полученные в ходе проводимого эксперимента для ранее брошенных тел. Из рисунков, в частности, видно, что коэффициенты лобового сопротивления у полушария при различных направлениях его обтекания отличаются более чем в два раза. При этом полушарие со скругленной стороны обтекается примерно так же, как шар. У каплевидного же тела значение C_x гораздо меньше, чем у шара и полушария. Получаемые в ходе данных экспериментов значения C_x согласуются с приведенными в литературе данными в пределах от $\sim 1\%$ (для шара) до $\sim 50\%$ (для вытянутых тел). В последнем случае большая величина погрешности, по-видимому, связана с тем, что такие тела при падении движутся не вполне устойчиво и к моменту пролета через последний датчик могут поворачиваться на некоторый угол, что приводит к изменению эффективного поперечного сечения и, соответственно, величины C_x .

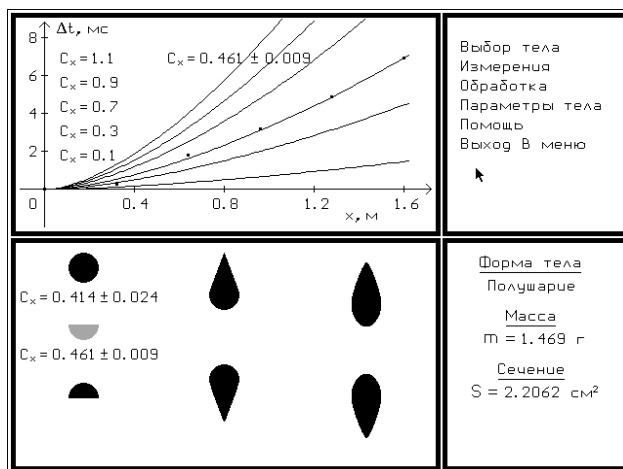


Рис. 9.47. Результаты измерений C_x для полушария.

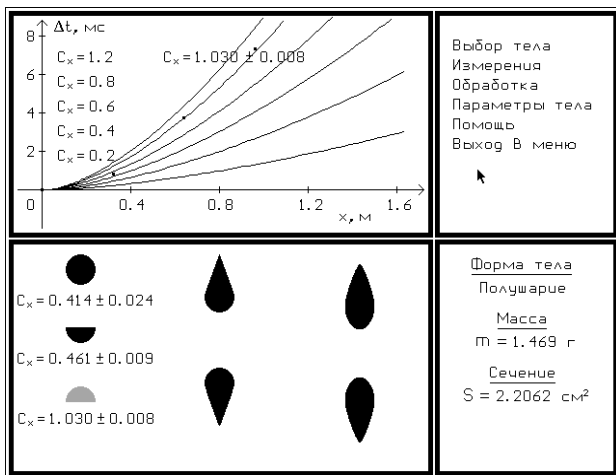


Рис. 9.48. Результаты измерений C_x для полушария при другом направлении набегающего воздуха.

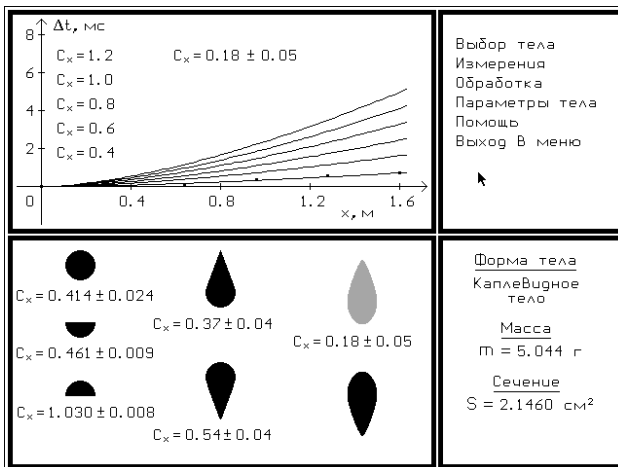


Рис. 9.49. Результаты измерений C_x для каплевидного тела.

Глава 10 ВОЛНЫ

После показа лекционных экспериментов по колебаниям и по механике сплошных сред можно переходить к показу опытов, демонстрирующих различные случаи распространения волн в сплошной среде. Теоретический материал по этой теме изложен в учебниках, например, [28, лекция 22], [31, глава XIX], [35, главы 4, 5]. Вначале рекомендуется продемонстрировать эксперименты, показывающие основные особенности продольных и поперечных бегущих и стоячих волн.

10.1. Механические модели бегущих и стоячих волн.

10.1.1. Модель бегущей волны.

На горизонтальную вращающуюся ось насажено с постоянным эксцентриситетом несколько десятков дисков, причем каждый следующий повернут относительно предыдущего на один и тот же небольшой угол. Диски образуют спиральное тело – червяк, состоящий из трех полных витков спирали. На каждый диск опирается вертикальный стержень, который может свободно перемещаться в направляющих. В пределах одного периода спирали концы стержней отогнуты вбок под прямым углом на разной высоте, причем длины всех согнутых стержней от точки опоры на диск до сгибов отличаются на одну и ту же постоянную величину. В пределах двух остальных периодов спирали все вертикальные стержни имеют одинаковую длину (см. рис. 10.1). При вращении спирали за ручку на оси все стержни

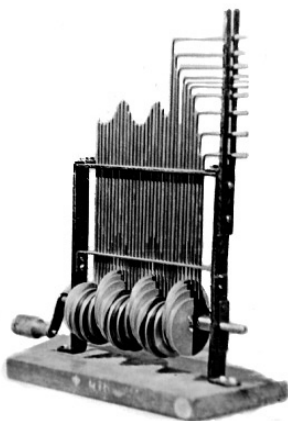


Рис. 10.1. Модель бегущей волны.

совершают колебательные движения вверх-вниз с постоянными фазовыми сдвигами друг относительно друга, так что движение их отогнутых концов воспроизводит продольную бегущую волну, в которой перемещаются «сгущения» и «разрежения», а концы прямых стержней – поперечную бегущую волну, где перемещаются «гребни» и «впадины».

10.1.2. Модель стоячей волны.

Эта модель устроена аналогичным образом (см. рис. 10.2), только диски насажены с переменным эксцентриситетом, изменяющимся по синусоидальному закону в одной плоскости, без поворотов друг относительно друга. При этом образуется синусоидальный червяк, а не спиральный, и движение стержней воспроизводит стоячую волну (продольную и поперечную), так как все стержни в этом случае при вращении оси колеблются в фазе.

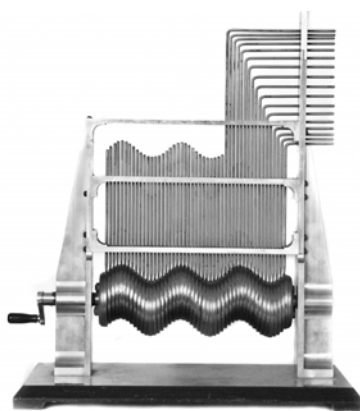


Рис. 10.2. Модель стоячей волны.

10.1.3. Волновая машина Краснушкина¹.

На длинную ось надет ряд одинаковых маятников, связанных между собой пружинами. Каждый маятник состоит из жесткого стержня *A*, вдоль которого можно перемещать цилиндрический груз *B*, устанавливая его на разной высоте. К маятникам прикреплены легкие указатели – горизонтальные стержни с белыми шариками *C* на концах. Крайний маятник приводится в движение с регулируемой частотой от электромотора с редуктором через специальный механизм *D* (см. рис. 10.3).

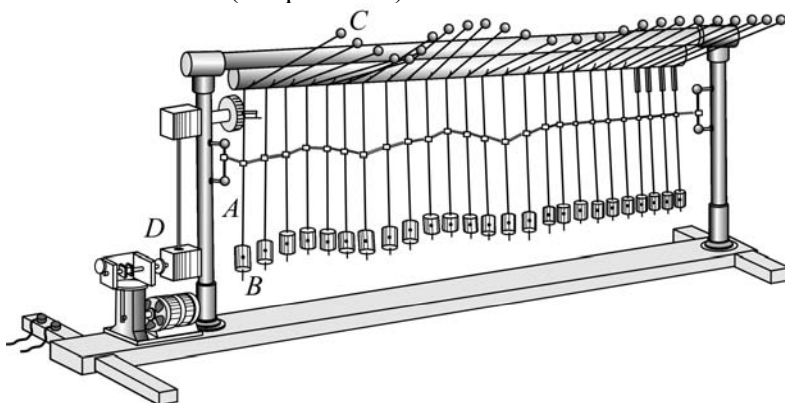


Рис. 10.3. Волновая машина Краснушкина.

¹ П. Е. Краснушкин (1913 – 1983) – профессор кафедры колебаний Московского университета.



Рис. 10.4. Установка на тележке.

Установка снабжена тележкой, на которой ее можно легко перемещать из хранилища в аудитории (см. рис. 10.4).

Система позволяет наблюдать ряд волновых явлений – распространение затухающей поперечной бегущей волны вдоль ряда связанных маятников, стоячие волны на части ряда (при закреплении одного из маятников), область «прозрачности» среды (распространение волн в некотором диапазоне частот от минимальной до максимальной и экспоненциальное затухание волн вне этой области частот).

10.1.4. Маятники Чеботаева.



Рис. 10.5. Маятники Чеботаева.

На установке (см. рис. 10.5), предложенной академиком В. П. Чеботаевым², расположен ряд маятников различной длины, причем частоты соседних маятников отличаются друг от друга на одинаковую величину, так что получается система маятников с эквидистантными частотами. После одновременного отклонения всех маятников (например, при помощи длинной линейки) они

начинают колебаться таким образом, что фазовые сдвиги между соседними маятниками возрастают пропорционально времени. Это приводит к тому, что по ряду из маятников как бы «бежит» поперечная волна со все более укорачивающейся длиной, и спустя некоторое время кажется, что маятники колеблются вразнобой, хаотически. Однако, через определенный, достаточно большой промежуток времени фазы колебаний снова совпадают,

² В. П. Чеботаев (1938 – 1992) – советский физик, академик РАН.

и маятники колеблются «в такт». Это явление несколько раз повторяется, а потом за счет погрешностей в подборе частот маятников фазировка нарушается. Установка требует тщательной настройки частот колебаний маятников перед их показом.

Демонстрация может использоваться также в разделе «Оптика» курса общей физики при обсуждении сложения колебаний с эквидистантными частотами и вида сигналов, излучаемых лазерами (синхронизация мод). Для этого планка, на которой подвешены маятники, закреплена на двух пьезодатчиках, и усиленный сигнал с них можно наблюдать на осциллографе. Этот сигнал резко возрастает при редких совпадениях фаз колебаний всех маятников, а в остальное время колеблется вблизи нуля.

10.2. Распространение импульсов.

Далее можно продемонстрировать распространение и отражение продольных одиночных бегущих импульсов в сплошной среде и поперечных импульсов в струне.

10.2.1. Продольные волны в пружине.

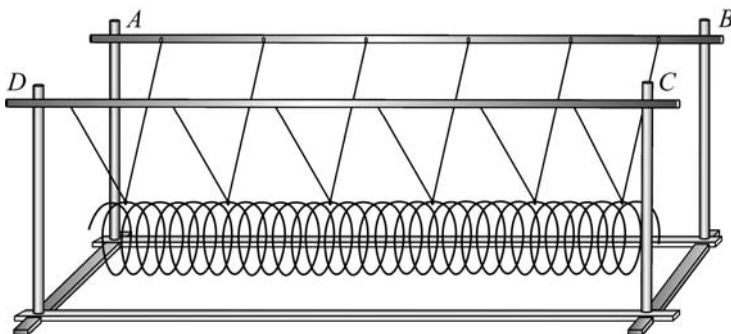


Рис. 10.6. Установка для наблюдения волн в пружине.

На длинной горизонтальной спиральной пружине, подвешенной на нитях к специальной раме $ABCD$ (см. рис. 10.6), демонстрируются волновые явления: распространение продольных импульсов сжатия и разрежения после толчков по концу пружины, отражение импульсов от свободного или закрепленного конца пружины, а также стоячие волны, возбуждаемые вручную демонстратором путем периодического смещения конца или середины пружины с разными частотами.

10.2.2. Среда без дисперсии – волны на резиновой трубке.

10.2.2.1. Отражение от свободного и закреплённого концов.

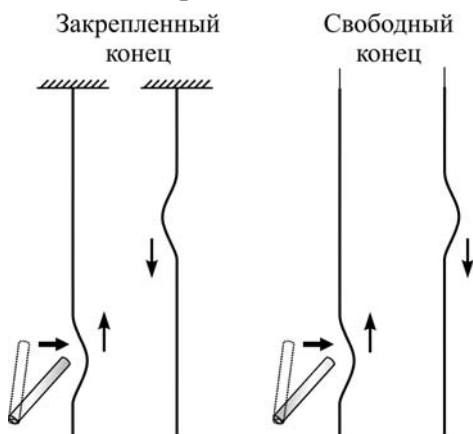


Рис. 10.7. Отражение импульсов от свободного и закрепленного концов трубок.

Демонстрирует распространение поперечных импульсов в среде без дисперсии – на натянутых в аудитории длинных трубках из силиконовой резины. Импульсы возбуждаются при помощи резких ударов палкой по трубкам, привязанным к балкону или потолку аудитории (см. рис. 10.7). Свободный конец трубки демонстратор держит

и натягивает одной рукой, а другой наносит удары палкой. При этом импульсы распространяются вдоль трубок, практически не меняя своей формы. Наблюдается отражение импульсов с изменением фазы (то есть с «потерей полволны») от закрепленного конца трубки, и без изменения фазы (без потери полволны) – от «свободного» конца, привязанного к балкону через кусок легкой веревки. Скорость прохождения импульсов регулируется при помощи изменения силы натяжения трубок.

При периодическом смещении концов трубок демонстратор может показать также возникновение стоячих волн, причем число полуволн, укладываемых на трубке, зависит от силы ее натяжения и частоты колебаний ее конца.

10.2.2.2. Отражение от препятствия – опыт А. Б. Млодзеевского.

Если привязать к используемой в предыдущем опыте резиновой трубке примерно на середине ее длины тяжелый грузик, то при прохождении импульсов отчетливо наблюдаются как проходящая волна, так и волна, отраженная от препятствия.

10.2.3. Модель среды с дисперсией.

10.2.3.1. Волны на висящей велосипедной цепи.

На висящей длинной и тяжелой велосипедной цепи, нижний конец которой свободен, демонстрируется распространение поперечных импульсов, возбуждаемых ударами палкой (см. рис. 10.8). Натяжение цепи, а следовательно, и скорость распространения импульсов вдоль нее, меняется от максимального наверху до нуля внизу, поэтому импульс, идущий сверху вниз, непрерывно изменяет свою форму (как в среде с дисперсией) – «обостряется» за счет того, что его «задняя» часть догоняет «переднюю». При ударе по нижнему концу цепи импульс «разваливается» и вверх не распространяется – возникают сложные колебания цепи.

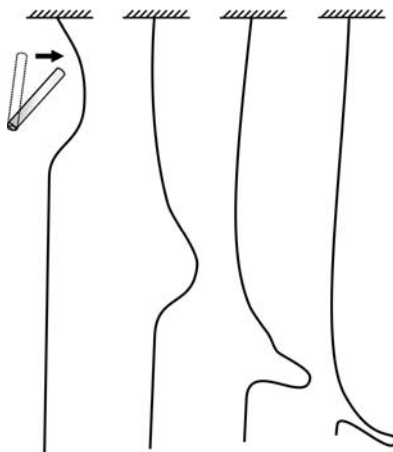


Рис. 10.8.

Волны на висящей тяжелой цепи.

10.2.3.2. Бич.

Скорость распространения импульса в натянутом шнуре зависит от его линейной плотности – увеличивается при ее уменьшении. Этот эффект используется пастухами, сплетающими свои бичи таким образом, что они утоньшаются от рукоятки к концу. После взмаха по бичу бежит все ускоряющаяся волна в виде импульса, причем резкий хлопок бича в конце говорит о том, что преодолевается «звуковой барьер». На лекции используется укороченная модель такого бича, и при некоторой тренировке демонстратор может извлекать при ее помощи громкие хлопки.

10.3. Волны на поверхности жидкости.

Волны на поверхности жидкости, не являющиеся чисто поперечными или продольными, более сложны для анализа и обычно рассматриваются отдельно (см., например, [28, лекция 24], [31, §158], [35, §7.3]). В то же время демонстрацию таких волн удобно использовать

для иллюстрации основных явлений и понятий волновой оптики – интерференции, дифракции, принципа Гюйгенса [31, §§159-161].

10.3.1. Капиллярные волны на поверхности жидкости (прибор П. Н. Лебедева³, И. Ф. Усагина, Е. В. Богословского⁴).

Волны, возникающие в тонком поверхностном слое жидкости, называют капиллярными. В лаборатории П. Н. Лебедева был создан прибор для демонстрации капиллярных волн и показа основных волновых процессов. Этот прибор и до настоящего времени широко используют в Кабинете физических демонстраций физического факультета МГУ. С его помощью удобно демонстрировать образование, распространение, отражение и преломление волн, принцип Гюйгенса, интерференцию и дифракцию волн.

Существенное отличие этого прибора от обычной ванны для демонстрации волн на поверхности воды заключается в том, что с его помощью демонстрируют капиллярные волны (более короткие), и поэтому картина дифракции и интерференции их получается более

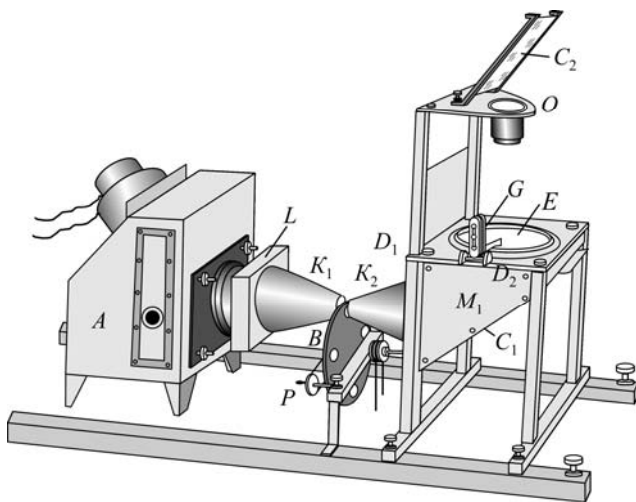


Рис. 10.9. Прибор для наблюдения капиллярных волн.

четкой. Кроме того, прибор снабжен стробоскопом, дающим возмож-

³ П. Н. Лебедев (1866 – 1912) – выдающийся русский физик-экспериментатор, профессор Московского университета.

⁴ Е. В. Богословский (1885 – 1939) – российский физик, ученик П. Н. Лебедева.

ность рассматривать на экране неподвижную картину волн или их движение при кажущихся небольших скоростях распространения.

На рисунке 10.9 представлен общий вид прибора. Пучок света от дугового фонаря A сходится у отверстия диска стробоскопа B , приводимого в равномерное вращение двигателем постоянного тока. Расходящийся от этого места пучок света, несколько собранный линзой D_1 , падает на большое плоское зеркало C_1 , расположенное под углом 45° к горизонту. Отраженные от этого зеркала лучи света еще сильнее собираются плоско-выпуклой линзой D_2 и освещают небольшую плоскую ванну E , заполненную жидкостью с малой вязкостью, например ацетоном. Волны, возникающие на поверхности ацетона под действием вибрирующего стержня, проецируют с помощью объектива O и второго плоского зеркала C_2 на вертикальный экран F (см. также рис. 10.10).

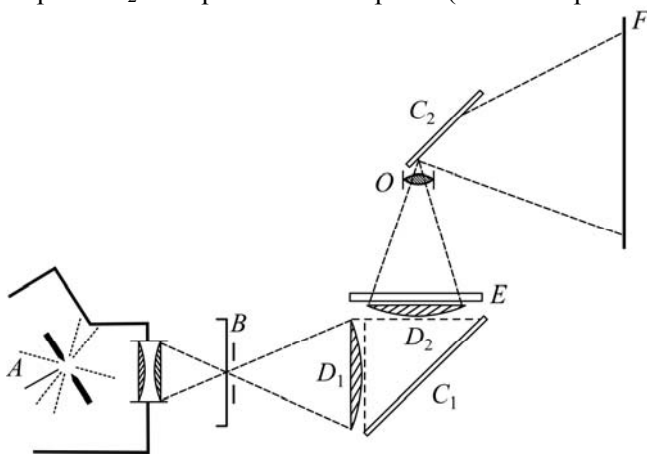


Рис. 10.10. Оптическая схема прибора.

Оптическая схема прибора приведена на рис. 10.10. После конденсора помещают плоскопараллельный стеклянный сосуд L (см. рис. 10.9), заполняемый водой. Этим сосудом следует пользоваться при длительной демонстрации опыта, иначе ацетон будет прогреваться, и картина капиллярных волн на экране станет неустойчивой. В целях ограждения аудитории от рассеянного света в установке предусмотрены два конуса K_1 и K_2 , внутри которых распространяется пучок света, и два боковых щита (на рисунке изображен лишь один щит M_1).

К металлической стойке вблизи стеклянной ванны E прикреплен электромагнитный вибратор G (см. рис. 10.9), стержень которого может колебаться с относительно большой частотой (10 – 40 Гц). При каждом погружении конца вибратора в жидкость на поверхности аце-

тона появляется новая волна. Для получения разных волн (круговых, плоских) на конце вибратора укрепляют различные насадки.

Для обнаружения столь коротких волн, как капиллярные, длиной в несколько миллиметров, необходимо стробоскопическое освещение. В данном приборе включение и выключение тока в электромагнитном вибраторе G синхронизировано с вращением

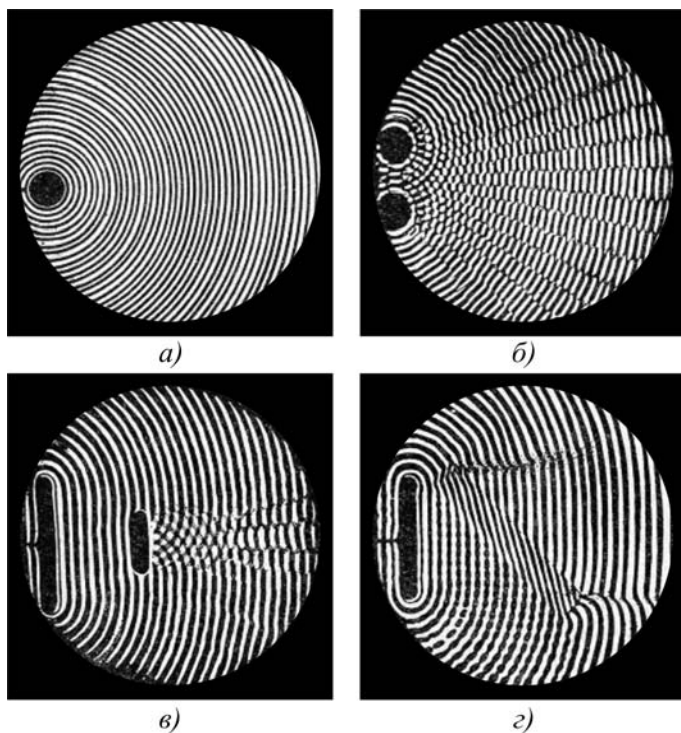


Рис. 10.11. Разные типы волн.

диска стробоскопа B , который периодически закрывает свет от фонаря. При этих условиях картина распространения капиллярных волн проецируется всегда на экран только в одной фазе. Зрители видят на экране волны не в движении, а в неподвижном состоянии (как бы моментальную фотографию их). Если нарушить синхронизацию между вращением диска стробоскопа и колебаниями вибратора, то проецируемые на экран волны на поверхности ацетона начнут передвигаться в ту или иную сторону. На рис. 10.11 показаны различные случаи распространения волн: *а)* распространение

сферических волн от одного вибрирующего стержня; б) интерференция волн, исходящих от двух вибрирующих стержней при одновременном погружении их в ацетон; в) распространение плоских волн, полученных при вибрации стержня, на конце которого закреплена продолговатая пластинка (на пути плоских волн поставлено препятствие, вследствие чего возникает дифракция); г) преломление плоских волн (на дно ванны с ацетоном погружена плоскопараллельная стеклянная пластинка).

Рассмотрим подробнее основные детали установки. Электромагнитный вибратор (см. рис. 10.12) состоит из двух небольших цилиндрических катушек 1 и 2, скрепленных основаниями. Витки катушек намотаны в противоположных направлениях и соединены между собой последовательно. В общем канале катушек расположен стальной стержень, удерживаемый с концов пружинами. Конец стержня, выходящий из нижнего отверстия катушки, несколько длиннее. К этому концу прикрепляют различные насадки, которые при вибрации стержня погружаются в ацетон. Стержень электромагнитного вибратора приходит в колебательное движение вследствие того, что постоянный ток поступает с помощью коммутатора попеременно то в верхнюю, то в нижнюю обмотку катушки. Синхронизация переключения тока в обмотках и вращения диска стробоскопа B достигается тем, что основная деталь коммутатора – цилиндрическое тело – укреплена на одной оси с диском.

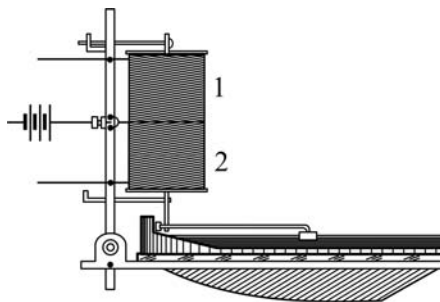


Рис. 10.12. Устройство вибратора.

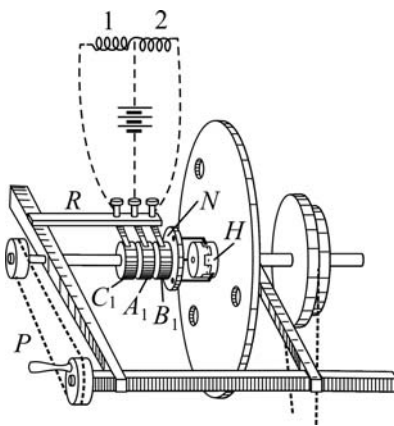


Рис. 10.13.

Устройство коммутатора.

Устройство коммутатора. Синхронизация переключения тока в обмотках и вращения диска стробоскопа B достигается тем, что основная деталь коммутатора – цилиндрическое тело – укреплена на одной оси с диском. При этих условиях синхронизация наступает при любой скорости вращения двигателя.

Схематическое устройство коммутатора показано рис. 10.13. Цилиндрическое тело H состоит из двух медных равных по размерам зубчаток, имеющих по три зуба угловой шириной около 60° и вложенных одна в другую. Зубья одной из них расположены между зубьями другой, а в местах их соприкосновения нанесен слой изоляционного лака, поэтому одна часть коммутатора электрически-изолирована от другой. Поверхности коммутатора касаются три щетки (две из них показаны на рисунке). Они укреплены на щеткодержателе и соединены через медные кольца A_1 , B_1 , C_1 и латунные скользящие контакты соответственно с концами катушек 1 и 2 вибратора и с одним из полюсов батареи, питающей его. В одном положении коммутатора замыкается одна пара щеток, и ток попадает в первую катушку вибратора и не попадает во вторую. При повороте коммутатора на угол 60° замыкается другая пара щеток, и ток поступает во вторую катушку вибратора. Переключение происходит из-за того, что средняя щетка касается то одной, то другой зубчатки, а крайние щетки все время соединены со своими зубчатками. Следовательно, при вращении цилиндрического тела H вместе с диском стробоскопа электрический ток попеременно поступает то в одну, то в другую обмотку вибратора, причем эти перемены совпадают с моментом или прохождения, или задержки светового потока, освещающего ванну с ацетоном (коммутатор имеет шесть пластин, диск стробоскопа – три отверстия).

Если желательно нарушить синхронизацию между вращением диска и колебаниями вибратора, необходимо изменить угловое положение щеток относительно контактных поверхностей тела H . Для этого предусмотрена возможность медленного вращения от руки щеткодержателя рукояткой P привода.

Щеткодержатель N представляет собой диск из изоляционного материала, насаженный на ось, расположенную в одном направлении с осью стробоскопа, но механически и электрически с ней не связанную. На этой же оси насажены кольца A_1 , B_1 , C_1 . Скользящие контакты, касающиеся этих колец, прикреплены к пластинке R из изоляционного материала и допускают вращение коммутатора в обоих направлениях. При медленном вращении щеткодержателя N с помощью ручного привода P картина волн на экране перемещается в ту или иную сторону, в соответствии с направлением и величиной скорости вращения щеткодержателя.

Установка смонтирована на тележке с довольно массивной крышкой, где расположены все необходимые части: дуговой фо-

нарь, двигатель, объектив, реостаты для регулировки скорости вращения двигателя и силы тока в обмотках вибратора и т. д.

10.3.1.1. Сферические и плоские волны.

Демонстрируются основные типы волн – «сферические» и «плоские», возникающие при использовании маленькой круглой насадки на вибраторе («точечный» источник) или длинной плоской насадки.

10.3.1.2. Отражение и преломление волн.

Демонстрируется структура волнового поля, образующегося при отражении плоской волны от плоского «зеркала», установленного под углом к направлению распространения волны. «Зеркало» моделируется вертикальной пластиной, поставленной на дно кюветы и выступающей над поверхностью жидкости.

Преломление волн в плоскопараллельной пластине и «линзе» наблюдается при погружении на дно кюветы прозрачных стеклянных пластинок соответствующей формы, меняющих над собой толщину слоя жидкости. На границе слоев с различной толщиной наблюдается изменение скорости распространения капиллярных волн и, соответственно, их преломление.

10.3.1.3. Интерференция волн.

Наблюдается интерференционная картина от двух «точечных» источников, для чего используется насадка с двумя маленькими круглыми выступами.

10.3.1.4. Дифракция волн: край экрана, щель, две щели, «решётка».

Демонстрируются основные типы дифракционных явлений – огибание края экрана, «сферическая» волна от небольшого отверстия (щели) в экране, дифракция на двух и нескольких щелях («дифракционная решетка»). Препятствия представляют собой вертикальные пластины с отверстиями соответствующей формы, устанавливаемые вертикально на дно кюветы.

10.3.2. Капиллярные волны в кювете на кодоскопе⁵.

Современная установка для демонстрации основных волновых явлений при помощи наблюдения капиллярных волн собрана на базе

⁵ Предложена и создана сотрудником КФД Ю.В. Старокуровым.



Рис. 10.14. Установка для наблюдения капиллярных волн на базе кодоскопа.

кодоскопа, проецирующего изображение этих волн на большой экран. Прозрачная кювета с водой устанавливается в горизонтальном положении на кодоскопе и подсвечивается снизу мощным светодиодом, питаемым от специальной электронной схемы, управляемой микрокомпьютером. Сбоку кюветы установлены два вибратора, сигнал на которые подается от той же схемы (см. рис. 10.14). Частоты переменных напряжений, подаваемых на диод и на вибраторы, регулируются в широких пределах и могут совпадать или немного отличаться друг от друга. В последнем случае можно наблюдать медленно «расходящиеся» от источников или «сходящиеся» к ним волны. Устанавливая на вибраторы различные виды насадок, а на дно кюветы – различные препятствия, можно показывать те же эксперименты по наблюдению волновых явлений, что и в демонстрации **10.3.1**.

10.4. Стоячие волны.

После демонстрации бегущих волн рекомендуется показывать опыты по возбуждению и анализу стоячих волн.

10.4.1. Стоячие волны на струне с электрокамертоном.

Демонстрируются поперечные стоячие волны на горизонтальной струне, возбуждаемой электрокамертоном (см. рис. 10.15). Один конец струны крепится на штативе, а другой – на специаль-

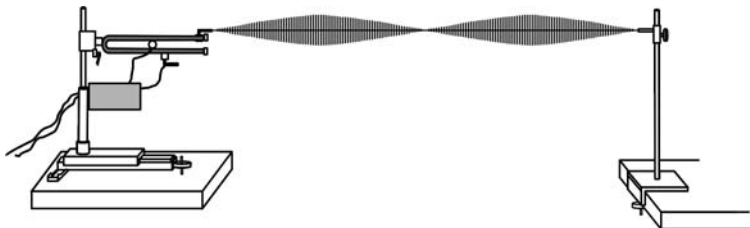


Рис. 10.15. Стоячие волны на струне, возбуждаемые электрокамертоном.

ной насадке, надетой на одну из ветвей камертона. Натяжение струны изменяется при помощи регулировочного винта на ножке подставки электрокамертона. При изменении натяжения наблюдается ряд обертонов, соответствующих укладыванию на длине струны одной, двух, трех и т. д. полуволн. Используя стробоскопическое освещение в затемненной аудитории, можно показать при соответствующем подборе частоты стробоскопа «замедленные» колебания струны на разных модах и колебания ветвей камертона, происходящие в противофазе. Демонстрация используется также при показе вынужденных колебаний струны (см. демонстрацию 6.3.8).

10.4.2. Стоячие волны на резиновой трубке (в потоке воздуха).

На аудиторном столе между двумя штативами натягивается резиновая трубка. Обдувая ее из сопла струей сжатого воздуха, направленной перпендикулярно трубке, добиваются установления на ней стоячей волны в режиме автоколебаний (см рис. 10.16). Число полуволн, укладывающихся на длине трубки, зависит от силы ее натяжения и от местоположения сопла, которое должно находиться вблизи пучности соответствующей моды колебаний.

Демонстрация используется также в разделе «Колебания» (см. демонстрацию 6.4.11).

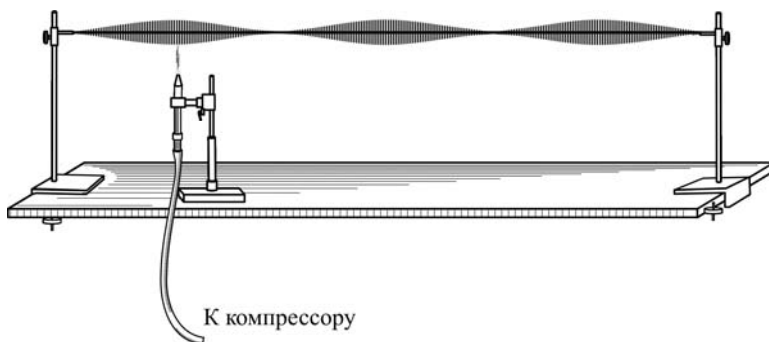


Рис. 10.16. Стоячие волны на резиновой трубке, возбуждаемые потоком воздуха.

10.4.3. Стоячие волны на стальной линейке (прибор Н. М. Конопаткина).

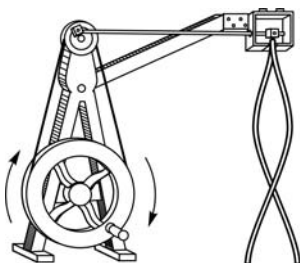


Рис. 10.17. Стоячие волны на приборе Н. М. Конопаткина.

Наблюдаются поперечные стоячие волны на стальной линейке, подвешенной вертикально (см. рис. 10.17). Нижний конец линейки свободен, а верхний закреплен на оси и приводится в колебательное движение с разными частотами при помощи кривошипно-шатунного механизма, установленного на центробежной машине. Стоячие волны соответствуют частотам, при которых на длине линейки укладывается нечетное число четвертей длины волны λ ($\lambda/4$, $3\lambda/4$ или $5\lambda/4$).

10.4.4. Ксилофоны (деревянный и металлический).



Рис. 10.18. Деревянный ксилофон.

Частота стоячих волн, возбуждаемых при ударе по середине упругой пластинки, зависит от ее длины; это является основой действия простейшего музыкального инструмента – ксилофона. На лекциях демонстрируются ксилофоны с деревянными и металлическими пластинками, звуки из них извлекаются при помощи ударов специальными молоточками (см. рис. 10.18).

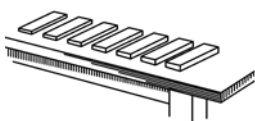


Рис. 10.19. «Гамма» на деревянных дощечках.

10.4.5. Набор деревянных пластинок («гамма»).

Демонстрируется звучание «гаммы» на наборе дощечек со все увеличивающейся толщиной, которые по очереди роняются на стол или на пол аудитории (см. рис. 10.19).

10.4.6. Труба Рубенса⁶.

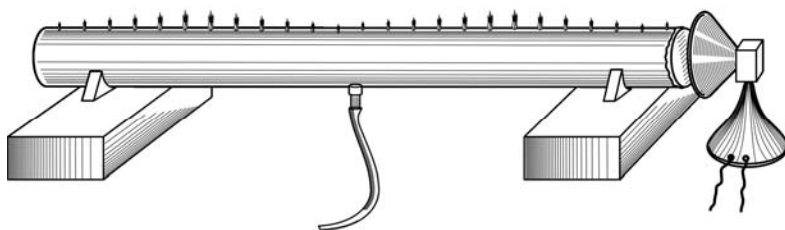


Рис. 10.20. Труба Рубенса.

Длинную горизонтальную цилиндрическую трубу с множеством отверстий, расположенных через равные промежутки вдоль трубы в ее верхней части, присоединяют к газовой сети, и метан, выходящий из отверстий, поджигают. Один конец трубы заглушен, а другой, прикрытый упругой мембраной, возбуждается динамиком от звукового генератора. В трубе возникают продольные стоячие звуковые волны, причем распределение их узлов и пучностей вдоль трубы наблюдается по высоте языков пламени, выходящих из отверстий (см. рис. 10.20). Демонстрируются стоячие волны на разных частотах, при которых на длине трубы укладывается разное число полувольт.

10.4.7. Продольные колебания стержней.

Деревянные тонкие стержни различной длины укрепляют в массивной металлической подставке (см. рис. 10.21). Если провести вдоль каждого стержня сверху вниз пальцами, обсыпанными порошком канифоли, то стержни придут в довольно интенсивные продольные колебания и будут издавать звук. Высоты звуков, издаваемых стержнями, обратно пропорциональны их длинам. Длины стержней следует подобрать так, чтобы составил мажорный аккорд.

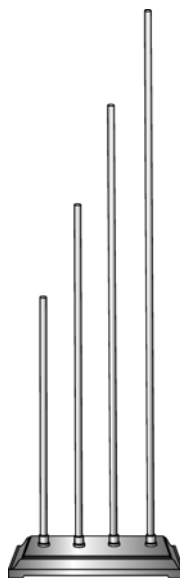


Рис. 10.21. Продольные колебания стержней.

⁶ Г. Рубенс (1865 – 1922) – немецкий физик, член Берлинской Академии наук.

Указания: 1. Примерные размеры стержней: 75, 60, 50 и 37,5 см; диаметр каждого стержня 9–12 мм. 2. Стержни изготавливают из сухой еловой доски. Доску следует взять без сучков, с ровной линией слоев. Поверхности стержней после обработки рубанком надо отшлифовать наждачной бумагой малых номеров.

Опыт можно оформить и иначе: закрепить в массивной подставке стальной стержень горизонтально в его средней части. При возбуждении одного из концов стержня путем натирания накаливаемой кожей второй конец начинает колебаться в продольном направлении. Заметить эти вибрации можно по отскакиванию от второго конца стержня небольшого костяного или металлического шарика, подвешенного на нити к штативу. В начальном положении шарик должен касаться конца стержня. Данный вариант установки называется «прибором Кундта⁷».

Возбудить на стержне стоячие волны можно и электромагнитным способом. У одного из концов стержня надо расположить сердечник электромагнита, обмотка которого присоединена к звуковому генератору. Подбирая частоту переменного тока, посылаемого в обмотку, можно добиться установления на стержне нечетного числа полуволн с пучностями смещений на свободных концах и узлом посередине, где стержень закреплен. Обнаружить колебания противоположного конца стержня в этом случае можно также электромагнитным способом, поставив вблизи него второй электромагнит. При колебаниях стержня в обмотке этого электромагнита возбуждается переменная электродвижущая сила, которая после усиления может быть обнаружена электронным осциллографом, телефоном или репродуктором.

10.4.8. Струны (см. также демонстрацию 6.4.9).

Законы звучания струн обычно демонстрируют на деревянном ящике (сонометре), на верхней поверхности которого натянуты струны, навертываемые с помощью ключа на стальные колки (см. рис. 10.22). Колебания струн возбуждают при помощи смычка или ударами молотка. Одну из струн, например среднюю, рекомендуется оттягивать с помощью груза. На такой установке можно показать зависимость частоты звука, издаваемого струной, от натяжения, от массы (линейной плотности) струны и от ее длины. В последнем случае изменяют длину звучащей час-

⁷ А. А. Э. Э. Кундт (1839 – 1894) – немецкий физик, иностранный член-корреспондент Петербургской Академии наук.

ти струны, подкладывая под нее деревянную подставку *a* («кобылку») – сначала на середине, а потом на одной трети длины струны. Чтобы оставшая часть струны не звучала, ее охватывают глушителем *b*, который представляет собой две складывающиеся дощечки, обшитые сукном или замшей.

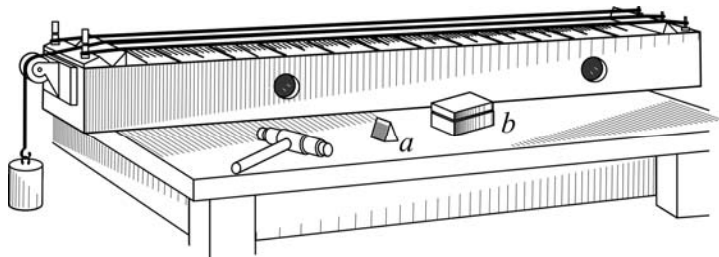


Рис. 10.22. Струны на сонометре.

Опыт проводят следующим образом: сначала обе крайние струны настраивают в унисон, затем одну из них укорачивают подставкой. При сравнении звучания этих струн легко уловить, что укороченная струна издает более высокий тон.

Зависимость частоты звука струны от ее длины можно наглядно продемонстрировать и на одном из щипковых инструментов: балалайке, мандолине, гитаре, если они имеются в наличии.

10.5. Фигуры Хладни⁸.

Образование узлов и пучностей на вибрирующих пластинах обычно демонстрируют на приборе, известном под названием пластин Хладни. Фигуры Хладни можно показать или непосредственно во время опыта, если аудитория небольшая, или же спроецировать с по-



Рис. 10.23. Фигуры Хладни.

⁸ Э.–Ф. Хладни (1756 – 1827) – немецкий физик, иностранный член-корреспондент Петербургской Академии наук.

мощью эпидиаскопа на экран после опыта. В Кабинете физических демонстраций имеются пластины овальной, треугольной и квадратной формы, закрепленные на подставках по центру каждой пластины. Колебания в них возбуждают смычком (см. рис. 10.23), предварительно посыпав пластины мелкой пробковой пылью. Проводя смычком в разных местах на их краях, а также касаясь пластин пальцем, наблюдают разные моды их поперечных колебаний.

Опыт допускает один интересный вариант, предложенный С. И. Усагиным. Ферромагнитный стержень вводят в канал катушки, обмотка которой питается переменным током от звукового генератора. К выступающему концу стержня прикрепляют пластину, которую посыпают песком. Размеры катушки, пластины и стержня должны быть подобраны так, чтобы вся установка умещалась под эпидиаскопом. При включении тока стержень и связанная с ним пластина вибрируют, причем на ней устанавливается система узлов и пучностей, отличная от системы, получаемой при возбуждении смычком, поскольку теперь оно действует в центре, а не на краю пластины. Изменение частоты тока в катушке влечет за собой изменение картины распределения узлов и пучностей.



Рис. 10.24. Колокол.

10.6. Колокол.

В Кабинете физических демонстраций физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова имеется небольшой колокол (см. рис. 10.24), и можно продемонстрировать его различное звучание при ударах по разным местам и возбуждении, соответственно, разных мод его колебаний.

10.7. Поляризация волн.

Следующие эксперименты можно показывать как в разделе «Механика», так и в разделе «Оптика» курса общей физики.

10.7.1. Волны на резиновой трубке, проходящей через ящик с прорезями.

Создавая на резиновой трубке поперечные колебания, совершающиеся поочередно в различных плоскостях, можно пока-

зать различные случаи линейной (плоской) поляризации поперечных волн. Беспорядочные поперечные колебания резиновой трубки, совершающиеся в различных плоскостях, моделируют неполяризованные поперечные волны. Применительно к распространению света различные поперечные волны на трубке имитируют колебания в линейно поляризованном (плоскополяризованном) или в естественном свете.

Действие линейных поляризатора и анализатора на поперечные волны можно продемонстрировать с помощью двух деревянных рам, сделанных из досок толщиной около 1 см. Высота рамы около 1 м, ширина вдоль трубки не меньше 30 см, ширина щели около 5 см.

Демонстрация действия поляризатора: укрепляют деревянную раму неподвижно на столе с помощью струбцинок. Сквозь нее пропускают длинную резиновую трубку, один конец которой закреплен, а другой (свободный) экспериментатор держит в руке. Экспериментатор задает трубке произвольные колебания так, чтобы плоскость их все время менялась. Рама, действуя как поляризатор, пропускает колебания лишь в одной определенной плоскости – вдоль щели. Таким образом, резиновая трубка, колеблющаяся до рамы беспорядочно, после прохождения сквозь раму колеблется только в одной плоскости (см. рис. 10.25).

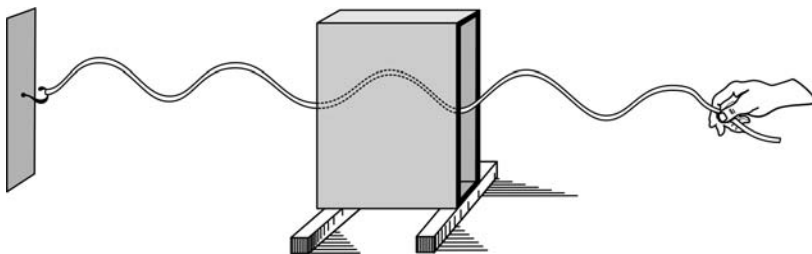


Рис. 10.25. Действие «поляризатора».

Демонстрация совместного действия поляризатора и анализатора: вторая рама, тоже закрепленная на столе, служит «анализатором». Если щели рам параллельны друг другу, то вторая рама пропустит колебания, вышедшие из первой. Таким образом, картина распространения колебаний по трубке будет следующей: первая рама пропускает колебания только в одной плоскости, и эти колебания проходят сквозь вторую раму и распространяются до конца трубки без изменения плоскости колебаний. Чтобы показать действие поляризатора и анализатора в скрещенных положениях, нужно

поставить вторую раму так, чтобы щели рам были перпендикулярны друг другу. Расстояние между рамами менять не нужно. Если первая рама укреплена вертикально, то вторую кладут на подставку на уровне $1/2$ высоты первой рамы. В «скрещенном» положении вторая рама совершенно не пропускает колебаний, вышедших из первой. Таким образом, картина распространения колебаний по трубке будет следующей: до первой рамы колебания беспорядочны, между первой и второй рамами – колебания в одной плоскости,

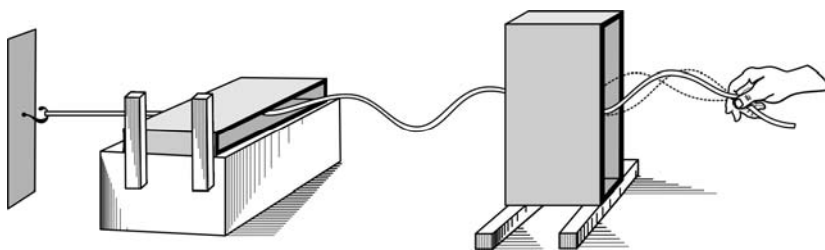


Рис. 10.26. Совместное действие скрещенных «поляризатора» и «анализатора».

после второй рамы колебаний нет совсем (см. рис. 10.26).

10.7.2. Модель поляризации – «ёршик» между пластинами.

В качестве модели неполяризованной поперечной волны можно использовать обычный «ёршик» для мойки посуды и две прозрачные пластинки, скрепленные параллельно друг другу на небольшом расстоянии. Протягивая ёршик за ручку между пластинками, наблюдают, как его хаотически ориентированные волоски ориентируются в одной плоскости.

Глава 11 АКУСТИКА

Вопросы излучения, распространения и регистрации звуковых волн в газах, жидкостях и твердых телах, а также законы восприятия звуков органами слуха человека в силу своей специфики обычно излагаются в учебниках в виде отдельного подраздела курса механики (см., например, [35, глава XX]). Поэтому в главе 11 данного пособия собраны описания имеющихся в Кабинете физических демонстраций физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова лекционных экспериментов по этой тематике.

11.1. Возбуждение звуковых волн.

При демонстрации опытов по акустике в качестве источников звука применяют камертоны, сирены, струны, органные трубы, свистки и электроакустические приборы – динамики, преобразующие переменные токи различных частот в звук той же частоты.

11.1.1. Набор камертонов.

Набор камертонов с резонаторными ящиками (см. рис. 11.1), дающий нормальную гамму звуков, устанавливают на демонстрационном столе и возбуждают камертоны поочередно – от самого



Р

ис. 11.1. Набор камертонов.

большого по размерам до самого маленького. Предлагают аудитории в течение нескольких секунд вслушиваться в звучание каждого возбужденного камертона в отдельности и затем всех вместе. Возбуждают камертоны ударами «билки» (молотка с резиновым наконечником) или движением скрипичного смычка по концам ветвей. В этом

случае извлекается основной тон камертона. При движении смычка по средней части ветвей возбуждается первый оберто́н. Во время возбуждения камертона ударом билки держать его следует только за ножку, при этом резонаторный ящик должен оставаться навесу.

Помимо непосредственного восприятия на слух звуковых колебаний камертона, можно наблюдать эти колебания с помощью шарика (костяного или целлулоидного), подвешенного на нити к штативу.

11.1.2. Камертон с шариком, резонанс двух камертонов (см. также демонстрацию 6.3.5).

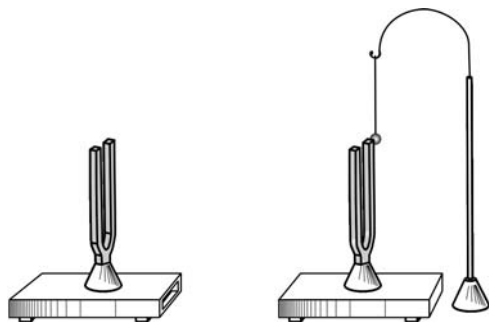


Рис. 11.2. Резонанс двух камертонов.

Закрепленные на резонаторных ящиках два камертона одинаковой частоты располагают на демонстрационном столе на расстоянии 60-80 см один от другого (см. рис. 11.2). Отверстия резонаторных ящиков обращены друг к другу. Ветвь одного из камертонов (второго) касается

подвешенного на нити небольшого шарика, выточенного из кости (лучше и проще всего использовать для этого полый целлулоидный шарик, подвешенный бифилярно к штативу). Ударом резинового молоточка или с помощью смычка возбуждают первый камертон. Если частоты камертонов равны или достаточно близки друг к другу, то второй камертон возбуждается дошедшими до его ящика звуковыми волнами. О его возбуждении можно судить или по отскокиванию шарика, или непосредственно по звучанию (для этого необходимо прекратить звучание камертона-генератора, коснувшись его ветвей рукой).

Опыт повторяют, изменяя частоту одного из камертонов. Для этого на одной из ветвей камертона укрепляют небольшую металлическую насадку. В этом случае резонанс не возникает, и шарик перестает отскакивать.

Опыт можно несколько видоизменить: убрать камертон-генератор, а вместо него поставить органную трубу, открытый конец которой обращен к входному отверстию резонаторного ящика

камертона. Если частота звука, издаваемого органной трубой, близка к собственной частоте камертона, то он возбуждается.

11.1.3. Электрокамертоны – наблюдение за колебаниями ветвей камертонов.

Наблюдение за колебаниями ветвей электрокамертонов (см. рис. 11.3) в замедленном темпе производится после их включения при помощи стробоскопического освещения с частотами, близкими к частотам их колебаний, в затемненной аудитории. В этом случае ветви камертона медленно передвигаются, то сближаясь, то отходя друг от друга. Этот вариант опыта, кроме того, убеждает зрителя в том, что ветви камертона колеблются в противофазе.

Описание деталей устройства электрокамертона приведено в главе 6 «Колебания», раздел «Автоколебания», демонстрация 6.4.7.

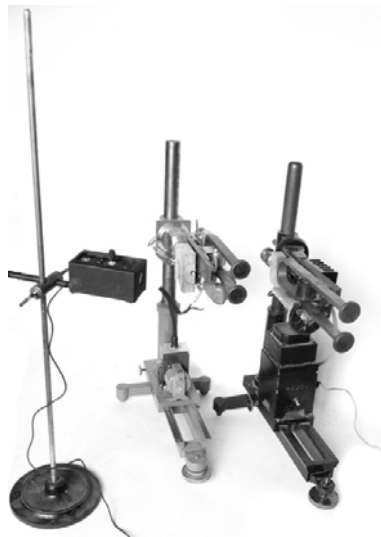


Рис. 11.3. Электрокамертоны со стробоскопом.

11.1.4. Сирены Савара (зубчатые колёса).

Один из удобных способов получения звуков и измерения их частот был предложен Феликсом Саваром¹ (1830 г.). К зубчатому колесу, вращающемуся с определенной угловой скоростью, прижимают упругую пластинку, издающую звук при каждом перескоке с одного зубца колеса на другой. В Кабинете физических демонстраций имеется набор таких сирен с разным числом зубцов

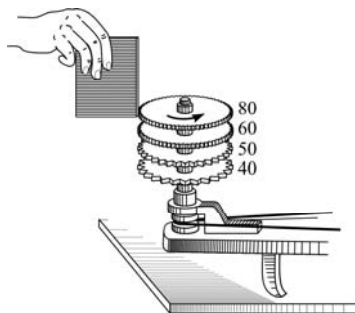


Рис. 11.4. Сирены Савара.

¹ Ф. Савар (1791 – 1841) – французский медик и физик, член Парижской Академии наук.

(см. рис. 11.4), позволяющий получать звуки различных частот. Опыты Савара позволили найти верхнюю частотную границу слышимости звуков ухом человека.

11.1.5. Дисксовая сирена Зеебека².

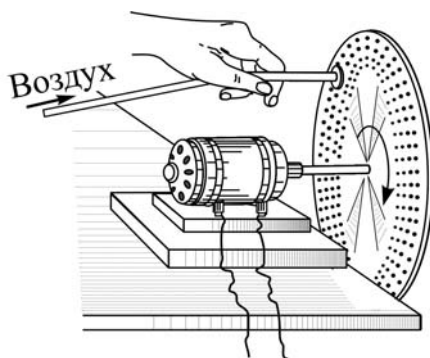


Рис. 11.5. Сирена Зеебека.

Струя сжатого воздуха из шланга направляется на пластмассовый диск с множеством отверстий, быстро вращающийся на валу электродвигателя (см. рис. 11.5). Периодическое прерывание потока газа вызывает появление звуков, частота которых зависит от количества отверстий, просверленных в диске на разных расстояниях от центра, и от частоты его вращения.



Рис. 11.6. Сирена Каньяр де Ла-Тура.

11.1.6. Сирена Каньяр де Ла-Тура³ (воздушный «поющий» гироскоп).

Периодическое прерывание потока воздуха рождает звук определенного тона. Этот эффект демонстрируется при помощи сирены Каньяр де Ла-Тура (см. рис. 11.6), в которой струя воздуха одновременно раскручивает ротор гироскопа и за счет прерывания потока мно-

² Т. И. Зеебек (1770 – 1831) – немецкий физик, член Прусской (Берлинской) Академии наук.

³ Ш. Каньяр де Ла-Тур (1777 – 1859) – французский физик, химик и механик.

жеством отверстий на роторе вызывает появление громкого звука.

11.1.7. Набор органных труб (см. также демонстрацию 6.4.4).

Органые трубы бывают разных типов: трубы со щелью (открытые или закрытые) и язычковые. Звучание органной трубы вызывают, продувая воздух ртом, нагнетательным насосом и т. п. Удобно это делать на органном столике (см. рис. 11.7).

Для демонстрации зависимости тона звука от размеров органной трубы на органном столике, соединенном шлангом с воздуходувкой, устанавливают несколько труб различной длины и поочередно возбуждают их, подавая воздух, начиная с трубы, дающей самый высокий тон. Затем опыт повторяют в обратной последовательности.

Затем на органном столике устанавливают органную трубу, снабженную поршнем для изменения длины звучащего в ней столба воздуха. При передвижении поршня изменяется тон звука.

Следует также сравнить тон звуков, издаваемых закрытой и открытой трубами одинаковых геометрических размеров.

Зависимость тона звука от длины вибрирующей части язычка трубы демонстрируют следующим образом. Язычковую трубу устанавливают на органном столике. При возбуждении ее струей воздуха возникает звук, частота которого зависит от длины вибрирующей части язычка трубы.

11.1.8. Набор свистков – зависимость тона от размера.

Источником звука может быть любая металлическая трубка, закрытая с одного конца, над открытым концом которой продувают воздух (например, ключ, над которым ртом продувают воздух). Изменяя размеры полости, демонстрируют указанную зависимость.

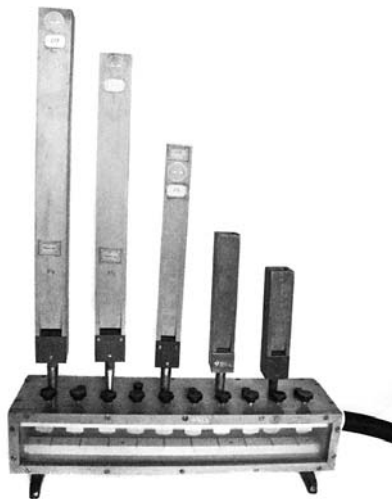


Рис. 11.7. Набор органных труб.

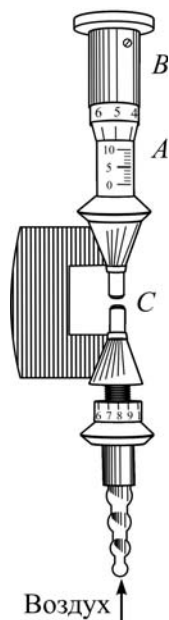


Рис. 11.8. Свисток Гальтона.

Для получения звуков высокого тона (с частотой до 20000 Гц) служит свисток Гальтона⁴ (см. рис. 11.8). Он представляет собой небольшую трубку *A*, объем которой можно менять, передвигая в ней небольшой поршень с помощью микрометрического винта *B*. Против отверстия трубки расположено круглое сопло *C*, через которое грушей или нагнетательным насосом продувают воздух. Сопло можно тоже передвигать относительно отверстия трубки *A*, оценивая это передвижение по шкале. С изменением объема трубки *A* тон звука изменяется. К прецизионным свисткам Гальтона обычно приложена шкала частот звука, получаемого от свистка в зависимости от объема трубки *A* при определенном положении сопла *C*. Частота звука, издаваемая свистком Гальтона, может превысить верхнюю границу частот звуков, воспринимаемых человеком. В этом случае звук обнаруживают каким-либо индикатором. Таким индикатором может служить пламя, расположенное в фокусе вогнутого зеркала, или микрофон, соединенный через усилитель с электронным осциллографом. Если после усилителя поставить детектор, то индикатором может служить гальванометр. Микрофон в этом опыте должен отзываться на звуки высоких частот, например, действовать на базе сегнетоэлектрических элементов.

11.1.9. Патефон.



Рис. 11.9. Патефон.

В качестве устаревшего и в настоящее время музейного способа извлечения звуков можно продемонстрировать патефон с пластинками (см. рис. 11.9), имеющийся в Кабинете физических демонстраций физфака МГУ. В патефоне игла, движущаяся при вращении диска после заводки специальной пружины по фигурной канавке пластинки, возбуждает колебания металлической мембраны, звучание которой передается наружу через подвижную трубку-рупор.

⁴ Ф. Гальтон (1822 – 1911) – английский географ, психолог и антрополог.

11.1.10. Звуковые генераторы с динамиками.

Наиболее удобными и мощными современными источниками звуков определенных частот являются динамики, включенные в цепь переменного тока, частоту которого можно изменять простым способом в широких пределах, пользуясь электронными звуковыми генераторами.

В звуковых генераторах, выпускаемых промышленностью, обычно предусмотрены различные выходные сопротивления и регуляторы выходного напряжения и мощности, что дает возможность питать ими разнообразные электромеханические преобразователи звука. Присоединив к звуковому генератору динамик, плавным поворотом регулятора частоты прибора демонстрируют весь спектр звуковых частот.

11.2. Звучание электрического звонка под колоколом форвакуумного насоса.



Рис. 11.10. Звонки под колоколом насоса.

Необходимость передающей среды для распространения звуковых волн демонстрируется при помощи электрического звонка, помещенного под колоколом форвакуумного насоса (см. рис. 11.10). После включения звонка звук из-под колокола слышен до тех пор, пока оттуда не выкачан насосом воздух, что контролируется по U-образному ртутному манометру. После остановки насоса и напуска воздуха под колокол слышимость звука, издаваемого звонком, восстанавливается.

11.3. Скорость звука.

Наглядно продемонстрировать конечную и не слишком большую величину скорости распространения звуковых волн можно при помощи следующих экспериментов.

11.3.1. «Улитка» Н. А. Умова.

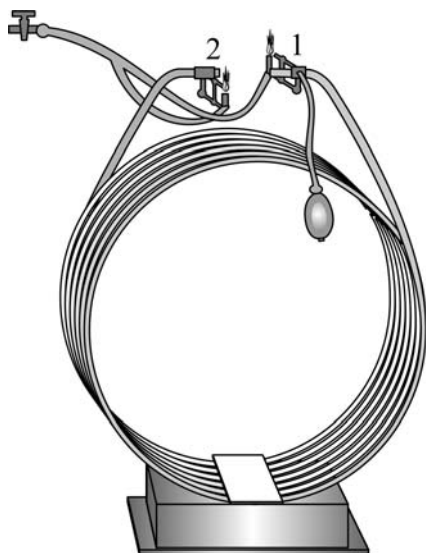


Рис. 11.11. «Улитка» Н. А. Умова.

Металлическая трубка длиной около 100 м свернута в спираль диаметром около 1 м, так что ее концы 1 и 2 расположены вблизи друг друга (см. рис. 11.11). Вдоль трубки распространяется со скоростью звука импульс сжатия от резиновой груши. Прохождение импульса отмечается по колебанию язычков пламени небольших горелок, питаемых от газовой сети и установленных у концов трубки: воздух из сопел, присоединенных к трубке, задувает пламя. Хорошо заметно запаздывание колебаний язычков пламени у нача-

ла и конца трубки (время распространения импульса вдоль трубки составляет $\sim 0,3$ с), а также многократное прохождение импульса туда и обратно за счет отражения от концов трубки.

11.3.2. Акустический интерферометр.

На экране осциллографа наблюдается фигура Лиссажу – эллипс, возникающий при подаче на отклоняющие пластины сигналов одинаковой частоты $f = 1$ кГц: от звукового генератора и от микрофона, расположенного на некотором расстоянии от динамика, возбуждаемого от того же генератора (см. рис. 11.12). При изменении расстояния между микрофоном и динамиком сдвиг фаз между колебаниями по осям X и Y на экране осциллографа меняется, и соответствующим образом изменяется форма и расположение эллипса; периодически он вырождается в прямую линию. Расстояние между положениями динамика, соответствующими одинаково

расположенной прямой на, экране, равно длине волны звука λ . Эти положения отмечаются мелом на аудиторном столе, и расстояние между ними, измеряемое линейкой, в условиях опыта составляет в среднем 34 см, откуда можно найти скорость звука в воздухе $v = f\lambda \approx 340$ м/с.

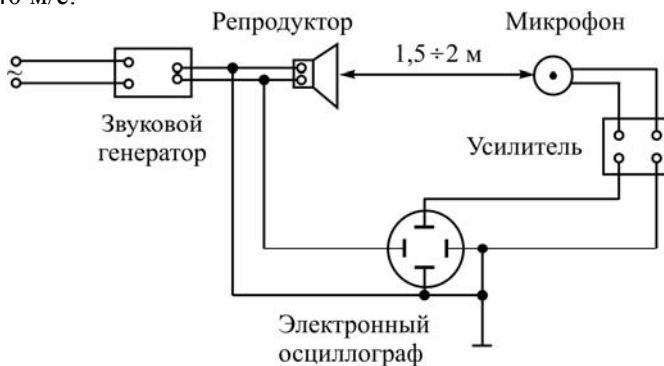


Рис. 11.12. Схема акустического интерферометра.

11.4. Акустические резонаторы Гельмгольца.

11.4.1. Зависимость собственной частоты от размеров резонатора.

Вблизи большого динамика-«колокольчика» устанавливаются три-четыре объемных акустических резонатора Гельмгольца, представляющих собой сферические полости разного объема, снабженные со стороны динамика неширокими

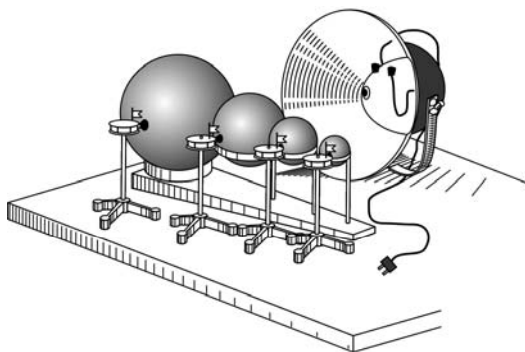


Рис. 11.13. Резонаторы Гельмгольца.

открытыми цилиндрическими отростками, а с противоположной стороны – узкими соплами, через которые воздух, выходя при резонансе с большой скоростью, раскручивает легкие вертушки (см. рис. 11.13). При постепенном увеличении частоты колебаний звукового генератора, к которому присоединен динамик, наблюдает-

ся резонанс и раскручивание индикаторов-вертушек: вначале у самого большого, затем у среднего, потом у маленького, и, наконец, у самого маленького резонатора. Резонансы достаточно узкие (добротность резонаторов составляет ~ 10), так что одновременно у разных резонаторов вертушки не раскручиваются.

11.4.2. Зависимость собственной частоты от рода газа (наблюдение биений при сложении волн от одинаковых резонаторов, заполненных воздухом и метаном).

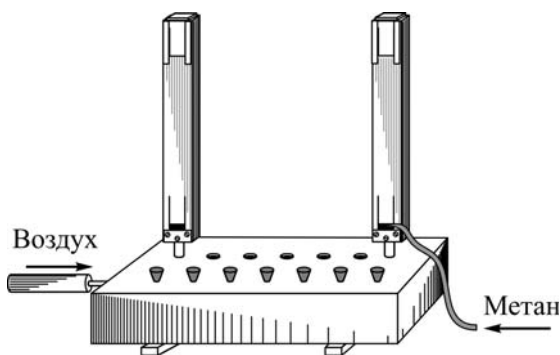


Рис. 11.14. Наблюдение биений при заполнении одной из двух одинаковых органных труб метаном вместо воздуха.

При продувании через них воздуха слышны биения, частота которых резко изменяется, когда в одну из труб начинают подавать вместе с воздухом более легкий газ – метан из газовой сети.

Резонансная частота объемного резонатора зависит не только от его размеров, но и от скорости звука в газе, заполняющем резонатор. Эта зависимость демонстрируется при помощи двух язычковых органных труб с близкими частотами (см. рис. 11.14).

При продувании че-

11.4.3. Модель глотки человека, разговор в атмосфере гелия.



Рис. 11.15. Модель глотки человека.

Глотка человека также является объемным резонатором, и при вдыхании легкого газа (например, гелия) тембр голоса должен измениться (повышаться). Демонстрируется анатомическая модель глотки человека (см. рис. 11.15) и изменение тембра голоса демон-

стратора при выдыхании газа из резиновой кислородной подушки, которая надувается гелием при подготовке демонстрации.

11.4.4. Зависимость собственной частоты резонатора от температуры газа.

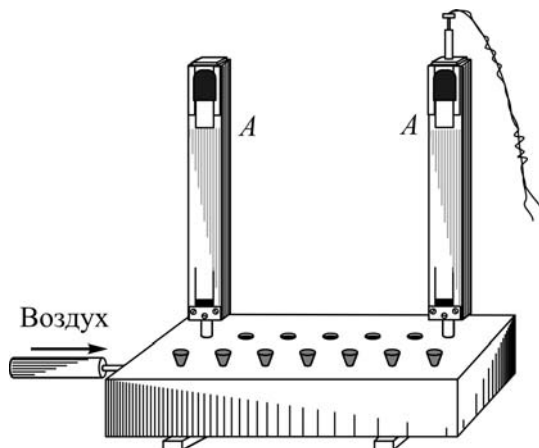


Рис. 11.16. Наблюдение биений при нагревании воздуха в одной из двух одинаковых органных труб.

Две открытые органные трубы одного тона устанавливают в отверстиях органного столика (см. рис. 11.16). Боковое отверстие столика толстым резиновым шлангом соединяют с нагнетающим воздух насосом. Внутри труб вводят стеклянные трубки несколько большей длины, чем органная труба. На одной из них в нижней части, примерно на $1/5$ длины трубы, навита нихромовая спираль, которая может быть включена в сеть переменного тока (при этом она нагревается до температуры $250-300\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Введение стеклянных трубок может вызвать акустическую расстройку органных труб. Это необходимо проверить до лекции, вызвав их одновременное звучание. В случае расстройки появляются звуковые биения. Чтобы трубы звучали в унисон, необходимо несколько передвинуть заслонку A у одной из них. Далее можно приступить к демонстрации самого опыта.

Демонстратор вновь вызывает одновременное звучание органных труб в течение нескольких секунд и убеждает слушателей в том, что трубы звучат в унисон. Затем включает электрический ток. Спираль нагревается и обогрывает окружающий ее воздух. Вследствие

увеличения скорости распространения звука в нагретом воздухе тон звука, получаемый от этой трубы, становится выше первоначального, что проявляется в возникновении акустических биений, которые отчетливо слышны в аудитории. Частота биений увеличивается по мере возрастания температуры воздуха. Выключив ток, улавливают уменьшение частоты биений.

11.4.5. Модуляция звука.

Перекрывая определенным образом поток воздуха, выходящий из языковой органной трубы, настроенной на частоту ~ 250 Гц, с резонатором Гельмгольца на конце (см. рис. 11.17), можно воспроизвести звучание простейших слов – «па-па» (а), «ма-ма» (б), «уа-уа» (в). Для показа эксперимента нужна предварительная тренировка демонстратора.

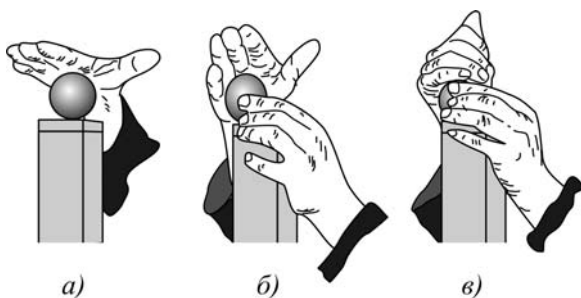


Рис. 11.17. Модуляция звука.

известии звучание простейших слов – «па-па» (а), «ма-ма» (б), «уа-уа» (в). Для показа эксперимента нужна предварительная тренировка демонстратора.

Репродуктор

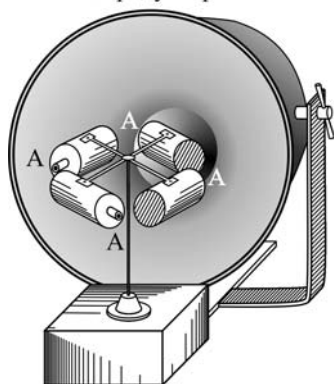


Рис. 11.18.

Акустическое реактивное колесо.

11.4.6. Акустическое реактивное колесо.

Акустическое реактивное колесо представляет собой вертушку, сделанную из четырех полых цилиндров *A*, подвешенных к концам легкого креста, центр которого имеет углубление для стальной игольчатой опоры (см. рис. 11.18). Каждый цилиндр-резонатор имеет в одном из оснований небольшое отверстие с отростком. Если поместить такую систему резонаторов, расположив их отверстия по или против часовой стрелки в звуковое поле мощного репродуктора, то при определенной частоте звука колесо начинает вращаться. Опыт следует повторить на разных частотах и

показать, что при частотах, больших или меньших собственной частоты резонаторов, вращение реактивного колеса не наблюдается.

11.4.7. Акустическое «захватывание».

На демонстрационный стол помещаются параллельно друг другу две открытые язычковые органнне трубы с близкими частотами, так что при подаче воздуха в них слышны биения. Затем экспериментатор разворачивает трубы так, чтобы они были расположены на одной линии открытыми концами друг к другу. При этом биения пропадают, так как происходит акустическое «захватывание» (явление открыто в 1931 г. К. Ф. Теодорчиком⁵ и С. Э. Хайкиным) – одна труба «навязывает» частоту собственных колебаний другой трубе, так как за счет нелинейных эффектов происходит принудительная синхронизация этих автоколебательных систем.

11.5. Звукопроводность твёрдых и жидких тел.

Камертон снимают с резонаторного ящика, а вместо него перпендикулярно верхней поверхности ящика ставят деревянный стержень длиной ~30 см и диаметром 8-10 мм. Если теперь колеблющийся камертон опустить стеблем на верхний конец стержня (см. левый рис. 11.19), то звучание камертона резко усилится. Опыт свидетельствует о том, что колебания камертона передаются через деревянный стержень довольно хорошо.

Для демонстрации звукопроводности жидкостей поступают следующим образом: камертон снимают с резонаторного ящика, а вместо него ставят мензурку или стакан, наполненный водой. На стебель камертона надевают корковую или дере-

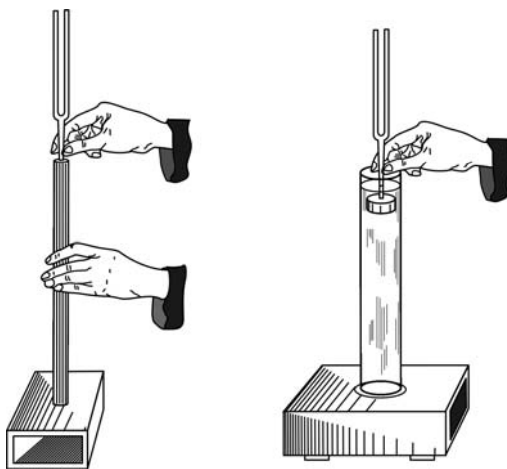


Рис. 11.19. Звукопроводность твердых и жидких тел.

⁵ К. Ф. Теодорчик (1891 – 1968) – профессор физического факультета МГУ, заведующий кафедрой колебаний (1939 – 1956 гг.).

вязную пробку, диаметр которой на 1–2 см меньше внутреннего диаметра сосуда. Далее возбужденный камертон опускают в мензурку с водой так, чтобы пробка погрузилась в воду на 1–2 см (см. правый рис. 11.19). При этом звучание камертона усиливается, что свидетельствует о звукопроводности воды и сосуда. Затем следует повторить опыт, несколько видоизменив его условия. Экспериментатор возбуждает камертон и производит поочередно две операции: сначала касается пробкой, насаженной на стебель камертона, края стеклянного сосуда, а затем тотчас же опускает пробку в воду. Звучание камертона во втором случае сильнее, чем в первом. Это сравнение убеждает аудиторию в том, что усиление звука при погружении камертона в воду определяется не только звукопроводностью стенок сосуда, но и звукопроводностью жидкости, заполняющей сосуд.

11.6. Отражение и фокусировка звука – зеркала Пикте⁶.

Параболические зеркала Пикте, обращенные друг к другу волнующими поверхностями, располагают на расстоянии 5–10 м. В фокусе одного из них укрепляют свисток Гальтона, снабженный резиновой грушей для продувания воздуха. В фокусе второго укрепляют горелку с тонким отверстием, соединенную с газовой сетью. Пламя этой горелки (высотой 10–12 см) служит чувствительным индикатором звуковых волн. При возбуждении свистка Гальтона пламя горелки, находящейся в фокусе второго зеркала, вздрагивает, опускается, делается бурлящим вследствие попадания на него воздушной волны, идущей от первого зеркала, затем отраженной от поверхности второго зеркала и сфокусировавшейся в том месте, где находится пламя.



Рис. 11.20. Зеркала Пикте.

м горелки, находящейся в фокусе второго зеркала, вздрагивает, опускается, делается бурлящим вследствие попадания на него воздушной волны, идущей от первого зеркала, затем отраженной от поверхности второго зеркала и сфокусировавшейся в том месте, где находится пламя.

⁶ М. А. Пикте (1752 – 1825) – швейцарский физик, член Лондонского и Эдинбургского королевских обществ, член-корреспондент Парижской АН.

Опыт с зеркалами можно повторить и в другом варианте: источником звука служит маленький динамик, возбуждаемый от звукового генератора на частоте около 10 кГц и расположенный в фокусе первого зеркала; приемником – микрофон, установленный в фокусе второго зеркала (см. рис. 11.20) и соединенный через усилитель с неоновой лампой. При звучании динамика неоновая лампа светится. Линия, соединяющая фокусы зеркал, должна быть перпендикулярна плоскостям, проходящим через края вогнутых зеркал.

Металлические зеркала Пикте используются также при чтении курса «Оптика» для демонстрации отражения и фокусировки инфракрасного излучения (опыт «Фокусировка холода»).

11.7. Анализ звука.

11.7.1. Прибор П. Н. Лебедева.

Прибор для анализа звуковых колебаний, сконструированный П. Н. Лебедевым (описан в статье в 1894 г.), имеющийся в музее Кабинета физических демонстраций физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова, действует следующим образом (см. рис. 11.21).

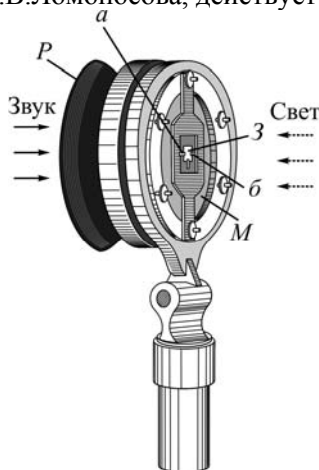


Рис. 11.21. Прибор П. Н. Лебедева для анализа звуковых колебаний.

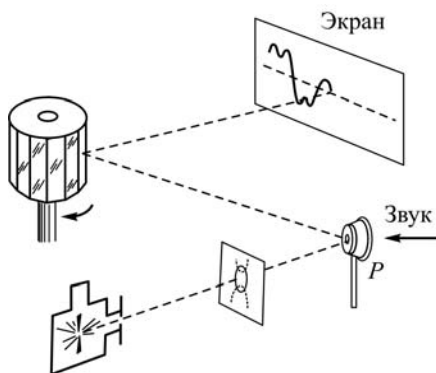


Рис. 11.22. Оптическая схема опыта.

Звуковые колебания через рупор P воздействуют на тонкую пробковую мембрану M , соединенную с легким зеркальцем Z таким образом, что смещение мембраны приводит к повороту зеркальца вокруг оси ab , лежащей в его плоскости. Для визуализации колеба-

ний мембраны и зеркала используется оптическая схема со вращающимся зеркальным барабаном (см. демонстрацию 6.2.2 и рис. 11.22). С помощью этого прибора П. Н. Лебедев рекомендовал демонстрировать следующие опыты:

1). *Сила звука*. Перед рупором прибора ставится на разных расстояниях звучащий камертон, и на экране демонстрируются синусоиды различных амплитуд. Если не изменять расстояние между рупором и камертоном, то можно наблюдать затухание колебаний во времени.

2). *Высота звука*. Перед рупором прибора последовательно располагаются возбужденные ударом молотка камертоны разных тонов, и получаемые кривые сравниваются между собой.

3). *Наложение друг на друга звуковых волн*. Демонстрируется одновременное звучание камертонов разных тонов перед рупором прибора.

4). *Тембр звука*. Звучание перед рупором прибора последовательно камертона, органной трубы, струны и т.д.

5). *График гласных звуков*, произнесенных на разные тона.

6). *Пение* перед рупором прибора.

7). *Разговорная речь*.

11.7.2. Спектр различных гласных звуков на осциллографе.

Микрофон, связанный с усилителем низкой частоты, присоединяют к вертикально отклоняющим пластинам электронного осциллографа. Когда на экране появится светлое пятно, включают генератор горизонтальной развертки осциллографа примерно на частоте 20-40 Гц. Далее перед микрофоном на расстоянии 0,5 м от него располагают различные источники звука, анализ которых желают произвести.

Опыт следует начать с камертонов различных тонов и показать, что при их звучании на одном и том же горизонтальном отрезке экрана укладывается различное число периодов синусоиды. Чем больше частота звучащего камертона, тем больше периодов синусоиды видно на экране при постоянной частоте горизонтальной развертки. Если взять камертон с большой частотой колебаний (2000 Гц), то на том же горизонтальном участке экрана уложится так много периодов синусоиды, что их трудно сосчитать и различить в отдельности. В этом случае увеличивают частоту развертки.

Далее перед микрофоном ставят другие источники звука (органную трубу, натянутую струну, репродуктор и т.д.) и повторяют опыт. Затем с помощью этой установки необходимо проанализировать спектральный состав разговорной речи, пения, гласных звуков

«а», «у», «и», «о» и отметить разнообразный характер кривых на экране осциллографа, соответствующих этим звукам.

Эта установка дает возможность демонстрировать сложение двух звуковых волн при возбуждении перед микрофоном камертонов как одного тона, так и разных. Весьма убедительна демонстрация на этой установке биения звуковых колебаний, когда в микрофон поступают звуковые волны от двух камертонов, несколько отличающихся друг от друга по частоте (нужно надеть металлическую насадку на ножку одного из синхронных камертонов).

Последовательное звучание перед микрофоном двух различных источников звука одной частоты (например, свистка и органной трубы) дает возможность уловить присутствие в графике колебаний этих источников обертонов, число и интенсивность которых определяют тембр излучаемого источниками звука.

11.7.3. Анализ звука при помощи компьютера.

Анализ спектра звуковых колебаний можно проводить также при помощи специальных компьютерных программ, например, программы «Спектрограф». Подробное описание этих экспериментов и возможностей соответствующего аппаратно-программного комплекса приведено в пункте 11.12.1.

11.8. Интерференция звука.

11.8.1. Прибор Квинке⁷.

Язычковая органная труба A (см. рис. 11.23) возбуждает звук в разветвленном канале, образованном двумя изогнутыми трубками B и C . Длина одной из трубок канала может плавно изменяться при ее раздвигании (как в музыкальных инструментах типа тромбона), длина другой неизменна. На выходе канала после соединения трубок надет рупор D , из которого выходит звук. Прибор позволяет наблюдать интерференцию – периодическое ослабление и усиление звука при изменении длины раздвижной трубки, так как звуковые волны, проходя по трубкам разной длины, приобретают разность фаз, пропорциональную их разности хода, и на выходе складываются. Отсчетное устройство E на приборе позволяет измерять разность хода волн между

⁷ Г. Г. Квинке (1834 – 1934) – немецкий физик, член-корреспондент Прусской (Берлинской) Академии наук.

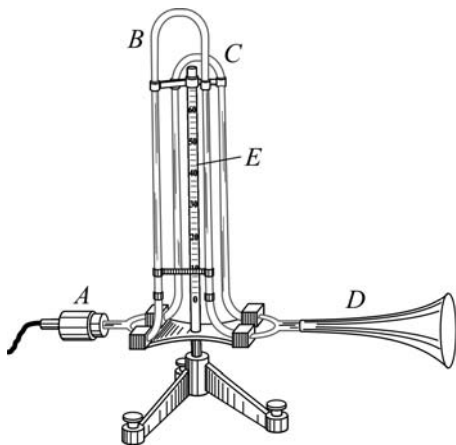


Рис. 11.23. Прибор Квинке.

рядам слушателей в аудитории, а затем перпендикулярно им. При этом слушатели воспринимают биения звука из-за интерференции звуковых волн, приходящих к ним от двух источников с переменной разностью хода. Если зафиксировать положение второго динамика, то биения прекращаются, то есть распределение интерференционных максимумов и минимумов в аудитории стабилизируется, но слушатели, сидящие в разных местах, слышат звук разной силы. Покачиваясь на своих местах, они могут в этом убедиться. Опыт полезно повторить, меняя частоту звука.

11.8.3. Интерференция звука при отражении от стенки.

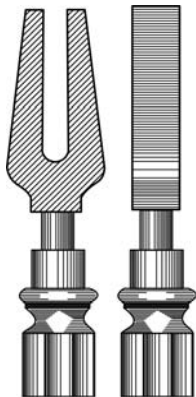


Рис. 11.24. Камертон на 2 кГц.

двумя последовательными исчезновениями звука и определять длину звуковой волны.

11.8.2. Сложение волн от двух динамиков, биения.

Для демонстрации используются два одинаковых динамика, подключенных к генератору звуковой частоты (~1 кГц). Один устанавливается неподвижно на аудиторном столе, а другой динамик экспериментатор двигает сначала в направлении, параллельном

Надо передвигать возбужденный камертон перпендикулярно рядам слушателей, сидящих в аудитории. Приближение и удаление камертона удобно производить вблизи классной доски, укрепленной на стене аудитории: при этих движениях возникают биения вследствие интерференции звуковых волн, излучаемых движущимся камертоном, и волн, отраженных от доски. Если прекратить передвижение камертона, биения исчезают.

Для постановки этого опыта необходимо взять камертон, издающий звук высокой частоты, порядка 2000 Гц (см. рис. 11.24). Так как камертоны такого диапазона частот не снабжены резонаторными ящиками (ящик был бы слишком мал), то камертон необходимо сильно возбудить. Укрепив камертон в каком-либо держателе, проводят сбоку по обеим его ветвям хорошо наконифоленным виолончельным или басовым смычком, а затем демонстрируют рекомендуемый опыт.

11.8.4. Интерференция звуковых волн, излучаемых ветвями камертона.

Известно, что звуковые волны, излучаемые вибрирующими ветвями камертона, находятся в противофазе. Вследствие этого волны частично гасят друг друга, особенно в определенных направлениях.

Для наблюдения этого явления поступают следующим образом: снятый с резонаторного ящика и возбужденный ударом молоточка камертон приближают к отверстию ящика примерно на расстояние 6-9 см (см. рис. 11.25). Если камертон расположен

так, что плоскость, проходящая через грани ветвей камертона, параллельна плоскости, проходящей через края отверстия резонаторного ящика или эти плоскости взаимно перпендикулярны, то колебания от обеих ветвей камертона приходят к внутренней полости резонаторного ящика в одной фазе. Волны усиливают друг друга, что влечет за собой резкое усиление звука, который издает резонаторный ящик. Если вращать камертон вокруг оси OO_1 , то звук, излучаемый ящиком, ослабевает. Особенно заметное уменьшение интенсивности звука наблюдается тогда, когда угол между указанными плоскостями становится равным 45° или 135° .

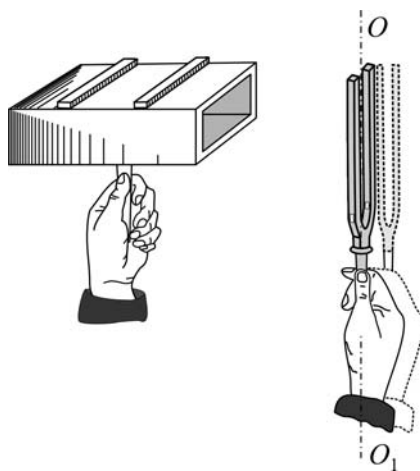


Рис. 11.25. Интерференция звуковых волн, излучаемых ветвями камертона.

11.8.5. Резонанс воздушного столба.

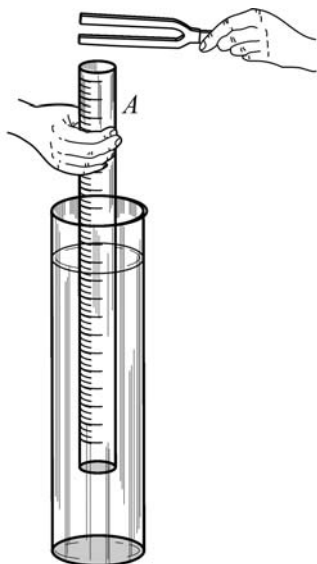


Рис. 11.26. Резонанс воздушного столба.

Высокую мензурку наполняют почти до краев водой. Стекланную цилиндрическую трубку *A* несколько меньшего диаметра, чем диаметр мензурки, опускают в воду и удерживают там на весу, как показано на рис. 11.26. Затем к открытому концу трубки подносят звучащий камертон и начинают медленно поднимать камертон и трубку, следя за тем, чтобы расстояние между камертоном и открытым концом трубки *A* оставалось все время постоянным. Когда длина воздушного столба в трубке становится равной $1/4$ длины волны, излучаемой камертоном, то вследствие интерференции и резонанса воздушного столба звук резко усиливается. При дальней-

шем подъеме трубки и, следовательно, при увеличении длины столба воздуха звук затихает. Когда длина воздушного столба достигает $3/4$ длины звуковой волны, излучаемой камертоном, то звук вновь усиливается. Правда, в этом случае усиление звука будет менее резким, чем при первом максимуме.

При наблюдении первого максимума звука полезно сопоставить длину воздушного столба в трубке *A* с длиной резонаторного ящика камертона, использованного в этом опыте. Удобно взять трубку *A* с делениями, чтобы длину звуковой волны определять непосредственно из опыта. Воду в мензурке можно чем-либо подкрасить. Демонстрацию следует повторить с камертонами другой частоты.

11.9. Эффект Доплера⁸.

Следующую серию демонстрационных экспериментов рекомендуется показывать на лекциях при изложении материала по теме «акустический эффект Доплера».

⁸ К. Доплер (1803 – 1853) – австрийский физик, член Венской Академии наук, директор первого в мире Физического института.

11.9.1. Движущийся камертон на 2 кГц, отражение волн от доски.

Для демонстрации эффекта Доплера можно быстро двигать возбужденный камертон с собственной частотой колебаний около 2 кГц (см. демонстрацию **11.8.3**) перпендикулярно классной доске, укрепленной на стене аудитории. При этих движениях слушатели воспринимают биения вследствие сложения звуковых волн разных частот – излучаемых движущимся камертоном и отраженных от доски. Если прекратить передвижение камертона, то биения исчезают, и сила звука стабилизируется. Опыт фактически проводится так же, как 11.8.3, отличается лишь его интерпретация.

11.9.2. Опыт с вращающейся органной трубой.

Прибор состоит из органной трубы *A*, укрепленной на одном из концов деревянной довольно длинной планки *B* (2 см × 5 см × 200 см), которая насажена на ось. Конструкция прибора дает возможность подавать воздух к органной трубе от воздуходувки во время вращения трубы (см. рис. 11.27).

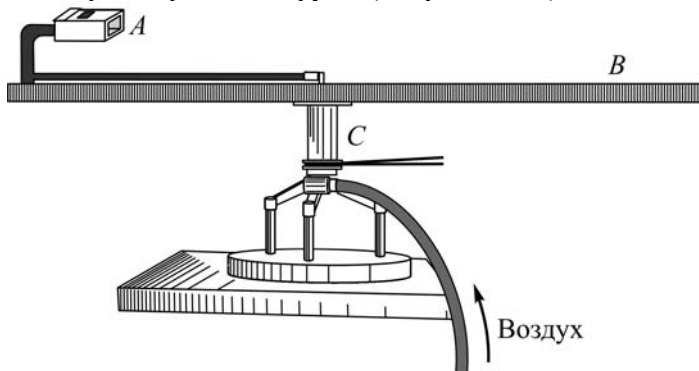


Рис. 11.27. Вращающаяся органная труба

Опыт следует начинать с продувания воздуха через неподвижную органную трубу. После 15-20 секунд звучания трубы всю систему приводят во вращение с частотой 1-3 Гц. В этом случае частота звука, воспринимаемая слушателями, изменяется: при приближении трубы к слушателям высота звука повышается, а при удалении – понижается.

Для этого опыта берут наиболее короткую органную трубу, длиной 10-12 см. Для приведения прибора во вращение на поверхности цилиндра *C*, через который продувается воздух, укрепляют

шків, который соединен ременной передачей с двигателем постоянного тока или центробежной машиной.

Располагая прибор около стены аудитории, можно наблюдать биения из-за сложения звука, идущего от движущейся трубы, и отраженного от стены – это повышает наглядность демонстрации.

11.9.3. Акустический интерферометр («вращение» фигур Лиссажу).

Для демонстрации эффекта Доплера применяется схема акустического интерферометра, использовавшаяся выше для измерения скорости звука (см. демонстрацию 11.3.2). Периодическое изменение («вращение») эллипса – фигуры Лиссажу на экране осциллографа при изменении расстояния между динамиком и микрофоном говорит о том, что частота звука, воспринимаемая микрофоном от движущегося источника, отличается от частоты генератора. При неподвижном динамике и микрофоне эллипс неподвижен, так как сдвиг фаз между колебаниями по осям X и Y постоянен; при изменении расстояния сдвиг фаз меняется, что воспринимается приемником как изменение частоты звука, и эллипс «вращается». Направление этого «вращения», и соответственно, знак приращения частоты воспринимаемых колебаний зависит от направления движения источника: при его приближении к приемнику частота растет, при удалении – падает.

11.9.4. Влияние совместного движения источника и приемника звука на разность фаз между их колебаниями⁹.

Демонстрация основана на том обстоятельстве, что при совместном движении репродуктора и микрофона в воздухе со скоростью v в направлении распространения звука между колебаниями, излучаемыми репродуктором и воспринимаемыми микрофоном, возникает дополнительная разность фаз $\Delta\varphi \approx \omega lv/c^2$, где ω – круговая частота, c – скорость звука в воздухе, l – расстояние между репродуктором и микрофоном.

Для наблюдения этого эффекта репродуктор и микрофон укрепляются на планке ($l \approx 70$ см), которая подвешивается к маятнику длиной $\sim 1,6$ м и периодом собственных колебаний $\sim 2,5$ сек (см. рис. 11.28). При этом используется маятник от демонстрации 6.2.1 «Маятник с песком». Репродуктор подключен к звуковому

⁹ Демонстрация поставлена К. Н. Баранским и Л. В. Зубаревой.

генератору (частота ~ 10 кГц). Принятый микрофоном сигнал усиливается резонансным услителем. На экране осциллографа методом эллипса наблюдается разность фаз между усиленным сигналом микрофона и сигналом звукового генератора.

Предварительно при покоящемся маятнике небольшим изменением частоты генератора на экране осциллографа получают изображение наклонной прямой. Затем при свободно колеблющемся маятнике на экране осциллографа наблюдают периодическое превращение прямой в эллипс. Так, при начальном отклонении маятника на угол 30° достигаемая при прохождении положения равновесия скорость планки – порядка 2 м/сек, а дополнительная разность фаз – порядка 50° . После этого планку с репродуктором поворачивают перпендикулярно плоскости качания маятника. В этом случае дополнительная разность фаз практически не наблюдается.

Эта демонстрация может быть использована также и в курсе «Оптика» – при изложении оснований опытов Физо и Майкельсона.

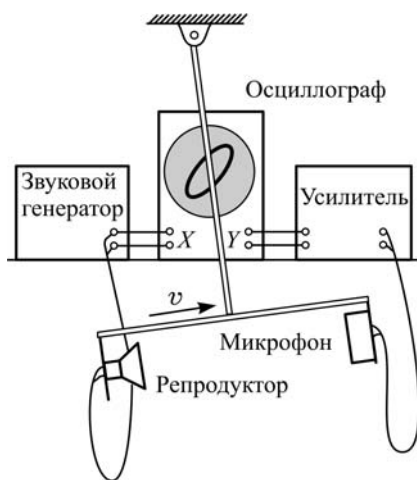


Рис. 11.28. Схема опыта.

11.10. Термоакустические эффекты.

Термоакустическими автоколебательными системами называются, согласно определению К. Ф. Теодорчика, такие, в которых убыль энергии при колебаниях пополняется от какого-либо источника тепла.

11.10.1. Молоток Тревельяна.

Латунная массивная пластина A фигурного сечения, снабженная железной рукояткой, прогревается в пламени газовой горелки до температуры примерно $250\text{--}300^\circ\text{C}$ (но не более температуры плавления свинца, равной $+327^\circ\text{C}$). Затем пластина кладется на свинцо-

вую призму B так, чтобы острые выступы пластины a и b коснулись ребра призмы (см. рис. 11.29, в верхней части которого изображено сечение пластины). Если расположить нагретую латунную пластину на призме так, как показано на рисунке, то пластина начнет колебаться около оси OO_1 , издавая при этом довольно высокий звук.

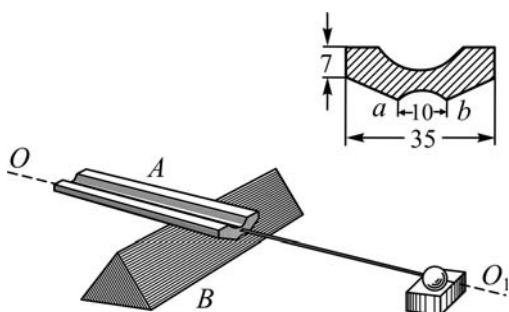


Рис. 11.29. Молоток Тревельяна.

Причину этого явления следует искать в следующем: если допустить, что в начальный момент латунная пластина сильнее нагревает свинец у точки a , чем у точки b , то в этом месте свинец вследствие плохой теплопроводности будет больше расширяться, чем в других местах, и вследствие этого несколько приподниматься. Под влиянием этого подъема латунная пластина чуть-чуть повернется. Теперь лучший тепловой контакт между латуной и свинцом будет в точке b , что приведет к повороту пластины в другую сторону. В результате такого неравномерного прогрева свинца латунная пластина будет колебаться и звучать в течение нескольких минут. При уменьшении разности температур между пластиной и свинцом до $70-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ колебания пластины прекращаются.

Указания: Верхнее ребро свинцовой призмы должно быть острым; для этого рекомендуется перед опытом опилить грани призмы напильником. Пластина должна опираться о призму своей средней частью. Для усиления звучания нагретой пластины опыт следует производить на резонаторном ящике.

11.10.2. Ложка на куске твердой углекислоты.

Для демонстрации нужен кусок твердой углекислоты, имеющей очень низкую температуру – около $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Она иногда используется для хранения мороженого в жару и его переноски к местам продажи. Прижимая металлическую ложку к этому куску, наблюдают появление характерного звука (писка), связанного с сильным охлаждением ложки при контакте с твердой углекислотой и неравномерным изменением ее линейных размеров, вызывающим не-

прерывное смещение точек касания, трение ложки о кусок и генерацию довольно громкого звука.

11.10.3. Газовая (химическая) гармоника.

Если взять стеклянную или металлическую трубу, открытую с обоих концов, и надвинуть ее в вертикальном положении на пламя газовой горелки, то вдоль трубы возникает поток горячего воздуха. При определенных условиях поток воздуха в трубе начинает колебаться и издавать звук. Это явление относится к классу термоакустических автоколебаний, причем основной тон соответствует удвоенной длине трубы.

Режим автоколебаний легко реализуется, если над пламенем маленькой горелки на оси трубы поместить соосно с ней перпендикулярно к оси трубы небольшой диск, с которого с процессе горения срываются кольцевые вихри нагретого воздуха. Меняя положение горелки в трубе, добиваются резонансного усиления звука. Режим горения газа при этом меняется, пламя начинает пульсировать, и это легко фиксируется визуально. Если перекрыть поток горячего воздуха по трубе путем закрытия специальной заслонки на ее верхнем конце, то автоколебания воздуха в трубе прекращаются, и звук глхнет.

В имеющейся в Кабинете физических демонстраций физическо-го факультета МГУ имени М.В.Ломоносова установке (см. рис. 11.30) четыре трубы разной, специально подобранной длины при возбуждении автоколебаний дают мажорный аккорд, и каждую из труб можно настраивать на резонансную частоту путем перемещения горелок вверх-вниз, или отключать путем закрытия заслонок наверху труб.



Рис. 11.30. Газовая гармоника.

11.11. Ультразвуковые волны.

Колебания, частота которых выше частоты звука, слышимого нормальным человеческим ухом, то есть выше $\sim 20\,000$ Гц, называют обычно ультразвуковыми колебаниями. Продольные колебания в этом диапазоне частот могут наблюдаться в газообразных, жидких и твердых телах.

Ультразвуковые колебания нашли широкое применение в различных отраслях техники: в подводной сигнализации и связи, гидролокации, дефектоскопии и т.д. Ультразвуковые колебания используют для интенсификации ряда технологических процессов: кристаллизации расплавов при получении высококачественных сталей, расщепления целлюлозы в бумажном производстве, дубления кожи и т.д., а также при физических, химических, биологических и медицинских исследованиях.

11.11.1. Генерация ультразвука.

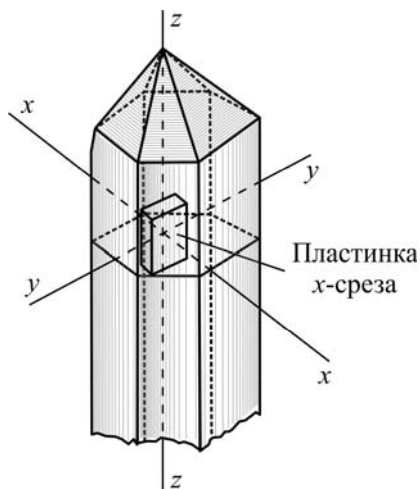


Рис. 11.31. Монокристалл кварца.

В современной технике применяют обычно два приема получения ультразвуковых колебаний. Первый прием основан на использовании пьезоэлектрического эффекта в кварце, сегнетовой соли, титанате бария и др.; второй прием – на использовании магнитострикционного эффекта, наблюдаемого в ферромагнитных и ферри-магнитных стержнях.

Монокристалл кварца представляет собой шестигранную призму, окантованную пирамидоподобными сужениями на концах (см. рис. 11.31).

В кварце выделяют обычно три главные оси: электрическую, механическую и оптическую. Обычно эти оси обозначают буквами x , y , z . Наибольший пьезоэффект наблюдается в направлении электрической оси x .

11.11.2. Ультразвуковой фонтан.

Пластинке кварца, вырезанной в плоскости максимального пьезоэффекта (x -срез), придают форму небольшого диска, поверхности которого тщательно шлифуют. На нижнюю и верхнюю поверхности кварцевой пластинки наносят путем серебрения контактные слои. Для демонстрации ультразвуковых колебаний кварца в жидкости необходимо укрепить кварцевый диск в специальном держателе с контактами, на которые подают напряжение от высокочастотного генератора. Держатель вместе с кварцем опускают в стеклянный сосуд кубической формы, заполненный почти полностью керосином (см. рис. 11.32). В целях уменьшения вибрации дна сосуда держатель помещают в жидкость так, чтобы он был на весу. При подаче на кварц достаточно высокого напряжения, приближающегося по частоте к собственной частоте кварца или к его гармоникам, на поверхности жидкости появляется волнение, которое превращается в небольшой фонтан высотой 5-8 см. Отдельные брызги фонтана поднимаются на большую высоту. При интенсивных колебаниях кварца над поверхностью жидкости в сосуде возникает густой туман – аэрозоль, образованный мельчайшими капельками керосина. При проецировании фонтана на экран туман необходимо сдувать.

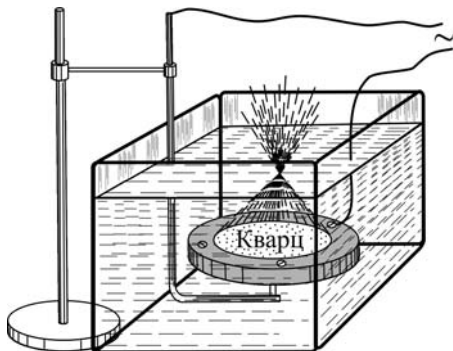


Рис. 11.32. Ультразвуковой фонтан.

Указания: Опыт ставят с кварцевыми пластинками диаметром ~ 25 мм и ~ 50 мм при толщине $\sim 2,7$ мм. Лучшие результаты получаются при использовании вогнутых кварцевых пластинок, стоимость которых значительно выше плоских. Высокочастотное напряжение подают на кварц из расчета примерно 300-500 В на 1 мм толщины пластинки. Для его получения используют высокочастотный генератор мощностью ~ 100 Вт, работающий в диапазоне частот 300-1200 кГц. В случае отсутствия такого оборудования можно использовать генераторы и излучатели меньшей мощности, производимые промышленностью для медицинских целей.

11.11.3. Получение эмульсии.

Вогнутую кварцевую пластину, обращенную вогнутостью вверх, укрепляют в держателе, висящем на стенках большого прямоугольной формы стеклянного сосуда, наполненного на $3/4$ высоты чистым керосином. Если на кварцевую пластину подать высокое напряжение, совпадающее по частоте с собственной частотой пластины, то она начнет вибрировать. От ее вогнутой поверхности пойдет вверх сферическая ультразвуковая волна, сходящаяся на некотором расстоянии от поверхности пластины в одной точке – в фокусе, где действие ультразвукового излучения на жидкость наибольшее. Желательно пластину установить так, чтобы излучение фокусировалось вблизи поверхности жидкости. Тогда над поверхностью керосина возникает фонтан. С вогнутой пластиной кварца диаметром ~ 50 мм, толщиной $\sim 2,9$ мм и с радиусом кривизны ~ 100 мм нетрудно получить фонтан высотой до 18-20 см. Затем в фонтан керосина помещают небольшую пробирку, наполненную водой ($3-4 \text{ см}^3$) и примерно таким же количеством трансформаторного масла. Пробирку следует расположить в фонтане таким образом, чтобы струя керосина

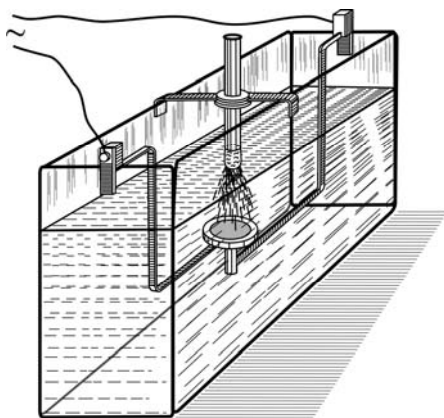


Рис. 11.33. Получение эмульсии.

била в ее дно (см. рис. 11.33). При таком расположении пробирки фонтан исчезает, зато смешиваемые жидкости в пробирке приходят в интенсивное движение. Теперь можно увидеть небольшой фонтан внутри самой пробирки. В течение 3-5 мин жидкости перемешиваются между собой, образуя эмульсию молочного цвета.

11.11.4. Химическое действие ультразвука (разложение КJ).

В пробирку наливают водный раствор йодистого калия произвольной концентрации. Как известно, этот раствор бесцветен и прозрачен, как вода. Под воздействием в течение 2-3 мин интенсивного ультразвукового поля в растворе возникает химическая реакция, которая внешне проявляется в виде выделения

чистого йода, окрашивающего раствор в светло-желтый цвет. Пробирку с раствором йодистого калия располагают в фонтане керосина так же, как и в опыте получения эмульсии масла в воде (см. демонстрацию 11.11.3).

11.11.5. Дифракция света на ультразвуке.

Опыты по дифракции света на ультразвуковых волнах, распространяющихся в жидкостях, используются на лекциях при чтении раздела «Оптика» курса общей физики.

11.11.6. Ультразвуковая установка фирмы «Владис».

В Кабинете физических демонстраций имеется также оборудование фирмы «Владис» (см. рис. 11.34), позволяющее наблюдать действие сфокусированной ультразвуковой волны. Акустооптический модуль предназначен для изучения ультразвуковых волн в воде, определения их скорости, а также для наблюдения дифракции света на ультразвуке. В нижней части модуля имеется пьезокерамический излучатель ультразвука с вогнутой верхней поверхностью, вертикальный канал для воды и окно. В съемную верхнюю часть модуля ввернут шток с барабаном, позволяющим точно (до 0,01 мм) отсчитывать по шкале координату штока. Излучатель подключается к ультразвуковому генератору при помощи кабеля, причем параллельно модулю можно подключать частотомер или осциллограф. Генератор настроен на резонансную частоту пьезоизлучателя (около 2,7 МГц), точное значение которой указано на передней панели генератора.



Рис. 11.34. Акустооптический модуль и генератор ультразвуковой частоты фирмы «Владис».

Если налить воду в канал до уровня чуть ниже середины окна, то при включении генератора в области фокусировки ультразвуковой волны наблюдается образование фонтана, а затем – распыление жидкости в аэрозоль. Как только прекратилось образование аэрозоля, генератор следует немедленно выключить во избежание порчи излучателя. Ультразвуковые устройства аналогичного типа в настоящее время часто используются в медицине для ингаляции.

Если вода полностью заполняет пространство между излучателем и штоком, то при определенных положениях штока в столбе жидкости возникают стоячие волны (резонансы), при которых резко возрастает нагрузка на излучатель. Это приводит к уменьшению показаний стрелочного прибора, который показывает выходное напряжение генератора. Вращая барабан, можно перемещать шток и отмечать положения, соответствующие минимумам показаний вольтметра генератора. Расстояния между такими положениями штока равны половине длины ультразвуковой волны. Зная частоту генератора, можно затем найти скорость звука в воде, составляющую около 1500 м/с.

11.12. Компьютерные демонстрации по акустике.

При преподавании раздела «Акустика» на лекциях обычно обсуждаются различные характеристики звука, а также вводится понятие частотного спектра периодической функции времени применительно к анализу звуковых сигналов. При этом для лучшего усвоения данного материала полезно предоставить студентам возможность как слухового, так и визуального восприятия информации, одновременно демонстрируя осциллограммы и спектры разных звуков. Для этих целей в Кабинете физических демонстраций физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова разработан демонстрационный комплекс [24, 27], состоящий из компьютера типа IBM PC со звуковой картой, к которой подключены микрофон и активные звуковые колонки.

Демонстрация лекционных экспериментов с помощью данного комплекса обеспечивается специально разработанной компьютерной программой «Спектрограф»¹⁰. Программа работает в операционной системе Windows (версии 95 и выше) и использует только ее стандартные функции, что позволяет легко ее переносить с одного компьютера на другой. Программа

¹⁰ Программа разработана Н. М. Нагорским.

осуществляет анализ и синтез звуковых сигналов и обеспечивает представление результатов проводимых экспериментов. Звуковые данные программа получает подобно стандартным звукозаписывающим программам для Windows, используя звуковую карту, что позволяет направлять на вход программы звуковой поток с любого устройства, поддерживаемого звуковой картой (например, с микрофона), а также смешивать звуки, поступающие с различных устройств. Настройка входа производится с помощью любого микшера Windows; это может быть, например, входящая в состав операционной системы стандартная программа «Регулятор громкости», которая позволяет регулировать громкость и уровень записи, а также устанавливать различные устройства в качестве источника звука для записи. В частности, если установить в качестве такого источника устройство «Mixed Output», то на вход «Спектрографа» будет поступать такой же звуковой поток, какой идет с выхода звуковой карты. Это позволяет получать и обрабатывать данные, содержащиеся в различных звуковых файлах.

Спектральный анализ звуковых сигналов производится с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) с прореживанием во времени. Это позволяет проводить демонстрации по акустике в реальном масштабе времени, получая высокое спектральное разрешение (~ 10 Гц при работе в диапазоне от 20 Гц до 4000 Гц). Высокая точность получения спектра обеспечивается использованием при БПФ достаточно большого отрезка времени ($\sim 0,25$ с при частоте дискретизации 8 кГц) и применением Гауссовой функции оконного сглаживания.

В «Спектрограф» встроен проигрыватель звуковых файлов, который позволяет проводить все стандартные манипуляции со звуковыми данными – запускать и останавливать воспроизведение, производить перемотку. При показе демонстраций на монитор одновременно выводятся спектр анализируемого сигнала и его осциллограмма, а также, если это необходимо, фигуры Лиссажу, получаемые в результате откладывания вдоль координатных осей мгновенных значений звуковых сигналов, поступающих с разных каналов звуковой карты. Для удобства показа в программе предусмотрена возможность масштабирования выводимых графических данных. Также имеется кнопка приостановки воспроизведения звука; при этом на мониторе отображаются спектр и осциллограмма сигнала, зафиксирован-

ные в момент нажатия кнопки. Это позволяет лучше рассмотреть графики и дать соответствующие пояснения. Программа также позволяет сохранять получаемые таким образом на экране графики в файл, что дает возможность при дефиците лекционного времени заблаговременно, перед началом лекции, получать осциллограммы и спектры выбранных для показа сигналов, запоминать их, после чего демонстрировать на лекции как «настоящие» осциллограммы и спектры, сопровождаемые звуком, так и полученные рисунки.

11.12.1. Осциллограммы и спектры нот гаммы, звуков человеческой речи, различных музыкальных инструментов.

Демонстрируются осциллограммы и спектры звуков гаммы, извлекаемых из всевозможных музыкальных инструментов. Музыкальный инструмент для проигрывания гаммы выбирается из списка, содержащего более 100 различных наименований, скорость проигрывания может регулироваться. Для синтеза звуков программа создает файл в формате MIDI, соответствующий выбранному инструменту и темпу проигрывания гаммы.

MIDI – это международный стандарт команд для синтеза звука, то есть в файле MIDI хранятся не сами звуковые данные, а команды, управляющие их синтезом. Фактически MIDI представляет собой запись музыкальных нот, по которым компьютер синтезирует звук. Качество и конкретная реализация такого синтеза зависят от типа звуковой карты. Кроме обычных музыкальных инструментов, MIDI содержит большое количество всевозможных синтезированных звуков (их принято называть «тембрами»), таких, как звук от выстрела, телефонный звонок, шум моря и т.п. Набор из 128 основных тембров и формат данных одинаковы для всех систем синтеза звука, соответствующих стандарту MIDI.

На следующих двух рисунках приведены осциллограммы, спектры и фигуры Лиссажу, полученные при проигрывании гаммы на инструментах «Рояль» (рис. 11.35) и «Тростниковый орган» (рис. 11.36). Из этих рисунков видно, что осциллограмма гаммы, исполненной на рояле, проще по виду (менее изрезана), чем осциллограмма той же гаммы, исполненной на органе. В соответствии с этим спектр первого сигнала содержит основной тон и три обертона, в то время как спектр второго сигнала содержит свыше десяти высших гармоник.

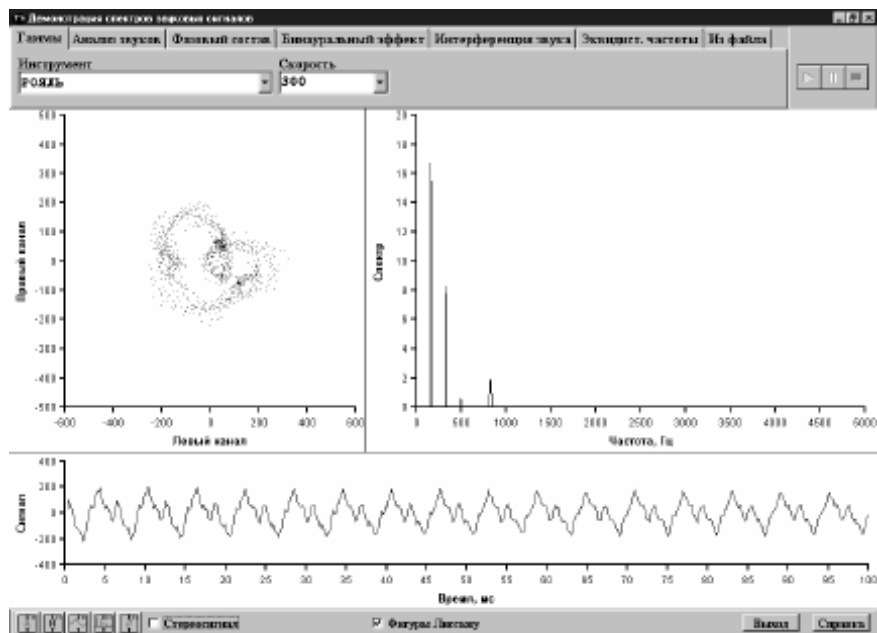


Рис. 11.35. Характеристики звука рояля.

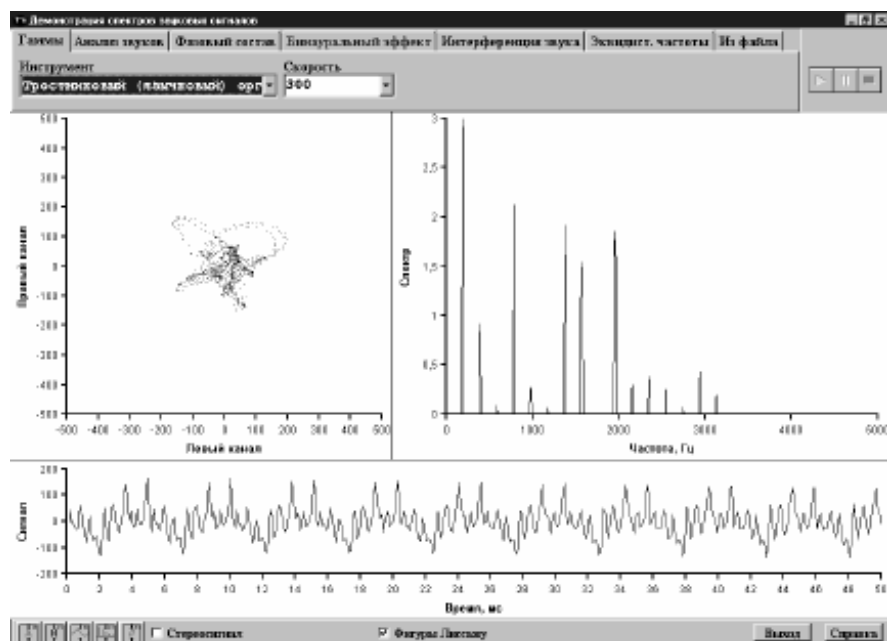


Рис. 11.36. Характеристики звука тростникового органа.

Программа «Спектрограф» дает возможность анализировать различные звуки, поступающие на вход звуковой карты с микрофона. В частности, можно наблюдать осциллограммы и спектры звуков, присутствующих в человеческой речи. Ниже на рисунках приведены результаты, полученные при анализе гласных звуков «и» (рис. 11.37) и «а» (рис. 11.38). Из рисунков видно, что спектр звука «и» содержит только одну заметную гармонику, а соответствующий сигнал близок к синусоидальному, тогда как в спектре звука «а» наблюдается несколько гармоник (основной тон и три обертона), что соответствует более сложной форме сигнала.

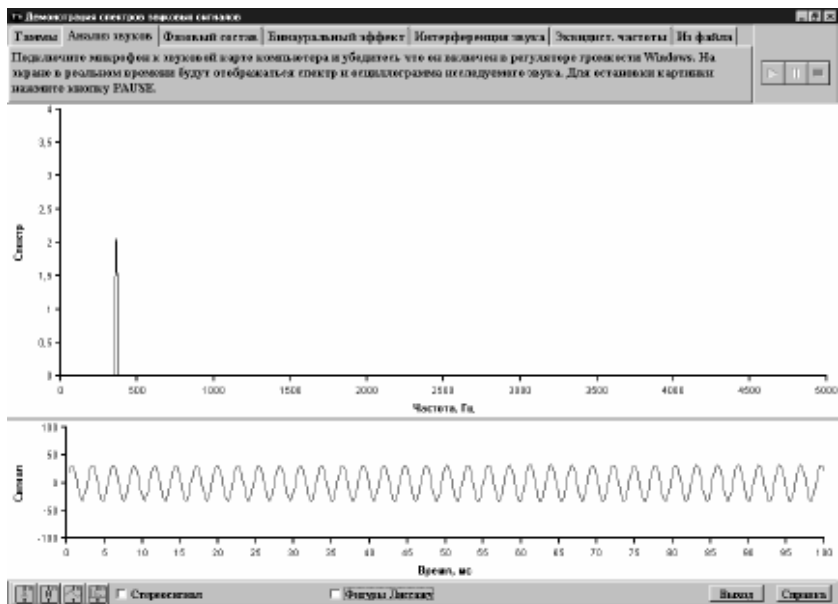


Рис. 11.37. Спектр и осциллограмма звука «и».

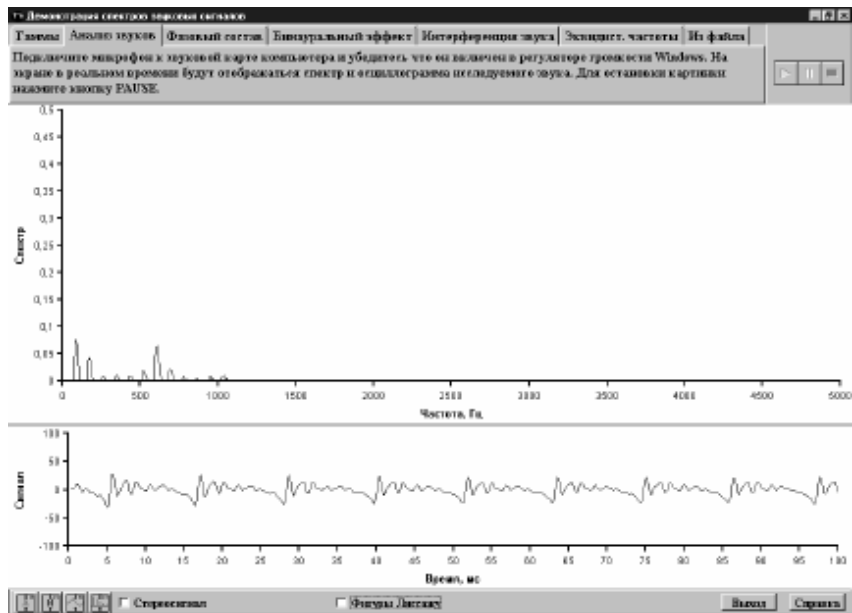


Рис. 11.38. Спектр и осциллограмма звука «а».

11.12.2. Свойства слуха.

11.12.2.1. Независимость слухового восприятия от фазового сдвига гармоник.

Демонстрируется нечувствительность человеческого уха к фазовому составу звука, то есть к соотношению между фазами отдельных гармоник, из которых состоит звуковой сигнал. Для демонстрации синтезируется и воспроизводится колонками звук, состоящий из двух гармоник одинаковой мощности, отличающихся друг от друга по фазе. Сдвиг фаз между гармониками может изменяться путем перемещения специального «движка» в верхней части окна программы. На следующих рисунках показаны осциллограммы и спектры сигнала, получаемого в результате сложения двух гармонических сигналов при сдвиге фаз между ними, равном $\pi/2$ (рис. 11.39) и $3\pi/2$ (рис. 11.40) соответственно (наблюдаемые гармоники неодинаковы по высоте вследствие особенностей амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) звуковой карты). Из рисунков видно, что при изменении разности фаз между гармониками осциллограмма сигнала заметно меняется, в то время как его спектр остается неизменным. При этом слышимый звук не изменяется.

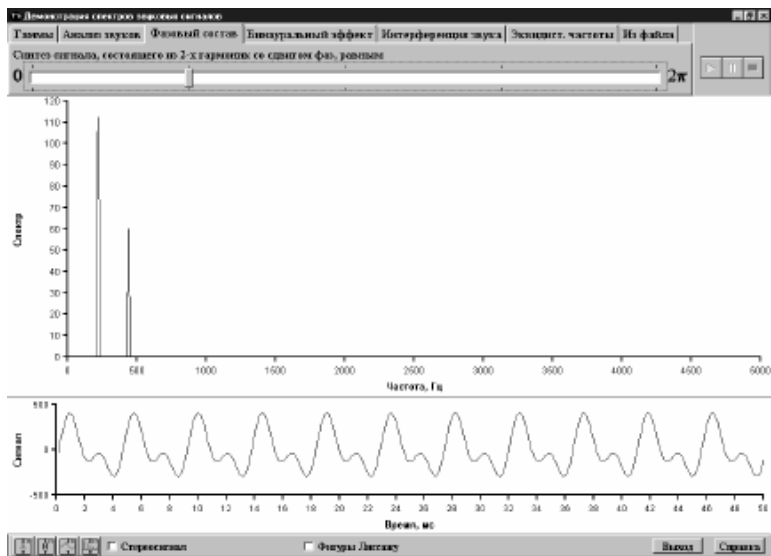


Рис. 11.39. Спектр и осциллограмма сигнала, получаемого в результате сложения двух гармонических сигналов при сдвиге фаз между ними, равном $\pi/2$.

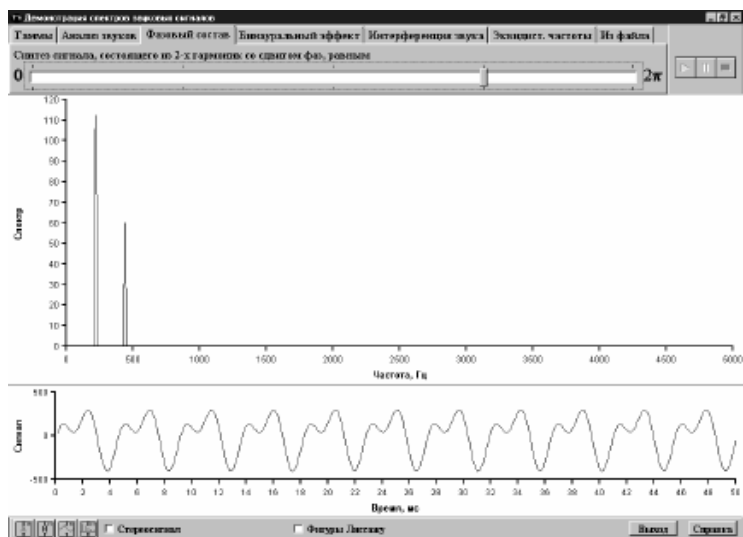


Рис. 11.40. Спектр и осциллограмма сигнала, получаемого в результате сложения двух гармонических сигналов при сдвиге фаз между ними, равном $3\pi/2$.

11.12.2.2. Бинауральный эффект.

Демонстрируется бинауральный эффект, позволяющий человеку определять направление на источник звука. На низких частотах основную роль в возможности такого определения играет наличие сдвига фаз между сигналами, воспринимаемыми ушами. Для демонстрации генерируются два гармонических сигнала одинаковой частоты и мощности, каждый из которых подается на свой стереоканал. Эти сигналы воспроизводятся через две звуковые колонки, расположенные по разные стороны от наблюдателя на расстоянии $\sim 5\div 7$ м друг от друга. Разность фаз между данными сигналами можно изменять путем перемещения специального «движка» в верхней части окна программы. При этом на мониторе отображаются осциллограммы этих двух сигналов, их спектр (он включает в себя одну гармонику) и фигура Лиссажу, получаемая из сигналов, поступающих с разных стереоканалов. При нулевой разности фаз между стереоканалами (см. рис. 11.41) две синусоиды на осциллограмме практически совпадают друг с другом, фигура Лиссажу близка к отрезку прямой, а источник звука кажется несмещенным. При изменении сдвига фаз между стереоканалами

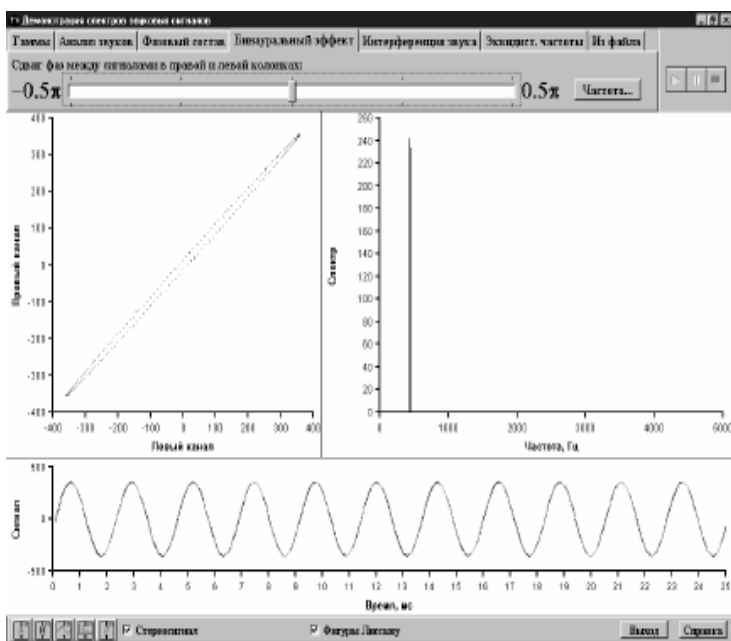


Рис. 11.41. Бинауральный эффект. Нулевая разность фаз между стереоканалами.

на $+\pi/4$ (см. рис. 11.42) две синусоиды на осциллограмме разделяются, фигура Лиссажу превращается в эллипс, а у наблюдателя создается ощущение того, что источник звука сместился вправо.

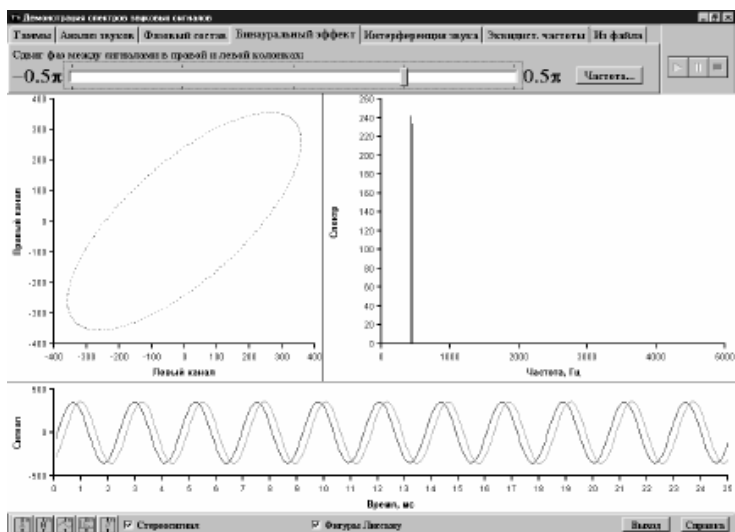


Рис. 11.42. Бинауральный эффект. Разность фаз между стереоканалами $+\pi/4$.

11.12.2.3. Интерференция звука, определение скорости звука, фигуры Лиссажу.

Демонстрируется распределение звукового поля в объеме аудитории, создаваемое колонками при подаче на них гармонических сигналов одной и той же частоты, а также изменение этого поля при движении колонок и регулировании сдвига фаз между сигналами в колонках. Частоту сигналов можно изменять. Для регистрации амплитуды и фазы звуковой волны используется микрофон. Во время демонстрации на мониторе отображается осциллограмма сигнала, поступающего с микрофона, его спектр, а также эллиптическая фигура Лиссажу, получаемая из сигнала с микрофона и опорного сигнала, взятого с одной из колонок. На рисунках 11.43 и 11.44 показаны результаты наблюдения одного и того же звукового поля при двух различных положениях микрофона в нем. Из рисунков видно, что при перемещении микрофона наблюдается изменение амплитуды регистрируемого звука, а также поворот и деформация эллипса.

Заметим, что в рамках этой демонстрации можно, наблюдая за изменением ориентации эллипса при перемещении микрофона относительно колонки, определять длину звуковой волны, что дает возможность при известной частоте сигнала измерять и скорость распространения звука в воздухе.

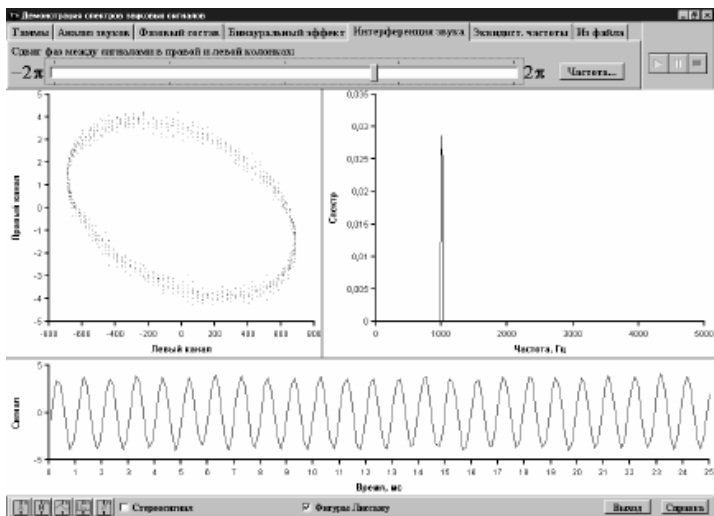


Рис. 11.43. Звук в аудитории при первом положении микрофона.

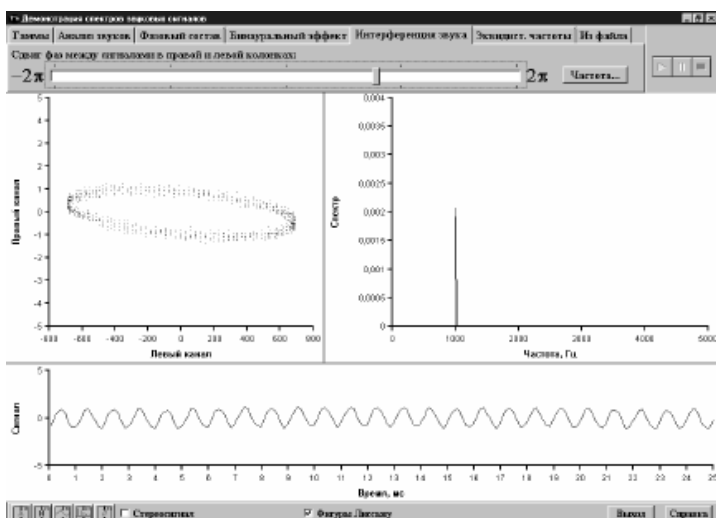


Рис. 11.44. Звук в аудитории при втором положении микрофона.

11.12.2.4. Сложение колебаний с эквидистантными частотами.

Демонстрируется результат сложения набора гармоник одинаковой мощности с эквидистантными частотами. Частота k -ой гармоники определяется по формуле $\nu = \nu_{\text{баз}} + k\Delta\nu$, $k = 0, 1, 2, \dots, n$, где $\nu_{\text{баз}}$ – базовая частота, $\Delta\nu$ – шаг. Задавая различные значения этих

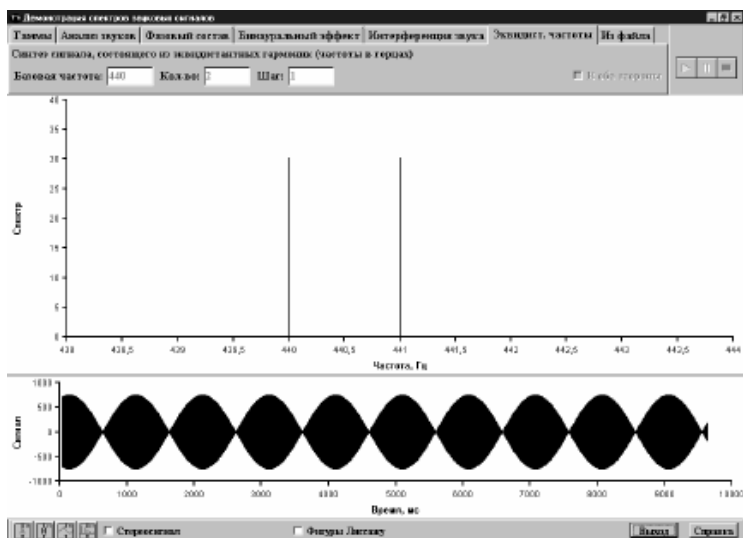


Рис. 11.45. Сложение двух гармонических сигналов с близкими частотами («биения»).

параметров, и изменяя число гармоник n , можно получать сигналы различного вида – биения, короткие импульсы и т.д. При этом наблюдатель одновременно видит осциллограмму, спектр и слышит соответствующий звуковой сигнал. На рис. 11.45 показано сложение двух гармоник с близкими частотами, в результате чего наблюдается классическая картина биений. На рис. 11.46 показано сложение трех гармоник с эквидистантными частотами – здесь картина биений получается более сложная, она представляет собой набор поочередно следующих один за другим более сильных и более слабых импульсов. На рис. 11.47 показано, как изменяется картина биений при сложении десяти гармоник с близкими частотами – здесь уже наблюдается последовательность из мощных импульсов («главных максимумов»), между которыми следует по 8 более слабых. Заметим, что данная демонстрация также может быть полезна при чтении раздела «Оптика» курса общей физики.

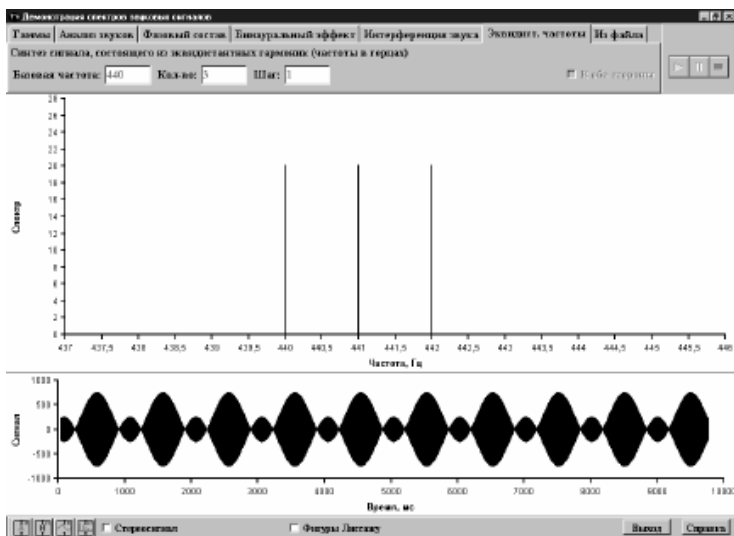


Рис. 11.46. Сложение трех гармоник с эквидистантными частотами.

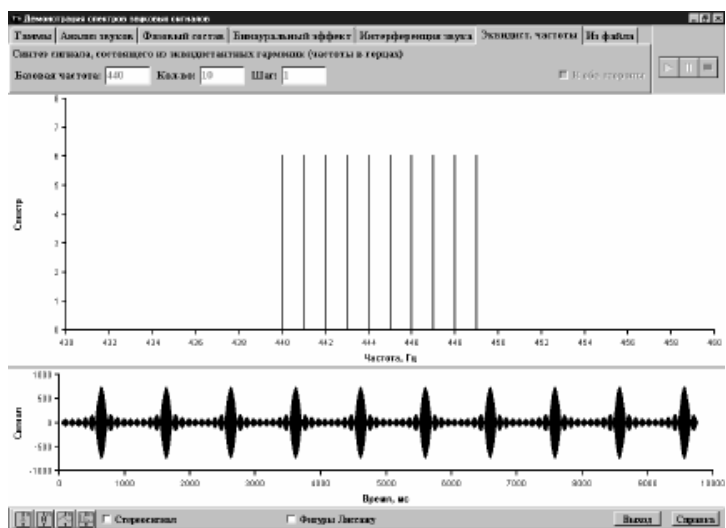


Рис. 11.47. Сложение десяти гармоник с эквидистантными частотами.

Литература

1. *Грабовский М. А.* Лекционные демонстрации по физике. Вып. 2. Механика жидкостей и газов. / Под ред. Млодзеевского А. Б. – М.–Л.: ОГИЗ Гос. изд-во технико-теоретической литературы «Гостехиздат», 1948. – 160 с.
2. *Грабовский М. А.* Лекционные демонстрации по физике. Вып. 7. Колебания и волны. / Под ред. Млодзеевского А. Б. – М.–Л.: ОГИЗ Гос. изд-во технико-теоретической литературы «Гостехиздат», 1952. – 232 с.
3. *Млодзеевский А. Б., Телеснин Р. В.* Лекционные демонстрации по физике. Вып. 8. Общая механика. – М.–Л.: ОГИЗ Гос. изд-во технико-теоретической литературы «Гостехиздат», 1954. – 84 с.
4. *Грабовский М. А., Млодзеевский А. Б., Усагин С. И.* Каталог лекционных демонстраций по общему курсу физики (на правах рукописи). – М.: Изд-во МГУ, 1959. – 144 с.
5. *Грабовский М. А., Млодзеевский А. Б., Телеснин Р. В.* и др. Лекционные демонстрации по физике. / Под ред. Ивероновой В. И. – М.: Наука, 1972. – 640 с.
6. *Семенов М. В., Якута А. А.* Механика твердого тела. Лекционный эксперимент. (Университетский курс общей физики). / Под общ. ред. Алешкевича В. А. – М.: Физический факультет МГУ, 1998. – 30 с.
7. *Семенов М. В., Якута А. А.* Механика сплошных сред. Лекционный эксперимент. (Университетский курс общей физики). / Под общ. ред. Алешкевича В. А. – М.: Физический факультет МГУ, 1999. – 56 с.
8. *Вабищевич М. Г., Корчажкин В. В., Мусаев Т. Ш., Погожев В. А., Семенов М. В.* Камертон с электромагнитным возбуждением. // А.с. АС №1417027, выдано Госкомизобретений СССР 15.04.1988.
9. *Вабищевич М. Г., Кандидов В. П., Мусаев Т. Ш., Семенов М. В.* Устройство для демонстрации модуляции звуковой волны. // А.с. АС №1527651, выдано Госкомизобретений СССР 08.08.1989.
10. *Вабищевич М. Г., Корчажкин В. В., Мусаев Т. Ш., Семенов М. В.* Прибор для демонстрации фигур Лиссажу. // А.с. АС №1529274, выдано Госкомизобретений СССР 15.08.1989.
11. *Вабищевич М. Г., Корчажкин В. В., Мусаев Т. Ш., Семенов М. В.* Прибор для демонстрации сложения угловых скоростей «Глобус». // А.с. АС №1543437, выдано Госкомизобретений СССР 15.10.1989.
12. *Вабищевич М. Г., Мусаев Т. Ш., Пустовалов Г. Е., Семенов М. В.* Учебный прибор для демонстрации движения твердого тела. // А.с. АС №1548808, выдано Госкомизобретений СССР 08.11.1989.
13. *Вабищевич М. Г., Куницын В. Е., Мусаев Т. Ш., Семенов М. В., Филиппов Н. С.* Устройство для демонстрации законов динамики «Воздушная дорога с ЭВМ». // А.с. АС №1675927, выдано Госкомизобретений СССР 08.05.1991.

14. *Вабищевич М. Г., Пустовалов Г. Е., Матвеев А. Н., Мусаев Т. Ш., Семенов М. В., Яковлев Е. В.* Устройство для демонстрации колебательных процессов. // А.с. АС №1707613, выдано Госкомизобретений СССР 22.09.1991.
15. *Корчажкин В. В., Куницын В. Е., Матвеев А. Н., Мусаев Т. Ш., Семенов М. В.* Учебный прибор по физике. // А.с. АС №1756929, выдано Госкомизобретений СССР 22.04.1992.
16. *Зимин А. И., Куницын В. Е., Мусаев Т. Ш., Семенов М. В.* Демонстрационный прибор по физике. // А.с. АС №1767514, выдано Госкомизобретений СССР 08.06.1992.
17. *Зимин А. И., Куницын В. Е., Матвеев А. Н., Мусаев Т. Ш., Семенов М. В.* Устройство для демонстрации реактивного движения. // А.с. АС №1802370, выдано Госкомизобретений СССР 09.10.1992.
18. *Семёнов М. В., Якута А. А.* Измерение отношения $\gamma = C_p/C_V$ у газов методом Рухардта: Учеб. пособие. – М.: Физический факультет МГУ, 1996. – 16 с.
19. *Бегун А. Ю., Виноградов М. П., Семенов М. В., Якута А. А.* Датчик углового перемещения и автоматизированные демонстрационные эксперименты на его основе. // Физическое образование в ВУЗах. – 1997. – Т.3. – 4. – С. 50-58.
20. *Бегун А. Ю., Семенов М. В., Якута А. А.* Измерение импульса силы при соударениях. // Физическое образование в ВУЗах. – 1997. – Т.3. – 4. – С. 30-40.
21. *Бегун А. Ю., Виноградов М. П., Семенов М. В., Якута А. А.* Использование датчика силы для изучения механических колебаний. // Физическое образование в ВУЗах. – 1997. – Т.3. – 4. – С. 41-49.
22. *Дунин М. С., Семенов М. В., Якута А. А.* Новые автоматизированные лекционные эксперименты по теме «Механические колебания». // Физическое образование в вузах. – 1999. – Т.5.– 4. – С. 160-173.
23. *Семенов М. В., Якута А. А.* Измерение ускорения свободного падения баллистическим методом в рамках демонстрационного эксперимента. // Физическое образование в вузах. – 2002. – Т.8. – 3. – С. 55-66.
24. *Нагорский Н. М., Семенов М. В., Якута А. А.* Получение и демонстрация осциллограмм и спектров звуковых сигналов с помощью звуковой карты и быстрого преобразования Фурье. // Физическое образование в вузах. – 2002. – Т.8. – 4. – С. 127-133.
25. *Семенов М. В., Якута А. А.* Новая автоматизированная лекционная демонстрация «Измерение коэффициента лобового сопротивления у тел различной формы». // Физическое образование в вузах. – 2002. – Т.8. – 4. – С. 134-142.
26. *Семенов М. В., Якута А. А.* Автоматизированная демонстрационная установка «Стол на воздушной подушке» и лекционные эксперименты на ее основе. // Физическое образование в вузах. – 2004. – Т.10. – 1. – С. 55–70.

27. *Нагорский Н. М., Семенов М. В., Якута А. А.* Компьютеризированные демонстрационные эксперименты по механике: Препринт физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова. – М., №15/2004. – 48 с.
28. *Алешкевич В. А., Деденко Л. Г., Караваяев В. А.* Механика. (Университетский курс общей физики). – М.: Изд. «ACADEMIA». 2004. – 480 с.
29. *Матвеев А. Н.* Механика и теория относительности. – М.: Изд. дом «Оникс 21 век». 2003. – 432 с.
30. *Сивухин Д. В.* Общий курс физики. Т.1. Механика. – СПб.: Изд. «Лань», 2006. – 560 с.
31. *Хайкин С. Э.* Физические основы механики. – СПб.: Изд. «Лань», 2008. – 768 с.
32. *Стрелков С. П.* Механика. – СПб.: Изд. «Лань», 2005. – 560 с.
33. Фейнман Р. и др. Фейнмановские лекции по физике, Т. 1,2. – М.: Изд. «Либроком», 2009. – 440 с.
34. *Киттель Ч., Найт У., Рудерман М.* Механика. БКФ, Т. I.– СПб.: Изд «Лань», 2005. – 480 с.
35. *Крауфорд Ф.* Волны. БКФ, Т. III.– Издание 3-е, исправленное. – М.: Наука, 1984. – 512 с.
36. *Семенов М. В., Якута А. А.* Видеозаписи лекционных экспериментов. // Съезд российских физиков-преподавателей «Физическое образование в XXI веке»: Тез. докл. – М., 2000. – С. 244.