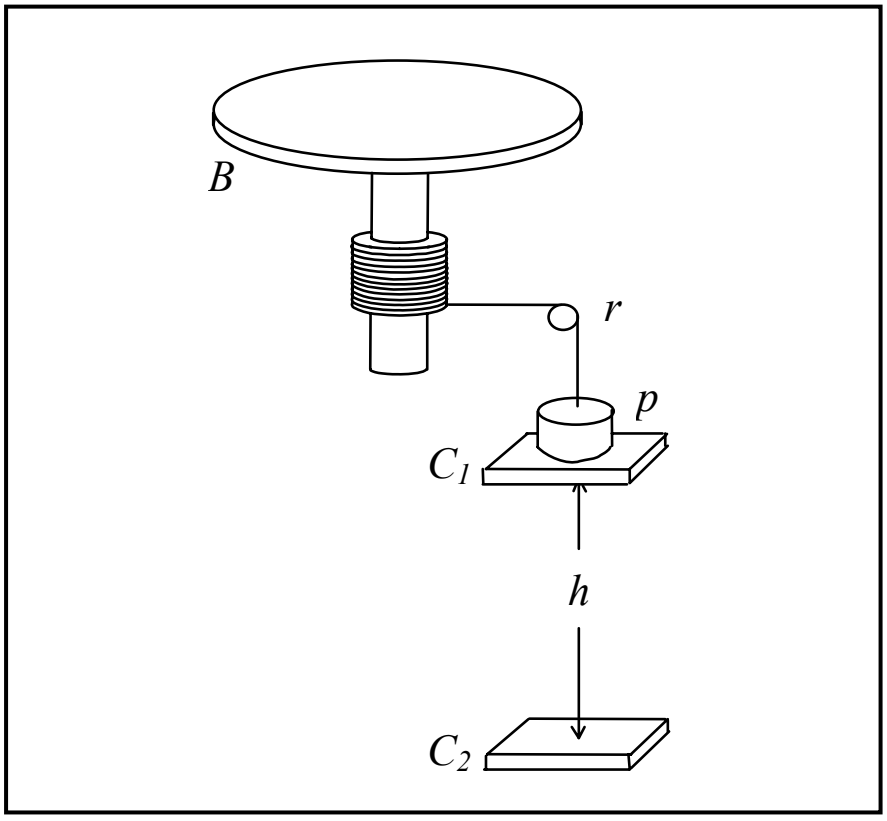
В.И. Козлов

АНТОЛОГИЯ ОБЩЕГО ФИЗИЧЕСКОГО ПРАКТИКУМА

Часть 1

(Механика)



2010
Физический факультет МГУ

В.И. Козлов

АНТОЛОГИЯ ОБЩЕГО ФИЗИЧЕСКОГО ПРАКТИКУМА

Часть 1

(Механика)

2010 г.

Козлов В.И. **Антология общего физического практикума. Часть 1.** — М: Физический факультет МГУ, 2009. —248 с.

В системе преподавания общей физики сложилась триада: лекции – семинары – практикум. Предназначение практикума – экспериментальное наблюдение основных, наиболее ярких и выразительных, физических эффектов и изучение законов, их описывающих. За многие десятилетия развития общего физического практикума создано много разных лабораторных работ, действительно охватывающих большинство физических эффектов, изучаемых в рамках общей физики.

Настоящая книга представляет собой попытку собрать воедино все самое интересное, что было сделано для общего физического практикума, и сделать это легко доступным преподавателям всех вузов

Издание предназначено для преподавателей высшей школы, занимающихся научно-методической работой

© В.И Козлов
© Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 2010г.

СОДЕРЖАНИЕ

© Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 2010г. 2
СОДЕРЖАНИЕ 3
Предисловие 5
Первой книге «Физический практикум» – 100 лет ! 8
Прямолинейное равномерное движение тела 12
Движение тела 18
в поле силы тяжести 18
2.1. Вертикальное движение тел 18
2.2. Движение тела, брошенного под углом к горизонту 26
Действие на тело нескольких сил 31
3.1. Равновесное положение тела 31
3.2. Движение тел в машине Атвуда 39
3.3. Движение тела по наклонной плоскости 45
3.4. Равноускоренное движение тела 51
3.5. Всплывание пузырьков воздуха внутри наклонной трубки с водой 56
3.6. Движение материального тела с переменным ускорением 57
3.7. Движение центра масс 61
3.8. Реактивная сила 62
3.9. Движение тела с переменной массой 63
Вращение и прецессия материальных тел 66
4.1. Вращательное движение твердого тела 66
4.2. Маятник Обербека 76
4.3. Прецессия гироскопа 78
4.4. Движение тела во вращающейся системе координат 81
Трение 86
5.1. Трение покоя 86
5.2. Трение скольжения 86
5.3. Трение качения 92
5.4. Внутреннее трение 94
5.5. Вязкое трение 94
Деформации твердого тела 98
6.1. Деформация растяжения и изгиба 98
6.2. Деформация кручения 104
6.3. Деформация пружины 107
6.4. Соударение тел 110
Колебания 122
7.1. Физический маятник 122
7.2. Оборотный маятник 131
7.3. Конический маятник 134
7.4. Крутильный маятник 136
7.5. Крутильный гравитационный маятник 141
7.6. Пружинный маятник 145
7.7. Бифилярный маятник 154
7.8. Маятник Максвелла 155
7.9. Маятник Фуко 157
7.10. Маятник Вильберфорса 158
7.11. Маятник Катера 158
7.12. Другие маятники 159
7.13. Колебания с трением 169

7.14. Маятник с колеблющейся точкой подвеса 176
7.15. Связанные маятники 179
7.16. Вынужденные колебания 186
7.17. Нелинейные колебания 192
Упругие волны 195
8.1. Упругие волны в газе 195
8.2. Упругие волны в твердом теле 216
8.3. Упругие волны в проволоке (нити) 224
8.4. Упругие волны в жидкости 232
8.5. Волны в пружине 234
8.6. Эффект Доплера 235
Гидродинамика 238

ПРЕДИСЛОВИЕ

В системе преподавания общей физики сложилась триада: лекции – семинары – практикум. Предназначение практикума – экспериментальное наблюдение основных, наиболее ярких и выразительных, физических эффектов и изучение законов, их описывающих. За многие десятилетия развития общего физического практикума создано много разных лабораторных работ, действительно охватывающих большинство физических эффектов, изучаемых в рамках общей физики.

Первым «Физическим практикумом», по-видимому, следует считать руководство профессора А. П. Соколова, впервые напечатанное в 1908 г. В нем были собраны описания всех лабораторных работ по физике, установленных в Физической лаборатории Московского государственного университета. В последующие годы общий физический практикум физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова продолжал развиваться. После нескольких переизданий книги А.П. Соколова появился «Физический практикум» К.П. Яковлева (1946 г.), результат, как он пишет, громадной работы нескольких поколений преподавателей Физического института МГУ, которые на протяжении почти полустолетия непрерывно улучшали и обновляли его физический практикум.

С развитием физического факультета часть лабораторных работ была заменена более современными, а часть отошла в возникшие специальные практикумы отделений и отдельных кафедр факультета. Наряду с этим появилось большое число новых лабораторных работ, что отражает как развитие физики, так и развитие методики ее преподавания. Сохранены лабораторные работы, которые, несмотря на свой «возраст», по-прежнему остаются очень полезными как учебные работы – именно при выполнении таких работ то или иное физическое явление или физический закон усваиваются студентом очень хорошо.

Большое внимание развитию общего физического практикума физического факультета МГУ постоянно уделяли заведующие кафедрой общей физики проф. В.И. Иверонова, проф. А.Н. Матвеев, проф. В.А. Алешкевич и в настоящее время – проф. А.М. Салецкий.

Большой вклад в расширение тематики лабораторных работ общего физического практикума внесли преподаватели других ведущих вузов (МФТИ, МИФИ и др.). В последние годы организованы регулярные конференции: Всероссийская научно-практическая конференция «Учебный физический эксперимент: Актуальные проблемы. Современные решения», Международная учебно-методическая конференция «Современный физический практикум» и другие, проводимые на базе отдельных вузов. С 1995 г. выходит журнал «Физическое образование в вузах», в котором значительная часть публикуемых материалов посвящена практикуму.

Настоящая книга представляет собой попытку собрать воедино все самое интересное, что было сделано для общего физического практикума, и сделать это легко доступным преподавателям всех вузов.

В описаниях большинства лабораторных работ, как и в журнальных статьях и докладах на научно-методических конференциях, акцент авторами делается на какой-либо характеристике физического процесса, характеристике вещества, характеристике физического закона. Это, конечно, вполне приемлемо. Но в физическом практикуме, когда студент выполняет эксперимент, главным для него должен быть физический эффект, физическое явление, которое разворачивается перед его глазами. Исходя из этого, в настоящей книге разбиение собранного материала по главам произведено так, что отдельные работы группировались

именно по тому, какое физическое явление воспроизводится студентом в данной работе. При этом оказалось, что в ряде лабораторных работ реализуется не одно явление, а два или даже больше. Так что произведенное распределение лабораторных работ по тематическим главам не является однозначным.

В настоящей книге ссылка на ту или иную научно-методическую работу начинается с названия этой работы, как выражающего ее физическое содержание. Жирным шрифтом выделен год публикации каждой работы, что позволяет более легко следить за хронологией развития практикума.

Основным источником материала для данной книги послужили следующие учебные пособия:

1. Соколов А.П. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям по физике. ОНТИ. НКТП. СССР. **1937**. 463 с.

2. Яковлев К.П. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям в физических лабораториях. Т. 1. Механика и общие свойства тел. Упругие колебания. Акустика. М.-Л., Гостехиздат, **1943**, 235 с.

3. Яковлев К.П. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям в физических лабораториях. Т. 3.Интерполирование и гармонический анализ. Элементы номографии. Лабораторная техника. Таблицы и формулы. М.-Л., Гостехиздат, **1945**, 235 с.

3. Яковлев К.П.Физический практикум. Руководство к практическим занятиям в физических лабораториях. Т. 1. Механика и общие свойства тел. Упругие колебания. Акустика. М.-Л., Гостехиздат, **1946**. 239 с.

4. Соколов А.П. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям по физике. Т. 1. Механика и общие свойства тел. Упругие колебания. Акустика. ОГИЗ. Государственное изд-во технико-теоретической литературы. М.-Л. **1946**.

5. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям по физике. Под ред. проф. В. И. Ивероновой. Сост.: А.Г Белянкиным, Е.С. Четвериковой, И.А. Яковлевым. Изд. 2-е. Гос. изд. ф.-м. литературы. М., **1951**.

6. Физический практикум. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. Составлено: А.Г. Белянкиным, Е.С. Четвериковой, И.А. Яковлевым. Гос. изд. ф.-м. литературы. М., **1953**, 636 с.

7. Физический практикум. Руководство к практическим занятиям по физике. [Для физ. и физ.-матем. фак. гос. ун-тов]. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. Составлено: А.Г. Белянкиным, Е.С. Четвериковой, И.А. Яковлевым. Гос. изд. ф.-м. литературы. М., **1955**, 636 с.

8. Прокофьев. В.И., Майсова Н.Н. Физический практикум. М., **1958**.

9. Физический практикум. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск. **1959**. 137 с.

10. Вердеревский Н.Н., Иродов И.Е., Майкова В.И. и др. Под ред. проф. Савельева И. В. Физический практикум. МИФИ. М. **1960**. 119 с.

11. Вердеревская. Н.Н., Иродов И.Е., Майкова В.И. и др. Под ред. проф. И.В. Савельева. Физический практикум. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Часть I. Москва, **1961**.

12. Физический практикум. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. Составлено: А.Г. Белянкиным, Г.П, Мотулевич, Е.С. Четвериковой, И.А. Яковлевым. Гос. изд. ф.-м. литературы. М., **1962**, 956 с.

13. Кортнев А.В., Рублев Ю.В., Куценко А.Н. Практикум по физике. Учебное пособие для студ. высш. техн. учебн. заведений. Изд. 2-е, доп. М., “Высш. школа”, **1963**, 516 стр.

14. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Под ред. докт. физ.-мат. наук Л.Л. Гольдина. Составлено: Л.Л. Гольдиным, С.М. Козелом, Н.Н. Колачевским и др. Изд. “Наука”. М., **1964**, 580 с.

15. Физический практикум. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. Гос. изд. ф.-м. литературы. М., **1965**.

16. И.Е.Иродов, Г.Н. Кутузова, В.И. Майкова и др. Физический практикум. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Часть I. Москва, **1965**.

17. Г.Г. Аксенова, К. Т.Басова, Н.Н. Взоров и др. Под ред. Н.И. Гольдфарба и Г.И. Пантюхова. Физический практикум. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Часть II. Москва, **1965**.

18. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. Составлен: А.Г. Белянкиным, Г.П, Мотулевич, Е.С. Четвериковой, И.А. Яковлевым. Изд. “Наука”. М., **1967**, 352 с.

19. Л.Л. Гольдин, Ф.Ф. Игошин, С.М. Козел и др. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Под ред. Л.Л. Гольдина. Изд. “Наука”. М., **1973**, 688 с.

20. Л.Л. Гольдин, Ф.Ф. Игошин, С.М. Козел и др. Лабораторные занятия по физике. Под ред. Л.Л. Гольдина. Изд. “Наука”. М., **1983**, 704 с.

21. Л.Г. Деденко, Д.Ф. Киселев, В.К. Петерсон, А.И. Слепков.Общий физический практикум. Механика. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Изд-во моск. ун-та. **1991**, 269 с.

22. А.М. Салецкий, А.И. Слепков. Механика твердого тела. Лабораторный практикум. М. Физический факультет МГУ. **1999**, 82 с.

23. Гладун А.Д., Александров Д.А., Игошин Ф.Ф. и др. Лабораторный практикум по общей физике: Учебное пособие для студентов вузов. Т. 1. Механика. М.: Изд-во МФТИ. **2004**. 316 с.

Кроме того, были обработаны научные журналы, публикующие научно-методические работы, материалы научно-методических конференций, а также реферативный журнал “Физика”.

Я надеюсь, что собранный в настоящей книге материал окажется полезным для многих преподавателей высшей школы, занимающихся научно-методической работой.

Доцент кафедры общей физики
физического факультета МГУ
доктор физ.-мат. наук В.И. Козлов

ПЕРВОЙ КНИГЕ «ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ» – 100 ЛЕТ !

(Заметка в газете физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова
№ 1 за 2009 год)

В 1908 году вышла в свет книга профессора Московского университета А.П. Соколова «Физический Практикум». В ней были собраны описания всех задач, установленных в Физической лаборатории Московского университета. Их удачный подбор и большое разнообразие делали руководство профессора А.П. Соколова достаточно полным для того времени курсом лабораторных занятий по физике.

История физического практикума восходит к 1872 году, когда А.Г. Столетову, с помощью тогдашнего заведующего кафедрой физики физико-математического факультета Московского университета профессора Н.А. Любимова, удалось создать учебную и научную лабораторию. Здесь А.Г. Столетов заложил основы первого общего физического практикума для экспериментального обучения студентов. Этот зародившийся практикум непрерывно совершенствовался и расширялся. Во главе этой работы стоял ученик А.Г. Столетова А.П. Соколов (1854–1928), который в 1884 г. стал экстраординарным, а в 1891 г. ординарным профессором. В 1883 г. он начал заведовать кафедрой теоретической физики и физической лабораторией физико-математического факультета. Его с полным основанием считают создателем первого физического практикума в университете.

«Физический Практикум» А.П. Соколова быстро приобрел широкую популярность. Первоначально эта книга предназначалась исключительно для нужд физической лаборатории Московского университета. Этим обстоятельством определялся как подбор задач, так и самый характер их описаний. Учебные лаборатории по физике, которые начали организовываться в высших учебных заведениях, в основном повторяли физический практикум Московского университета, и различные «Руководства» к практическим занятиям, которые издавались в последующие годы, в большинстве представляли собой также более или менее удачные подражания курсу А.П. Соколова. У проф. А.П. Соколова и его коллег появилось желание сделать книгу более универсальной, т. е. пригодной к обслуживанию различных высших учебных заведений, имеющих физические лаборатории. Это намерение заставило изменить как круг задач, так и характер их описаний. К тому же со времени первого издания некоторые области физики значительно разрослись и приобрели особенно важное значение – это также потребовало введения ряда новых задач. Сюда относятся, например, некоторые задачи из оптики, все задачи по радиоактивности, часть которых взята из руководства К.П. Яковлева «Специальный практикум по радиоактивности», задачи по электронным явлениям т. д.

Во втором издании, вышедшем в двадцатых годах, «Физический Практикум» был совершенно переработан проф. А.П. Соколовым и проф. К.П. Яковлевым, дополнен рядом новых задач. Благодаря этому курс проф. А.П. Соколова вновь оказался вполне удовлетворительным руководством для студенческих работ по физике, не исключая и его разделов, новых в то время.

С 1927 г. профессор А.А. Глаголева-Аркадьева заведовала «Физической лабораторией» (Моховая 9), которая и была физическим практикумом.

В 1946 г. вышло очередное издание книги «Физический Практикум» проф. К.П. Яковлева. Общий объем Руководства оказался очень большим, поэтому весь материал расположен в трех томах. В первом томе, кроме вводной части и описания основных физических измерений, собраны работы по механике, упругим колебаниям и акустике (57 работ); во втором томе – работы по всем остальным разделам физики; третий том содержит все справочные и вспомогательные материалы.

К.П. Яковлев и А.П. Соколов в качестве своих коллег по работе над этой книгой называют С.И. Вавилова, И. И. Васильева, Б. А. Введенского, М.А. Леонтовича, А.С. Предводителева, С.Н. Ржевкина, Е.С. Четверикову, И.А. Яковлева, и других.

Новая эра в развитии физического практикума наступила с переездом физического факультета МГУ в новое здание на Ленинских горах. Практикум обогатился новым оборудованием. Бурное развитие физики заставило повысить требования к экспериментальному обучению студентов. Было поставлено много новых задач и изъят из практикума ряд более простых задач. В практикуме представлены задачи трех типов. Во-первых, задачи чисто измерительные, знакомящие студента с отдельными приборами (например, нониус, баллистический гальванометр, вольтметр и т. д.). Во-вторых, – и это основная часть практикума – задачи, в которых студент осваивает методы измерений тех или иных физических величин и наряду с точными измерениями знакомится с физическими явлениями. Наконец, есть задачи, в которых акцент сделан именно на индивидуальное знакомство студента с некоторыми физическими явлениями.

Под руководством В.И. Ивероновой, В.Г. Зубова, Р.В. Телеснина и И.А. Яковлева была проведена за один год гигантская работа по развертыванию нового практикума по общей физике, занявшему весь главный коридор четвертого этажа здания факультета. И.А. Яковлев создал в нем совершенно новый общий практикум по оптике. В нем были в отдельных комнатах сформированы отделы задач по спектральному анализу, по поляризационным явлениям в кристаллах, по дифракции и интерференции с использованием интерферометров Фабри–Перо и Майкельсона, задача по дифракционной теории образования и трансформации изображений Аббе. Он постоянно пополнял практикум новыми задачами. В отдельных помещениях были созданы первые учебные задачи по изучению гелий-неонового лазера и голографии. На лазеры были переведены многие задачи. К.Н. Баранский поставил задачи по определению скорости света фазовым методом в воздухе и стекле, дифракции Фраунгофера и Френеля на малых отверстиях и дисках, дифракции света на ультразвуке. Т.С. Величкина поставила все задачи по кристаллооптике. О.А. Шустин поставил первую задачу по голографии, на основе которой уже в бытность нашу на кафедре физики твердого тела И.А. Яковлев создал первый в мире специальный практикум по голографии для всех студентов факультета.

Общий практикум стал образцом для всех вузов страны, так как с ним знакомились практически все слушатели ФПК, преподаватели общей физики. Были созданы практикумы – слесарный, токарный, монтажный, стеклодувный, а также кабинет черчения и инженерной графики, где занимались студенты 1-го курса в первой половине первого семестра. В порядке реорганизации этих подразделений (в конце 70-х годов) был организован практикум «Введение в технику эксперимента» (ВТЭК), где студенты-первокурсники знакомятся с различными из-

мерительными приборами, с основами электрических и радиоизмерений (руководителями этого подразделения были Д.А. Соболев,а затем по настоящее время С.А. Киров). Занятия во ВТЭКе проходят по следующим пособиям:

Д.А. Соболев «Практикум по технике эксперимента» под ред. А.Н. Матвеева и Н.Н. Журавлева, 1983 г. и Д.А. Соболев «Введение в технику физического эксперимента» под ред. А.Н. Матвеева и Н.Н. Журавлева, 1993 г. Многолетняя работа над практикумом позволила осознать некоторые ее методические аспекты. Трудность постановки задач в разделах механики и молекулярной физики заключается в том, что большинство современных методов измерений основано на переходе к измерению электрических величин. Использование же студентами первого курса, работающими в этих разделах, ряда электроизмерительных приборов и схем нежелательно, так как в этом случае сложность измерительной установки может помешать ясному пониманию изучаемого явления. По объему отдельные задачи практикума далеко не одинаковы. На одной и той же установке можно во многих случаях осуществить целый ряд упражнений. Выполнить все эти упражнения за одно занятие не представляется возможным. Однако, в книгу помещены все эти упражнения с тем, чтобы объем работы конкретного студента определил преподаватель. Книга «Физический практикум» отнюдь не должна освободить студента от работы над учебником и сама не должна превратиться в учебник по общему курсу физики. Поэтому теоретические вопросы, знание которых необходимо студенту при выполнении работы, не вошли в описание задачи, если их изложение можно найти в каком-либо из существующих и достаточно распространенных учебников. Однако, ряд задач практикума потребовал более детального рассмотрения некоторых теоретических вопросов, чем это можно найти в учебниках, или выходит за рамки излагаемого в них материала. В этом случае теоретические вопросы вставлены в описания задач. В 1962 г. был издан однотомник «Физический практикум» под редакцией В.И. Ивероновой (в то время – заведующей кафедрой общей физики). Составителями этой книги были А.Г. Белянкин, Г.П. Мотулевич, Е.С. Четверикова и И.А. Яковлев.

В постановке 139 задач, вошедших в это издание, участвовали 37 преподавателей, в основном, кафедры общей физики, причем, почти половина всех этих задач была поставлена И.А. Яковлевым (31 задача), А.Г. Белянкиным (23 задачи) и Е.С. Четвериковой (11 задач).

В 1967–68 г.г. вышло 2-е издание «Физического практикума»” под редакцией В.И. Ивероновой, в двух томах, переработанное и дополненное 27 новыми задачами (всего в этом издании было 166 задач).

В 70-х годах Л.П. Стрелкова создала лабораторию по изучению электромагнитных волн.

К началу 90-х годов ОФП был значительно модернизирован. Из 24 действующих лабораторий были коренным образом реорганизованы и перепланированы 11 лабораторий. Была создана 81 новая установка (34 задачи) и существенным образом модернизировано 96 установок. Таким образом, было обновлено 57% действующих установок ОФП. В 33 задачах результаты обрабатывались на ЭВМ (ЕС-10-10). Все задачи ОФП были снабжены обновленными описаниями. В эти годы наш ОФП занимал ведущее место в СССР. Его опыт работы изучали слушатели ФПК из МИФИ, педагогического института, II-го медицинского института, отдельные представители многих других вузов страны. С ОФП знакомились представители вузов США, ФРГ, Болгарии, Польши, КНДР. ОФП посетил посол Китайской На-

родной Республики с большой делегацией специалистов. В среднем ОФП проводил 15–20 экскурсий в год для гостей МГУ и физического факультета.

В настоящее время ОФП имеет 25 лабораторий, в которых размещены 140 задач (около 300 лабораторных установок).

С 1966 по 1990 г.г. в рамках основанного при МГУ факультета повышения квалификации преподавателей вузов (ФПК) на физфаке действовало вечернее отделение ФПК. Курировал специальность «Общая физика» и читал лекции на отделении проф. И.А. Яковлев. Ответственными за обучение в ОФП слушателей вечернего отделения (инженерный поток) были сначала доцент М.А. Грабовский, а затем доцент В.С. Никольский.

В 1960–1970-е годы в ОФП стажировались преподаватели-иностранцы из Польши, Чехословакии, ГДР и Венгрии. Их стажировкой руководил доцент В.С. Никольский.

В 1971 году для практикума была приобретена ЭВМ «Мир-2», и значительное число лабораторных работ стало выполняться с обработкой результатов эксперимента на этой вычислительной машине.

В 90-е годы стали проводиться научно-методические конференции, позволившие преподавателям, увлекающимся методической работой, иметь соответствующие публикации, которые, как известно, являются основным критерием в оценке работы не только научных работников, но и преподавателей.

В последние годы пришел новый этап развития практикума – внедрение лабораторных работ, выполняемых на экспериментальных установках, непосредственно связанных с персональным компьютером.

Отрадно отметить, что студенты нашего факультета положительно оценивают роль общего физического практикума в системе своей текущей учебы.

Хочется надеяться, что, несмотря на трудности с финансированием и техническим оснащением, наш общий физический практикум будет продолжать развиваться и останется лучшим в мире.

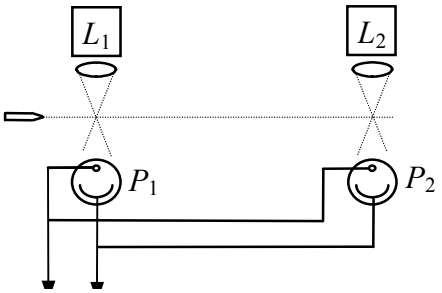
Доцент кафедры общей физики
физического факультета МГУ
доктор физ.-мат. наук В.И. Козлов

Глава 1

ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА

1. **Определение начальной скорости пули методом фотореле.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 1а. С.77-79.

Цель лабораторной работы – измерение скорости полета пули. Скорость пули измеряется следующим образом. Два фотоэлемента P_1 и P_2 установлены на определенном расстоянии L один от другого и возбуждаются осветителями L_1 и L_2, которые снабжены линзами. Духовое ружье устанавливается в станке так, что его пуля пролетает через фокус одной и затем другой линзы, на мгновение прекращая освещение соответствующих фотоэлементов. Время t полета пули между фотоэлементами регистрируется с помощью осциллографа, равномерное движение луча по экрану которого испытывает отклонения в моменты прекращения освещения фотоэлементов пулей. Скорость пули вычисляется по формуле равномерного движения $v = L/t$.



2. **Определение скорости пули методом баллистического маятника.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 1б. С.79-81.

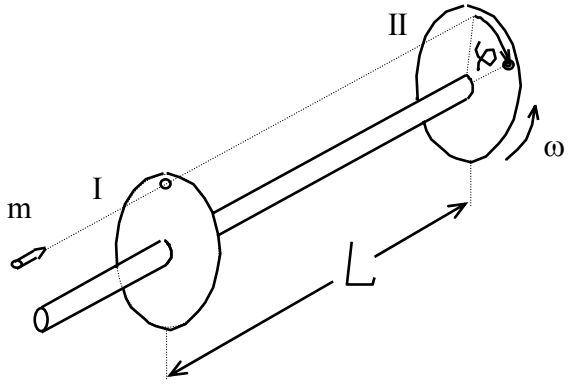
3. **Измерение скорости полета пули с помощью баллистического маятника.** Физический практикум. Под ред. В.И. Ивероновой. М., **1953, 1955**. Задача 13. С. 129-132. **1967**. Задача 19. С. 97-100.

4. **Измерение скорости полета пули. Метод баллистического маятника.** Л.Л. Гольдин и др. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Под ред. Л.Л. Гольдина. «Наука». **1964**, с. 102-105.

5. **Измерение скорости полета пули. Метод вращающихся дисков.** Л.Л. Гольдин и др. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Под ред. Л.Л. Гольдина. «Наука». **1964**, с. 105, 109-111. **1973**. Работа 13. С. 102-103, 107-108.

В этом методе используется так называемый прибор Поля, представляющий собой два тонких бумажных диска I и II, закрепленных на общей оси на некотором расстоянии L друг от друга. Ось приводится во вращение мотором.

Пуля m, направленная параллельно оси вращения, пробивает оба диска. За время полета пули между дисками последние успевают повернуться на некоторый угол φ, так что пробоины не лежат на линии, параллельной оси вращения. Скорость пули определяется по смещению пробоин, которое удобно измерять, сдвигая диски вдоль оси до соприкосновения.



6. **Измерение скорости полета пули. Метод крутильного баллистического маятника.** Л.Л. Гольдин и др. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Под ред Л.Л. Гольдина. «Наука». **1964**, с. 102-103, 105-106. **1973**, с. 105, 108-109.

7. **Измерение скорости пули по пути и времени.** Messung der Geschwindigkeit eines Geschosses aus Weg und Zeit. “Praz. Naturwiss.”, **1965**, A14, № 11, “Physik”, 296-298. [РЖ 1966-6А78].

Описывается лабораторный способ измерения скорости выстрела пули. Электрическая схема состоит из конденсатора и сопротивления, соединенных параллельно. Напряжение на конденсаторе измеряется электрометром. Конденсатор соединяют с источником напряжения. На линии от источника напряжения к сопротивлению и от сопротивления к конденсатору делают по две контактных клеммы, которые замыкаются тонкими полосками, расположенными параллельно друг другу, но под некоторым углом к направлению выстрела. Когда выстрел произведен, пуля разрывает первую полоску, конденсатор отключается от источника напряжения и начинает разряжаться через сопротивление. Когда разрывается второй контакт, разряд конденсатора прекращается. Скорость выстрела определяется по формуле $V=A/t$, где A – расстояние между пластинками, t – время разряда. Время рассчитывают по формуле $t = [(U_1 – U_2)/(U_1+U_2)]\cdot 2RC$. Приведен вывод расчетной формулы и методические указания.

8. **Измерение скорости пули с помощью крутильного баллистического маятника.** Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. В.И. Ивероновой. Изд. «Наука».М. **1967.** Задача 19. С. 129-132.

9. **Баллистический маятник фирмы Beck and Co.** The Beck ball pendulum. “Amer. J. Phys.”, **1968**, 36, №12, 1161-1163. [РЖ 1969-11А49].

Описан баллистический маятник, предназначенный для применения в лабораториях общей физики и механики. Маятник является прочным и надежным прибором, позволяющим получать воспроизводимые и согласованные результаты. Бронзовый шарик, выстреленный из пружинного пистолета, улавливается пустотелой чечевицей маятника. Под действием выстреленного шарика маятник, находящийся в вертикальном положении, отклоняется на некоторый угол вдоль изогнутой рейки и захватывается в крайнем положении собачкой. Пистолет можно также применять для выстреливания шарика в свободное пространство,

для чего нужно предварительно отклонить маятник с пути шарика. Пружина пистолета имеет три степени растяжения, сообщающие три различные начальные скорости шарику. При выполнении опыта необходимо для каждого натяжения пружины производить несколько выстрелов, т. к. начальная скорость шарика подвержена незначительным флуктуациям. В статье приведены фотоснимок и результаты экспериментов при разных натяжениях пружины и при выстреливании шарика в свободное пространство. Проведен подробный анализ пренебрегаемых величин и источников ошибок и показано, что при учете ошибок получаются достаточно хорошие результаты.

10. **Закон сохранения количества движения при неупругом ударе.** Groth Jurgen. Der Impulssatz beim unelastischen Stoss. “Prax. Naturwiss.”, **1968**, F17, № 5, 137-138. [РЖ 1968-12А76].

Опыт проводится при помощи баллистического маятника, представляющего собой массивный деревянный брусок, прикрепленный к легкой штанге. В маятник стреляют из духового ружья металлическим штырьком и рассчитывают скорость штырька, согласно закону сохранения количества движения, по углу отклонения маятника. Для контроля скорость выстрела рекомендуется определить другим способом. Штырек намагничивают и снова стреляют сквозь две катушки индуктивности, установленные на некотором расстоянии друг от друга и соединенные с входом электронного осциллографа. По масштабу времени и расстоянию между зарегистрированными импульсами рассчитывают скорость штырька. Результаты измерений дают хорошее совпадение.

11. **Измерение скорости полета пули.** Руководство к лабораторным занятиям по физике. Под ред. Л.Л. Гольдина. Изд. 2-е. «Наука». М. **1973.** Работа 13. С.105-111. **1983.** Работа 2.3. С.115-120.

12. **Определение скорости пули с помощью крутильного баллистического маятника.** Руководство к лабораторным работам по физике. Часть I. Механика. Молекулярная физика. Под ред. А.П. Максименко. Днепропетровский. гос. ун-т. **1973**. Работа 7.

13. **Баллистический маятник.** Scheie Carl E. Ballistic pendulum. “Phys. Teacher”, **1973**, 11, № 7, 426-427. [РЖ 1974-3А79].

Описан лабораторный эксперимент по определению скорости стрелы с помощью баллистического маятника. Сравнение погрешностей определения скорости стрелы по точной формуле и двум ее аппроксимациям показывает, что для угловых отклонений маятника, меньших 16°, погрешность в первом случае, связанная с неточным измерением малой высоты подъема маятника, существенно превышает погрешности, вызванные аппроксимациями, сделанными в предположении малости углов отклонения маятника.

14. **Эксперимент с поездом Эйнштейна в учебной лаборатории.** Shaffer Joseph. Einstein′s train in the lab. “Phys. Teach.”, **1974**, 12, № 2, 103-105. [РЖ 1974-7А78].

Описан лабораторный эксперимент, моделирующий известный мыслимый эксперимент СТО с изменением течения времени для двух наблюдателей, нахо-

дящихся в разных системах отсчета, но наблюдающих за одними и теми же событиями. В качестве примера рассмотрены поезд, движущийся с некоторой скоростью, и два наблюдателя, один из которых находится в поезде, а другой вне его, следящих за вспышками света на концах поезда. Экспериментальное оборудование отличается необыкновенной простотой и состоит из стержня, связанного с помощью нити через систему блоков с воротом и играющего роль поезда, и двух нитей, один конец которых также связан с воротом, а на других закреплены небольшие грузы для натяжения нитей. На нитях закреплены зажимы, играющие роль источников света. При вращении ворота нити и стержень начинают двигаться, но с разными скоростями (разные скорости движения обусловлены разными диаметрами ворота для нитей и цилиндра), отношение же скоростей постоянно. Приведены результаты для наблюдателя, движущегося вместе с «поездом», и неподвижного наблюдателя, которые хорошо согласуются с теорией.

15. **Определение скорости снаряда.** Janke Werner. Bestimmung der Geschwindigkeit eines Geschlosses. “Prax. Naturwiss. Phys.”, **1975**, 24, № 8, 207-209. [РЖ 1976 2А-100].

Метод с вращающимися дисками, использованный Физо для измерения скорости света, модифицирован для измерения скорости ружейной дроби или пистолетной пули. На вращающейся оси помещаются два картонных диска, которые пуля пробивает последовательно. Скорость пули можно определить, измеряя угол поворота второго диска за время пролета пулей расстояния между диском (≈1 м) и частоту вращения дисков. Последняя измеряется стробоскопическим методом или индукционным тахометром. Если эти методы недоступны, то скорость вращения можно измерить с помощью фотосопротивления и осциллографа. Для того, чтобы определить истинную скорость пули, необходимо учесть потерю части ее энергии при пробивании первого диска. Для этого в промежутке между дисками помещается третий из того же материала. Рассматривая отношение скоростей до и после соответствующих дисков, можно вычислить скорость пули перед первым диском. Точность измерений для пистолетной пули (226 м/с) оценена в 3%.

16. **Определение скорости пули с помощью крутильно-баллистического маятника.** Задача 2. С. 18-21. Полищук Д.И. и др. Физический практикум для нефизических специальностей. Часть I. Одесса. **1977**.

17**. Определение скорости полета пули, выпущенной из духового ружья.** Hanna Charles. Determining the speed of an air rifle bullet. “Phys. Teach.”, **1981**, 19, № 3, 184-185. [РЖ 1981-10А19].

Описывается устройство для демонстрации движения частицы (пули) с большой скоростью. Для измерения малых временных интервалов используется осциллограф. Основой данной установки являются два простых элемента, включенных в схеме противоположным образом. Каждый из них состоит из отрезка металлической фольги и электрической батареи с напряжением 1,5 В. Пуля, выстреленная из ружья, пробивает первую полоску фольги, что вызывает появление напряжения 1,5 В в цепи; в момент пробивания второго отрезка фольги напряжение падает до нуля. Таким образом, можно определить величину временного интервала, за который пуля пролетает расстояние между двумя полосками фольги. Очень полезной при проведении демонстрации оказывается фотокамера.

18. **Измерение времени полета пули в эксперименте с классическим баллистическим маятником.** Peterson F. C. Timing the flight of the projectile in the classical ballistic pendulum experiment. “Amer. J. Phys.”, **1983**, 51, № 7, 602-604. [РЖ 1984-1А93].

Для измерения времени полета пули, выпущенной из пружинного ружья, используются два микрофона, один из которых укреплен на ружье, а второй помещается в предполагаемом месте падения пули. Сигналы микрофонов усиливаются и формируются специальным устройством, запускающим и останавливающим цифровой измеритель временных интервалов. Даны описание и электрическая схема этого устройства. Точность измерения времени в экспериментах составила ±3 мс при среднем времени полета 440 мс. С помощью описанного устройства можно также измерять время свободного падения тела и установить независимость величины вертикальной составляющей скорости от горизонтальной.

19. **Баллистический маятник с пружинным пистолетом. Еще один способ определения начальной скорости [снаряда].**Wagner William S. The spring gun ballistic pendulum: An alternate method for finding the initial velocity. “Amer. J. Phys.”, **1985**, 53, № 11, 1114-1115. [РЖ 1986-6А104].

При проведении опыта с баллистическим маятником для нахождения начальной скорости “снаряда” используется закон сохранения энергии. Полагается, что потенциальная энергия сжатой пружины пистолета превращается в кинетическую энергию “снаряда” и приходящего во вращательное движение стержня маятника. Жесткость пружины измеряется заранее. Относительная погрешность измерения скорости составляет 5÷9 %.

20. **Измерение скорости пуль разными методами.** Kamencak F. Mereni rychlosti strel. Sb. Pr. Ped. Fak. Ostrove. A. **1989**. № 24. С. 131-142. [РЖ 1990**.** 4А150].

Описаны четыре метода измерения скорости пули, выпущенной из пневматического ружья, с использованием простых средств: 1) метод баллистического маятника; 2) метод вращающихся дисков; 3) метод сжатия пружины; 4) метод горизонтального бросания.

21. **Измерение скорости полета пули с помощью баллистического маятника**. Moszczynsky Bogumil, Krupowies Janusz, Kucharczyk Dariusz, Magonski Janusz. Przyrzad do badania wahadla balistycznego skretnego. Пат. 148785 Польша, МКИ G 09 B 23/10. Zaklady Elektroniczne ″Elwro″. № P.25.9614; Заявл. 19.05.86; Опубл. **31.01.90.**

Предлагаемый прибор может быть использован для определения скорости полета пули (напр., в лабораторной работе) и представляет собою расположенную горизонтально стальную штангу, укрепленную на вертикально расположенной стальной проволоке, проходящей через середину штанги. На стержне штанги симметрично закрепляются два цилиндра, расстояние которых до проволоки может меняться. При помощи катапульты производится выстрел таким образом, что пуля застревает в мишени, установленной на одном из концов штанги. На приборе имеется угломерное устройство для измерения угла отклонения штанги, а также электронный секундомер для определения периода колебаний маятника.

22. **Определение скорости пули с помощью баллистического маятника.** Общий физический практикум. Механика. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Изд. моск. ун-та. **1991.** Лабораторная работа 9. С.121-125.

Баллистический маятник состоит из заполненного вязким веществом (воск, парафин) большого цилиндра, который закреплен в металлической раме. Рама может свободно, с очень небольшим трением, вращаться около горизонтальной оси. Выстрел производится из духового (пружинного) ружья, укрепленного в станке так, чтобы скорость пули была направлена горизонтально по прямой, проходящей через центр тяжести маятника и перпендикулярной к его оси вращения. Пуля, проникая в цилиндр со стороны его открытой части, обращенной к ружью, застревает в нем, сообщая маятнику часть своего момента импульса относительно оси. Маятник отклоняется от вертикальной линии на некоторый угол α, который измеряется с помощью зеркала и шкалы (вследствие трения и вызываемого им затухания колебаний маятника значения α, полученные непосредственно из отсчетов, всегда несколько меньше истинной величины). Теоретический анализ поведения системы приводит к следующей формуле для вычисления скорости пули v:

$$v = 2\frac{\sin\frac{\alpha}{2}}{m}\sqrt{\frac{g}{2}(M+m)(I+ma^2)},$$

где m – масса пули, M – масса цилиндра, I – момент инерции маятника относительно оси вращения, a – расстояние от оси вращения маятника до его центра тяжести (и до точки удара пули).

23. **Измерение скорости стрелы в студенческой лаборатории.** Tuijn C., Kool B.W. The measurement of arrow velocities in the students' laboratory. Eur. J. Phys. **1992.** 13, № 3. С. 127-134.

Описан метод измерения скорости стрелы посредством индуцирования напряжений, вызванных пролетом стрелы с намагниченным наконечником через две катушки, расположенные на фиксированном расстоянии. В результате могут быть обнаружены такие малые эффекты, как влияние материала тетивы, количества нитей, высоты оттяжки стабилизаторов. Экспериментальная установка относительно проста и может быть использована на ранней стадии студенческого лабораторного курса. Обсуждаются возможные математические модели исследуемых процессов.

Глава 2

ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА В ПОЛЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

2.1. Вертикальное движение тел

1. **Изучение законов падения на машине Атвуда.** С. 43-46. Физический практикум. Под ред. проф. В. Ивероновой. Задача 3. М., **1951**.

2. **Изучение законов падения на машине Атвуда.** Физический практикум. Под ред. проф. В. Ивероновой. Задача 3. С. 45-48. М., **1953, 1955**.

3. **Определение ускорения силы тяжести с помощью маятника.** Физический практикум. Под ред. проф. В. Ивероновой. Задача 4. С. 48-53. М., **1953, 1955**.

4. **Непосредственное измерение ускорения силы тяжести.** Нол (The direct measurement of "g". Noehl John), School Sci. and Math, **1959**, 59, № 9, 673-679. [РЖ 1960-9-21916].

Описывается самодельный прибор, при помощи которого можно определить ускорение силы тяжести путем наблюдения явления падения тела, прикрепленного к магнитной ленте, движущейся при падении тела с ускорением g между ножами полюсных наконечников электромагнита, питаемого промышленным переменным током. Лента проявляется в растворе четыреххлористого углерода с мелкими обезжиренными железными опилками, которые притягиваются к ленте в тех ее местах, которые были между полюсными ножами в момент, когда сила тока в катушке электромагнита была равна нулю и поперечное намагничивание меняло знак. Расстояние между двумя последовательными линиями, обозначенными опилками, представляет расстояние, проходимое падающим телом в течение одного полупериода переменного тока. Это дает возможность вычислить средние скорости. Принимая во внимание, что при постоянном ускорении средняя скорость за какой-либо промежуток времени равна мгновенной скорости в средней точке этого промежутка времени, строится график скорости, по которому и определяется g как крутизна наклона полученной прямой. Этим методом полученное значение g равно 976 см/с^2, причем средняя скорость вычислялась за время в три полупериода при частоте переменного тока 60 Гц.

5. **Новый прибор для проведения опытов по свободному падению.** Hildbrand Klaus. Fallversuche mit einem neuen Fallgerat. "Prax. Naturwiss.", **1966**, A15, 9, Physik, 235-237. [РЖ 1967-5A44].

Описывается прибор, при помощи которого можно определить время свободного падения методом Греневельда. В качестве падающего тела используется металлический цилиндр со штифтом. Цилиндр укреплен зажимом на некоторой высоте, при этом электрическая цепь измерительной установки замкнута накоротко. Когда зажим отпускают, цилиндр падает в ловушку и своей тяжестью прижимает ловушку к контактной пружине. Электрическая цепь, разомкнутая во

время падения, вновь замыкается. Зажим и ловушка, соединенные параллельно, связаны проводником с подвижным электродом измерительной установки. При перемещении электрода вдоль пластины на ней остаются отметки времени только в тот период, когда цилиндр падает, т. к. в остальное время электрическая цепь замкнута накоротко. Таким образом, по количеству отметок можно измерить время падения цилиндра и затем рассчитать ускорение свободного падения. Автор рекомендует вместо цилиндра со штифтом и зажима использовать электромагнит, стальной шарик и контактную пружину. Приведена электрическая схема, согласно которой выключение тока в электромагните и начало регистрации отметок времени происходит одновременно. Соответственно в момент, когда шарик попадает в ловушку, регистрация отметок времени прекращается.

6. **Опыты по свободному падению с маркировкой времени на металлизированной бумаге.** Koster Artur. Fallversuche mit Zeitschreibung auf Metallpapier. “Prax. Naturwiss.”, **1966**, A15, 10, Physik, 253-255. [РЖ 67-6A71].

Приведен краткий исторический обзор методики проведения опытов по свободному падению от Галилея до настоящего времени и описывается современный способ определения ускорения свободного падения, в котором короткие промежутки времени измеряются при помощи металлизированной бумаги и камертона, к ножке которого прикреплено острие. Описана электрическая схема установки.

7. **Определение ускорения силы тяжести при помощи свободного падения вращающегося валика.** Werner Klaus. Bestimmung der Erdbeschleunigung mit Hilfe des freien Falls einer rotierenden Walze. “Prax. Naturwiss.”, **1967**, F16, Physik, 89-90. [РЖ 1967-11A92].

Тяжелый уравновешенный валик с нанесенными по верхней окружности попеременно черными и белыми полосками для стробоскопического наблюдения подвешен вертикально и приводится во вращение мотором, сообщающим ему такую скорость, при которой валик кажется неподвижным. После достижения этой скорости валик свободно падает, продолжая равномерно вращаться. При этом на боковой поверхности валика при помощи шприца, наполненного чернилами, вычерчивается кривая. После падения валика бумага, покрывающая его боковую поверхность, срезается и производится расчет.

8. **Исследование свободного падения тела методом световых следов.** Trittelvitz Walther. Schulerubungen zum freien Fall nach dem Leuchtspurfahren. “Prax. Naturwiss.” **1967**, F16, № 2, Physik, 32-36. [РЖ 1967-10A96].

Луч света прерывается обтюратором так, чтобы получалось 50 вспышек в секунду продолжительностью каждая в 1/1000 с. Полосу бумаги, покрытой светочувствительной краской, подвешивают в затемненном помещении на выдергивающийся гвоздь и оттягивают грузом. Свет фокусируют на нижний край полосы, включают обтюратор и выдергивают гвоздь. Бумага падает и вспышки света оставляют на ней светящиеся следы. По расстояниям между следами выводят закон свободного падения тела.

9. **Закон падения $s=gt^2/2$, полученный с помощью стробоскопа и и фотокамеры.** Steketee J. De valwet $s_t=gt^2/2$ afgeleid met stroboscoop en polaroidland

camera. “Nederl. Tijdschr. Natuurkunde”, **1968**, 34, № 4, 112-117 (гол.). [РЖ 1968-12А72].

Описан эксперимент, позволяющий учащимся самим вывести закон свободного падения. Падение стального шарика (первоначально удерживаемого электромагнитом) вдоль линейки автоматически фотографируется при вспышках стробоскопа, повторяющихся с частотой 50 Гц. По фотографиям строится зависимость $\sqrt{s_t}$ от t. По наклону получившейся прямой определяют коэффициент пропорциональности, удвоенный квадрат которого дает ускорение силы тяжести. Эта величина получается с точностью ≈5%. Эксперимент можно видоизменить, фотографируя последовательные подскакивания целлулоидного шарика, одновременно перемещающегося вдоль стола.

10. **Измерение g методом свободного падения.** Pirie J. Measurement of g by free fall. “Phys. Educ.”, **1969**, 4, № 1, 49-51. [РЖ 1969-9А83].

Описан метод измерения g в свободном падении латунного цилиндра вдоль направляющей трубки. Отметчик времени приводится в действие при помощи двух лампочек накаливания и фотокатода, расположенных в начале и в конце вертикального пути. Приведен график типичных результатов. Указывается, что точность эксперимента лимитируется точностью отметчика времени, составляющей ±5%. Отмечается преимущество метода свободного падения по сравнению с методом маятника, при котором студентам приходится затрачивать слишком много времени на наблюдение качаний.

11. **Пути повышения точности измерения ускорения силы тяжести по методу падения шарика.** Гаргер К.С., Шульга В.И., Шрамко В.И. «Изв. высш. учеб. заведений. Физика», **1972**, № 1, 128-130. [РЖ 1972-6А84].

Кратко описана усовершенствованная полуавтоматическая установка для определения численного значения величины ускорения силы тяжести g из непосредственных наблюдений за свободным падением тел. Установка смонтирована на вертикальной стойке. Измеряется время падения шарика между двумя уровнями, на которых находятся датчики (фотодиоды). Приведены блок-схема установки и результаты измерений g (в таблице), полученные новым методом. Относительная случайная ошибка не превышает 0,7%.

12. **Методы определения ускорения земного тяготения, используемые в кабинетах физики.** Попов Б. Методы за определяне на земното ускорение, използувани в кабинета по физика. «″Мат. и физика (НРБ)», **1973**, 16, № 6, 43-50. [РЖ 1974-6А68].

Рассмотрены простые опыты, позволяющие определить ускорение свободного падения с достаточной точностью: 1) наблюдение свободного падения тела и измерение времени падения метрономом; 2) измерение с помощью шнура Бабине; 3) опыты по наблюдению падения тел с небольшой высоты с автоматическим измерением времени падения; 4) измерение ускорения в опытах по наблюдению движения тел по наклонной плоскости; 5) определение ускорения в опытах с математическим маятником; 6) по наблюдению свободного падения капель воды, время падения которых определяется с помощью стробоскопа и т. д.

13. **Анализ данных эксперимента свободного падения.** Humphrey Clyde L. Analysis of the free fall experiment. “Amer.J.Phys.”, **1973**, 41, № 8, 965-968. [РЖ 1974-1А40].

Пять известных в литературе методов анализа данных эксперимента свободного падения сравниваются с методом, предложенным автором. Показано, что три из рассмотренных методов непригодны, т. к. используют при определении среднего значения ускорения лишь малую часть данных. Статистический анализ трех остальных методов показывает, что при использовании методики обработки эксперимента, предложенной автором, получается наиболее точное среднее значение ускорения. Экспериментальные результаты подтверждают результаты статистического анализа.

14 **Определение ускорения свободного падения с помощью синхронного мотора.** Schilt H., Rose R. Bestimmung der Erbeschleunigung mit Hilfe eines Synchronmotors. “Prax. Naturwiss.”, **1974**, Teil 1, 24, № 5, 119-120. [РЖ 1974-11А90].

К шкиву, насаженному на вал синхронного электромотора (частота оборотов 50 $с^{-1}$), прикрепляется короткая металлическая проволока. Рядом с мотором при помощи электромагнита поддерживается массивная металлическая планка с прикрепленной к ней полосой восковки. После отключения электромагнита планка падает вниз, и проволока при каждом повороте шкива оставляет след на восковке. Измеряя расстояние между следами, можно вычислить ускорение свободного падения для каждой тройки последующих следов, а затем усреднить полученные значения.

15. **Выяснение законов свободного падения и измерение ускорения свободного падения.** Reichspfarr Franz. Ermittlung der Fallgesetze und der Erdbeschleuningung. “Prax. Naturwiss.”, **1974**, Teil 1, 23, 7, 169-173. [РЖ 1975-1А81].

Для регистрации свободно падающего тела предлагается изготовить прибор, основной частью которого является неоновая лампочка, питаемая от сети переменного тока. Делая 100 вспышек в секунду, она экспонирует полоску фотопленки, закрепленной на свободно падающей железной полоске длиной ≈1 м. Для улучшения разрешающей способности используется оптическая система из тонкой щели, образованной обломками бритвы, и цилиндрической линзы из кусочка стеклянной палочки. Все устройство размещено в деревянной коробке, которую можно сделать открывающейся для демонстрации устройства. Прорез в стенках коробки является шахтой для падающего тела. До начала падения полоска закреплена в проводящем подвесе и шунтирует лампочку, не давая ей загореться. Опыт проводится в полной темноте и заканчивается проявлением пленки. При навыке время затемнения составит ≈2 минуты. После проявления пленки на нее наклеивается шкала из миллиметровой бумаги, отсчеты S/t переносятся на график и пересчитываются в график v/t, наклон которого определяет ускорение свободного падения.

16. **Определение гравитационной постоянной и массы Земли в лабораторном практикуме.** Ахматов А.С., Еланский В.А., Островский М.С., Быстрова Г.В. Сб. научно-методич. статей по физике. М. В. школа. Вып.4. **1975** . С. 59-61.

17. **Калибровка лампы-вспышки с помощью простого лабораторного оборудования.** Blake Julian G. Calibration of a Blinky with project physics laboratory equipment. “Amer.J.Phys.”, **1975**, 43, № 8, 747. [РЖ 1976-2А101].

Отмечается возможность определения ускорения свободного падения путем фотографирования свободно падающего тела с использованием предварительно откалиброванной неоновой лампы-вспышки. При калибровке лампы, т. е. определении числа вспышек в секунду, свет от лампы направляется на полупроводниковый фотоэлемент, выходной сигнал которого подается на усилитель. Выходной сигнал усилителя представляет собой последовательность импульсов, соответствующих вспышкам лампы. Число вспышек в секунду определяется с помощью счетчика импульсов, подключенного к выходу усилителя.

18. **Точный эксперимент с падающим телом.** Blackburn James A., Koenig R. Precision falling body experiment. “Amer.J.Phys.”, **1976**, 44, № 9, 855-857. [РЖ 1977-4А93].

Описаны лабораторное оборудование и методика выполнения эксперимента по определению ускорения свободного падения тела. В отличие от традиционных экспериментов, в этом эксперименте время падения тела (металлический шарик) фиксируется при помощи размыкания и замыкания электрической цепи самим шариком. Время падения определяется с помощью таймера, собранного на интегральных элементах и имеющего пятиразрядный цифровой индикатор. Таймер включается и выключается автоматически одновременно с началом и концом падения шарика. Обсуждаются результаты эксперимента. Отмечается, что точность определения ускорения свободного падения с помощью описанного оборудования лучше чем 10^{-3}. При анализе результатов учитывается сопротивление воздуха.

19. **О простом эксперименте по изучению законов свободного падения тел.** Uber ein einfaches Experiment zum freien fall. Kaiser Heribert, Musgens Robert. “Naturwiss. Unterr. Phys./Chem.”, **1979**, 27, № 9, 266-270. [РЖ 1980-2А81].

Предложен простой эксперимент по установлению закона свободно падающего тела. На оси вращающегося электромотора укреплена мягкая проволочка, оставляющая метки на падающем мимо мотора длинном стержне. По известной частоте вращения мотора и по расстояниям между метками можно определить ускорение свободного падения, скорости и пути, проходимые за различные отрезки времени. Даны рекомендации по обработке результатов эксперимента.

20. **Об экспериментах со свободным падением и бросанием тел.**

Zur Behandlung des freien Falls und der Wurfarten. Schroter Wolfram. “Phys. Sch.”, **1981**, 19, № 7-8, 317-320. [РЖ 1982-1А123].

Движение тел при их падении или бросании удобно изучать с помощью стробоскопической фотосъемки. В описанных экспериментах освещение движущегося тела производилось с частотой 20 Гц. Для падающего тела определялась квадратичная зависимость от времени пути, пройденного телом. При движении тела, брошенного с некоторой начальной скоростью в горизонтальном направлении, стробоскопические снимки позволяют сделать заключение о постоянстве скорости в горизонтальном направлении в течение всего времени

движения (при пренебрежении сопротивлением воздуха), о независимости движений в горизонтальном и вертикальном направлениях.

21. **Об определении ускорения свободного падения.** O wyznaczaniu przyspieszenia ziemskiego. Golla Jan. “Fiz. szk.”, **1983**, 29, № 3, 167-169. [РЖ 1984-1А92].

Описан способ определения ускорения свободного падения на основе измерения времени падения тела с заданной высоты. Основную часть установки составляет электрический хронометр, позволяющий измерять время с точностью до 0,01 с. Приведена схема установки, описано устройство хронометра и методика проведения опыта. Измеряется время падения шарика, отпускаемого электромагнитом после его выключения.

22. **Измерение времени реакции.** Measuring reaction time. Willey David G. “Phys. Teach.”, **1985**, 23, № 5, 314. [РЖ 1986-1А].

Предлагается простое устройство, предназначенное для измерения времени реакции человека и представляющее собой длинный стержень с делениями, проградуированный в секундах в соответствии с законом $(2s/g)^{1/2}$, который связывает путь и время при свободном падении. Один из участников опыта держит стержень за верхний конец и в некоторый момент отпускает его. Испытуемый держит руку вблизи нижнего конца стержня и должен схватить стержень, как только увидит, что стержень начал падать. Деление, зажатое в кулаке испытуемого, указывает время его реакции.

23. **Опыт по теме «Свободное падение».** Ein Fallversuch am Wasserhahn. Driedger Klaus Peter. “Prax. Naturwiss. Phys.”, **1987**, 36, № 1, 44-46. [РЖ 1987-8А126].

Описывается опыт по теме «Свободное падение», проводимый без каких-либо специальных приборов. Вода, вытекающая из водопроводного крана, находится в свободном падении с некоторой начальной скоростью. Предлагается экспериментально проверить формулу зависимости радиуса поперечного сечения струи от скорости воды в струе.

24. **Определение ускорения свободного падения с помощью резинового мяча.** Determination of gravitational acceleretion using a rubber ball. Guercio G. “Amer.J.Phys.”, **1987**, 55, № 1, 59-63. [РЖ 1987-8А124].

Резиновый мяч диаметром 4,9 см и массой 64 г падает с определенной высоты на твердый пол. Измеряется время между первым последующими отскоками мяча. Это время измеряется цифровым секундомером с разрешением 0,01 и с таймером на интегральных микросхемах с разрешением 0,001 с, управляемым с помощью микрофона. В первом случае точность измерения ускорения свободного падения составляет 2–3 %, во втором случае – лучше 1 %. Обсуждается ряд возникающих в эксперименте проблем: время столкновения, внутренняя колебательная энергия мяча, зависимость упругих свойств резины от температуры, величина потерь энергии при ударе мяча об пол.

25. **Новый эксперимент по свободному падению для определения ускорения, вызванного тяготением.** A new free-fall experiment to determine the accele

ration due to gravity. Bunker Kit. Phys. Educ. **1991**. 26. № 6. С. 386-390. [РЖ 91-7А71].

Описана недорогая учебная экспериментальная установка для измерения ускорения свободного падения g с точностью не хуже 0,1 % и даже до 0,04 %. Обычные установки в учебных лабораториях позволяют измерить *g* с точностью не лучше 5 %. Латунный шар диаметром 25 мм пролетает в свободном падении расстояние около 150 мм, измеряемое с помощью микроскопа-катетометра (traveling microscope). Время полета измеряется часами с кварцевым кристаллом на частоте 1 МГц. Установка идеально удовлетворяет требованиям учебной лаборатории: измерения и вычисления выполняются студентом за одно занятие (2 часа); явление описывается простой математикой; студентом исполняется процедура выделения систематической погрешности и ее учет, а также уменьшение случайной погрешности путем увеличения числа наблюдений. Получены значения g для Брисбена 9,79 м/с^2, для Лондона 9,81 м/с^2, для Сингапура 9,78 м/с^2.

26. **Измерение ускорения свободного падения методом двух компьютеров**. (метод Гладуна). ФОВ.-**1997**. Т. 3, № 3. С. 157.

27. **Фундаментальные опыты по механике: Принцип относительности.** Никифоров Г.Г. Учеб. физ. **1998**. № 3. 16-20, 79. [РЖ 1999. 08-18А.89].

С помощью сконструированной автором экспериментальной установки можно наблюдать свободное падение тел и столкновение тел в различных системах отсчета.

28. **Фронтальные лабораторные работы в углубленном курсе физики с использованием доработанных стандартных физических приборов.** Грабович В.Б. Пробл. учеб. физ. эксперим. **1998**. № 5. 41-44, 80. [РЖ 1999. 01-18А113].

Рассмотрены возможности совершенствования стандартного оборудования и их использования для выполнения физического практикума по электромагнитным колебаниям и цепям переменного тока, а также лабораторных работ «Движение тел под действием силы тяжести» и «Скорость равномерного движения».

29. **Фундаментальные опыты по механике: Принцип относительности.** Никифоров Г.Г. Учеб. физ. **1998**. № 3. 16-20, 79. [РЖ 1999. 08-18А.89].

С помощью сконструированной автором экспериментальной установки можно наблюдать свободное падение тел и столкновение тел в различных системах отсчета.

30. **Реализация классического эксперимента «Опыт Галилея» с помощью техники фотофиниша.** Рыжиков С.Б., Старокуров Ю.В. СФП-2002. С.-П. Тез. Докл. М.-**2002**, с. 169.

31. **О повышении точности измерения ускорения свободного падения.** Рязанцев О.В., Шульга В.И.; ил. ДЕП. В НИИТЭхим (Черкассы) 18.02.02, № 6-хп **2002**. Рус. [РЖ 02.12-18А.155ДЕП].

Проведен теоретический анализ возможностей определения ускорения силы тяжести методом свободного падения стального шарика. Показано, что в условиях физического практикума вузов измерение времени падения с точностью до

миллисекунд обеспечивает относительную случайную погрешность определения ускорения не хуже 0,02%, а систематическую – 0,26%, что вполне соответствует современным требованиям к точности проведения лабораторных измерений. Основой установки является стандартный лабораторный стенд FRM-0,2 (лаборатория «Физические основы механики»), нормативные параметры которого по предлагаемой методике измерений улучшаются более чем на два порядка.

32. **Измерение ускорения свободного падения баллистическим методом в рамках демонстрационного эксперимента**. Семенов М.В., Якута А.А. Физ. образ. в вузах. **2002**. 8. № 3. 55–56. [РЖ 2003-05-137].

Описывается автоматизированная установка, реализующая один из вариантов баллистического метода измерения ускорения свободного падения в вакууме при наблюдении падения тел в воздухе. Установка позволяет наблюдать падение шариков в воздухе и определять моменты времени, в которые шарики имеют заданные координаты, соответствующие координатам датчиков. В дальнейшем с помощью компьютера можно проводить математическую обработку полученных данных. Излагаются теоретические основы метода обработки экспериментальных данных, позволяющего во время лекции быстро и точно измерять *g*. Приводятся экспериментальные результаты.

33. **Эксперименты по измерению ускорения в гравитациооном поле с помощью цифровой камеры.** Tsukushi Itaru, Suzuki Susumu, Aikawa Fumihiro. Chuba kogyo daigaku kenkyu hokoku=Rept. Chuba Inst. Technol. **2003**. № 50. 77-85. [РЖФиз. 06.12-18А.141].

34. **Стробоскопический эффект и измерение ускорения свободного падения.** Марулина Л.С. Структура и свойства твердого тела. **2003**. № 7. 134-137. [РЖФиз. 04.12-18А.152].

Стробоскопический эффект используется для исследования быстро протекающих процессов, например, для измерения частоты вращения или колебаний какой-либо физической системы. В работе описывается применение стробоскопа СШ-2 для вычисления ускорения свободного падения *g*. В качестве падающего тела использован пластиковый мяч массы 10 г и диаметра 6 см. Параметры мяча таковы, что можно пренебречь сопротивлением воздуха. Для уменьшения погрешности результатов требуется повысить точность измерения координат падающего тела.

35. **Прибор для определения ускорения свободного падения.** Барвинченко А.М., Гуревич Ю.Л. Проблемы учебн. физ. эксп-та : Мат-лы 9 Всеросс. научно-практ. конф. «Учебный физический эксперимент : Актуальные проблемы. Совр. Решения», Москва, 2004 : Сборник научных трудов. Вып. 19. М., **2004**. 34. [РЖФиз. 06.04-18А.141].

36. **Определение коэффициентов сопротивления для гладких шаров в экспериментах со свободным падением в старых рудниках.** Experimental evaluation of tht drag coefficient for smooth spheres by free fall experiments in old mines. Maroto J. A., Duenas-Molina J., Dios J. Eur. J. Phys. **2005**. 26. № 3. 323-330. [РЖФиз. 06.05-18А.143].

37. **Эксперименты со свободным падением.** Experiments in free fall. Art A. Phys. Educ. **2006**. 41. № 3. 380–385. [РЖ 18. Физика Ч. I. 2008. № 1. 18А.110].

2.2. Движение тела, брошенного под углом к горизонту

1. **Новый простой прибор для выстреливания шариков.** Ein neues, einfaches Wurfgerat. “Leybold-Welle”, **1961**, 2, 7, 22-23. [РЖ 1964-1А75].

Описывается новый прибор фирмы Leubold, который может быть использован для демонстрации движения тела, брошенного вертикально или под углом к горизонту. Прибор состоит из гильзы с пружиной и стержня. Когда стержень вдвинут в гильзу, пружина сжата и стержень удерживается в гильзе при помощи стопорного винта. На переднюю часть стержня, выступающую из гильзы, надевают шарик, в котором высверлено соответствующее углубление. Если отпустить винт, пружина разжимается и стержень с шариком получают толчок. После остановки стержня, шарик слетает с него и летит по параболе с определенной начальной скоростью. Прибор может быть укреплен на штативе в любом положении в соответствии с заданным направлением начальной скорости.

2. **Пружинная «пушка» для лабораторных и лекционных опытов по механике.** Rice Michael. A simple spring gun: experiments; demonstrations. “Amer. J. Phys.”, **1963**, 31, 2, 89-91. [РЖ 1964-1А74].

Описано устройство пружинной «пушки» для проведения опытов по кинематике и динамике точки, производящей метание стальных шариков диаметром ~1 см. Сжатие пружины до ее спуска, а, следовательно, и начальная скорость шарика могут устанавливаться на любые значения от нуля до некоторого предела. С этим прибором рекомендуется проводить следующие лабораторные опыты: в вертикальную мишень, покрытую листом копировальной и листом обыкновенной бумаги, из «пушки» делается ряд «выстрелов» стальными шариками одинаковой массы и затем производится математическая обработка случайных отклонений следов этих шариков на мишени от среднего; 2) графическое изучение зависимости начальной скорости шарика от различной степени сжатия пружин различной длины, но одинаковой жесткости; 3) для выбранной начальной скорости и жесткости пружины теоретически рассчитывается траектория шарика; затем 6 или 7 вычисленных точек траектории проверяются на опыте с помощью следов на вертикальной мишени, приближаемой или удаляемой от пушки; 4) с помощью стробоскопического метода получают на одном фотоснимке изображение траектории шарика на фоне сетки из нейлоновых нитей; зная начальную скорость шарика и отсчитывая по сетке его координаты, получают значения ускорения g, отличающиеся от табличного не больше чем на 1%; 5) качественное изучение центральных и косых ударов стальных шариков. Описанный прибор может быть также использован для постановки демонстрационных опытов.

3. **Прибор для лабораторных работ по динамике.** Robin J. L. Un appareil pour travaux pratiques de dynamique. “Bull. Union hysicians”, **1964**, 58, № 477, 783-787. [РЖ 1965-1А76].

Прибор состоит из криволинейной направляющей, устанавливаемой на штативе на любой высоте. Стальной шарик удерживается в любом месте на направляющей с помощью электромагнита. При выключении электромагнита шарик скатывается по направляющей, срывается с ее края и падает на пол. Варьируя высоту установки направляющей на штативе и высоту скатывания шарика по направляющей, получают различные кривые свободного падения шарика. С помощью этого прибора можно экспериментально проверить законы падения тел,

определить коэффициент восстановления при упругом ударе, переход потенциальной энергии в кинетическую и т. п.

4. **Определение g путем преобразования времени.** Freier George D. Obtaining “g” with a time transformation. “Amer. J. Phys.”, **1969**, 37, № 9, 929. [РЖ 1970 5А35].

Показано, что аппаратура Сенко [Cenco, Water Drop Parabola Demonstrator, № 76030], в которой поток капелек, совершающих движение по параболическим траекториям, освещается светом от стробоскопа и проектируется затем на экран, может быть использована в студенческом практикуме для измерения ускорения силы тяжести g. Такое измерение становится возможным благодаря свойствам стробоскопа, позволяющим наблюдать быстрое движение тел в замедленном темпе. Путем преобразования временной координаты получена формула, определяющая истинное ускорение g: $g = a'/(\Delta f / f_1)^2$, где a' – наблюдаемое ускорение замедленного движения, f_1 – собственная частота стробоскопа. Отмечается, что аппаратура Сенко может быть усовершенствована благодаря введению двух соответствующим образом расположенных относительно экрана зеркал, позволяющих наблюдать горизонтальные и вертикальные компоненты движения раздельно.

5. **Простая установка для проверки закона сохранения импульса.** Мисов П. Проста постановка за проверка на закона за запазване на импулса. «Мат. и физика» (НРБ), **1970**, 13, № 4, 36-37.[РЖ 1971-1А57].

Установка состоит из двух шариков, лежащих в желобке, укрепленном в горизонтальном положении в верхней части штатива. Один из шариков насажен на один конец стержня, а во втором шарике по диаметру сделано отверстие, в которое может входить этот стержень. На стержень надевают спиральную пружину, которую сжимают шарики. Если пережечь нить, которая связывает пружину, то шарики разлетаются в стороны и падают на пол с одинаковой высоты. Поскольку шарики падают с одной высоты, то горизонтальная дальность полета шариков пропорциональна скорости, приобретаемой шариками при расталкивании пружиной. Установка может быть использована для постановки лабораторной работы, в которой проверяется соотношение $m_1/m_2=x_2/x_1$, где m_1 и m_2 – массы шариков, x_1 и x_2 – горизонтальные дальности полета шариков.

6. **Измерение ускорения силы тяжести (*g*).** Mordue D.L. A measure of g. “Amer. J. Phys.”, **1971**, 39, № 10, 1266-1267. [РЖ 1972-2А102].

Выведено аналитическое выражение для определения ускорения силы тяжести. При выводе использовалось уравнение Бернулли для потока воды из крана, имеющего круговое выходное отверстие. Приведены численные результаты опытов: первый опыт дал величину g=850 см/с^2, во втором опыте g=910 см/с^2. Эти опыты можно успешно проделать в любой учебной лаборатории.

7. **Радиус действия пружинного пистолета.** Heideman Edwin Paul. Range of a dart gun. “Phys. Teacher”, **1973.** 11. № 6, 362-363. [РЖ 1974-1А64].

Описан лабораторный эксперимент по изучению кинематики движения снаряда. В эксперименте используется игрушечный пружинный пистолет, стреляющий стрелами. К концу стрелы прикрепляется шарик от подшипника весом 28 г. Пистолет закрепляется в горизонтальном положении (дуло параллельно ла-

бораторному столу) на стойке. Измеряя расстояние от дула пистолета до пола S_y, определяют время свободного падения снаряда по формуле $t = \sqrt{2S_y/g}$, где g – ускорение свободного падения. Измеряя расстояние от дула до точки падения (по горизонтали) S_x и пренебрегая сопротивлением воздуха, определяют начальную скорость $V_x = S_x/t$. Закрепляя пистолет в вертикальном положении и измеряя максимальную высоту подъема снаряда $S_{вер}$, определяют время подъема на эту высоту $t = \sqrt{2S_{вер}/g}$, а затем вычисляют начальную скорость $V_{вер} = gt$. Зная начальную скорость, учащиеся могут рассчитать дальность полета снаряда в зависимости от прицельного угла пистолета.

8. **Простой точный эксперимент по проверке закона сохранения механической энергии.** Wiss James, Zak Bernard. Chear, accurate, conservation of mechanical energy experiment. “Amer. J. Phys.”, **1973**, 41, № 9, 1100-1101. [РЖ 1974-2А74].

Описан простой лабораторный эксперимент по проверке закона сохранения механической энергии. Экспериментальное оборудование состоит из маятника, представляющего собой шарик от подшипника, подвешенный на тонкой нити. Шарик, отклоненный от положения равновесия, проходя через это положение, с помощью специального приспособления освобождается от нити и падает по параболической траектории на пол. Зная высоту шарика в момент начала движения в качестве маятника, горизонтальное расстояние, которое он пролетел в свободном состоянии, и его массу, легко вычислить скорость в момент начала свободного движения. Отмечается, что точность проверки закона сохранения механической энергии находится в пределах 5%, а для некоторых устройств освобождения шарика от нити достигает 1%.

9. **Моментальная фотография.** Berry Michael L. Stop-action photography. “Phys. Teacher.”, **1975**, 13, № 7, 418-419. [РЖ 1976-2А105].

Для исследования криволинейного движения разработана система для моментальной съемки. Она состоит из камеры с фокусирующей линзой (Fujica SLR) автоматической вспышки и алюминиевой фольги, замыкающей электрическую цепь вспышки. Например, при фотографировании падения шарика в металлическую чашку с жидкостью один контакт цепи лампы вспышки соединяется с корпусом чашки, а второй (кусок алюминиевой фольги) подкладывается под нее и изолируется клином из губки. При ударе шарика о дно клин выскакивает, и срабатывает вспышка. Меняя уровень жидкости, можно исследовать разные стадии процесса. Процесс фотографирования, обработки пленки и сами снимки вызывают интерес у учащихся.

10. **Падение горизонтально брошенного шарика.** Ursule J. Chute parabolique d′une bille. “Bull. Union phys.”, **1976**, 71, № 587, 45-48. [РЖ 1977-4А94].

Описана аппаратура для автоматической записи траектории горизонтально брошенного тела. Шарик, вначале удерживаемый электромагнитом, скатывается по наклонному желобу с горизонтальной конечной частью. Траектория записывается с помощью копировальной бумаги, на которую шарик надавливает при падении. Предусмотрено автоматическое включение и выключение часов, измеряющих время падения. Полученные результаты обрабатываются обычным способом.

11. **Законы сохранения механической энергии.** Conservation of mechanical energy. Hwu Y.P. “Phys. Educ.”, **1980**, 15, № 5, 293-294. [РЖ 1981-1А74].

Описан опыт, в котором иллюстрируется закон сохранения механической энергии с использованием принципа независимости движения. Маленький шарик известной массы скатывается по искривленному наклонному желобу, затем свободно падает с высоты h. Величина R горизонтальной проекции траектории свободного падения шарика измеряется линейкой. Затем вычисляется величина скорости шарика v_0 в момент отрыва его от желоба – по формуле $v_0=R(g/2h)^{1/2}$. Далее на расстоянии 5 см от конца желоба вертикально помещается рейка, покрытая слоем краски. Шарик, ударяясь о рейку во время своего падения, оставляет на ней точечный след. Затем рейка перемещается еще на 5 см и процедура повторяется и т. д. Для каждой метки вычисляется потенциальная энергия mgh_i и усредненная величина «вертикальной» компоненты кинетической энергии шарика. Сумма потенциальной энергии и «вертикальной» составляющей кинетической энергии шарика дает «вертикальную» компоненту механической энергии, которая должна быть одинаковой для всех меток.

12. **Невесомость.** Weightlessness. Shiells Robin. “Phys. Educ.”, **1981**, 16, № 1, 52-54. [РЖ 1981-9А117].

Описано устройство камеры для демонстрации явления невесомости. Камера представляет собой деревянный ящик в форме куба размерами 0,6×0,6×0,6 м^3, подвешенный с помощью двух тросов. Внутри камеры находится механическая катапульта, выстреливающая шариком (диаметр ≈1,3 см), фотокамера и два электрических осветителя. Камера приводится в состояние падения с помощью специального механизма, одновременно включающего катапульту и фотокамеру. Толчок при приземлении камеры смягчается матами. Фотографии траектории движения шарика, выстреливаемого под разными углами к горизонтали в состоянии падения и в состоянии покоя камеры, позволяют обсудить с учащимися законы движения тел в системе отсчета, движущейся под действием силы тяжести.

13. **Изучение траекторий снарядов.** Grant A. Ruari. Phys. Educ. **1990**. 25, 5. С. 288-292. [РЖ 1А102].

Приводится схема простейшего опыта полета тел, брошенных под углом к горизонту. Стальной шарик опускается с заданной высоты при помощи электромагнита на наклонную плоскость и после отражения оставляет четкий след на песке. Меняя высоту падения, находится значение постоянной g. Проиллюстрирована схема расчета траекторий полета с учетом сопротивления воздуха.

14. **Экспериментальная задача из раздела «Кинематика материальной точки».** Хаджидобрев П. Експериментална задача от раздела «Кинематика на материална точка». Физика.-**1992**.-17, № 4.-26-29.-Болг.

Рассмотрено решение экспериментальной задачи, в которой по стробоскопической фотографии траектории движения тела, брошенного под углом к горизонту, надо определить положение тела в начальный момент времени, среднюю скорость и ускорение движения тела, записать закон движения тела в проекциях на координатные оси.

15. **Экспериментальные задачи на истечение жидкости из сосуда.** Василевская Л.И., Василевский А.С.Учеб. Физ. **1998**. № 4. 14-16, 76 [РЖ 1999.08А88].

Используя подручные средства и простейшее оборудование, можно предложить достаточно глубокие по содержанию экспериментальные задания, два из которых приведены в статье: 1. Исследовать зависимость дальности падения струи от высоты, на которой находится отверстие; 2. Оценить силу давления на поршень в медицинском шприце.

16. **Экспериментальное изучение движения по циклоиде в поле силы тяжести.** Майер В.В., Майер Р.В. Учеб. физ. **2003**. № 5. 31-53, 76. [РЖФиз. 04.08-18А.155].

Предлагается в рамках спецкурса по учебному физическому эксперименту провести изучение некоторых физических свойств циклоиды. Изложена учебная теория движения тела по циклоидальной траектории в поле силы тяжести. Предложены учебные приборы и установки, позволяющие экспериментально исследовать это движение. Простейшая электронная техника, которая рекомендуется для изучения циклоиды, может найти самое широкое применение во многих других учебных опытах по механике.

17. **Использование метаний для лабораторных работ: Надежный и недорогой подход к нескольким понятиям.** Farkas N., Ramsier R.D. Phys. Educ. **2006**. 41, № 2. 151-156. [РЖ Физика.08.06-18А.137].

Глава 3
ДЕЙСТВИЕ НА ТЕЛО НЕСКОЛЬКИХ СИЛ

3.1. Равновесное положение тела

1. **Точное взвешивание.** А.П. Соколов. Физический практикум. ОНТИ. **1937**. Задача 5. С.100-106. Физический практикум. Под ред. проф. В. Ивероновой. М., **1951.** Задача 5, с. 51-61.

1953, **1955.** Лаб. работа 5, с. 53-63.

1962. Лаб. работа 5, с. 57–69.

1967. Лаб. работа 5, с. 63–75.

В ходе данной работы достигается статическое положение исследуемого тела путем уравновешивания силы притяжения тела Землей созданием силы, действующей на тело со стороны опоры, которой является чашка аналитических весов. Собственно взвешивание заключается в накладывании на противоположную чашку весов таких разновесок (тел известной массы), которые приведут весы в состояние равновесия.

2. **Определение плотности твердых тел пикнометром и гидростатическим взвешиванием.** А.П. Соколов. Физический практикум. ОНТИ. **1937**. Задача 6. С.107-109. Физический практикум. Под ред. проф. В. Ивероновой. М., **1951.** Задача 6. С. 61-65.

1953, 1955. Лаб. работа 6. С. 63-66.

1962. Лаб. работа 6. С. 69-73.

1967. Лаб. работа 6. С. 75-78.

1) На аналитических весах определяют массу p (без поправки на кажущуюся потерю веса в воздухе) возможно большего количества кусочков исследуемого твердого тела (известкового шпата). Наполнив пикнометр водой, определяют его массу Q. Высыпают кусочки исследуемого твердого тела в пикнометр и определяют его массу P. Плотность исследуемого тела определяется по формуле

$$D = \frac{p(\delta - \lambda)}{Q - P + p} + \lambda ,$$

где δ – плотность воды, λ – плотность воздуха.

2) Взвешивают исследуемое тело в воздухе, а затем, подвесив его на тонкой проволоке к чаше весов, опять уравновешивают его гирями. Пусть при этом значение массы тела (без учета выталкивания воздухом) оказалось P. При этом пусть масса тела в месте с проволокой подвеса – P_1. Затем погружают исследуемое тело в стакан с водой, приводят весы в равновесие. При этом кажущаяся масса тела с проволокой при погружении в воду будет P_2. С принятием в расчет кажущейся потери веса тела и воды в воздухе плотность тела вычисляется по формуле:

$$D = \frac{P}{P_1 - P_2}(\delta - \lambda) + \lambda ,$$

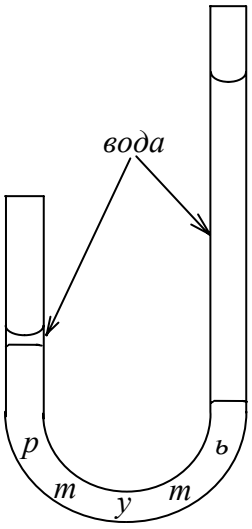
где δ – плотность воды, λ – плотность воздуха.

3. **Определение плотности жидкостей пикнометром, гидростатическим взвешиванием и весами Вестфаля.** А.П.Соколов. Физический практикум. ОНТИ. **1937**. Задача 7. С.109-114.

В ходе работы взвешивается сосуд, наполняемый последовательно исследуемой жидкостью и водой. Истинная плотность D исследуемой жидкости (с поправкой на кажущуюся потерю веса в воздухе) вычисляется по формуле

$$D = \frac{P - p}{Q - p}(\delta - \lambda) + \lambda,$$

где P – масса пикнометра, наполненного исследуемой жидкостью, Q – масса пикнометра, наполненного водой, p – масса самого пикнометра, δ – плотность воды, λ – плотность воздуха.



Стеклянный запаянный баллончик с небольшим количеством ртути в нем подвешивают к одной из чашек весов и уравновешивают его разновесками на другой чашке. Затем уравновешивают этот баллончик, погруженный в стакан с водой. Отсюда находят неисправленное значение массы вытесненной воды p. Заменив стакан с водой стаканом с исследуемой жидкостью, опять уравновешивают весы. Отсюда находят неисправленное значение массы вытесненной жидкости q. Истинная плотность D исследуемой жидкости находится по формуле:

$$D = \frac{q}{p}(\delta - \lambda) + \lambda.$$

Весы Вестфаля сконструированы так, что при их уравновешивании, когда стеклянный цилиндр погружен в исследуемую жидкость, отсчет плотности этой жидкости производится непосредственно на коромысле весов.

4. **Определение плотностей жидкостей по способу сообщающихся сосудов при помощи катетометра.** А.П. Соколов. Физический практикум. ОНТИ. **1937**. Задача 8. С.114-117.

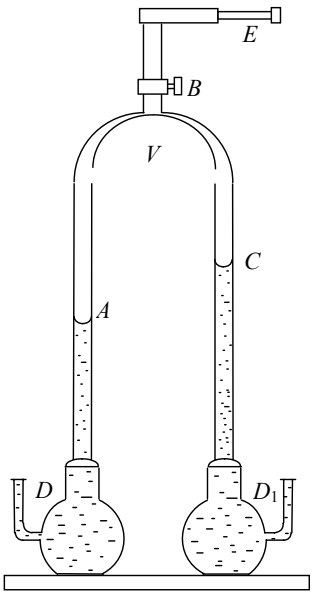
1) Стеклянная U-образная трубка, укрепленная на штативе, в нижней своей части наполнена ртутью, над которой в обоих коленах налита дистиллированная вода до различной высоты, вследствие чего высота ртути в обоих коленах также различна. Измерения сводятся к тому, чтобы определить положение мениска ртути и высоты водяных столбов в обоих коленах трубки.

Если h_1 – высота водяного столба правого колена, а h_2 – высота такого же столба левого колена, то $h_1 - h_2$ – высота столба воды, уравновешивающего столб ртути высотой H.

Если плотность воды d, то плотность ртути D определится из соотношения

$$\frac{D}{d} = \frac{h_1 - h_2}{H}.$$

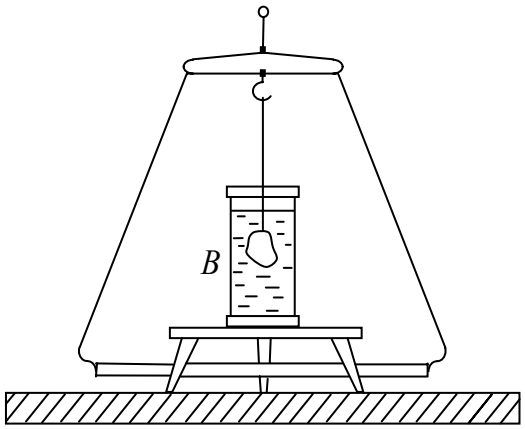
2) При определении плотности раствора сернокислой меди *U*-образная трубка *V* укреплена на штативе в вертикальном положении так, что ее открытые концы находятся внизу и опущены в сосуды *D* и D_1 с боковыми ответвлениями. В одном из этих сосудов налита дистиллированная вода, а в другом – раствор сернокислой меди. Трубка *V* через кран *B* сообщается с маленьким ручным насосом *E*. Измерения состоят в том, что насосом *E* втягивают жидкость в трубки *A* и *C* на некоторую высоту и закрывают кран B. Затем измеряют высоту расположения менисков в трубках *A* и *C*, а также в боковых ответвлениях трубок. Из полученных данных вычисляется плотность исследуемого раствора.



5. **Определение плотности твердых тел методом гидростатического взвешивания.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 7a. С.128-129.

Основным прибором в этом методе служат аналитические весы. Каждое из исследуемых тел взвешивается два раза: один раз – в воздухе и второй раз – в воде.

В последнем случае тело подвешивается на тонкой проволоке к крючку левой чаши весов, над которой на подставке помещают стеклянный цилиндр *B* с дистиллированной водой, налитой в таком количестве, чтобы все тело и небольшая часть проволочки были погружены в воду. При этом необходимо определить температуру воды в цилиндре; Температура взвешиваемого тела принимается равной температуре воды. Плотность вещества исследуемого тела ρ при температуре наблюдения вычисляется по формуле



$$\rho = \rho_{\text{воды}} \frac{G_{\text{тела}}}{G_{\text{воды}}},$$

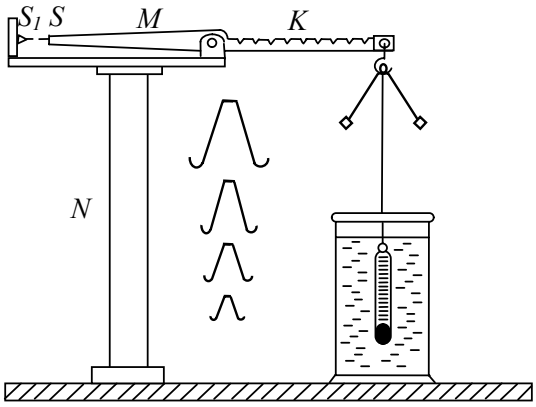
где $\rho_{\text{воды}}$ – плотность воды при температуре наблюдения, $G_{\text{тела}}$ и $G_{\text{воды}}$ – вес тела и вес вытесненной им воды, приведенные к пустоте.

6. **Определение плотности твердых тел методом пикнометра.** К.П.Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 7b. С.130-131.

7. **Определение плотности жидкостей при помощи весов Вестфаля-Мора.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 8a. С.131-134.

Весы Вестфаля–Мора, которые применяются для определения плотности исключительно жидких тел, состоят из вертикальной колонки *N* и неравноплечного коромысла *K*. Коромысло весов на коротком плече имеет цилиндрический противовес *M*, который оканчивается острием *S*. Второе острие S_1, укрепленное неподвижно на подставке весов, расположено против острия *S*. При правильной установки весов кончики того и другого острия должны быть расположены на одной высоте, т. е. одно против другого.

Длинное плечо коромысла весов разделено на 10 равных частей, отмеченных цифрами. Точкам деления соответствуют острые вырезы на коромысле, в которые помещаются имеющиеся при весах разновески. На концах разновесков имеются крючки, за которые разновески можно подвешивать друг к другу. Нулевое деление коромысла соответствует его точке опоры, а на десятом делении, на конце коромысла, находится крючок, к которому на тонкой проволоке подвешивается стеклянный поплавок весов. Вес поплавка и противовеса *M* подобраны так, что коромысло в воздухе без всяких дополнительных нагрузок находится в равновесии.



Если же поплавок погрузить в жидкость, то равновесие весов нарушается, и для того, чтобы его восстановить, необходимо коромысло нагрузить некоторым количеством разновесков. Обыкновенно поплавок представляет собой маленький термометр со шкалой, отвечающей небольшому интервалу температур, близких к комнатной, например от +10°С до +30°С.

Исследуемая жидкость наливается в стеклянный цилиндр, который помещают на подставку так, чтобы поплавок свободно висел внутри жидкости, не касаясь дна и стенок цилиндра. При весах обычно имеются четыре (иногда пять) разновесков или грузов, абсолютный вес которых может оставаться неизвестным. Их относительные веса подобраны специальным образом. Вес воды, взятой при 15 °С в объеме поплавка, равен некоторому числу граммов p_0, соответствующему весу первого (самого тяжелого) груза.

Допустим, что при погружении поплавка весов в некоторую жидкость равновесие весов устанавливается при нагрузке коромысла, равной Kp_0 граммов – здесь *K* – результат непосредственного отсчета положения грузов на коромысле. Очевидно, что эта нагрузка соответствует весу исследуемой жидкости, взятой в объеме поплавка весов. Плотность исследуемой жидкости при температуре опыта $\rho_ж$ вычисляется по формуле:

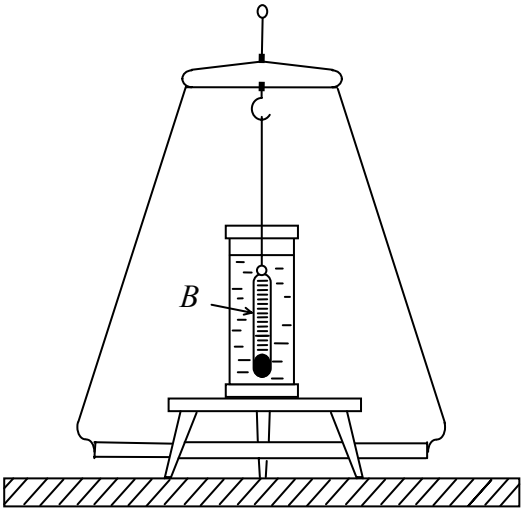
$$\rho_ж = K\rho_{воды},$$

где $\rho_{воды}$ – плотность воды при температуре опыта. Более точное выражение для плотности исследуемой жидкости, учитывающее проведение опыта в воздухе, имеет вид:

$$\rho_ж = K\left(\rho_{воды} - \rho_{воздуха}\right) + \rho_{воздуха},$$

где $\rho_{воздуха}$ – плотность воздуха при температуре измерения.

8. **Определение плотности жидкостей методом гидростатического взвешивания.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 8b. С.134-135.



Метод гидростатического взвешивания в применении к определению плотности жидких тел требует трех последовательных определений веса некоторого тела, обыкновенно стеклянного поплавка *B* с термометром, а именно: его веса в воздухе, его веса в чистой (дистиллированной) воде, и, наконец, его веса в исследуемой жидкости.

Температура воды и исследуемой жидкости должна быть известна. Все взвешивания производятся на аналитических весах. Исследуемые жидкости наливаются в стеклянный цилиндр и устанавливаются на подставке над чашкой весов так, чтобы поплавок свободно висел внутри жидкости. После выполнения измерений плотность исследуемой жидкости $\rho_{ж}$ вычисляется по формуле:

$$\rho_{ж} = \frac{P}{P_{\text{воды}}}\left(\rho_{\text{воды}} - \rho_{\text{воздуха}}\right) + \rho_{\text{воздуха}},$$

где P – вес исследуемой жидкости в объеме поплавка при температуре наблюдения, $P_{\text{воды}}$ – вес воды в объеме поплавка при температуре наблюдения, $\rho_{\text{воды}}$ – плотность воды при температуре наблюдения и $\rho_{\text{воздуха}}$ – плотность воздуха при температуре наблюдения.

9. **Определение плотности жидкостей методом пикнометра.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 8c. С.135-136.

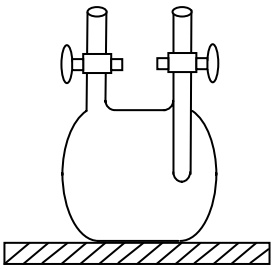
В процессе выполнения лабораторной работы сначала определяют вес пустого пикнометра, затем – вес пикнометра, наполнив его дистиллированной водой, температуру которой предварительно измеряют, и, наконец, заменив в пикнометре воду исследуемой жидкостью, температуру которой тоже предварительно измеряют, вновь определяют вес пикнометра вместе с исследуемой жидкостью. Плотность исследуемой жидкости вычисляется по формуле:

$$\rho_{ж} = \frac{P}{P_{\text{воды}}}\left(\rho_{\text{воды}} - \rho_{\text{воздуха}}\right) + \rho_{\text{воздуха}}$$

где P – вес исследуемой жидкости и вес воды при температуре наблюдения, $\rho_{\text{воды}}$ – плотность воды при температуре наблюдения и $\rho_{\text{воздуха}}$ – плотность воздуха при температуре наблюдения.

10. **Определение плотности сухих газов методом взвешивания.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 9a. С.136-141.

Для определения плотности газов методом взвешивания применяются стеклянные сосуды или шарообразной формы или в форме колбы емкостью обыкно-



венно около 500 см^3, с двумя кранами, очень хорошо притертыми, так что просачивание газа через них практически совершенно устранено.

Измерения сводятся к тому, чтобы определить, во-первых, вес дистиллированной воды в объеме данного сосуда, и, во-вторых, вес исследуемого газа, взятого в том же объеме. Одновременно необходимо определить температуру воды и температуру и давление газа в сосуде. Взвешивание выполняют на аналитических весах. Из результатов взвешивания определяют абсолютную плотность исследуемых газов, т. е. их плотность по отношению к воде при 4° С и их относительную плотность по отношению к воздуху.

Абсолютная плотность исследуемого газа ρ_0 вычисляется по формуле:

$$\rho_0 = \frac{G}{G_{\text{воды}}}\left(1+\alpha_p t\right)\frac{760}{H}\rho_{\text{воды}},$$

где G – вес газа в объеме сосуда при температуре t и давлении H, $G_{\text{воды}}$ – вес воды в том же объеме и при той же температуре, α_p – коэффициент расширения газа при постоянном давлении, $\rho_{\text{воды}}$ – плотность воды при температуре исследования. Величины G и $G_{\text{воды}}$ обозначают истинный вес газа и воды, т. е. приведенный к пустоте.

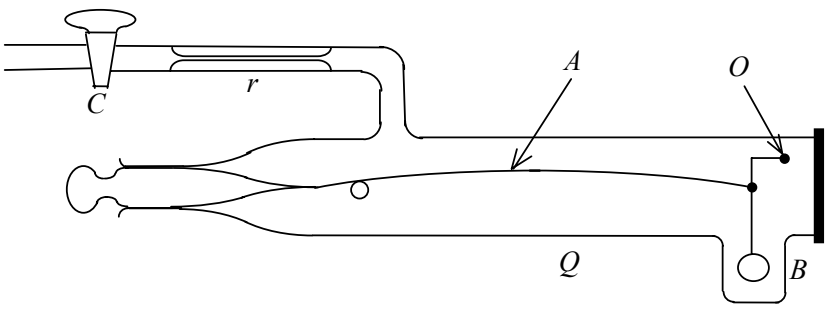
Плотность газа по отношению к воздуху в предположении, что оба эти газа имеют одинаковые объем, температуру и давление, находится из соотношения:

$$\frac{\rho_1}{\rho} = \frac{G_1}{G},$$

где ρ_1 и ρ – плотность исследуемого газа и воздуха при одинаковой температуре t и давлении H, а G_1 и G – истинный, т. е. приведенный к пустоте, вес исследуемого газа и воздуха, взятых в одинаковом объеме.

11. **Определение плотности сухого газа при различных давлениях при помощи микровесов Сальвиони.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 9b. С.141-143.

При определении плотности газов методом, основанным на законе Архимеда, измеряется та кажущаяся потеря в весе тела, которую оно испытывает, находясь внутри исследуемого газа. Так как для тела небольшого объема эта потеря, равная весу газа, вытесняемого телом, по абсолютной величине очень невелика, то для ее измерения необходимо применить весьма чувствительные весы какого-либо типа. Микровесы очень простого устройства, предложенные Сальвиони, состоят из упругой кварцевой или стеклянной пружинки A, укрепленной горизонтально.



На ее свободном конце подвешен небольшой запаянный стеклянный шарик *B*. Смещение пружины передается горизонтальной оси *O*, на которой укреплено маленькое зеркальце. Вся система помещена внутри герметически закрытого стеклянного сосуда *Q*, передняя стенка которого сделана плоской для того, чтобы возможно было регистрировать отклонения зеркальца. Сосуд *Q* при помощи стеклянной трубки, имеющей капилляр *r* и кран*C*, соединяется с осушающими сосудами и вакуумной установкой, которая дает возможность изменять давление газа в сосуде. Величина давления отсчитывается по манометру, который имеется при приборе. Деформация пружины *A* и ее изменения, вызываемые изменением плотности газа в сосуде, по закону упругих деформаций пропорциональна деформирующей силе, которая изменяется пропорционально удельному весу газа в сосуде, или пропорциональна его плотности. Таким образом, показания прибора изменяются пропорционально плотности газа в сосуде. При изменении плотности газа в сосуде *Q* потеря в весе шарика *B* также изменяется, что вызывает соответствующий поворот зеркальца. Плотность газа в приборе $\rho_{газа}$ вычисляется по формуле:

$$\rho_{газа} = \rho \frac{n_1 - n_0}{n - n_0} = \alpha \left(n_1 - n_0 \right),$$

где ρ – плотность сухого воздуха при температуре *t*° *C* и давлении *H*, n_1 – отсчет по шкале прибора (поворот зеркальца) при этой плотности газа в приборе, n_0 – отсчет по шкале прибора в состоянии крайнего разрежения газа в сосуде, которое создается действием вакуумной установки – при этом условии плотность газа в приборе можно считать равной нулю, *n* – отсчет по шкале прибора при наполнении сосуда сухим воздухом при определенной температуре *t*° С и определенном давлении *H*, величина *α* выражает цену одного деления шкалы прибора.

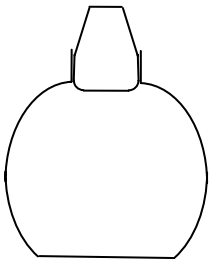
12. **Определение плотности жидкостей пикнометром и гидростатическим взвешиванием.** Задача 7. С. 65-68. Физический практикум. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. М., **1951. 1953, 1955**. Лаб. работа 7. С. 67-70.

1962. Лаб. работа 7. С. 73-76.

1967. Лаб. работа 7. С. 78-82.

Пикнометрами называются небольшие сосуды различной формы и емкости, внутрь которых можно вводить определенные объемы жидкости, если наполнять пикнометры до имеющихся на них меток.

В настоящей лабораторной работе несколько небольших кусочков известкового шпата взвешивают с точностью до 1 мг – пусть их (кажущийся) вес в воздухе оказался равным *P*. Наполняют пикнометр чистой дистиллированной водой, температуру которой предварительно измеряют, и взвешивают его – пусть его (кажущийся) вес в воздухе оказался равным P_1. Затем снимают пикнометр с весов и вводят в него все взвешенные кусочки известкового шпата, наблюдая, чтобы на них не оказалось пузырьков воздуха, что могло бы внести большие ошибки в результат измерений. Часть воды при этом выливается из пикнометра. Закрыв пикнометр пробкой, его тщательно высушивают, доводя уровень воды до метки, и взвешивают еще раз – пусть (кажущийся) вес пикнометра в воздухе (с водой и кусочками шпата) оказался равным P_2. Таким образом, вес P_2 воды, вытесненной кусочками шпата, очевидно, равен:



$$P_{\text{воды}} = P + P_1 - P_2,$$

причем P_B обозначает (кажущийся) вес воды в объеме шпата, т. е. не приведенный к пустоте.

Плотность шпата при температуре наблюдения вычисляется по формуле:

$$\rho_t = \frac{P}{P_{\text{воды}}}\left(\rho_{\text{воды}} - \rho_{\text{воздуха}}\right) + \rho_{\text{воздуха}}.$$

В этом выражении плотность воды $\rho_{\text{воды}}$ и плотность воздуха $\rho_{\text{воздуха}}$ берутся из таблиц.

13. **Эксперимент, демонстрирующий закон обратных квадратов.** Lufburrow Robert A. Inverse-square law experiment. “Amer. J. Phys.”, **1963**, № 1, 60-62. [РЖ 1963-6А97].

Обычно в лабораторных экспериментах студенты непосредственно не имеют дела с силами, изменяющимися обратно пропорционально квадрату расстояния. Описан эксперимент, имеющий целью заполнить этот пробел. К короткому концу неравноплечного рычага длиной 1 м, шарнирно закрепленного в точке, отстоящей на 25 см от конца, прикреплены цилиндрический постоянный магнит и (близ точки опоры) груз весом 50 г; вблизи длинного конца помещен другой груз, перемещаемый вдоль рычага для достижения равновесия. Непосредственно под магнитом закреплен подобный ему магнит, отталкивающий первый магнит кверху. Против длинного конца рычага устанавливается стрелка, фиксирующая равновесное положение. Пользуясь добавочным грузиком в 1 г, подвешиваемым к короткому концу, и изменяя расстояние между магнитами путем смещения вверх или вниз нижнего магнита, можно определять зависимость силы притяжения от расстояния. При достаточном терпении и аккуратности получаются достаточно точные количественные результаты. В качестве побочного результата обнаруживается, что магнитные полюса расположены на некотором расстоянии вглубь от плоскостей оснований магнитов.

14. **К вопросу о взвешивании на аналитических демпферных весах.** Ваксман А.И. Сб. научно-методич. статей по физике. М. В. школа. Вып.4. **1975** г. С. 86-88.

15. **Определение порядка величины плотности воздуха.** Determination de l´ordre de grandeur de la masse volumique de l´air. En classe de cinquieme. Cattelin Jacques. “Bull. Union phys.”, **1983**, 77, № 656, 1265-1266. [РЖ 1984-2А81].

Предложен простой способ измерения плотности воздуха, в котором используются сосуд с твердыми стенками, содержащий воздух, ванна с водой и весы. Сосуд закрыт пробкой с проходящей сквозь нее стеклянной трубкой с коническим краном. Измерение плотности воздуха, содержащегося в сосуде, основано на законе Архимеда. Используя сосуды объемом 800–900 см^3, авторы получили значения плотности воздуха 1,2–1,3 г/л.

16. **Гидравлические весы.** The hydrobalance. Agrawal D. C. “Amer. J. Phys.” **1984**, 52, № 2, 184. [РЖ 1984-9А135].

Описана простая конструкция гидравлических весов, позволяющая определить плотность исследуемых твердых тел. На коромысле симметрично закрепле-

ны две чашки с одинаковой геометрией из одинакового материала. К дну чашек прикреплены два конуса, заполненных свинцовой дробью, так что между одним из конусов и дном соответствующей чашки образовано свободное пространство. В ненагруженном состоянии уровни дна обеих чашек совпадают с уровнем воды. Исследуемое тело помещается в одну из чашек, и баланс восстанавливается помещением на другую чашку массы W_1. Затем тело помещается в свободное пространство между дном чашки и конусом, и баланс восстанавливается помещением на другую чашку массы W_2. Искомая плотность рассчитывается по формуле $\rho = W_1/(W_1 - W_2)$. Отмечаются некоторые преимущества предлагаемой конструкции по сравнению с известными гидравлическими весами Николсона.

17 **Условия плавания тел в ограниченных резервуарах.** Сорокин А.В. Физика в системе совр. образ.: ФССО-3. Т. 3. Труды 7 Межд. конф., С.-П-г, 14-18 окт., **2003**. Т. 3. СПб, 2003, 143-144. [РЖФиз. 06.01-18А.146].

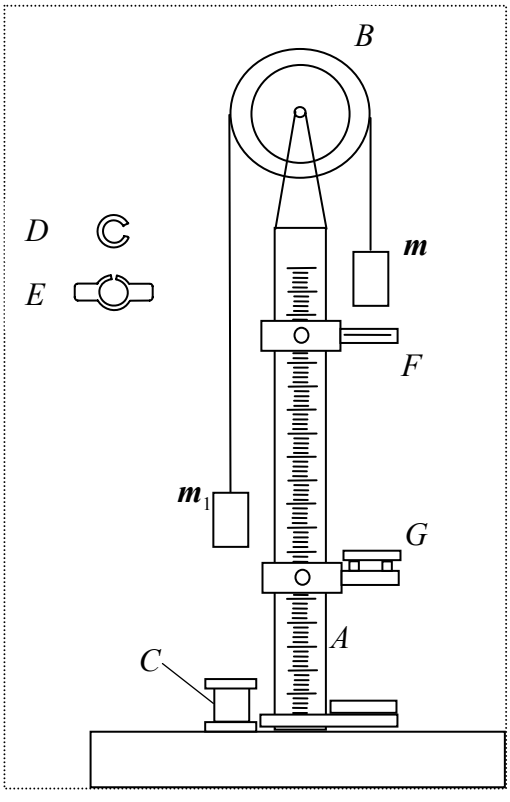
18. **Измерение плотности жидкости из разницы давлений.** Density of liquids by measurements in pressure differences. Ibanez-Mengual J. A., Valerdi-Perez R. P., Garcia-Gamuz J. A. Eur. J. Phys. **2008**. 29. № 1. 53-57. [РЖ 09.01.-18А. 106].

19. **Определение плотности жидкости с помощью метровой линейки.** Finding the density of a liqued using a metre rule. Chattopadhyay K.N. Phys. Educ. 2008. 43. № 2. 203-205. [РЖ 09.09.-18А. 102].

3.2. Движение тел в машине Атвуда

1. **Изучение законов падения тел на приборе Атвуда.** А.П. Соколов. Физический практикум. ОНТИ. **1937.** Лабораторная работа 3. С. 91.

Прибор Атвуда предназначен для проверки законов равноускоренного движения тел. Металлический стержень *A* со шкалой установлен вертикально. На его верхнем конце имеется легкий алюминиевый блок *B*, вращающийся с малым трением. Через блок перекинута тонкая нить с грузами *m* и m_1 одинаковой массы. Груз m_1 внутри имеет железную пластинку и потому может удерживаться электромагнитом *C*.

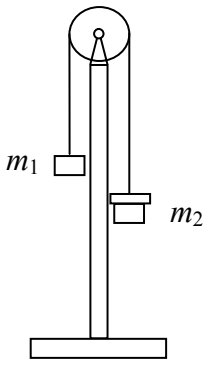


Масса грузов *m* и m_1 может быть увеличена добавочными грузами *D* и *E*. Если на груз *m* положить добавочный груз массы m_2, то, как известно, система придет в равномерно ускоренное движение. Если же груз m_2 во время ускоренного движения будет снят, то система начнет перемещаться равномерно.

На стержне *A* имеются две платформы: *F* – кольцевая и *G* – сплошная. Обе платформы могут быть укреплены при помощи зажимных винтов в любом месте стержня *A*. Измерение времени производится при помощи метронома. В лабора-

торной работе проверяется «закон пути»: $S=\left(at^2\right)/2$, «закон скоростей»: $v=at$, и второй закон динамики: $a=F/m$.

2. **Проверка второго закона Ньютона на приборе Атвуда.** Работа 2с. К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** С.81-85.



Прибор Атвуда состоит из длинной вертикальной стойки, на верхнем конце которой расположен легкий блок, который может вращаться относительно горизонтальной оси с очень небольшим трением. Через блок перекинута нить с двумя одинаковыми грузами на концах, так что вся система находится в равновесии. Если же на правый груз положить дополнительный груз (перегрузок), то система приходит в движение. Конструкция прибора позволяет снимать перегрузки в любом месте в процессе движения. После снятия перегрузка система движется равномерно.

Элементарная теория прибора Атвуда строится в предположении, что силами трения и инерцией блока можно пренебречь. Обозначая массу левого груза через m_1, а массу правого груза вместе с перегрузком – через m_2, легко получить:

$$a=\frac{m_2-m_1}{m_2+m_1}g\,.$$

На приборе Атвуда можно проверить основные законы равномерно-ускоренного движения и второй закон Ньютона.

1) Как было отмечено, при снятии перегрузка в процессе движения системы скорость системы тел на машине Атвуда пропорциональна времени их движения:

$$v=at\,.$$

Справедливость этого соотношения (закона скоростей) проверяется путем измерения времени движения системы и соответствующей этому времени скорости системы тел. 2) Измерение пройденного телами пути s позволяет проверить соотношение (закон пути):

$$s=\frac{at^2}{2}\,.$$

3) Изменяя соотношение масс тел по разные стороны блока при неизменной их общей массы, измеряют время движения системы t и путь s, проходимый при этом телами системы, что позволяет проверить пропорциональность ускорения системы тел разности масс тел по разные стороны блока, т.е. второй закон Ньютона:

$$f=ma\,.$$

Выведена формула для ускорения a системы тел с массами m_1 и m_2 с учетом силы трения η:

$$a=\frac{\left(m_2-m_1\right)g-\eta}{m_1+m_2+\alpha\dfrac{J}{r^2}},$$

где r – радиус блока, J – момент инерции блока, α – некоторый коэффициент, меньший единицы, величина которого зависит от формы блока.

Натяжения нитей с учетом массы и радиуса блока, а также трения в системе:

$$T_1 = \frac{m_1\left(2m_2 g - \eta + \alpha\frac{J}{r^2}g\right)}{m_1 + m_2 + \alpha\frac{J}{r^2}},$$

$$T_2 = \frac{m_2\left(2m_1 g - \eta + \alpha\frac{J}{r^2}g\right)}{m_1 + m_2 + \alpha\frac{J}{r^2}}.$$

Если в этих формулах, а также в формуле для ускорения положить $\eta = 0$ и $J = 0$, т. е. пренебречь силой трения и инерцией блока, то для ускорения a вместо формулы, приведенной выше, получается элементарная формула, приведенная выше, а натяжения нитей оказываются одинаковыми:

$$T_1 = T_2 = \frac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2}g.$$

При измерении интервалов времени используется метроном.

В ходе выполнения работы определяется сила трения, которая равна весу такого перегрузка μ, при котором система, получившая предварительно небольшой импульс, движется далее по закону равномерного движения.

3. **Изучение законов падения на машине Атвуда.** Физический практикум. Под ред. В.И. Ивероновой. М. **1953, 1955, 1962.** Лабораторная работа 3. С. 46-49.

1967. Лабораторная работа 3. С. 51-54.

4. **Реабилитация машины Атвуда.** Решар (Rehabilitation de la machine d'Atwood. Reichart Charles), Inform. Scient., **1954**, **8**, № 3, 83-92 (франц.). [РЖ 1956-9-24655].

Указывая на неправильные представления, возникающие у учащихся при обычном применении машины Атвуда для проверки законов падения, автор рекомендует измерять не пройденные пути, а промежутки времени, необходимые для прохождения падающим телом определенных заданных заранее расстояний, кратных некоторому начальному расстоянию.

5. **Измерение времени, законы динамики и падения тел. Сулес.** (Mesure du temps. Lois de la dynamique et chute des cjrps. Soules), Bull. Union physicians, **1957**, 51**,** № 434, 433-437 (франц.). [РЖ 1958-2-2572].

Для измерения времени падения груза на машине Атвуда использован хронограф с точностью до 0,01 сек., состоящий из синхронного мотора, приводящего в движение бумажную ленту, на которой зубчатое колесо со 100 зубцами записывает одинаковые промежутки времени. Параллельно с ним перо, связанное с пусковым механизмом и остановкой груза, чертит на ленте в состоянии покоя прямую линию. В момент пуска перо изменяет свое положение, а в момент оста-

новки возвращается в начальное. Таким образом записывается время падения. Автор приводит результаты опытов по наблюдению первого и второго закона динамики и описывает использование хронографа для наблюдения свободного падения тел. Технические данные об устройстве хронографа автор не приводит.

6. **Установка для определения величины *g* и проверки закона *f* = *ma*, сделанная по образцу машины Атвуда.** Kapa. (Bericht uber eine nach dem Vorbild von Atwood herstellte Apparatur zur Aufnahme der Messreihen fur die Konstante *g* und das Gesetz $k = m \cdot b$. Kahra Johannes), Praxis Phys., Chem., Photogr., **1957**, 6, ¹ 4, 105 – 112 (нем.). [РЖ 1958-1-82].

Описывается установка, основным элементом которой является электрический секундомер, позволяющий измерять время с точностью до 0,01 сек., а также методика эксперимента. Приведены эскизы и фотографии, результаты измерений даны в виде таблиц.

7. **Простой способ измерения мгновенной скорости.** Nimmerrichner Udo. Messung der Momentangeschwindigkeit mit einfachen Mitteln. “Prax. Naturwiss.”, **1964**, F13, № 10, Physik, 264-266. [РЖ 1965-4A58].

Описывается способ измерения мгновенной скорости при помощи машины Атвуда, в которой вместо мгновенной скорости опускающегося груза определяют мгновенную угловую скорость вращающегося блока. Угловую скорость блока определяют стробоскопическим методом, при этом линейная скорость груза равна $V = 2\pi rf/n$, где r – радиус блока, f – частота прерывания светового луча, n – число штрихов на стробоскопическом диске, наклеенном на блок. Мгновенная скорость достигает заданной величины через некоторое время после начала движения. Время измеряют секундомером. Так как стробоскопический диск кажется неподвижным также при удвоенной, утроенной и т. д. угловой скорости, легко показать, что при равноускоренном движении $V \sim t$. Стробоскопический способ может быть также использован при изучении законов свободного падения. Приведены методические указания.

8. **Исследование прямолинейного движения тел в поле тяжести на машине Атвуда.** Руководство к лабораторным занятиям по физике. Под ред. Л.Л. Гольдина. Изд. «Наука». М. **1964.** Работа 12. С. 91.

1973. Работа 10. С. 94-99.

9. **Новое устройство типа машины Атвуда.** Chen Henry S. C. New Atwood′s machine attachment. ″Amer. J. Phys.″, **1966**, 34, № 10, 955-957. [РЖ 1967-2A51].

Устройство состоит из массивного барабана с кольцевой фаской, по которой на барабан наматывается нить. Нить перекидывается через блок и к ней подвешивается груз произвольной массы. В свободном состоянии барабан, вращаясь, вместе с грузом падает вниз. Для фиксации времени движения барабана и груза служат два искровых таймера. Устройство позволяет проверять законы движения центра масс и движения относительно центра масс.

10. **Простая машина Атвуда со свободным вращением и малым трением.** EatonB. G. A frictionless, rotation-free simple Atwood′s machine. “Amer. J. Phys.”, **1969**, 37, № 4, 425-452. [РЖ 1970 3A63].

Описана простая конструкция машины Атвуда, предназначенной для изучения прямой пропорциональной зависимости между силой и ускорением в течение двухчасового лабораторного занятия. Предлагаемая конструкция удовлетворяет трем основным критериям, предъявляемым к приборам подобного рода: имеет очень малое трение; в ней используется хронирующее устройство (отметчик времени), обладающее высокой точностью; прибор свободен от усложнений, связанных с учетом моментов инерции. Прибор представляет собой горизонтально закрепленный полый цилиндр, внутрь которого подается сжатый воздух. Воздух, выходящий через многочисленные отверстия в поверхности цилиндра, давит снизу на перекинутую через цилиндр бумажную ленту и тем самым значительно уменьшает трение между бумажной лентой и поверхностью цилиндра. Ускоряющая сила создается за счет небольшой разности грузов, подвешиваемых на разных концах бумажной ленты, при этом полная масса всей движущейся системы при изменении ускоряющей силы сохраняется постоянной. Метки времени на пропарафиненную бумажную ленту при ее движении по поверхности цилиндра наносятся с помощью искрового разрядника, расположенного над верхней точкой перегиба ленты. Разрядник может располагаться в четырех положениях по ширине ленты. Частота следования разрядов может принимать значения 10, 30. и 60 Гц. Метки времени, нанесенные на бумажную ленту, и известное значение ускоряющей силы позволяют студентам оформить результаты измерений в виде графика зависимости ускоряющей силы от ускорения, который представляет собой прямую линию.

11. **Использование автоматических весов для опыта Поггендорфа при изучении второго закона динамики.** Cintra do Prado L. Utilizing automatic balances for Poggendorff's experiment on the second law of motion. “Amer. J. Phys.”, **1970**, 38, № 4, 541-542. [РЖ 1970-9А77].

Описана конструкция и даны практические рекомендации по изготовлению простого приспособления для изучения изменения веса тела при движении в режиме свободного падения. Два тела разной массы подвешены к концам эластичного шнура, перекинутого через блок с малым моментом инерции. Ось блока закреплена в рамке, подвешенной к подвижной чашке весов. Нагрузка на весы изменяется в зависимости от состояния покоя или движения подвешенных к блоку грузов. Изменяя вес, соотношение весов грузов и время движения, можно определить реакцию отдачи, вызванную движением грузов в каждый отдельный момент времени и сравнить полученные данные с вычисленными из II закона Ньютона.

12. **Законы статики и равновесие предплечья.** Hellemans J., Van Broeckhoven R. Statics and the equilibrium of the lower arm. “Phys. Educ.”, **1978**, 13, № 7, 430-431. [РЖ 1979-6А104].

Предложен наглядный учебный эксперимент по курсу механики для студентов медико-биологических специальностей, который также может служить хорошей демонстрацией условия равновесия твердого тела и концепции внешних и внутренних сил. Два бруска, скрепленные шарнирно, с системой динамометров, моделируют предплечье и плечо руки человека; они нагружаются грузами известного веса. В опыте измеряется сила, действующая со стороны «плеча» на «предплечье» в нагруженной системе, находящейся в равновесии. При экспери-

ментальной проверке условия равновесия всей системы учитывается также вес собственно «предплечья». Приведена схема сил, действующих на «предплечье», и типичные экспериментальные результаты.

13. **Изучение статики в лаборатории экспериментальной физики.** Etude de la statique au L. E. P. Description de material utilize. Collaboration: Equipe des P. E. G. maths-sciences, L. E. P. La Roche-sur-Yon. “Bull. Union phys.”, **1983**, 77, № 656, 1285-1290. [РЖ 1984-2А76].

Описаны эксперименты с телами очень малого веса на горизонтальном динамометре, с помощью которых изучаются такие темы, как равновесие тела под действием двух или трех сил, центр тяжести тела, градуировка пружинных весов, моменты сил, пара сил, общие условия равновесия тел. В экспериментах используются закрепленные на лабораторном столе пружинные динамометры или блоки с перекинутыми через них гирьками, а также подвешенная на двух или трех растяжках платформа размером 30×50 см. Даны поясняющие рисунки.

14. **200 лет машины Атвуда.** 200 Jahre Atwoodsche Fallmaschine. Jupe Klaus. “Phys. Sch.”, **1985**, 23, ¹ 9, 350-353. [РЖ 1986-3А87-88].

15. **Машина Атвуда.** Atwood′s machine. Greenslade Thomas B. “Phys. Teach.”, **1985**, 23, 1, 24-28. [РЖ 1985-9А118].

Машина Атвуда, широко описываемая в курсах общей физики как система, состоящая из блока и двух масс, связанных невесомой нитью, перекинутой через блок, является на самом деле упрощенной моделью настоящей машины, впервые описанной Атвудом в 1784 г. в работе «трактовка прямолинейного движения и вращения тел с описанием оригинальных экспериментов по существу предмета», в которой описаны 13 экспериментов на равномерное и равноускоренное движение тел. Отличие оригинальной машины Атвуда от ее упрощенной модели заключается в наличии дополнительных четырех колес, связанных с осью основного блока, действие которых способствует уменьшению трения в системе. Приводится рисунок оригинальной машины Атвуда и машины, созданной автором для проверки результатов оригинальных экспериментов.

16. **Усовершенствование лабораторной работы «Изучение законов кинематики и динамики поступательного движения на приборе Атвуда»**. Стороженко Л.П., Симашко С.Г., Самусь И.Д. Сб. научно-методич. статей по физике. М. В. школа. Вып. 12. **1985** г. С. 83-88.

17. **Прибор для исследования законов прямолинейного движения.** Przyrzad do badania praw ruchu prostoliniowego: Пат. 148224 Польша, МКИ G 09 B 23/10. Grzeszczak Andrzej, Srokowski Waldemar, Tokarska Anna, Krupowies Janusz, Sieczynski Janusz; Zaklady Elektroniczne “Elwro”. № P.254298; Заявл. 2.07.85; Опубл. 28.02.**1990**. [РЖ 1990-11А151П].

Прибор предназначается для исследования равноускоренного движения и представляет собой модификацию машины Атвуда: нить с двумя грузами, перекинутая через блок, укрепленный неподвижно в верхней части штатива со шкалой. Груз большей массы перед началом движения удерживается наверху при помощи электромагнита. Отсчет времени движения осуществляется электрон-

ным секундомером, который запускается при помощи фотоэлектрического датчика, установленного в рамке, через которую проходит падающий груз. Аналогичная рамка внизу содержит фотодатчик, при помощи которого фиксируется окончание движения груза.

18. **Изучение законов равноускоренного движения на машине Атвуда.** Лаб. работа 1. Общий физический практикум. Механика. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Изд-во моск. ун-та. **1991**. С. 87-91.

3.3. Движение тела по наклонной плоскости

1. **Прибор для измерения толщины очень тонких нитей.** Gorcea Haralambie. Aparat pentru masurat grosimea firolor foartye subtiri. “Gaz. Mat. Si fiz”, **1960**, B11, № 3, 150-153 (рум.). [РЖ 1961-1A103].

Нить, диаметр d которой требуется измерить, кладут на полированную плоскость, которую постепенно наклоняют в плоскости, перпендикулярной нити. Нить удерживает шарик диаметром D, который перекатится через нее тогда, когда верхний конец плоскости поднимется на высоту h по вертикальной шкале, расположенной на расстоянии b от нижнего, шарнирно закрепленного конца плоскости. При этом диаметр нити определяется по формуле: $d = D\left(\sqrt{b^2 + h^2} - b\right)/h^2$. Вертикальную шкалу можно градуировать в значениях d. Преимуществом описанного прибора перед микрометром с винтом является меньшее давление на нить во время измерения, а, следовательно, и меньшая деформация нитей из пластичных материалов.

2. **Учебное пособие для изучения момента инерции.** Bihari Sandor. Eszkoz tehetetlensegi nyomatek vizsgalatahoz. “Termeszettud. tanitasa”, **1961**, № 3, 63, 3 (венг.) [РЖ 1962-6A102].

С помощью описанного пособия можно определять момент инерции полых и сплошных цилиндрических тел, исследуя их движение по наклонной плоскости. В комплект пособия входят макет наклонной плоскости и несколько цилиндрических тел, момент инерции которых определяется.

3. **Определение ускорения свободного падения на небольшом участке пути при помощи электронных часов.** Stauch Carlo. Zur Bestimmung der Fallbe schleunigung mit kurzer Fahrbahn und elektronischem Zeitmeβgreat. “Prax. Naturwiss.”, **1961**, A 10, № 9, Physik, 242-243. [РЖ 1962-3A59].

Для проведения опытов используется наклонная плоскость, угол наклона которой к горизонту постепенно увеличивают. Можно показать, что при скатывании шариков с наклонной плоскости ускорение зависит от угла наклона и в каждом отдельном случае является величиной постоянной. Время скатывания измеряют электронными часами. Приведены расчеты и результаты измерений, из которых следует, что отношение $b/\sin\alpha$ = const. Если $\alpha = 90°$, т. е. шарик падает свободно, $b = g$.

4. **Определение моментов инерции.** Ruth Wolfgang. Messung von Tragheitsmomenten. “Prax. Naturwiss.”, **1962**, A11, № 12, Physuk, 312-315. [РЖ 1963-6A73].

Описывается метод определения моментов инерции тел относительно оси, проходящей через центр тяжести. Исследуемое тело скатывается с наклонной плоскости с некоторой высоты h и катится по горизонтальной поверхности со скоростью v. Согласно закону сохранения энергии $mgh = mv^2/2 + I\omega^2/2$. Из этого уравнения можно рассчитать момент инерции, если знать v. Для того чтобы с достаточной степенью точности измерить v на небольшом горизонтальном участке, автор рекомендует использовать контактные электрические часы.

5. **Простой опыт по определению ускорения свободного падения при помощи наклонной плоскости.** Kruse K. Ein einfacher Versuch auf der schiefen Ebene zur Bestimmung der Fallbeschleunigung. “Math. Und naturwiss. Unterr.”, **1962**, 14, № 8, 369-370. [РЖ 1962-6А99].

Для определения ускорения свободного падения рассчитывают ускорение, которое приобретают тела различной формы (сплошной шар, сплошной цилиндр, полый шар, полый цилиндр) при скатывании с наклонной плоскости. Затем согласно закону сохранения энергии рассчитывают величину g. Приведены таблицы измерений и расчетов. Ошибка в определении g составляет величину ~5–6%.

6. **Замечание к статье «Простой опыт по определению ускорения свободного падения при помощи наклонной плоскости».** Schock W. Eine Bemerkung zu “ein einfacher Versuch auf der schiefen Ebene zur Bestimmung der Fallbeschleunigung” “Math. Und naturwiss. Unterr.”, **1962**, 15, № 5, 223 (нем.). [РЖ 1963-3А60].

В дополнение к статье Крюзе (РЖФиз, 1962, 6А99) приводятся расчеты поправок на значение трения качения и скольжения при определении ускорения свободного падения при помощи тел, скатывающихся с наклонной плоскости.

7. **О скатывающихся шарах.** Brockmeyer Heinrich. Uber die rollende Kugel. “Prax. Natuewiss”, **1964**, A13, № 12, Physik, 319-320. [РЖ 1965-5А62].

По наклонному деревянному желобу скатывается стальной шарик. Если сфотографировать его в свете стробоскопической лампы, можно определить скорость в любой точке траектории, а затем, используя закон сохранения энергии, рассчитать момент инерции шарика относительно его центра тяжести. Можно также показать, что соответственно выведенным уравнениям разные шарики скатываются с одинаковой скоростью. Таким образом при помощи наклонной плоскости можно показать ряд интересных опытов, например, упругое соударение скатывающегося шарика с неподвижным и др.

8. **Опыты по скатыванию.** Hubschmann Werner. Untersuchungen an der Fallrinne. “Prax. Naturwiss.”, **1964**, F13, № 12, Physik, 329-330. [РЖ 1965-5А63].

Описывается способ определения моментов инерции различных тел (шаров, сплошных и полых цилиндров и т. п.) при помощи наклонной плоскости. Если тело скатывается с наклонной плоскости, его скорость и ускорение оказываются меньше, чем соответствующие величины, полученные расчетным путем. В связи с этим из закона сохранения энергии выведены формулы для расчета моментов инерции скатывающихся тел.

9. **Наклонная плоскость.** Fouille A. Plan incline. A. F. “Bull. Union physicians”, **1964**, 58, № 476, 673-682 (франц.). [РЖ 1964-11А98].

Описан разработанный автором прибор, представляющий собой наклонную плоскость с регулируемым углом наклона, особенность которой состоит в том, что она снабжена отметчиком времени, использующим городской переменный ток и регистрирующим полуволны выпрямленного тока шириной 3 мс. Подвижная тележка, скатывающаяся по направляющим с наклонной плоскости, снабжена пишущим штифтом, оставляющим след с каждым периодом переменного тока. Такое устройство позволяет использовать наклонную плоскость для различных количественных школьных экспериментов: проверки законов падения тел, формул равномерно-ускоренного движения, пропорциональности сил и ускорений, принципа инерции и закона сохранения энергии, для изучения движения тела при сухом и жидком трении, и движения под действием силы, пропорциональной расстоянию. Рассмотрены примеры таких экспериментов и дано схематическое описание прибора.

10. **Применение регистрирующей наклонной плоскости** A. F. В учебных заведениях третьей степени и в технических школах. Fouille A. Applications du plan incline enregistreur A. F. dans le 3^{e}. degree et les ecoles d′ingenieurs. “Bull. Union physiciencs”, **1965**, 60, № 486, 32-44. [РЖ 1966-6А79].

В предыдущей статье (РЖФиз, 1964, 11А98) было описано применение в школах второй степени наклонной плоскости. В настоящей статье указано, как с помощью некоторых добавлений можно применить этот прибор к более сложным задачам, предлагаемым в программах учебных заведений третьей степени и в технических школах. Описаны следующие эксперименты: измерение момента инерции круглого диска, изучение трения твердых тел, изучение жидкого трения, изучение удара, проверка теоремы сохранения количества движения, проверка правила сложения скоростей. Приведены численные результаты экспериментов.

11. **Наклонная плоскость на весах.** Moller Herbert. Die schiefe Ebene auf der Waage. “Prax. Naturwiss.”, **1965**, A 14, № 8б 209-210. [РЖ 1966-3А70].

Описывается опыт, при помощи которого можно показать силу реакции, действующую на тело, движущееся вертикально вниз в поле земного тяготения с ускорением $b < g$. При проведении опыта тележка массой m скатывается с наклонной плоскости, установленной на чашке весов, при этом показания весов уменьшаются на величину $mg\sin^2\alpha$ (ускорение вдоль наклонной плоскости равно $g\sin\alpha$), проекция ускорения на вертикальную плоскость составит $g\sin^2\alpha$. Реакция наклонной плоскости, направленная вертикально вверх, дает величину $mg\cos^2\alpha = mg - mg\sin^2\alpha = mg(g - b)$. Приведены указания к изготовлению установки и описано несколько модификаций опыта.

12. **Метод определения мгновенной скорости.** Mogill A. T. An approach to the determination of instantaneous velocity. “Phys. Teacher”, **1973.** 11. № 6, 358. [РЖ 1974-1А63].

Предлагается метод определения мгновенной скорости в эксперименте по изучению законов движения тележки, скатывающейся по наклонной плоскости. Результаты наблюдения за движением тележки наносятся на график. Положение

тележки (S) является функцией времени (t). Мгновенная скорость определяется из графика $S=f(t)$ как крутизна наклона кривой. Определив мгновенную скорость в нескольких точках, можно построить график зависимости скорости тележки от времени.

13. **Об определении ускорения силы земного тяготения в учебном физическом эксперименте.** Попов Б. Относно определяне на земното ускорение в учебния експеримент по физика. “Мат. и физика” (НРБ), **1973**, 16, № 5, 23-27.

Рассматриваются различные методы определения ускорения свободного падения в школьном физическом эксперименте; с помощью установки, предложенной Гримзелем; установки, предложенной Полем; с помощью изучения движения тела по наклонной плоскости, а также с помощью колебаний маятника.

14. **Сохранение момента количества движения в неконсервативной среде.** Finn Edward J. Linear momentum conservation in a nonconservative environment. “Amer. J. Phys.”, **1974**, 42, № 1, 54-57. [РЖ 1974-6А67].

Подробно описан лабораторный эксперимент, выполненный по программе общего курса физики, в котором проверяется закон сохранения момента количества движения. В первой части эксперимента металлические цилиндры различных размеров соскальзывают по наклонному латунному рельсу под действием собственного веса и продолжают двигаться по горизонтальной плоскости до полного торможения. Это эксперимент позволяет определить коэффициент трения между цилиндрами и поверхностью рельса в предположении, что он имеет постоянное значение, и момент количества движения цилиндров. Во второй части эксперимента на цилиндр с известным коэффициентом трения, установленным в начале горизонтальной части рельса, соскальзывает с наклонного рельса другой цилиндр и ударяет его. В этой части эксперимента определяются кинетическая энергии цилиндров после соударения, их моменты количества движения, изменение кинетической энергии системы для упругих и неупругих соударений и изменение общего момента количества движения. Подробно описаны теория эксперимента и используемое лабораторное оборудование.

15. **Простые опыты для определения ускорения свободного падения.** Oethinger H. Einfache Experimente zur Bestimmung der Fallbeschleunigung (g). “Naturwiss. Unter.”, **1976**, 24, № 1, 7-8. [РЖ 1976-5А108].

Описываются опыты, основанные на следующих положениях: при качении шарика по наклонной плоскости с малым отношением высоты к длине ($\approx 1/10$) отношение ускорения качения к ускорению свободного падения также $\approx 1/10$; аналогичное соотношение верно также (в случае его малости) между ускорениями и массами тележки, движущейся по горизонтальной плоскости, и увлекающего ее (с помощью блока и нити) падающего груза. В обоих случаях измеряется время.

16. **Очередной эксперимент по измерению *g*.** Bernerj Bruce. Another experiment to measure g. “Phys. Teach.”, **1978**, 16, № 8, 558-559. [РЖ 1979-5А67].

Предложен простой лабораторный эксперимент по курсу механики для учащихся средней школы. По наклонному желобу с малым углом уклона, вращаясь, скатывается стальной шарик (диаметром около 20 мм). Время скатывания шари-

ка *t* измеряется секундомером. Ускорение свободного падения g вычисляется по формуле $g= 2{,}8 \cdot d^2/ht^2$, где *d* – диаметр шарика, *h* – высота, с которой он скатывается. Формула выведена из закона сохранения механической энергии, в котором учитывается энергия вращения шарика.

17. **Изучение вращательного движения.** An exercise in rotational motion. Mahoney Brother James. “Phys. Teach.”,**1980**, 18, № 8, 600. [РЖ 1981-4А110].

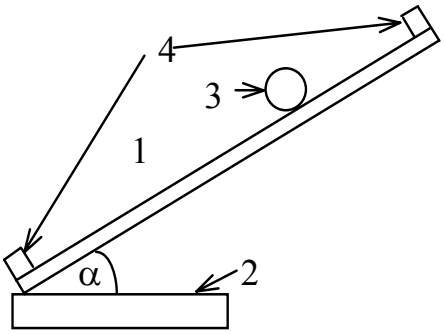
Описан лабораторный эксперимент по курсу механики, способствующий более глубокому пониманию школьниками закономерностей вращательного движения. В эксперименте исследуется вращательное движение цилиндрического тела (жестяной банки), скатывающегося по наклонной плоскости с углом наклона 12°. Измеряются: расстояние s, пройденное телом, соответствующее число оборотов тела, время, за которое пройдено это расстояние, высота наклонной плоскости, определяется масса тела и его радиус *R*. В процессе обработки результатов: 1) сравниваются величины *s* и R_0; 2) вычисляются величины конечной скорости поступательного движения цилиндра v и скорости вращения ω, сравниваются *v* и ω*R*; 3) из закона сохранения энергии в приближении отсутствия сил трения вычисляется величина момента инерции тела *I* и сравнивается с величиной момента инерции идеального тонкостенного цилиндра; 4) вычисляется величина ускорения поступательного движения *a* и *aR*; 5) рассматриваются изменения момента количества движения при скатывании цилиндра; 6) вычисляется средняя величина вращающего момента; 7) вычисляется средняя величина силы трения, действующей на цилиндр; 8) исследуется уравнение $\Gamma = I\alpha$.

18. **Усовершенствованный эксперимент по проверке II закона Ньютона.** An improved Newton′s second law experiment. Domann F. T. “Amer. J. Phys.”, **1982**, 50, № 2, 185-186. [РЖ 1982-7А].

Описан простой и эффективный эксперимент, позволяющий произвести прямую проверку II закона Ньютона. Линейный трек на воздушной подушке устанавливается под небольшим углом к горизонтальной плоскости (3°–4°). Объект, скользящий по треку, оборудован устройством для подвески маленького пластмассового блока и пружинным динамометром, калиброванным в ньютонах. Один из концов длинной нити прикрепляется к динамометру. Другой, с подвешенным грузом, перекидывается через блок. Таким образом, действующая на объект сила может измеряться непосредственно, Сила, действующая вдоль наклонной плоскости вниз, может быть измерена либо подбором величины груза, при которой объект движется равномерно, либо уравновешиванием объекта на треке в неподвижном состоянии. Для измерения величины ускорения $a = 2S/t^2$ объекта измеряется время *t*, за которое объект пройдет по треку известное расстояние *S* (время измеряется секундомером или с помощью таймера). Затем полученный набор данных зависимости силы от ускорения представляется в графическом виде, определяется масса объекта и сравнивается с величиной, полученной взвешиванием объекта. Обсуждается проблема точности измерений, отмечаются дидактические преимущества эксперимента.

19. **Определение момента инерции сплошного стержня.** Bogacz Eugeniusz. Wyznaczanie momentu bezwladnosci bryty sztywnej. “Fiz. szk.”, **1988**, 34,

№ 2, 93-97. [РЖ 1988-11А100].



Подробно рассматривается процесс скатывания без скольжения цилиндра из однородного материала с наклонной плоскости, образующей малый угол с горизонтом. Измеряя непосредственно этот угол, высоту наклонной плоскости, время скатывания, пройденный путь и геометрические размеры цилиндра, можно вычислить момент инерции и другие параметры движения цилиндра. Приводятся типичные результаты измерений, а также рекомендации по проведению опыта. Анализируются основные факторы, влияющие на погрешность измерений характеристик движения. Приводятся формулы для расчета погрешностей.

Подробно описан лабораторный эксперимент, в котором исследуется движение тела по наклонной плоскости и проверяется закон ускоренного движения для свободно падающих тел: расстояния, пройденные телами при равномерно ускоренном движении из состояния покоя, прямо пропорциональны квадратам временных интервалов, требующихся для прохождения данных расстояний. Особенностью данного эксперимента является его максимальная приближенность к методике выполнения эксперимента, описанной Галилеем, и оценке результатов эксперимента с помощью оборудования, которое имелось в распоряжении Галилея. Результаты эксперимента подтверждают выводы, сделанные Галилеем 300 лет назад, и опровергают многочисленные дискуссионные материалы, в которых оспаривается возможность получения Галилеем подобных данных.

20. **Простой и неожиданный эксперимент выполнен студентами, изучающими физику.** Lattery M. Phys. Educ. **2000**. 35. № 2. 130-131. [РЖ 00.08-18А.112].

Простое действие катящегося вниз мяча на наклонной плоскости верхней части стола может быть теоретически проанализировано студентами. Когда они проверяют свои предсказания экспериментально, получается удовлетворительное согласие.

21. **Лабораторная работа по изучению движения тел по наклонной плоскости на базе установки FPM-15.** Кропотов А.А., Ким де Чан, Махро И.Г. СФП-2002, С.-П. Тез. докл. М.-**2002**, с 270.

На кафедре физики Братского государственного технического университета разработана простая лабораторная установка для изучения движения тел по наклонной плоскости. Данная установка создана на базе стандартной установки FPM-15 ”Наклонный маятник” (см. рис.).

С помощью специального устройства можно менять угол наклона α плоскости (желоба) 1 к горизонтальной подставке 2. В исходном состоянии шарик удерживается с помощью электромагнита. При скатывании шарика 3 по желобу автоматически включается миллисекундомер с помощью фотоэлектрических датчиков 4, установленных в начале и в конце наклонной плоскости.

Для изучения движения тел при их скольжении по наклонной плоскости желоб цилиндрической формы может быть заменен на желоб прямоугольной формы.

Для темы ”законы сохранения”: На данной установке можно осуществить проверку закона сохранения механической энергии при скатывании тела правильной геометрической формы с наклонной плоскости.

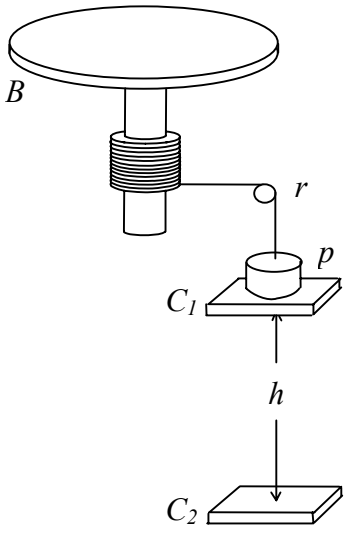
Для динамики (сила трения): Постепенно изменяя угол наклона желоба, можно найти предельный угол, при котором тело начинает соскальзывать с наклонной плоскости.

22. **Реконструкция эксперимента Галилео Галилея: наклонная плоскость.** Reconstruction of Galileo Galilei´s experiment : the inclined plane. Straulino S. Phys. Educ. 2008. 43. № 3. 316-321. [РЖФиз. 09.09-18А. 101].

3.4. Равноускоренное движение тела

1. **Определение момента инерции динамическим методом.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 2с. С.90-91.

Прибор для определения моментов инерции тел произвольной формы состоит из горизонтального диска (платформы) В, который может вращаться вокруг вертикальной оси.



Вращение диска вызывается действием груза *p*, прикрепленного на шнурке, который перекинут через легкий блок *r* и навит вокруг вала *M*, укрепленного на оси прибора. Груз *p* в своем верхнем положении опирается на откидную платформу c_1, имеющую спусковой механизм; при нажатии его кнопки груз *p* освобождается и начинает опускаться, вращая диск *B*, и одновременно приходит в действие электрический секундомер. В момент достижения грузом *p* своего нижнего положения (удар о нижнюю платформу c_2) секундомер останавливается. Диск продолжает некоторое время вращаться по инерции. В предположении, что сила трения постоянна, вращение диска под действием груза р можно считать равномерно ускоренным, а вращение диска по инерции – равномерно замедленным.

2. **Заметка об изучении равноускоренного движения.** Чжень (A note on the study of uniformly accelerated motion. Chen Henry S. C.), Amer. J. Phys., **1954**, 22, № 5, 253-254. [РЖ 1955-4-6141].

При лабораторном изучении равноускоренного движения предлагается измерять пути, проходимые в различные промежутки времени (от одной и той же точки), находить отношение пути ко времени и строить график этого отношения в функции времени. Тогда, продолжая график до пересечения с осью ординат, получают мгновенное значение скорости в данной точке пути, а наклон прямой, получающейся на графике, определяет ускорение. Полезно такие измерения проводить для разных точек пути, сопоставляя между собой результаты. Тогда, построив график зависимости мгновенной скорости (в разные моменты) от времени, также можно определить ускорение.

Преимущества этого метода: он пригоден и для неравноускоренных движений; первый график делает более понятной идею предельного перехода при нахождении мгновенной скорости.

3. **Метод измерения ускорений.** Молк. (Method for obtaining accelerations. Moelk Jacob W.) Amer. J. Phys., **1957**, **25**, № 5, 323-324. [РЖ 1958-2-2570].

Описан новый метод демонстрации 2-го закона Ньютона. Над тележкой, движущейся по рельсам, укреплен соленоид (50 Ом, 110 В). Начиная свой путь под действием груза, тележка размыкает цепь и одновременно включает измеритель времени. В конце пути тележка снова включает ток и одновременно останавливает измеритель времени. Зная вес груза и время движения тележки, легко графически получить линейную зависимость ускорения от силы. [Wright Junior College, Чикаго, Иллинойс, США].

4. **Метод уточненного измерения времени при помощи тележки Лейбольда.** Хом. (Methode zur verfeinerten Zeitmessung an der Leybold-Fahrbahn. Hohm Siegfried), Praxis Phys., Chem., Photogr., **1957**, **6**, 5, 122-123. [РЖ 1958-2-2571].

Тележка снабжается железным якорем, который удерживает ее при помощи электромагнита в начальном положении и служит контактом для питания реле, включающего и выключающего электрические часы в начале и конце измеряемого промежутка времени. Тележка приводится в движение грузиком, переброшенным через блок, или наклонением. Приводится специальная схема установки.

5. **Экспериментальное доказательство второго закона Ньютона. Берц.** (Experimentelle Prüfung des Newtonschen Kraftgesetzes. Berz E.), Math. Und naturwiss. Unterr., **1958**, 10, № 10, 459. [РЖ 1958-11-24346].

Описывается прибор, с помощью которого можно экспериментально вывести второй закон Ньютона. Прибор состоит из горизонтально расположенных рельсов, по которым катится тележка, приводимая в движение грузиком, прикрепленным к проволочке, которая с одной стороны привязана к тележке, с другой – присоединена к лампочке и источнику напряжения. На расстояниях, относящихся как 1:3:5 …, на рельсы наклеиваются изолирующие бумажки. При падении грузика и движении тележки лампочка вспыхивает через равные промежутки времени, что устанавливается с помощью метронома. Отсюда получается, что $S \sim t^2$. Измерив время, в течение которого тележка проходит весь путь, находят ускорение и его зависимость от силы и массы.

6. **Прибор для доказательства теоремы о центре тяжести.** Piel Martin. Ein Great zur Bestatigung desnSchwerpunktsatzes. Prax. Naturwiss., **1959**, A8,

№ 9, Physik, 244-246. [РЖ 1960-6-12932].

По двум параллельным стержням, расположенным горизонтально, может перемещаться на роликах специальная тележка. В основании тележки находится прямоугольная рама, состоящая из двух параллельных стержней и двух поперечных планок. По стержням может перемещаться электромагнит. На одной из поперечных планок имеется железный выступ, к другой прикреплена пружина, связанная с электромагнитом веревкой. При включении тока под действием горизонтальной внешней силы магнит смещается вдоль стержней к железному вы-

ступу, растягивая пружину, при этом тележка движется в противоположную сторону. По отношению масс и соответствующему отношению смещений движущихся тел может быть доказана теорема.

7. **К изучению законов равноускоренного движения.** Bader Franz. Versuche zu den Bewegungsgesetzen. “Prax. Naturwiss.”, **1962**, A11, № 11, Physik, 281-282. [РЖ 1963-4A67].

Описывается метод маркировки времени при проведении опытов по изучению законов равноускоренного движения в тех случаях, когда тележка, движущаяся с ускорением и связанная с электрической схемой, имеет приспособление, которое делает соответствующие отметки (см., например, РЖФиз, 1960, № 8, 18878). Подчеркивается, что при маркировке времени методом пылевых фигур при частоте 50 Гц метки лежат настолько близко одна от другой, что их трудно сосчитать. В связи с этим автор рекомендует применение схемы, обеспечивающей возникновение коротких импульсов напряжения каждые 0,2 с. Схема состоит из источника напряжения, двух катушек индуктивности (первичная 300 витков, вторичная 1200 витков) и плоской пружины с грузиком на конце. Колеблющаяся пружинка поочередно замыкает цепи первичной и вторичной катушки, связанной с движущейся тележкой, возникают короткие, но сильные импульсы напряжения. Описывается методика проведения опытов, приведены результаты измерений и расчеты.

8. **Об измерении скорости при ускоренном движении**. Bader Franz. Zur Geschwindigkeitsmessung bei beschleunigten Bewegungen. “Prax. Naturwiss.”, **1962**, A11, № 12, Physik, 309-310. [РЖ 1963-6A71].

При ускоренном движении по закону $s = at^2$ среднеарифметическая скорость равна мгновенной скорости в средний момент временного интервала, но не в средней точке пути. Это легко проверить экспериментально в случае, когда при проведении опыта маркируются равные интервалы времени. В других случаях средний момент времени неизвестен, и тогда, обычно, приближенно приписывают измеренную среднюю скорость в средней точке пути, которую легко определить. Приведен расчет получающейся при этом ошибки. Эта ошибка даже в самом неблагоприятном случае не достигает 3% (вообще она <1%), что в условиях школьного опыта вполне допустимо.

9. **Путь – время – законы движения.** Groeneveld Jan. Weg – Zeit – Gesetze. “Prax. Naturwiss.” **1963**, A12, ¹ 1, Physik, 12-14. [РЖ 1963-9A45].

Описывается способ проверки соотношения $s = bt^2/2$, в котором, если на тело действует постоянная сила, все три величины могут быть определены в любой момент времени и сколь угодно часто, так что можно составить таблицу и показать, что отношение s/t^2 остается величиной постоянной и равной $b/2$. Проверка проводится методом пылевых фигур при помощи специальной тележки (РЖФиз, 1963, 4A67, 7A49) и телеграфного ключа. Приведена электрическая схема присоединения тележки, ключа и электродов к сети переменного тока. Описывается также методика проверки общей формулы равноускоренного движения $s = s_0 + v_0t + bt^2/2$ и формулы гармонического колебательного движения $v_{макс} = a_0\omega$ и $b_{макс} = a_0\omega^2$. Приведены результаты измерений скорости и ускорения гармонического колебательного движения в сравнении со скоростью и ускорением равно-

ускоренного движения, из которых следует, что расчеты по формулам соответствуют экспериментальным данным.

Преимущества этого метода: он пригоден и для неравноускоренных движений; первый график делает более понятной идею предельного перехода при нахождении мгновенной скорости.

10. **Подтверждение второго закона Ньютона при помощи тележки Лейбольда и электрического секундомера.** Gunge Aage. Bekraeftelse af Newtons 2. lov ved hjaelp af Leybolds Fahrbahn og elektrisk stopur. “Fys. Tidsskr.”, **1965**, 63, № 2-3, 77-93 (датск.). [РЖ 1967-1А40].

Подробно описана установка и расчет эксперимента, в котором для проверки второго закона движения Ньютона применяется тележка Лейбольда и электрический секундомер. Приведены численные результаты и графики.

11. **Эксперимент по изучению импульса силы с помощью линейного воздушного трека.** Fox J. N., Broker S. H., Fischer W. K. Impulse experiment for a linear air track. “Amer. J. Phys.”, **1968**, 36, № 7, 637-638. [РЖ 1969-1А63].

Описана постановка двухчасовой лабораторной студенческой работы, целью которой является изучение связи между импульсом силы и изменением количества движения. Работа выполняется на воздушном треке длиной 2,5 м. Скольжение по треку бруска с массой M_1 происходит под действием груза, висящего на перекинутой через блок легкой нити. Построение графика зависимости силы F от времени t производится на основании определения времени ускоренного движения при изменении массы груза. Регистрация положения бруска на светочувствительной бумаге осуществляется с помощью импульсного искрового источника света, работающего с частотой 30 Гц. Изменение количества движения бруска вычисляется по формуле

$$\int_0^{\Delta t} F(t)dt = m\mathrm{v}\,,$$

причем интеграл оценивается по площади под кривой $F(t)$. Для измерения изменения количества движения под действием средней во времени силы

$$\overline{F} = \left(\Delta t\right)^{-1} \int_0^{\Delta t} F\left(t\right) dt$$

к нити подвешивается груз M_2 такой, что $\overline{F} = M_1 M_2 g/\left(M_1 + M_2\right)$. Груз M_2 прикрепляется на такой высоте, чтобы время его падения составляло Δt. Измеряя скорость бруска в конце нити, можно найти изменение количества движения и проверить справедливость формулы, связывающей импульс силы с изменением mv.

12. **Измерение мгновенной скорости и ускорения в опытах по механике.** Ворочаев В. М. В сб. «Вопр. методики преподав. Мат. и физ.» Вып. 3. Минск, «Нар. Асвета», **1973**, 97-101. [РЖ 1974-2А73].

Описана установка, которая может быть использована для определения значения средней скорости, выяснения зависимости между пройденным путем и

скоростью при равноускоренном движении, измерения ускорения по углу отклонения маятника, установленного на движущейся тележке. Главной частью установки является демонстрационный прибор по кинематике и динамике; для измерения времени используется электронный счетчик-секундомер с двумя контактными датчиками.

13. **Експериментална установка за проверки зависимости ускорения от массы тела и действующей на него силы.** Мисов П. Опитна постановка за проверка на зависимостта на ускорението от маса на тялото и от силата, която му действува. «Мат. и физика» (НРБ), **1975**, 18, № 5, 49-50.

В существующих установках по изучению зависимости ускорения от массы тела и действующей на него силы для измерения времени движения тела используются механические, электрические и электронные часы с системами автоматического пуска и остановки тела, что усложняет конструкцию установок и приводит к тому, что внимание учащихся сосредоточивается не столько на изучении движения, сколько на системах измерения времени. Предлагается простая установка, позволяющая, по мнению автора, избежать указанных трудностей. Установка представляет собой тележку, движущуюся по горизонтальным рельсам под действием груза, подвешенного к нити, переброшенной через укрепленный на краю стола блок. На тележке укрепляется горизонтальная платформа, покрытая белым листом бумаги. Время движения тележки измеряется по времени падения грузика на платформу с известной высоты. Одновременно с началом движения тележки начинает падать грузик и оставляет при падении след на бумаге. По известной высоте падения грузика и измеренному перемещению тележки легко определить ускорение движения тележки. Подвешивая к нити дополнительные грузы и помещая дополнительные грузы на платформу, можно изменять действующую силу и массу движущегося тела и исследовать зависимость ускорения от действующей силы и массы тела.

14. **Опыты с тележкой Ньютона.** Zeuner Hermann. Versuche mit einem “Newton-Wagen”. “Prax. Naturwiss. Phys.”, **1975**, 24, № 9, 238-240. [РЖ 1976-2А97].

Идея опытов, применяемых при изучении второго закона Ньютона, такова: ускорение, приобретаемое тележкой, скатывающейся по наклонной плоскости, определяется по конечной скорости на горизонтальном столе. Скорость определяется по времени пробега определенного расстояния. Для того чтобы это было возможно, нужно, чтобы все колеса тележки переходили на горизонтальный стол одновременно. Предложена конструкция такой трехколесной тележки и системы рельсов. Приводится описание опытов.

15. **О движении тележки по горизонтальной плоскости под действием груза.** Sind gewissenhafte “Fahrbahnbenutzer” trickreiche Falschspieler? Bubeck Heinrich. “Prax. Naturwiss. Phys.”, **1979**, 28, [1] 10, 260-261. [РЖ 1980 3А-76].

Критический разбор статьи Wesely, опубликованной в Praxis 28 (1979), H. 2, s. 34-39, в которой рассматривается движение тележки по горизонтальной плоскости под действием груза, связанного с тележкой нерастяжимой нитью, перекинутой через блок, причем массы тележки и груза изменяются, а их сумма остается постоянной. При этом ускорение системы меняется. Автор критикуемой статьи ошибочно полагает силу натяжения нити равной весу

груза, что приводит к неверному толкованию результатов эксперимента. Указан альтернативный метод изучения законов Ньютона с помощью двух грузиков с различными массами, связанных нитью, перекинутой через блок. Обсуждаются возможные ошибки в случае измерения силы натяжения нити пружинным динамометром.

16. **Эксперимент при обосновании второго закона Ньютона.** Майер В.В., Мамаева Е.С., Агафонов Е.Н. Пробл. учеб. физ. эксперим. **1997**. № 3. 45-46, 101. [РЖ 1997.12А157].

В эксперименте предлагается использовать поплавковый акселерометр, закрепленный на легкой тележке.

17. **Удивительные свойства циклоиды.** Майер В.В., Майер Р.В. Учеб. Физ. **1998.** № 2. 22-26, 78. [Н: 1999.08-18F.92].

В механике есть немало явлений, которые остаются за пределами школьного курса физики. К такому явлению относится скольжение тела в поле силы тяжести по циклоидальной траектории. В статье предлагаются простые приборы для демонстрационных и индивидуальных экспериментов.

18. **Прямая проверка второго закона Ньютона.** Никифоров Г.Г. Учеб. физ. **1999**. № 1. 25-29, 79. [РЖ 1999. 10-18А.124].

Описан разработанный автором, не имеющий аналогов регулируемый источник постоянной силы. Прибор обеспечивает получение постоянной силы натяжения нити, которая не зависит от массы, скорости и ускорения тела, прикрепленного к нити. Величина силы легко регулируется и измеряется во все время движения с помощью указателя, не связанного с движущимся телом. Прибор позволяет провести прямое экспериментальное исследование зависимости ускорения от силы и массы.

3.5. Всплывание пузырьков воздуха внутри наклонной трубки с водой

1. **Опытное исследование выталкивающей силы, действующей в гравитационном поле, видоизмененном полем сил инерции.** Бахчеванциев, Ристов (За силите на потисок во инерциіално променети гравитациони полиња. Бахчеванциев Славчо, Ристов Милчо), Годишен зб. Филос. Фак. Ун-т Скопје. Природно-матем. одд., **1956** (1958), **9**, 39-48 (сербо-хорв. Рез. франц). [РЖ 1959-9-19402].

Описаны опыты по экспериментальному исследованию выталкивающей силы, действующей на свинцовые и пробковые шары, погруженные в жидкость, находящуюся под действием гравитационного поля Земли и центробежных сил.

2. **Скорость равномерного движения.** Фронтальная лабораторная работа исследовательского характера. Грабович В.Б. Учеб. физ. **1998**. № 2. 3-4, 77. [РЖ 1999-08А85].

В школьных программах по физике не случайно не содержится лабораторной работы по измерению скорости равномерного прямолинейного движения. Не так просто подобрать удобный объект для измерений. Автором в качестве равно-

мерно движущегося объекта избраны небольшие пузырьки воздуха, всплывающие внутри длинной и тонкой наклонной трубки с водой. В качестве трубок использованы трубки от ртутных барометров.

3. **Простой метод наблюдения всплывающих в жидкости пузырей.** Кондрашов Б.Н., Воробьева Е.А. Вопр. прикл. физ. **2002**. № 8. 8-9, 91. [РЖФиз. 03.12-18А.161].

Представлены простые опыты по наблюдению за всплывающими пузырьками воздуха, аналогичные опытам с ячейкой Геле–Шоу. Практически все опыты (за исключением опытов с сильно непрозрачными жидкостями), проводимые с ячейкой Геле–Шоу, легко повторимы. Изучение формы пузырьков позволяет осмысленно применять формулу Лапласа для добавочного давления над искривленной поверхностью, и развивает наблюдательность.

3.6. Движение материального тела с переменным ускорением

1. **Скользящая цепь.** Bader Franz. Die abrollende Kette ($K=a+b\cdot s$). “Prax. Naturwiss.”, **1962**, A11, № 10, Physik, 253-254 (нем.). [РЖ 1963-3А61].

Описывается опыт, демонстрирующий зависимость между силой и ускорением в том случае, когда сила не является величиной постоянной и зависит от смещения, т. е. $K=a+b\cdot s$, где a и b – постоянные. Через неподвижный блок перекидывают гибкую цепь, состоящую из звеньев. Левый край цепи удерживается электромагнитом. Правый край, более длинный, чем левый, на величину s_0, висит свободно. Если выключить ток, в первый момент цепь начинает скользить под действием силы $K_0 = \sigma s_0$, где σ – вес единицы длины цепи. В дальнейшем сила возрастает, и, когда левый конец за время t пройдет расстояние s, сила сделается равной $K = \sigma\left(s_0 + 2s\right)$. Приводится решение дифференциального уравнения движения $\left(m + m_r\right)\ddot{s} = \sigma\left(s_0 + 2s\right)$, где m_r – масса, эквивалентная моменту инерции блока, а также график зависимости $s/(s_0/2)$ от времени. Результаты наблюдений хорошо совпадают с теоретической кривой.

2. **Элементарное исследование импульсных сил.** Jeffers Fred, Soules Jack A. Elementary study of impulsive Forces. “Amer. J Phys.”, **1965**, 33, № 12, 1079-1081. [РЖ-66 6А80].

Разработан эксперимент для наглядной демонстрации больших размеров импульсных сил, принимающих участие в торможении движущейся массы. Эксперимент состоял в торможении падающих стальных подшипниковых шариков диаметром 6,25 мм и 12,5 мм в каучуковом блоке размером 25×140×88 мм^3 и плотностью ~1,64 г/см^3. Результаты этого эксперимента свидетельствуют о том, что при торможении возникает значительная сила, зависящая от скорости. Данные экспериментов оказались воспроизводимыми с точностью ~3%. Приведены элементарный анализ эксперимента и указания к его проведению.

3. **Широко распространенная ошибка в стандартной задаче по динамике деформируемого твердого тела.** Sanmartin Juan R., Vallejo Miguel A. Widespread

error in a standard problem in the dynamics of deformable bodies. “Amer. J. Phys.”, **1978**, 46, № 9, 949-950. [РЖ 1979-4А75].

Стандартной задачей по динамике деформируемых тел является задача об однородной цепи (или гибком нерастяжимом шнуре) длины L и массы λL, соскальзывающей с гладкого стола, причем в начальный момент длина отрезка цепи, лежащего на столе, равна αL ($\alpha < 1$). В качестве уравнения движения цепи для всей области $\alpha L \le X_A \le L$ (где X_A – длина участка цепи, свисающего со стола) обычно используется уравнение $X_A = gX_A/L$. Показано, что это уравнение недействительно для той фазы движения цепи, когда ее конец, лежащий на столе, приближается к концу стола: в этом случае цепь отделяется от стола и ее движение принимает сложный характер. Доказательство этого факта для случаев отсутствия трения и наличия трения цепи о стол и об угол стола производится методом от противного. Для случая $X_A = L$ анализируются уравнения движения вертикального и горизонтального отрезков цепи и элемента цепи, движущегося по углу стола (этот элемент аппроксимируется дугой окружности радиуса ρ, где $\rho \approx L$). Для малых $L/2H$, где H – высота стола, и для малых коэффициентов трения выведена формула для горизонтального расстояния, пройденного падающей цепью.

4. **Нетрадиционный подход к задаче о скольжении однородного троса через край гладкого стола. Another look at uniform rope sliding over the edge of a smooth table.** Prato Domingo, Gleiser Reinaldo J. “Amer. J. Phys.”, **1982**, 50, № 6, 536-539. [РЖ 1983-1А76].

Рассмотрена задача о скольжении без трения гибкого нерастяжимого троса с однородно распределенной вдоль его длины массой по плоскому столу, если конец троса свисает с края стола. Сформулирована математическая модель этой системы, описываемая уравнениями движения Ньютона в двухмерной геометрии для системы с постоянной массой. Показано, что в процессе движения такой трос не может сохранять постоянную форму прямого угла, а в месте его перегиба под действием сил инерции форма прямого угла будет искажаться. Этот эффект приведет к изменению закона движения троса по сравнению со случаем, когда его форма в процессе движения не меняется (т. е. силы инерции в горизонтальном направлении не учитываются). Обсуждаются условия, при которых трос в процессе скольжения по столу может сохранять постоянную форму.

5. **Уравнение движения цепочки из шариков. Эксперимент по проверке второго закона Ньютона.** Bewegungsgleichung der Kugelkette. Ein Experiment zum zweiten Newtonschen Axiom. Dirks Heinrich. “Prax. Naturwiss. Phys.”, **1983**, 32, № 5, 147-150. [РЖ 1983-А110].

Классической проблемой механики является задача о соскальзывании тяжелой нити с горизонтального стола под действием силы тяжести свисающего с края стола конца нити. Согласно II закону Ньютона в случае однородной нити, движущейся без трения, сила, действующая на нить в каждый момент времени, пропорциональна пройденному пути. Экспериментальная проверка этого утверждения состоит в проверке пропорциональности ускорения пройденному пути (длине свисающего конца). Предложен несколько видоизмененный вариант экс-

периментальной установки. Цепочка, составленная из шариков, перекинута через блок. Электронная схема вырабатывает напряжение, пропорциональное ускорению, скорости и пройденному пути. Эти напряжения подаются на вход двухкоординатного самописца, в результате регистрируются диаграммы зависимости ускорения от пройденного пути, а также ускорения, скорости и пути от времени.

6. **Лабораторная установка для исследования прямолинейного движения тела с помощью инплантрона.** Подколзин В. Д. “Сб. науч.-метод. ст. по физ.” (Москва), **1984**, № 11, 88-91. [РЖ 1984-12А101].

В физических практикумах многих вузов практически не имеется лабораторных установок с непрерывной электрической записью для исследования таких параметров движения тела, как скорость, ускорение, координата в зависимости от времени [Иверонова, Голдин, Ахматов, Евграфов].

В предлагаемой установке, предназначенной для лабораторной работы по исследованию прямолинейного движения тела с непрерывной электрической записью ускорения, в качестве электроинерционного преобразователя используется инплантрон [Иориш Ю.И. Инерционно-плазменные приборы параметров движения на инплантронах.– Измерительная техника, 1972, № 4, с. 31.]. Отличительной особенностью инплантрона является отсутствие в нем взаимоподвижных и трущихся деталей, устойчивость к перегрузкам, простота изготовления, В основе работы инплантрона лежит инерционно-плазменный эффект, проявляющийся в условиях контракции разряда [Иориш Ю.И., Подколзин В.Д. Низкочастотные колебания диффузно-контрагированного разряда. – Журнал технической физики, 1972, т. 42, 3 3, с. 536.]. При движении трубки с ускорением на контрагированный плазменный шнур, представляющий собой континуум положительно и отрицательно заряженных ионов, электронов и нейтральных частиц, действуют силы инерции. В результате подвижная прианодная область шнура смещается вдоль разрезных анодов, включенных в мостовую схему как единое целое, а разрядный ток перераспределяется между анодами. При этом разность потенциалов между плечами моста прямо пропорциональна ускорению в достаточно широких пределах. Таким образом осуществляется преобразование механического сигнала в электрический. Пороговая чувствительность инплантрона к ускорению может быть доведена до 10^{-4} м/с^2.

Достаточно высокая чувствительность инплантрона позволяет создать компактную лабораторную установку на сравнительно небольшой длине пробега исследуемого тела (≈1 м) в течение 3–4 с. Установка включает (рис. 1.): тележку 1, инплантрон в арматуре 2, направляющий желоб 3 с пружиной 4, груз 5 на нити, переброшенной через шкив, и электронную аппаратуру.

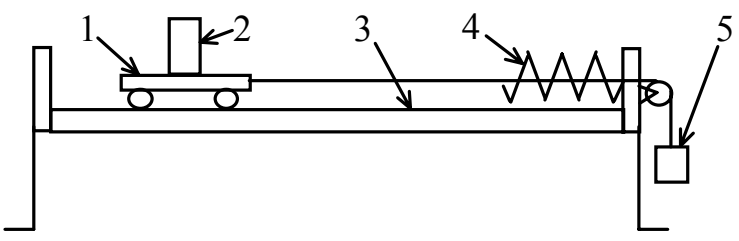


Рис. 1.

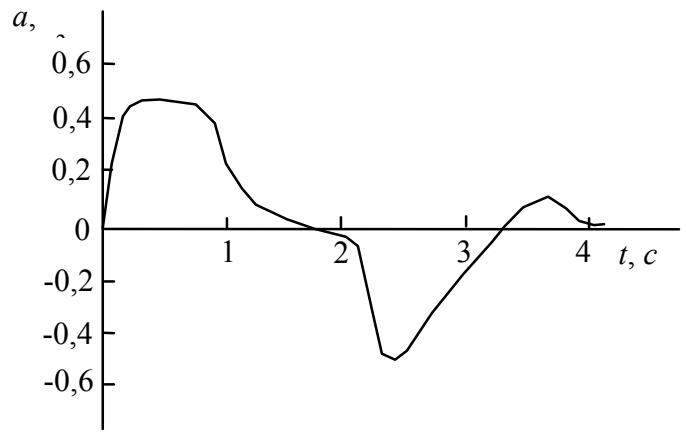


Рис. 2

В установке обеспечивается сложное прямолинейное движение тележки с инплантроном, воспроизводимое от опыта к опыту. Тележка приводится в движение грузом, часть пути движется по инерции, тормозится пружиной, меняет направление перемещения, снова движется по инерции и, наконец, останавливается под действием силы трения. Ускорение тележки, преобразуемое инплантроном в электрический сигнал, фиксируется на экране запоминающего осциллографа в виде некоторой кривой, которая в относительных единицах копируется при наложении кальки на экран (рис. 2). По длительности развертки легко устанавливается масштаб времени. Полученную картину можно использовать для расчета скорости и координаты путем графического интегрирования.

Электрическая схема установки допускает также подключение электронно-вычислительной аппаратуры, например, интеграторов с однократным или двойным интегрированием для одновременного получения и непрерывной записи графика скорости и координаты.

Для получения данных об ускорении в абсолютных единицах используется метод, основанный на принципе эквивалентности сил инерции и гравитации. При наклоне имплантрона плазменный шнур всплывает, и инплантрон регистрирует горизонтальную составляющую ускорения свободного падения.

Инплантрон как электроинерционный преобразователь может быть применен при постановке других лабораторных работ, например, для измерения полного ускорения тела при криволинейном движении в горизонтальной плоскости, при исследовании колебательных процессов, при исследовании действия на частицы силы Кориолиса при вращательном движении инплантрона.

7. **Экспериментальное изучение работы переменной силы.** Experimental analysis of the work done by a variable force. Sherman Joel F. “Amer. J. Phys.”, **1985**, 53, № 5, 442-445. [РЖ 1986-2А106].

Разработана методика лабораторного эксперимента по прямому определению работы переменной силы. Приведен теоретический расчет работы при перемещении тела через последовательные положения равновесия, результаты представлены в виде таблицы. Описана настольная лабораторная установка, состоящая из двух стоек и кронштейнов с блоками, подвесов и двух грузов, с постоянной и регулируемой массой ≈0,2 кг. Последовательно уравновешивая постоянный груз в различных положениях, осуществляют экспериментальное приближенное интегрирование по конечным отрезкам перемещения груза. Для сравнения приведена таблица типичных результатов, которые отличаются от теоретических не более чем на 3%. Установка и методика успешно применяются в тече-

ние 6 лет в преподавании курса общей физики студентам машиностроительных специальностей.

8. **Новая методика проведения лабораторной работы по механике.** Степанов С.В. Научн. тр. Моск. пед. гос. ун-та. : Естеств. науки. Сб. статей. М., **2003**. 180-181. [РЖФиз. 04.09-18А.169].

Предлагается новый вариант проведения лабораторной работы “Движение тела по окружности под действием силы тяжести и упругости”. Отличие старого варианта с использованием “конического маятника” состоит, во-первых, в том, что движение тела (груз, подвешенный нитью к динамометру) происходит в вертикальной плоскости, а, во-вторых, в цели работы. В новом варианте цель работы состоит в экспериментальном доказательстве того, что при движении тела с ускорением, направленным вверх, его вес увеличивается. Дается подробный ход работы и расчетные формулы. В качестве дополнительного задания предлагается рассчитать угол, на который необходимо отклонить груз, чтобы его вес в нижней точке траектории увеличился вдвое.

9. **Изучение движения тела под действием изменяющейся силы.** Майер Р.В., Никулина М.В. Учеб. физ. **2004**. № 1. 22-27. [РЖФиз. 05.07-18А.117].

Разработана методика, позволяющая изучить движение системы с одной степенью свободы при изменении действующих на нее сил с течением времени. Предложен вычислительный эксперимент, моделирующий движение данной системы при различных ее параметрах и начальных условиях. Приведена компьютерная программа, моделирующая движение тела в перечисленных экспериментах, написанная на языке Pascal. Рассмотрена экспериментальная установка, состоящая из двух грузов, соединенных нитью, перекинутой через неподвижный блок, мензурки, наполненной жидкостью, и перегрузка, лежащего на специальном держателе. Держатель установлен так, чтобы при подъеме соответствующего груза на него надевался перегрузок, а при опускании – снимался.

3.7. Движение центра масс

1. **Движение центра масс.** Физический практикум. Под ред. В.И. Ивероновой. М., **1962**. Задача 16. С. 107-113.

Движение центра масс определяется теоремой, утверждающей, что центр масс системы движется так, как если бы в нем была сосредоточена вся масса системы и к нему были бы приложены все внешние силы, действующие на систему. Целью задачи является экспериментальная проверка теоремы о движении центра масс. Для этого используется машина Атвуда, дополненная некоторыми деталями.

2. **Изучение движения центра масс.** Физический практикум. Под ред. В.И. Ивероновой. М., **1967**. Задача 14. С. 107-113.

3. **Изучение движения центра масс.** Задача 4. С. 25-28. Физический практикум для нефизических специальностей. Часть I. Одесса. **1977**. 76 стр.

Установка состоит из двух грузов одинаковой массы, укрепленных на концах нити, перекинутой через два блока.

4. **Эксперимент по курсу динамики твердого тела, выполняемый с помощью пневматического стола.** Hinrichsen P. F. An air-table experiment on rigid body dynamics. “Amer. J. Phys.”, **1978**, 46, № 11, 1133-1138. [РЖ 1979-5А71].

Предложены лабораторные эксперименты по изучению роли центра масс твердого тела, находящегося на воздушной подушке, при его движении под действием импульса силы, приложенной к произвольной точке тела. Описаны методы определения положения центра масс плоского твердого тела неправильной формы. Приведены способы определения “радиуса вращения”, т. е. радиуса обруча, момент инерции которого равен моменту инерции исследуемого тела. Устанавливается связь между линейным импульсом тела и угловым моментом.

3.8. Реактивная сила

1. **Прибор для измерения реактивной силы.** Emeis Wilhelm. Die “Aufprallwaage”. “Prax. Naturwiss.”, **1963**, A 12, Physik, 91-94. [РЖ 1963-11А96].

Описывается установка, при помощи которой может быть определена сила $K=v(dm/dt)$, где v – скорость истечения струи, dm/dt – масса, вытекающая в единицу времени. Резиновый шланг с насадкой на конце укрепляют в горизонтальном положении. Вода, вытекающая из шланга, попадает в трубку, изогнутую под углом 90° и прикрепленную к нижнему концу вертикального стержня. Стержень закреплен посередине и может вращаться вокруг горизонтальной оси. К верхнему концу стержня прикреплен шнур, перекинутый через неподвижный блок. При помощи грузиков, подвешиваемых к шнуру, сила реакции может быть уравновешена. Кроме того, сила реакции может быть рассчитана, если знать v и dm/dt. Для этого измеряют сечение насадки и массу воды, протекшую через изогнутую трубку в стаканчик за время t. Из полученных данных можно также определить ускорение свободного падения g. При помощи описанной установки можно также показать, что при абсолютно упругом соударении сила реакции удваивается. Для этого изогнутую трубку, в которую впрыскивается вода, заменяют U-образной, укрепленной горизонтально на нижнем конце стержня. В качестве примеров упругого соударения приведены расчеты давления газа на стенку сосуда, светового давления на поверхность и давления ветра на парус.

2. **Измерение реактивной силы.** Под ред. В.И. Ивероновой. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. М., **1967**. Задача 23. С. 141-144.

3. **Изучение реактивного вращательного движения.** Панасюк В.С., Сазонова З.С.Сб. научно-методич. статей по физике. М. В. школа. Вып.7. **1979** г. С. 57-62.

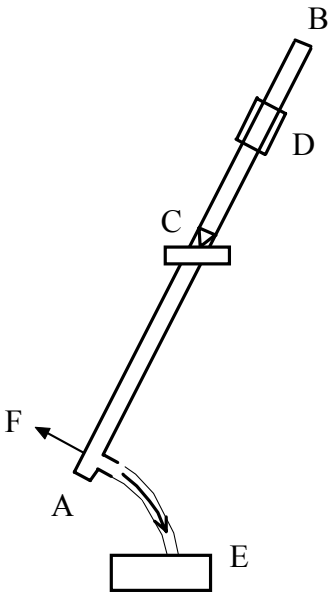
4. **Измерение реактивной силы. Общий физический практикум. Механика.** Л.Г. Деденко, Д.Ф. Киселев, В.К. Петерсон, А.И. Слепков. **1991**. Лаб.работа 12. С.146–149.

Если некоторая система выбрасывает часть своей массы, а выброшенная часть изменяет при этом свой импульс, то на систему действует реактивная сила, равная изменению импульса выброшенной части за единицу времени, т. е.

$$\vec{F} = -\mu\left(\vec{v} - \vec{v}_S\right),$$

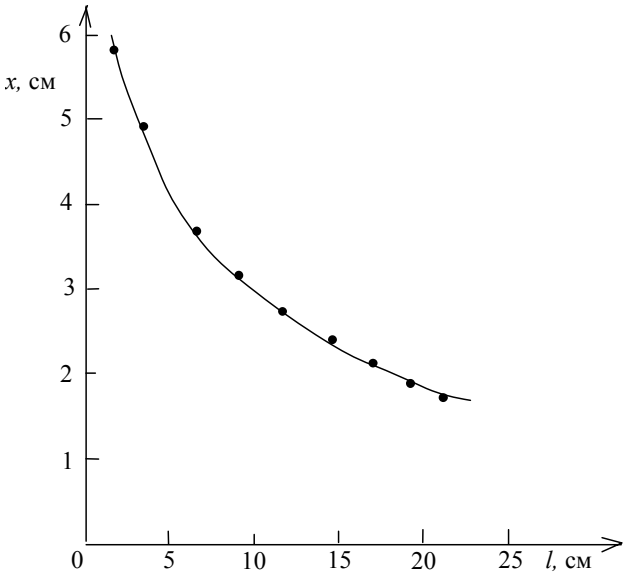
где $\vec{F}$ – реактивная сила, μ – масса, выбрасываемая в единицу времени, $\vec{v}$ – скорость выбрасываемых частиц, $\vec{v}_S$ – скорость системы.

Аналогичная ситуация возникает при захвате системой массы извне. Поэтому масса системы может и не изменяться. Реактивная сила при этом возникает за счет разности скоростей захватываемых и выбрасываемых частиц вещества.



Схематический вид установки для измерения реактивной силы

Именно такой вариант реализован в данной лабораторной работе. Схематический вид установки приведен на рисунке. Основная ее часть – металлический маятник *AB*. Он может колебаться в вертикальной плоскости, опираясь на ребро призмы в точке *C*. Нижняя часть маятника – полая трубка, имеющая на конце *A* патрубок, внутреннее сечение которого *S*. Верхняя часть представляет собой сплошной стержень, по которому может перемещаться и закрепляться на нем цилиндр *D*. Вблизи точки *C* трубка имеет отросток, ось которого параллельна ребру призмы и который соединен с мягким резиновым шлангом. По шлангу подается вода, которая, пройдя через трубку, вытекает из патрубка, образуя струю. Появляющаяся при этом реактивная сила отклоняет маятник от вертикального положения. При постоянном потоке воды угол отклонения стержня неизменен. Постоянство потока обеспечивается тем, что вода в маятник поступает из специального сосуда, уровень воды в котором фиксирован



Зависимость горизонтального отклонения верхнего конца стержня от расстояния от этого конца до грузика

Анализ сил, действующих на маятник, приводит к следующему выражению для реактивной силы:

$$F = \mu \cdot v = \frac{\rho}{v}\left(\frac{Q}{t}\right)^2,$$

где ρ – плотность воды, Q – объем воды, вытекающий из маятника за время t (он измеряется специальным мерным сосудом *E*). Измерение реактивной силы F проводится для нескольких положений цилиндра *D*.

3.9. Движение тела с переменной массой

1. **Падающая цепь. Точный метод.** Берч, Гебалл (The falling chain; an exact method. Burch D. S., Geballe R.), Amer. J. Phys., **1953**, **21**, № 7, 570-572. [РЖ 1954-5-4516].

Описан учебный эксперимент по механике тел переменной массы, заключающийся в сравнении времени прохождения определенного расстояния чашкой, на которой лежит цепь, создающая перегрузку системы машины Атвуда, со временем падения той же чашки, если цепь (в начале опыта подвешенная вертикально) постепенно падает на чашку. Так как подобная задача полностью разрешима, можно сравнить экспериментальные времена с теоретическими. Приводятся цифровые данные, свидетельствующие о хорошем совпадении теории с опытом, если время падения контролируется точным электрическим методом.

2. **Движение тела переменой массы (ракета).** Физический практикум. Под ред. В.И. Ивероновой. М., **1962**. задача 18. С. 115-120.

3. **Изучение движения тела переменной массы (ракета).** Физический практикум. Под ред. В.И. Ивероновой. М., **1967**. Задача 24. С. 145-149.

4. **Эксперимент по ракетному движению для лаборатории расширенного типа.** Shepherd Gilles F. A. A rocket propulsion project for a divergent lab. “Phys. Teacher.”, **1976**, 14, № 9, 570-572. [РЖ 1977-5А86].

Описан эксперимент по исследованию ракетного движения, предназначенный для выполнения в лабораториях, работающих по новой программе физического практикума. В эксперименте используется традиционное лабораторное оборудование, состоящее из двух газовых патронов, один из которых не заряжен, и вращающегося инерционного диска с искровым таймером. Оба патрона закреплены на диске. Когда заряженный патрон прокалывается, выхлоп газа приводит диск в движение, С помощью таймера студенты измеряют угловую скорость вращения диска как функцию времени и из построенного на основе этих данных графика определяют время выхлопа, отрицательное угловое ускорение, вычисляют момент инерции диска и работу, производимую газом при выхлопе.

5. **Динамика движения ленты, разматывающейся на наклонной плоскости.** Dynamics of a tape that unwinds while rolling down an incline. Calvini P. “Amer. J. Phys.”, **1983**, 51, № 3, 226-230. [РЖ 1983-9А83].

Рассмотрена динамика движения плотно упакованной ленты, разматывающейся в процессе перемещения вдоль наклонной плоскости. Предложены геометрическая модель движения и метод ее анализа на основе уравнения движения тела с переменной массой. Показано, что известное ранее приближенное решение дает погрешность ≈15% по сравнению с точным решением. Обсуждаются условия сохранения механической энергии при движении ленты.

6. **Движение железнодорожной цистерны, имеющей течь.** Motion of a leaky tank car. McDonald K. T. “Amer. J. Phys.”, **1991**. 59, № 9. С. 813-816. [РЖ 92-10А86].

Проанализировано удивительно сложное движение железнодорожной цистерны с водой. Кран, через который вода может покидать цистерну, расположен в ее дне и смещен относительно центра масс системы цистерна-вода на некоторое расстояние вдоль ее длины. Перед открытием крана система цистерна-вода покоится. Скорость вытекающей из крана воды в системе отсчета,

связанной с цистерной, вертикальна. На основании закона сохранения импульса составляется интегральное уравнение. При этом удается избежать явного использования неизвестных нестационарных сил, возникающих в момент открытия крана. Дифференцированием интегрального уравнения во времени получено уравнение движения. Интерпретируются все силы, которые входят в это уравнение. Подробно рассмотрены два частных случая: скорость вытекающей воды (в системе отсчета, связанной с цистерной) уменьшается с понижением уровня воды в цистерне и менее реалистичный случай, когда вода вытекает с постоянной скоростью. В заключение приведены численные оценки и предложен план соответствующего эксперимента в учебной лаборатории (модель цистерны на воздушной подушке).

7. **Струя песка и машина Атвуда с изменяющейся массой.** Flow of sand and a variable mass Atwood machine. Flores J., Solovey G., Gil S. *Amer. J. Phys.* 2003. 71, № 7. 715-720. [РЖФиз. 04.03-18А.143]. [РЖФиз. 04.09-18А.171].

8. **Падающая цепочка Хопкинса Тейта, Стила и Кэйли.** The falling chain of Hopkins, Tait, Steele and Cayley. Wong Chun Wa, Youn Seo Ho, Yasui Kosuke. Eur. J. Phys. **2007**. 28. № 3. 385-400. [РЖФиз. 09.08-18А.114].

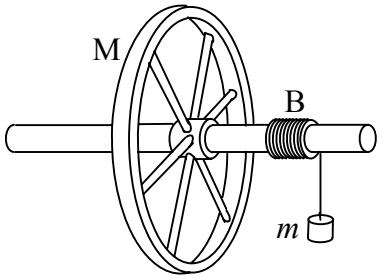
Однородная гибкая цепочка без трения, сложенная кучкой на краю стола, падает звено за звеном с ускорением $g/3$, если движение неконсервативно, и с ускорением $g/2$ в случае консервативного движения (g – ускорение свободного падения). Ввиду невозможности конструирования такой падающей цепочки, был использован ее аналог, обладающий большей размерностью. Домашняя видеокамера использовалась для регистрации падения трехмерной версии, названной xyz-ползуном. После учета поправок, связанных с трением, вертикальная составляющая ускорения xyz-ползуна равна $a_x/g = 0{,}328 \pm 0{,}004$. Этот результат находится в согласии с теоретическим значением $a_x/g=1/3$ для идеального xyz-ползуна с сохранением энергии.

Глава 4

ВРАЩЕНИЕ И ПРЕЦЕССИЯ МАТЕРИАЛЬНЫХ ТЕЛ

4.1. Вращательное движение твердого тела

1. **Определение момента инерции махового колеса динамическим методом.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 2а. С.85-88.



Прибор представляет собой маховое колесо М, которое может вращаться с очень малым трением относительно горизонтальной оси. На оси колеса укреплен деревянный вал В, на который намотана нить, к концу которой прикреплен груз массой m. Если колесо освободить, то груз начнет опускаться, приводя маховое колесо во вращение, которое можно считать равноускоренным.

Момент инерции колеса (вместе с осью и валом) вычисляется по формуле

$$J = \frac{mr^2\left(gt^2 - 2h\right)}{2h},$$

в которой все величины в ее правой части доступны непосредственным измерениям, а ускорение свободного падения g считается известным.

Чтобы найти момент инерции одного колеса, следует из полученного значения вычесть момент инерции оси и вала. Их значения находят вычислением по формулам для однородных цилиндрических тел известной геометрии и плотности их материала.

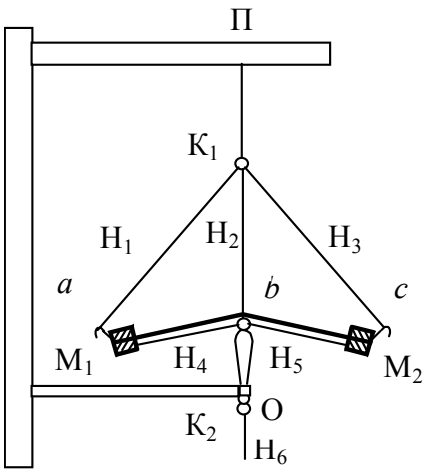
2. **Движение по окружности. Определение *g*.** Фелл. (Motionin a circle – determination of “g”. Fell J. I.), School Sci Rev., **1957**, 38, № 135, 282-283. [РЖ 1958-1-83].

Описан простой демонстрационный прибор, состоящий из кругового желоба, вращающегося вокруг оси симметрии. Высота подъема металлического шарика в этом желобе позволяет определить величину g. Во втором варианте прибора круговой желоб заменяется небольшим прямым желобом, который может устанавливаться на различных расстояниях от оси вращения и наклоняться под разными углами. В этом случае отмечается момент подъема шарика с горизонтальной плоскости. Приводятся расчетные формулы.

3. **Определение момента инерции махового колеса динамическим методом.** Работа 9. С.43-45. Физический практикум. Часть 1. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М. А. Большаниной. Томск. **1959**.

4. **Установка для демонстрации к теме «Закон сохранения момента количества движения».** Фурсов В. К. «Вестн. высш. Школы». **1961**, № 1, 77. [РЖ 1961-8А61].

Коромысло *abc* (см. рисунок) с помощью тонких нитей H_1, H_2 и H_3 и карабинов K_1 и K_2 может свободно вращаться вокруг вертикальной оси *b*П.



Нити H_4 и H_5 и кольцо, через которое эти нити продеты, а также нить H_6 служат для изменения расстояния между цилиндрами M_1 и M_2; неподвижное кольцо О предохраняет систему от раскачиваний. Коромысло с цилиндрами, предельно удаленными от точки *b*, приводится во вращение вокруг вертикальной оси; при этом измеряют время t_0, затрачиваемое на небольшое (5–10) число оборотов.

Затем, натягивая нить H_6, сближают цилиндры и снова определяют время *t*, затрачиваемое на совершение того же числа оборотов. Справедливость закона сохранения момента количества движения доказывается сравнением промежутков времени t_0 и *t*.

5. **Круговое движение.** Stewart Albert B. Circular motion. «Amer. J. Phys.», **1961**, **29**, 6, 373. [РЖ 1961-12А145].

В качестве альтернативы к стандартному эксперименту по центростремительному ускорению (вращение массы и пружины при помощи электродвигателя с фрикционным приводом переменной скорости) предлагается исследовать движение укрепленного на нити груза при вращении его в вертикальной плоскости по круговой траектории с такой скоростью, что натяжение нити уменьшается до нуля в верхней точке. После некоторой практики удается при вращении от руки достигнуть соответствующего периода с точностью до 5%. График зависимости T^2 от радиуса *R* представляет прямую линию. Учащимся предлагается доказать, что T^2/R = const независимо от угловой скорости вращения. Эксперимент проводился с грузом 10 г при радиусах 20–125 см. Эксперимент рекомендуется для сильных учащихся, как новая задача, доступная для аналитического и экспериментального исследований.

6. **Измерение центростремительной силы.** Stubbe Hans. Die Messung der Zentripetalkraft. “Prax. Naturwiss.”, **1961**, А10, № 2, Physik, 38-39. [РЖ 1961-11А76].

Полоску фанеры длиной 65 см и шириной 5 см с бортиками, в которых высверлены отверстия на разных расстояниях от центра, устанавливают горизонтально на ось электромотора. В качестве вращающейся массы служит тележка, нагруженная плоскими цилиндрическими грузиками. Тележку соединяют с динамометром, второй конец динамометра при помощи штифта прикрепляют к бортикам. При проведении опытов динамометр закрепляют на разных расстояниях от оси вращения и измеряют силу, действующую на тележку при разных нагрузках. Из опытов следует, что отношение ZT^2/mr (*Z* – величина центростре-

мительной силы, T – период вращения, m – масса тележки с грузиками, r – расстояние от оси вращения до центра тяжести тележки) является величиной постоянной и равной $4\pi^2$.

7. **Прибор для демонстрации и определения центростремительной силы.** Walters John H., Jr. Centripetal force apparatus. “Amer. J. Phys.”, **1961**, 29. № 3, 212. [РЖ 1961-11А75].

Приводится чертеж прибора для демонстрации центростремительной силы, допускающий изменения радиуса вращения и массы вращающегося тела. Прибор состоит из стеклянной трубки с заполированными концами, в которую пропущена нить. На концах нити укреплены грузы. При вращении верхнего груза нить натягивается и перемещается вдоль трубки до тех пор, пока силы, действующие на нить, не уравновесятся. Ошибка в определении центростремительной силы не превышает 1–2%.

8. **Замечания к опыту по определению центростремительной силы.** Benade A.H. Commtnts on centripetal force experiment. “Amer. J. Phys.”, **1961**, 29, 10, 712. [РЖ 1962-4А48].

При определении величины центростремительной силы (РЖФиз, 1961, 11А75) рекомендуется учесть, что для приведения груза во вращение вращают саму трубку, при этом ее верхний конец описывает окружность радиуса b. Вследствие этого радиус вращения груза $r = L\cos\theta \pm b$, где θ – угол между направлением нити и горизонтальной плоскостью, а угловая скорость $\omega = \omega_0\left[1 \pm \left(b/L\cos\vartheta\right)\right]^{-1/2} \cong \omega_0\left[1 \pm \left(b/2L\right)\right]$.

9. **Изучение вращательного движения твердого тела.** Физический практикум. Под ред. В.И. Ивероновой, М., **1962**. Лабораторная работа 10. С. 86-90.

10. **Скорость в круговом движении.** Hoffmann Herbert. Die Geschwindigkeit bei einer Kreisbahn. “Prax. Naturwiss.”, **1962**, A11, № 8, 202-203. [РЖ 1963-3А62].

Описан опыт по определению зависимости линейной скорости точки от частоты ее вращения по окружности $\left(v = 2\pi nr/t\right)$. Электромотор с хорошо регулируемым числом оборотов приводит во вращение диск сирены, в отверстия которого на разных расстояниях r от центра может вставляться алюминиевый стержень. Позади диска находится экран со щелью, за которой устанавливается фотоэлемент. Параллельный пучок света, падающий на щель, при вращении стержня периодически прерывается, и электронный счетчик, соединенный с фотоэлементом, сосчитывает число перерывов и, следовательно, число оборотов n за ранее установленный интервал времени t, по истечении которого установка автоматически выключается. Меняя скорость мотора (n/t) при неизменном положении стержня r, и, наоборот, меняя положение стержня при неизменной скорости мотора, из результатов измерений получают искомую зависимость линейной скорости от угловой.

11. **Равноускоренное вращательное движение.** Groeneveld Jan. Die gleichmassig beschleunigte Drehbewegung. “Prax. Naturwiss.”, **1964**, F13, № 9, Physik, 230-233. [РЖ 1965-3А72].

12. **Лабораторные работы по физике с исследовательским уклоном.** Landis Harry M. Experimental experimemts in the elementary physics laboratory. “Amer. J. Phus.”, **1964**, 32, № 9, 704-706. [РЖ 1965-3А71].

Предложены темы двух лабораторных работ, в которых студент должен сам определить программу исследования. Для первой работы на тему «Центральные силы» студент получает конус с углом при вершине немногим меньше 180°. Конус устанавливается вершиной вниз и на его внутреннюю поверхность можно бросать стальные шарики. Движение этих шариков происходит под действием составляющей силы веса, которая в данном случае является центральной силой. Студент может найти закономерности этого движения. Для второй работы – «Движение по ненатянутой веревке» студент получает подвижный блок с грузом, который может скользить по свободно свисающей веревке. С этим простым оборудованием он может исследовать движение, близкое к движению по брахистохроне.

13. **Учебный прибор для проверки второго принципа динамики при вращении жесткой системы.** Forgnone V. P., Pani P. Apparecchio didattio per sistemi rigidi in rotazone. “Giorn. fiz. Soc. ital. fis.”; **1965**, 6, № 1, 36-38. [РЖ 1966-3А71].

Описан простой прибор для проверки закона сохранения момента инерции при вращении, состоящий из круглой платформы, ось которой приводится во вращение падающим грузом. На платформу можно класть различные грузы; кроме того, к платформе на продолжении ее диаметра прикреплены два противоположно направленных стержня с прикрепленными к ним равными грузами, одинаково удаленными от центра платформы, положение которых можно менять. Приведен примерный расчет моментов инерции.

14. **Сохранение момента количества движения.** Hart John. The conservation of angular momentum. “Amer. J. Phys.”, **1965**, 33, № 4, 345. [РЖ 1965-10А69].

Описан простой прибор для демонстрации закона сохранения момента количества движения и для получения полуколичественных результатов. Прибор представляет собой центробежный регулятор Уатта, в котором можно в процессе вращения шаров изменять расстояние между ними. Измеряя расстояния между шарами и соответствующие им скорости вращения вокруг оси, можно убедиться в сохранении момента вращения.

15. **Опыты по проверке формулы $Z = m\omega^2 r$.** Harder Max. Versuche zur Bestatigung $Z = m\omega^2 r$. Prax. Naturwiss., **1966**, A15, № 12, “Prax. Naturwiss.”, 1966, A15, № 12, “Physik” 323-324. [РЖ 1967-8А48].

На пластинке из оргстекла на одинаковых расстояниях друг от друга устанавливают стеклянные трубки с уклоном 0,5; 1; 1,5 и 2. В трубки помещают стальные шарики и концы трубок закрывают наглухо. Если привести пластину во вращение, при некоторой угловой скорости шарики поднимаются в трубках, так что для каждого шарика $Z = G\mathrm{tg}\beta$, где G – вес шарика, $\mathrm{tg}\beta$ – уклон трубки. Таким образом, можно показать, что $\mathrm{tg}\beta \sim r$, следовательно, и $Z \sim r$. Аналогичным образом, устанавливая трубки с разными уклонами на одинаковых расстояниях от оси вращения, можно показать, что $\mathrm{tg}\beta \sim \omega^2$ и $Z \sim \omega^2$.

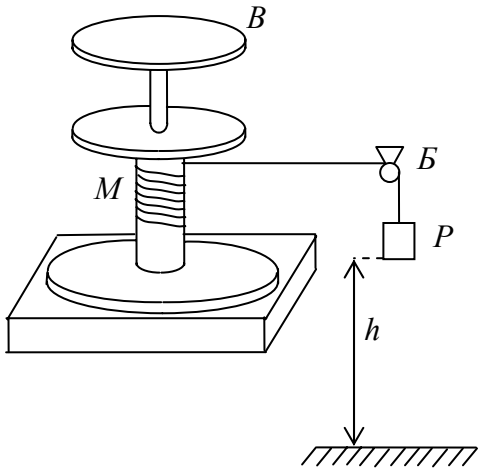
16. **Изучение вращательного движения тела.** Физический практикум. Под ред В.И. Ивероновой, М., **1967**. Задача 10. С. 92-95.

17. **Изучение эллипсоида инерции (геометрии массы) твердых тел.** Под ред. В.И. Ивероновой. Физический практикум. М., **1967**. Задача 13. С. 102-107.

18. **Определение ускорения силы тяжести.** Ponsetto B., Spegno A. Determinazione dell′accelerazione di gravita. “Giorn. Ital. Fis.”, **1968**, 9, № 3, 224-226. [РЖ 1969-3А51].

Описана установка, которую рекомендуется применить для определения ускорения силы тяжести. Идея проведения опыта состоит в том, что центростремительное ускорение центра тяжести штанги, у которой верхний конец соединен с диском, равномерно вращающимся в горизонтальной плоскости, а другой оставлен свободным, совпадает с горизонтальной составляющей ускорения силы тяжести. Точность измерения ≈2%.

19. **Определение момента инерции тела динамическим методом.** Работа 4. Руководство к лабораторным работам по физике. Часть I. Механика. Молекулярная физика. Под ред. А.П. Максименко. Днепропетровский. гос. ун-т. **1973**. 130 с.



Прибор для определения момента инерции тел произвольной формы состоит из горизонтального диска *B*, который может вращаться около вертикальной оси. Вращение диска вызывается действием груза *P*, прикрепленного к нити, перекинутой через блок *Б* и навитой на шкив *M*, укрепленный на оси прибора. Исследуемое тело,момент инерции которого определяетя, помещается на диск так, чтобы ось, по отношению к которой определяется момент инерции, совпала с осью прибора.

Если груз *P* заставить падать с высоты *h*, то потенциальная энергия груза *P* перейдет частично в кинетическую энергию поступательного движения груза, в кинетическую энергию вращения прибора и в работу по пеодолению трения *A*.

Чтобы исключить работу сил трения *A,* следует произвести опыт с двумя различными грузами *P*, массы которых m_1 и m_2. Момент инерции измеряемого тела *I* определяется из соотношения

$$\left(m_1 - m_2\right) gh = 2\left(I_0 - I\right)\frac{h^2}{r^2}\left(\frac{1}{t_1^2} - \frac{1}{t_2^2}\right) + 2h^2\left(\frac{m_1}{t_1^2} - \frac{m_2}{t_2^2}\right),$$

где момент инерции самого прибора I_0 определяется из аналогичных измерений с ненагруженным прибором; здесь r – радиус диска, t_1 и t_2 – время падения грузов m_1 и m_2 с высоты h.

20. **Прибор для демонстрации центробежной силы.** Wessner John. “Amer. J. Phys.”, **1975**, 43, ¹ 9, 838-839. [РЖ 1976-2А106].

Обсуждаются результаты, получаемые при выполнении лабораторной работы по исследованию центробежной силы, в которой студент может изменять величину центробежной силы и частоту вращения при неизменных радиусе и массе системы. Указывается, что традиционный графический метод анализа экспериментальных данных часто приводит к неверному результату, и поэтому предлагается в подобных случаях использовать метод нелинейного анализа. Кратко описывается устройство и принцип действия центробежного аппарата.

21. **Установка для исследования центростремительной силы.** Lohken Rudolf. Eine Anordnung zur Untersuchung der Zentripetalkraft. “Prax. Naturwiss. Phys.”, **1977**, 26, № 5, 2119-121. [РЖ 1977 12А-96].

Описана установка для измерения центростремительной силы с помощью рычажных весов. Установка состоит из вращающегося диска, стоящей на нем тележки и шнура, протянутого от тележки в радиальном направлении и далее вертикально через блок в центре диска к неподвижным весам. В качестве параметров движения выбраны масса тележки, радиус траектории и период вращения. В опыте количественно исследуется зависимость центростремительной силы от этих параметров.

22. **Экспериментальная установка Джоуля по изучению превращения механической работы во внутреннюю энергию.** Lochbaas Horst. Versuchsaordnung nach Joule zur Umwandlung von mechanischer Energie in innere Energie. “Prax. Naturwiss. Phys.”, **1978**, 27, № 2, 37-39. [РЖ 1978-7А143].

Описана модифицированная установка Джоуля для демонстрации превращения механической работы во внутреннюю энергию тела. В установке сосуд, в котором находится жидкость, может вращаться вокруг оси. Мешалка установки приводится во вращение электромотором. При работе мешалки вращение передается сосуду, который удерживается в покое динамометром, прикрепленным к стенке. Число оборотов мешалки определяется счетчиком, установленным на валу мешалки. Для измерения температуры может использоваться ртутный термометр или термоэлемент. Измеряемая разность температур не должна превышать 3°С, т. к. при таком небольшом повышении температуры ошибки, возникающие вследствие потерь тепла, очень малы. Приведены результаты измерений зависимости между механической работой и изменением температуры при постоянной массе жидкости, а также механической работой и массой жидкости при одном и том же изменении температуры.

23. **Изучение центростремительной силы.** Centripetal force using a hand rotator. Chesnut David. “Phys. Teach.”, **1980**, 18, № 6, 466-467. [РЖ 1981-3А100].

Описана несложная лабораторная работа по проверке известного выражения для центростремительной силы $F = mv^2/r$. Два одинаковых динамометра со шкалой до 2 кг прикрепляются к блоку, расположенному на вращающемся столе, приводимом в движение вручную или с помощью мотора с регулируемой скоростью вращения. К обоим динамометрам прикрепляются грузы – резиновые пробки одинаковой массы. Скорость вращения устройства должна быть такова, чтобы показания динамометра заключались в пределах от 600 г до 1 кг. Измерения рекомендуется проводить в стробоскопическом освещении. Оценка фона

проводится в отсутствие грузов при вращении платформы с прежней скоростью. Величина радиуса r измеряется от центра вращения до центра масс груза, частота вращения определяется с помощью секундомера. Затем вычисляется величина mv^2/r и сравнивается с измеренной величиной силы F. Отмечается, что результаты согласуются с точностью примерно 5%.

24. **Эксперимент по вращательному движению с использованием ЭВМ для вводных лабораторных работ по физике.** A computerized rotational motion experiment for the introductory physics laboratory. Peterson F.C., Williams S.A. “Amer. J. Phys.”, **1983**, 51, № 10, 901-905. [РЖ 1984-5А115].

Описывается лабораторная работа по физике, посвященная изучению основ вращательного движения твердых тел. Экспериментальное устройство содержит диск с вертикально расположенной осью. Диск приводится во вращение нитью, намотанной на ось диска. Усилие прикладывается к нити с помощью груза. На оси диска закреплен преобразователь угол-код. Преобразователь содержит диск с 200 равнорасположенными по окружности отверстиями, светоизлучающий диод с одной стороны диска и фототранзистор – с другой. Сигналы с преобразователя поступают в ЭВМ. Приводятся результаты измерений угловой скорости вращения диска как функции времени. Приведена методика определения приложенных моментов, а также изучения влияния трения и изменения момента инерции на динамику вращательного движения.

25. **Вариант установки для определения момента инерции.** A different moment of inertia apparatus. Mc Caslin John G. “Phys. Teach.”, **1984**, 22, № 1, 54-55. [РЖ 1984-7А93].

Предлагается один из возможных вариантов классической установки по определению момента инерции диска. Установка представляет собой диск, на который намотана бумажная лента с опускающимся грузом. Лента перемещается в зазоре искрового таймера, дающего на ленте отметки через равные промежутки времени. При помощи другого независимого таймера регистрируется время 10 полных оборотов диска. В процессе обработки результатов студент строит график зависимости средней скорости диска между искровыми промежутками от времени и затем находит тангенциальное ускорение диска и натяжение ленты, значение которых позволяет вычислить момент инерции диска.

26. **Устройство для измерения момента инерции.** Eaton Bruce, De Geer Richard, Johnson Walter. Moment of inertia apparatus. “Amer. J. Phys.”, **1985.** 53, № 2, 183-184. [РЖ 1986-1А110].

Приведено описание устройства для проведения студентами экспериментов с вращающимися системами и для установления связи между вращательным и прямолинейным движениями. Устройство представляет собой расположенный на горизонтальной оси цилиндр, по периметру которого в желобе располагается сенсибилизированная (светочувствительная) лента, к концу которой прикреплен груз. При освобождении цилиндра груз начинает падать, одновременно с этим включается искровой хронограф и на ленте появляется график “положение груза – время”, из которого определяется тангенциальное ускорение цилиндра. В цилиндре имеются 3 пары симметричных отверстий, в которые для изменения момента инерции системы вкладываются меньшие цилиндры. Сту-

денты рассчитывают моменты инерции таких различных геометрически систем и сравнивают их

27. **Вращательное движение.** Saitoh A. Winding motion. “Phys. Educ.”, **1986**, 21, № 2, 98-102. [РЖ 1986-10А103].

Описана установка и эксперимент по изучению трехмерного вращательного движения. Установка состоит из шеста длиной 1,3 м с вращающейся вершиной, к которой прикреплен на прочной нити длиной 1 м шарик весом 64 г. Вершина шеста соединена с проходящим внутри него металлическим стержнем, приводящимся во вращение ручной дрелью. Радиус вращения шарика определялся по миллиметровой шкале. Скорость вращения v_0 рассчитывалась из геометрических размеров установки и радиуса вращения. При резкой остановке дрели шарик за время t_0 совершает движение по спирали вплоть до столкновения с шестом. Измерялась зависимость t_0 от начальной скорости вращения шарика. Рассчитана теоретическая зависимость $t_0(v_0)$, находящаяся в хорошем согласии с экспериментальными данными.

28. **Универсальный стенд для выполнения лабораторных работ по механике в курсе общей физики.** Булатова Р.Ф., Кривоносов Г.А., Рудакова Г.А. Сб. научно-методич. статей по физике. **1989**. Выпуск 15. С. 98-101.

В украинском заочном политехническом институте разработан универсальный стенд, на котором возможно, в частности, изучение тангенциального и нормального ускорений. На этом стенде применяются простейшие так называемые контактные методы (которые могут быть электрическими, магнитными, оптическими с применением волоконной оптики и др.) при изучении механики.

29. **Измерение момента инерции колеса.** Общий физический практикум. Механика. Под ред. А.Н.Матвеева, Д.Ф. Киселева. Лаб. работа 6. С. 104–108. Изд. моск. ун–та. **1991**.

30. **Проверка закона сохранения момента количества движения.** Общий физический практикум. Механика. Под ред. А.Н.Матвеева, Д.Ф. Киселева. Лаб. работа 6. С. 149–159. Изд. моск. ун–та. **1991**.

Объектом изучения является механическая система, основными элементами которой являются колонка, способная вращаться относительно вертикальной оси, и цилиндры, при своем перемещении изменяющие момент инерции системы.

31. **Определение момента инерции колеса.** А.М. Салецкий, А.И. Слепков. Механика твердого тела. Лабораторный практикум. Москва. Физический факультет МГУ. **1999.** Лаб. работа 4. С. 38-46.

В работе используются два способа экспериментального определения момента инерции: метод колебаний и метод вращения. Первый основан на использовании зависимости периода колебаний физического маятника от его момента инерции. Второй – на анализе инерционных свойств твердого тела, закрепленного на оси, при его вращательном движении. Кроме этого, проводится прямой расчет момента инерции исследуемого тела известной геометрии.

Основной частью установки является сплошное колесо, которое может вращаться вокруг горизонтальной оси. К цилиндру, расположенному на оси колеса, с помощью нити прикреплен груз. Помещая груз в устройство для его крепления, получаем физический маятник, который может колебаться около положения равновесия. Угол отклонения может быть определен по угломерной шкале. Установка снабжена системами регистрации периода колебаний колеса и времени опускания груза.

32. **Изучение тензора инерции твердого тела.** А.М. Салецкий, А.И. Слепков. Механика твердого тела. Лабораторный практикум. Москва. Физический факультет МГУ. **1999.** Лаб. работа 5. С. 47-58.

Идея выполняемого эксперимента заключается в исследовании и определении на основе данных эксперимента главных моментов инерции. В процессе работы устанавливается связь между моментом инерции относительно произвольной фиксированной оси и компонентами тензора инерции.

Измеряют расстояние L от оси колебаний до центра масс груза и определяют период колебаний T получившегося физического маятника. По полученным данным определяют момент инерции колеса:

$$J = mL\left(\frac{gT^2}{4\pi^2} - L\right).$$

Здесь m – общая масса колеса и груза, расположенного на нем.

В том случае, когда груз освобожден (при этом устройство для его крепления снимается с колеса), под действием силы тяжести он начнет опускаться, приводя колесо во вращение. При этом измеряется время Δt прохождения груза, в начале движения находившегося у отметки x_0, между определенными отметками x_1 и x_2. После того, как груз опустится на полную длину нити до отметки x_3, колесо будет продолжать вращаться, и нить начнет наматываться на цилиндр радиуса r. В результате груз поднимется до отметки $\boldsymbol{x_4}$. На основании этого ускорение груза

$$a = 2\frac{\sqrt{x_2 - x_0} - \sqrt{x_1 - x_0}}{(\Delta t)^2},$$

момент силы трения

$$M_{\text{тр}} = gr \cdot \frac{x_4 - x_0}{2x_3 - x_0 - x_4}$$

и момент инерции колеса

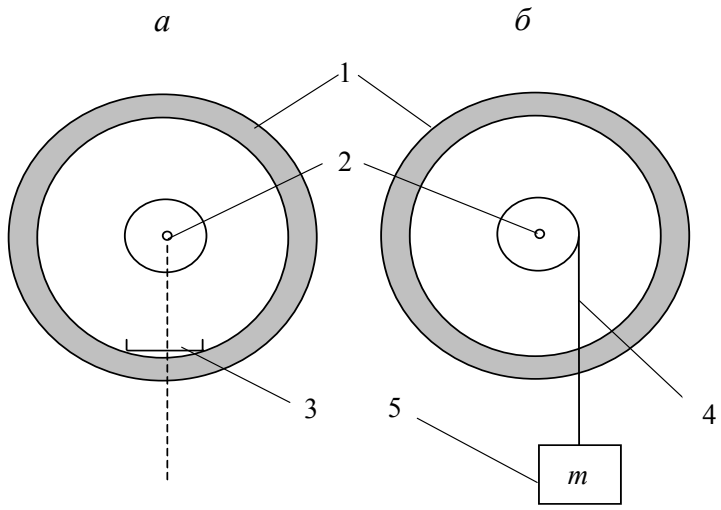
$$J = mr^2\left(\frac{g}{a} - 1\right) - \frac{M_{\text{тр}} \cdot r}{a}.$$

33. **Изучение инерционных характеристик твердого тела в учебной лаборатории.** Васильев Е.И., Салецкий А.М., Слепков А.И. Учеб. эксперим. в высш. шк. **1999**. № 2. 48-54. [РЖ 00.09-18А.98].

В лекционных курсах по общей физике, которые читаются для студентов 1 и 2 курсов на физическом факультете МГУ и др. вузах России, мало времени от-

водится на изучение инерционных свойств твердого тела при вращении. Как правило, рассматривается лишь вращение твердых тел, обладающих определенной симметрией. При этом полностью выпадают из рассмотрения тензорные свойства моментов инерции. Ввиду ограниченности времени в лекционных курсах и на семинарских занятиях целесообразно перенести изучение этих вопросов в практикум по общей физике. Описаны методика и учебная экспериментальная установка для определения тензора инерции тел, не обладающих симметрией в распределении массы.

34. **Лабораторная установка для определения момента инерции тела.** Ковалевский И.Г., Вржащ Е.Э.СФП-**2002**, С.-П. Тез. Докл. М.-2002, с 115.



Схематическое изображение экспериментальной установки для определения момента инерции колеса: *а* – методом колебаний; *б* –методом вращательного движения; 1 – колесо, 2 – ось колебаний (вращения), 3 – устройство для крепления груза, 4 – нить, 5 – груз

35. **Экспериментальное исследование общепринятого уравнения для определения момента инерции пластины.** Experimental study of the onventional equation to determine a plate´s moment of inertia. Pintao C.A.F., de Souza Filho M.P., Grandini C.R., Hessel R. Eur. J. Phus. **2004**. 25. № 3. 409-417. [РЖФиз. 05.07-18А.120].

36. **Измерение момента инерции тела человека методом вращающейся платформы.** Measuring tht moment of inertia of the human body by a notating platform method. Griffits W., Waikins J., Sharpe D. Amer. J. *Phys.* **2005**. 73. № 1, 85-93. [РЖФиз. 06.11-18А.128].

37. **Исследование движения скатывания неосесимметричных цилиндров.** Rolling motion of non-axisymmetric cylinders. Carnevali Antonio, May Russell. Amer. J. Phys. **2005.** 73. № 10. 909–913.

38. **Как шарики скатываются со стола.** How balls roll off tables. Bacon M.E. Amer. J. Phys. **2005.** 73. № 8. 722–724. [РЖ 18. Физика Ч. I. 2007. № 4. 18А.95].

39. **Вращательная устойчивость – занимательный физический парадокс.** Sendra C.V., Della Picca F., Gil S. Eur. J. Phys. **2007**. 28, № 5. 845–857. [РЖ Физика.08.10-18А.106].

40. **Экспериментальное исследование центростремительных сил.** Pintao C. A. E., de Souza Filho M. P., Usida W. F., Motta M. Phys. Educ. **2007**.42, № 1. 56–61. [РЖ Физика.08.11-18А.106].

4.2. Маятник Обербека

1. **Проверка основного закона вращения твердого тела на крестообразном маятнике.** Работа 5. С. 31-33. Физический практикум. Часть 1. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск. **1959**.

2. **Использование маятника Обербека.** Szamborski Jerzy. Wykorzystanie wahandla Oberbecka. “Fiz. szk.”, **1970**, 16, № 6, 48-49. [РЖ 1971-7А61].

Для исследования зависимости кинетической энергии вращающегося твердого тела от его момента инерции рекомендуется использовать маятник Обербека, с которого предварительно сняты два стержня, а на двух оставшихся стержнях укреплены на одинаковом расстоянии от оси вращения две одинаковые шайбы. На вал маятника накручена нить, к ней подвешен грузик. При опускании грузика его потенциальная энергия частично превращается в кинетическую энергию вращения маятника, и поэтому величину кинетической энергии можно подсчитать. Увеличив в одинаковое число раз массу шайб и подвешенного на нити грузика, можно показать, что кинетическая энергия увеличится, но величина углового ускорения не изменится. Изменяя величину массы подвешенного грузика и оставляя неизменным момент инерции маятника, можно показать, что кинетическая энергия пропорциональна квадрату угловой скорости.

3. **Изучение законов вращательного движения на крестообразном маятнике Обербека.** «Лабораторные занятия по физике. Под ред. Л.Л. Гольдина». Москва. «Наука». **1983**. С.107-111.

Содержание: 1) Исследуется вращательное движение маятника под действием различных перегрузков при постоянном моменте инерции системы. Из данных этого опыта определяют момент инерции системы, а также момент сил трения, действующих на ось маятника.

2) Изучается вращательное движение маятника при различных значениях момента инерции системы. Момент инерции системы варьируют, изменяя расстояние грузов от оси вращения. Измеренные значения момента инерции сравниваются с расчетными.

4. **Исследование вращательного движения твердого тела.** Bizon Adam. Badanie ruchu obrotowego bryly sztywnej. Fiz. Szk. **1989**. 35, № 4. С. 234-243. [РЖ 1990 4А151].

Описывается лабораторная работа по динамике вращательного движения тела, представляющего собой крестовину с грузиками, положение которых на стержнях крестовины может регулироваться (так называемый маятник Обербека). На шкив крестовины намотан шнур, другой конец которого перекинут через неподвижный блок. К этому концу прикреплен груз. Его вертикальное перемещение (вдоль стен лаборатории) регистрируется датчиками и электронным секундомером. Показано, как при помощи такой установки по известным расстояниям и временам опускания груза определить момент инерции тела и выявить

ряд кинематических соотношений. Приводятся результаты типичных экспериментов.

5. **Изучение вращательного движения твердого тела (маятник Обербека).** Общий физический практикум. Механика. Под ред. А.Н. Матвеева, Д.Ф. Киселева. Лаб. работа 4, с. 97–100. Изд. Моск. Ун-та. **1991**.

6. **Изучение вращательного движения твердого тела вокруг закрепленной оси.** А.М. Салецкий, А.И. Слепков. Механика твердого тела. Лабораторный практикум. Москва. Физический факультет МГУ. **1999**. Лаб. работа 1. С. 15-23.

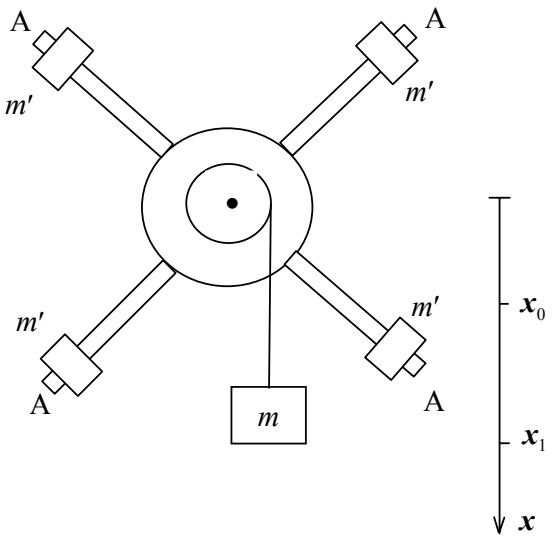
В этой работе целью является экспериментальная проверка основного уравнения вращательного движения твердого тела вокруг закрепленной оси. В эксперименте исследуется вращательное движение закрепленной на оси системы тел, у которой может меняться момент инерции. Различные моменты внешних сил создаются грузами, подвешенными на нити, намотанной на шкив.

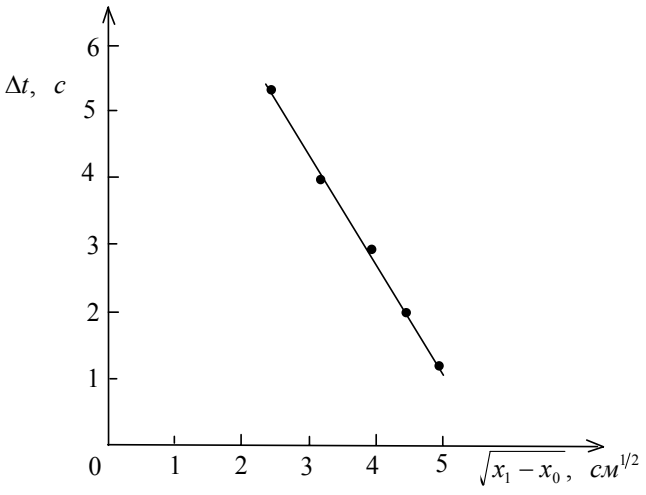
Маятник Обербека состоит из четырех стержней A и двух шкивов с разными радиусами R_1 и R_2, укрепленных на на одной горизонтальной оси.

Справедливость закона движения системы, т. е. постоянство ускорения системы тел, устанавливается по выполнению линейной зависимости времени $\triangle t$ прохождения груза между двумя отметками x_0 и x_1 на оси x от величины $\sqrt{x_1 - x_0}$. Получившаяся экспериментально линейная зависимость указывает на то, что движение тела является равнопеременным.

В лабораторной работе оценивается величина момента сил трения, который оказывается малым по сравнению с начальным моментом силы натяжения нити, проверяется независимость инерционных свойств маятника от момента внешних сил, проверяется основное уравнение вращательного движения и теорема Гюйгенса–Штейнера.

Независимость инерционных свойств маятника от момента внешних сил проверяется путем проведения эксперимента по определению момента инерции системы при изменении массы груза, приводящего систему в движение, и при изменении радиуса шкива, на который намотана нить с этим грузом.





Справедливость основного уравнение вращательного движения и теоремы Гюйгенса–Штейнера устанавливается по линейности зависимости квадрата времени опускания груза $(\triangle t)^2$ от квадрата удаления центров грузов на стержнях l^2:

7. **Точное измерение ускорения свободного падения в лаборатории практикума.** Dupre A., Janssen P. Amer. J. Phys. **2000**. 68, № 8. 704-711.

Стержень, соединенный горизонтальной петлей с вертикальной осью мотора, может отклоняться от вертикали при угловой частоте мотора свыше определенного минимального значения. Гравитационное ускорение связано простым образом со скоростью мотора, длиной стержня и его углом с вертикалью. Оказывается, что g может быть измерено с точностью лучше 0,1 % без использования изощренных технологий или применения поправок к результату. Система обладает некоторыми другими интересными особенностями, которые делают ее особенно подходящей для выпускной (undergraduate) лаборатории.

8. **О возможном способе определения линейного ускорения при работе с крестом Обербека.** Давидзон М.И., Хрунов А.А.VII учебно-методическая конференция стран Содружества. Санкт-Петербург.-2002. Тез. Докл. Москва, **2002**. С. 274.

В физическом практикуме по механике Ивановского государственного университета при изучении динамики вращательного движения с помощью креста Обербека обычно предлагается линейное ускорение креста считать постоянным и определять его по формуле $a = 2s/t^2$, где s – отрезок пути, пройденного грузами за время t. Между тем ясно, что крест Обербека и грузы, приводящие его во вращение, испытывают действие сил сопротивления и приведенное выше соотношение на выполняется. Можно полагать, что момент сил сопротивления направлен против момента силы тяжести и, соответственно, ускорение будет меньше по сравнению с величиной, рассчитанной по вышеприведенной формуле. Предлагается полученные в результате эксперимента данные $s(t)$ для каждого груза представлять с помощью программы Excel-97 (или имеющейся другой) персонального компьютера в виде, например, полинома второй степени или другой функции $s = bt^2 + ct + d$, где b, c, d – постоянные. Продифференцировав последнее выражение дважды, можно найти ускорение и другие требуемые по заданию в лабораторной работе величины.

9. **Оценка момента сил трения на маятнике Обербека: проблемы физического моделирования, учета специфики вуза и использование работ исследовательского характера в процессе обучения.** Бражкин Ю.А., Каленков Г.С., Каленков С.Г., Сизякова В.Н. СФП-2002 С.-П. Тез. докл. М.-**2002**, с. 273.

4.3. Прецессия гироскопа

1. **Изучение гироскопа.** Задача 17. С. 109-114. Физический практикум. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. М., **1951.**

2. **Изучение гироскопа.** Физический практикум. Под ред. В.И. Ивероновой. М., **1953, 1955**. Задача 17. С. 111-116.

3. **Гироскоп на воздушной подушке.** Marcley Robert G/ Air suspension gyroscope. “Amer. J. Phys.”, **1960**, **28**, № 2, 150-155. [РЖ 1960-1А106].

Описан прибор, позволяющий проводить количественное изучение гироскопической прецессии в учебной лаборатории. Вращающийся намагниченный стальной шар, поддерживаемый струей воздуха и приводимый во вращение (подобно ротору асинхронного мотора) вращающимся магнитным полем, исключает необходимость (для всех практических целей) в поправках на фрикционные потери в подшипниках карданного подвеса. Пользуясь только секундомером, микрометром и обычным стробоскопом, можно легко свести ошибку к 0,5%. При соответствующем усовершенствовании деталей прибора и техники его использования ошибка может быть сведена к 0,01%.

4. **Изучение гироскопа (прецессия).** Физический практикум. Под ред. В.И. Ивероновой. М., **1962**. Задача 17. С. 113-115. **1967**. Задача 22. С. 139-141.

5. **Два прибора на воздушных подушках для физических лабораторий и для лекционных демонстраций.** Daw Harold A. Two air-supported devices for physics laboratories and for physics demonstrations. “Amer. J. Phys.”, **1965**, 33, № 4, 322-326. [РЖ 1966-3А72].

Дано подробное описание гироскопа простой конструкции, представляющего собой стальной шар из шарикоподшипника, вращающегося на воздушной подушке и пригодного для проведения ряда лабораторных экспериментов. Во второй части описано использование этого гироскопа (с некоторой модификацией) в приборе, моделирующем явление магнитного резонанса.

6. **Опыты с большим волчком по равноускоренному вращательному движению.** Schledermann Dietrich. Versuche zur gleichmassig beschleunigten Drehbewegung mit einem grossen Kreisel. “Prax. Naturwiss.”, **1971**, Teil 1, 20, № 6, 148-152. [РЖ 1971-12А109].

Описываются опыты по изучению связи между углом поворота и временем, а также по установлению связи между угловой скоростью и временем при равноускоренном движении, не приводившиеся ранее в литературе. Основной прибор – большой волчок, ось которого закреплена в горизонтальном положении. Углы поворота отсчитывают, зная угловое расстояние между спицами волчка (18°). Временные отрезки измеряются с помощью электрического секундомера, схема которого подробно описана. Временные отрезки измеряются также с помощью светового прерывателя и электронного измерителя коротких промежутков времени.

7. **Исследование движения гироскопа.** Задача 4. С. 25-28. Полищук Д.И. и др. Физический практикум для нефизических специальностей. Часть I. (Учебное пособие). Одесса. **1977**. 76 стр.

8. **Волчки, подвешенные на нитях.** Tops – with strings attached. Lea M.J. “Phys. educ.”, **1982**, 17, № 1, 24-25. [РЖ 1982-7А64].

9. **Лабораторная работа по численному моделированию движения твердого тела, закрепленного в точке.** Бабич И.Л., Мартынюк А.В.Сб. научно-методич. статей по физике. М. В. школа. Вып.13. **1987** г. С.27-35.

10. **Изучение прецессии гироскопа.** Л.Г. Деденко, Д.Ф. Киселев, В.К. Петерсон, А.И. Слепков. Общий физический практикум. Механика. Под ред. А.Н. Матвеева, Д.Ф. Киселева. Лаб. работа 8, с. 113–115. Изд. Моск. Ун-та. **1991**.

Гироскопом называется твердое тело, вращающееся с большой скоростью вокруг своей оси симметрии, ориентация которой может изменяться. Свобода ориентации оси гироскопа обеспечивается кардановым подвесом или каким-либо другим аналогичным устройством. При этом движение оси гироскопа происходит таким образом, что некоторая точка этой оси (например, центр масс гироскопа) остается неподвижной. При вращении оси соответствующая угловая скорость Ω (скорость прецессии) много меньше угловой скорости вращения гироскопа вокруг своей оси ω.

Если на ось гироскопа действует некоторая сила, создающая момент ***M***, то момент импульса относительно неподвижной точки гироскопа (главный момент импульса) ***L*** изменяется в соответствии с основным уравнением динамики вращательного движения твердого тела (уравнением моментов):

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M} .$$

Изменение момента импульса ***L*** в единицу времени, равное ***LΩ***, определяется уравнением

$$L\Omega = M.$$

Учитывая, что для быстро вращающегося гироскопа

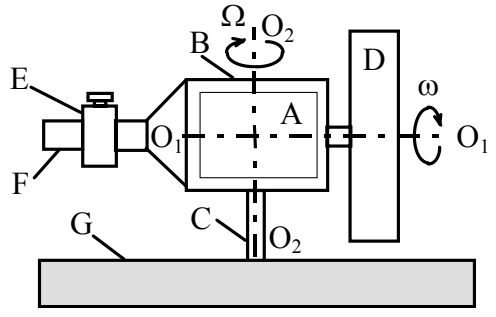
$$L = J\omega,$$

где J – момент инерции гироскопа относительно его оси, получим для угловой скорости

$$\Omega = \frac{M}{J\omega} .$$

Вращение оси гироскопа с угловой скоростью **Ω** под действием постоянного момента сил ***M*** называется прецессией гироскопа.

Экспериментальная установка для изучения прецессии гироскопа иллюстрируется рисунком. Основной элемент установки – электромоторчик A, укрепленный в обойме B. Обойма опирается на вертикальный стержень C и может вращаться вокруг горизонтальной оси O_1O_1 (со скоростью ω), а вместе со стержнем – вокруг вертикальной оси O_2O_2 (со скоростью Ω). Собственно, гироскопом является ротор электромоторчика с массивным диском D. Момент внешних сил, приложенных к гироскопу, может изменяться посредством перемещения груза E по стержню F, жестко



скрепленного с обоймой двигателя *B*. Стержень *C* укреплен на массивной подставке *G*. В состав установки входят также система измерения скорости вращения моторчика, электронный таймер, фотоэлектрическая система измерения угла поворота гироскопа вокруг вертикальной оси.

Груз *E* закрепляют на стержне *F* так, чтобы весь прибор находился в безразличном равновесии, ось гироскопа устанавливают горизонтально. Включают моторчик и выжидают 2–3 минуты, пока ротор не станет вращаться с постоянным числом оборотов. Смещением груза *E* создают момент силы тяжести $M = Ph$, где P – вес груза, h – расстояние этого груза от его начального положения, измеряемого по шкале на стержне.

Далее измеряют величину угловой скорости прецессии при различных значениях момента M (при различных значениях величины плеча h). Выполняют эти измерения при различных значениях скорости вращения моторчика: 2000, 4000 и 6000 оборотов в минуту. Отношение M_i/Ω_i должно быть одинаковым при всех скоростях ω_i, что позволяет после его усреднения (или графически) вычислить величину L. Далее вычисляется момент инерции гироскопа $J = L/\omega$.

11. **Гироскопы на занятиях в инженерных технических вузах.** Самарин В.П., Червова А.А. «Физическое образование в ВУЗах». **2001**. Т. 7, № 3, с. 66-72.

12. **Новый прибор для изучения прецессии гироскопа и анализа его динамики.** Wang K., Yang J., Zhang B. Tianjin shifan daxue xiebao. Ziran kexue ban = J. Tianjin Norm. Univ. Natur. Sci. Ed. **2001.** 21. № 3. Кит.

Для нового типа инструмента, используемого для показа прецессии жесткого тела в преподавательской деятельности, построена динамическая модель для изучения механизма его движения. Посредством анализа бифуркации его изменения равновесия, найдено, что в области установления явления есть стабильное изменяющееся равновесие системы вблизи $\pi/2$ несмотря на то, что две возможности для гироскопа наклоняться внутрь или наружу обуславливает бифуркации изменяющегося равновесия.

4.4. Движение тела во вращающейся системе координат

1. **Опыт, демонстрирующий движение под действием центральных сил.** Blau A. Ein Demonstrationsversuch zur Zentralbewegung. “Math. Und naturwiss, Unterr.”, **1964**, **16**, 10, 454-455. [РЖ 1964-11А96].

Описывается установка для исследования движения под действием центральной силы. В столе высверливается отверстие, над отверстием помещают шариковый подшипник. К оси подшипника прикрепляют неподвижный блок. Через блок перебрасывают нить. К одному концу нити привязывают тело, которое может вращаться. Другой конец опускают в отверстие и подвешивают второй груз, обеспечивающий центральную силу, действующую на вращающееся тело. Подшипник мотором приводят во вращение, при этом тело движется по сложной кривой типа розетки, расположенной между двумя концентрическими окружностями разных радиусов, а груз соответственно поднимается и опускается. Для уменьшения трения движение тела происходит на воздушной подушке. Чтобы зафиксировать траектории движения, на вращающемся теле укрепляют маленькую лампочку накаливания и батарейку и фотографируют сверху. Резуль-

таты опыта показали полное соответствие между кривыми, рассчитанными теоретически и полученными экспериментально.

2. **Простой метод количественных исследований силы Кориолиса в учебных целях.** Giovannozzi M. Un metodo semplice per esperienze didattiche quantitative sulla forza di Coriolis. “Giorn. Fis. Soc. Ital. Fis.”, **1968**, 9, № 3, 182-189. [РЖ 1969 3А55].

Автор отмечает отсутствие учебных приборов для измерения силы Кориолиса и предлагает следующий опыт. По горизонтальной трубе, вращающейся вокруг некоторой вертикальной оси, пускается поток воды. В центральной части трубы имеются две щели, через которые она сообщается с двумя коаксиальными пьезометрическими трубками, расположенными вдоль оси вращения. При вращении трубы жидкость подвергается воздействию сил Кориолиса, которые могут быть вычислены по уровню жидкости в пьезометрических трубках.

3. **Устройство для эксперимента с центростремительной силой.** Williamson S. J., Korda A. A new twist for a centripetal force experiment. “Amer. J. Phys.”, **1972**, 40, № 3, 482-484. [РЖ 1972-8А52].

Описано усовершенствованное экспериментальное устройство для исследования свойств центростремительной силы в учебных физических лабораториях. Устройство представляет собой стальную *Т*-образную штангу, соединенную с электрическим мотором. На штанге установлены два тела одинаковой массы (280 г), которые могут передвигаться по штанге при вращении последней. Каждая масса связана при помощи струны, перекинутой через шкив, с рядом ограничительных пружин, соединенных шарнирно с шариковым упорным подшипником. Новым элементом в конструкции является противовес для баланса веса шарнирного устройства и набора пружин. Описанное устройство отличается простотой, хорошей точностью, стабильностью экспериментальных условий и позволяет студенту непосредственно обнаружить величину центростремительной силы. Кратко описана методика проведения эксперимента. Описанный эксперимент можно использовать также в лекционной демонстрации.

4. **Лабораторная работа по определению центростремительного и кориолисова ускорений.** Johnson P. B., Pipes P. B., Johns M. W. Laboratory exercise in centripetal and Coriolis accelerations. “Amer. J. Phys.”, **1974**, 42, № 10, 892-895. [РЖ 1985-3А114].

Описана установка для изучения движения во вращающейся системе координат, состоящая из стола диаметром 1,2 м с нанесенной координатной сеткой; пружинной пушки, помещенной на краю стола; фотоаппарата, неподвижно укрепленного соосно над столом; стробоскопического осветителя. Пружинная пушка выстреливает мячи во время вращения стола. Описана методика проведения эксперимента. При обработке фотоснимков определяется ускорение, либо по начальным условиям с помощью компьютера находится траектория и сравнивается с опытом. Возможна демонстрация маятника Фуко.

5. **Экспериментальная установка для проверки зависимости ускорения от силы при равномерном движении тела по окружности.** Мисов П. Опитна поста-

новка за проверка на зависимостта на ускорението от силата при равномерно движение на тяло по окръжност. «Мат. и физика (НРБ)», **1975**, 18, № 2, 46-47.

Установка представляет собой горизонтальный металлический диск, приводимый в равномерное вращение вокруг вертикальной оси с помощью электродвигателя. На диске неподвижно укреплен *Г*-образный штатив, к которому на расстоянии 5–10 см от центра диска подвешивают грузик. Для определения величины отклонения грузика к штативу прикрепляют картон с нанесенной сеткой. Даны советы по проведению опыта, выведена рабочая формула для проверки зависимости ускорения от числа оборотов диска.

6. **Установка для изучения центростремительной силы.** Moore J. A. Centripetal force apparatus. “Amer. J. Phys.”, **1975**, 43, № 5, 466-467. [РЖ 1975-10А64].

Установка для демонстрации опытов с центростремительной силой, выпускаемая фирмой Sargent-Welch Scientific Company, позволяет определить зависимость величины центростремительной силы от частоты (диапазон изменения последней 10%). Центростремительную силу определяют по величине груза, вызывающего такое же растяжение пружины, которое создает центростремительная сила. С помощью данной установки невозможно исследовать зависимость между центростремительной силой и частотой при заданном радиусе вращения груза. Предложена простая модификация установки, позволяющая увеличить диапазон изменения скорости вращения и определить упомянутую выше зависимость.

7. **Эксперимент с воротом.** Capstan experiment. Bettis Clifford. “Amer. J. Phys.”, **1981**, 49, 11, 1080-1081. [РЖ 1982-5А105].

Описан учебный эксперимент, в котором используется маленький круглый лабораторный стол с вертикальным болтом в его центре. На краях стола в произвольных местах прикрепляются два блока; горизонтально расположенная нить, перекинутая через блоки, перекидывается через болт в центре стола. На одном конце нити подвешивается груз известной массы, на другом – «объекты» (различные грузы). Измеряется вес объекта, при котором он начинает двигаться (при данном угле между нитями блоков). Затем блоки закрепляются в других положениях, и опыт повторяется. Можно также измерить вес объекта, при котором система движется с постоянной скоростью (как функцию угла). Учащиеся должны эмпирически найти соотношение между весом и величиной угла и представить результаты графически.

8. **Вращающийся шарик на наклонном вращающемся столе.** Sambles J.R., Preist T.W., Lang S.R., Toms R.P. A rolling sphere on a tilted rotating 0turntable. “Phys. Educ.”, **1983,** 18, № 5, 234-239. [РЖ 1984-2А77].

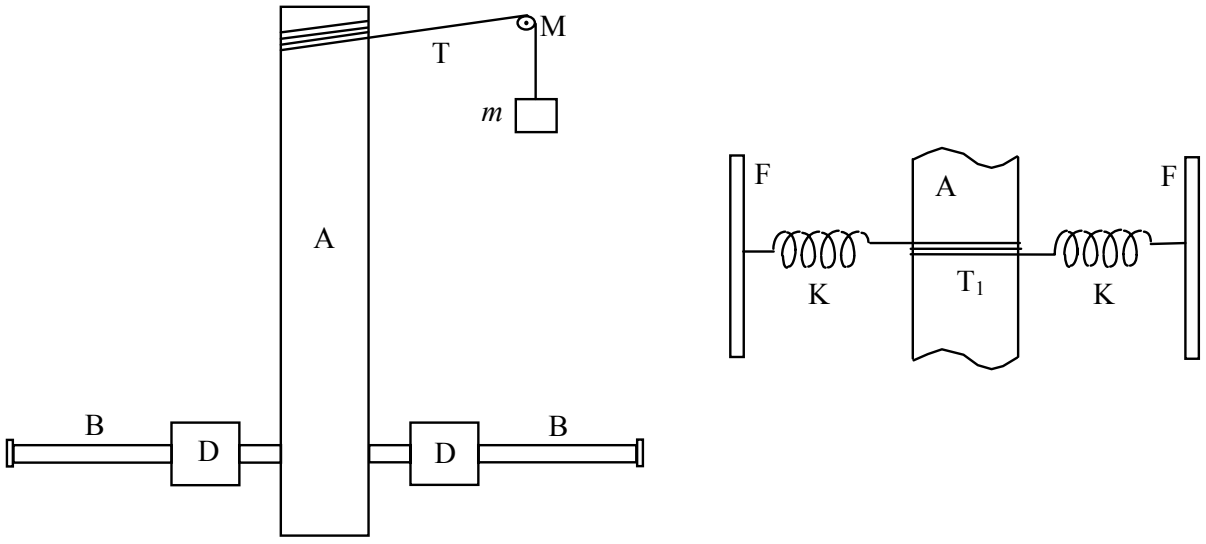
Существует много наглядных экспериментов, которые легко воспроизводятся без наличия дорогостоящих приборов и материалов и, в то же время, интересны тем, что результаты их не очевидны на первый взгляд, а иногда и неожиданны. Описывается один из таких экспериментов: поведение вращающегося шарика на вращающемся наклонном столе. Решены уравнения движения шарика. Рассмотрены варианты траектории движения шарика для горизонтального стола, для наклонного стола, для прямолинейного движения на вращающемся наклонном столе. Рассмотрен также общий случай (эпициклоидальное движение). Кроме того, найдены решения в векторной форме. Проведено сравнение расчетных и экспериментально полученных параметров движения. В эксперименте удачно

сочетаются прикладная математика и экспериментальная физика, что делает его весьма привлекательным для показа школьникам старших классов и студентам первого курса.

9. **Вращающийся шарик на наклонном вращающемся столе.** Sambles J. R., Preist T. W., Lang S. R., Toms R. P. A rolling sphere on a tilted rotating 0turntable. "Phys. Educ.», **1983,** 18, № 5, 234-239. [РЖ 1984-2А77].

9. **Кориолисово ускорение. Лабораторный эксперимент.** Coriolis acceleration. A laboratory experiment. Martin Adriana M., Mariani D. F. "Amer. J. Phys.", **1984**, 52, № 9, 814-817. [РЖ 1985-3А71].

Предлагается демонстрационная установка, представляющая собой вращающийся стол, над которым прямолинейно и равномерно относительно лабораторной системы отсчета движется тележка, протягиваемая вдоль рельсовой дорожки при помощи отдельного мотора. На тележке в виде вертикального штыря укреплен электрод, проходящий в непосредственной близости от поверхности стола.



а *б*

а – Схема установки для изучения закона сохранения момента импульса;
б – размещение пружин, обеспечивающих режим крутильных колебаний

Стол и электрод, к которому от генератора подводится импульсное высоковольтное напряжение, образуют разрядный промежуток. На листе бумаги, помещенном на стол, образуется искровой трек, обозначающий траекторию тележки относительно вращающейся системы отсчета. Анализ траектории позволяет вычислить кориолисово ускорение, его зависимость от скорости тележки и угловой скорости вращения системы отсчета, а также проверить ряд других соотношений.

Колонка *A* с закрепленным в ней стержнем *BB* может вращаться вокруг своей вертикальной оси симметрии. По стержню могут скользить два цилиндра *D* одинаковой массы. В верхней части колонки на нее намотана нить *T*, которая через блок *M* прикреплена к грузу массы m. При опускании этого груза колонка приходит во вращательное движение. Когда груз останавливается, цилиндры B, до этого момента удерживаемые специальным устройством, освобождаются и очень быстро соскальзывают к концам стержня *BB*. Это увеличивает момент

инерции системы и уменьшает по закону сохранения момента количества движения ее угловую скорость. Система продолжает вращаться, и нить навивается на колонку. Груз при этом поднимается вверх, не доходя, однако, до своего первоначального положения вследствие потери части механической энергии системы в тепловую при ударе цилиндров об упоры, наличия сил трения при движении системы и др. В ходе выполнения работы измеряются расстояния h_1 и h_2, проходимые грузом при его опускании и подъеме.

Целью работы является проверка соотношения

$$J_1\omega_1 = J_2\omega_2, \tag{1}$$

где J_1 и J_2 – моменты инерции системы при расположении цилиндров DD на стержне ВВ вплотную к колонке и при их удаленном от колонки положении соответственно, ω_1 и ω_2 – угловые скорости вращения системы в этих двух конфигурациях. Теоретический анализ поведения системы приводит к следующему соотношению, эквивалентному (1), но выраженному через экспериментально измеряемые характеристики движения системы:

$$\cdot\frac{T_1^2 H_1 h_1}{H_1 + h_1} = \frac{T_2^2 H_2 h_2}{H_2 + h_2}\cdot \tag{2}$$

Здесь T_1 и T_2 – периоды колебаний системы при двух ее описанных выше конфигурациях, H_1 – исходная высота груза, h_1 – высота поднятия груза после изменения направления движения, h – высота поднятия груза после изменения направления движения и увеличения момента инерции системы, H_2 – высота, с которой должен опускаться груз, чтобы он поднялся бы на ту же высоту при неизменном моменте инерции J_2. Величина H_2 находится в результате проведения небольшого дополнительного эксперимента и соответствующего расчета.

Глава 5
ТРЕНИЕ

5.1. Трение покоя

1. **Измерение коэффициента трения покоя.** Мисов П. Измерване на коэфициента на триене при покои. «Мат. и физика» (НРБ), **1974**, 17, № 2, 42-43. [РЖ 1974-9А72].

Для определения коэффициента трения покоя тело в виде параллелепипеда или цилиндра помещается на горизонтальный диск, который с помощью электродвигателя может приводиться во вращение. Частоту вращения электродвигателя можно плавно изменять с помощью включенного в цепь реостата. При определенной частоте вращения диска тело начинает скользить и слетает с диска. В этот момент сила трения покоя максимальна. Приравняв ее центростремительной силе, определяют коэффициент трения через число оборотов диска, время, за которое сделано это число оборотов, и расстояние тела от оси вращения. Поскольку на диск можно ставить различные тела и покрывать часть диска сектором из различных материалов, можно определить коэффициент трения для различных пар веществ.

2. **Экспериментальное изучение нормальной силы и силы трения.** Normal and frictional forces: An experiment. Macomber Hilliard K. “Phys. Teach.”, **1979**, 17, № 9, 593-595. [РЖ 1980-5А112].

Обсуждается природа нормальной силы и силы трения, действующих на тело, находящееся на шероховатой поверхности. Указано, что обе силы суть реакции связи (поверхности), одна из которых направлена нормально к поверхности, а другая по касательной. Описано устройство, иллюстрирующее концепцию нормальной и касательной реакции опоры. На наклонной плоскости с помощью системы грузов массами m_1 и m_2, подвешенных на нитях, перекинутых через блок, удерживается деревянный параллелепипед. Экспериментально изучаются условия равновесия всей системы. Для каждого конкретного значения m_1 определяется граничная величина m_2, при котором система еще находится в состоянии статического равновесия. Результаты эксперимента представляются в графическом виде.

3. **О силе трения покоя.** Козлов В.И., Нифанов А.С., Терешина И.С. Шестая межд. конф. ФССО-01. Ярославль. **2001**. Тез. докл. Том II. С 180-111.

5.2. Трение скольжения

1. **Определение коэффициента внешнего трения трибометром.** Работа 6. С. 33-35. Физический практикум. Часть 1. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск. **1959**.

2. $\mathbf{T = T_0 \exp(-\mu\theta)}$. Horton George W. $T = T_0 \exp(-\mu\theta)$. “Amer. J. Phys.”, **1963**, 31, № 5, 391. [РЖ 1964-4А80].

Описан простой лабораторный эксперимент по сухому трению. Две трубки и один стержень из латуни различных диаметров (7,5; 6,0 и 2,8 см) укреплены од-

ним концом к краю стола. Свободные концы их тщательно зачищаются и полируются для придания им одинаковых поверхностных свойств. Затем на них накладывается веревка так, что один ее конец с привязанным к нему грузом в 2 кг свисает вниз, а другой конец с динамометром удерживается под углами $\pi/2$, π, $3\pi/2$, 2π, … к вертикали. Получающиеся замеры наносятся на график функции $T = T_0 \exp(-\mu\theta)$ на полулогарифмической бумаге. Результаты экспериментов обнаружили почти точное совпадение данных для всех трех валов с прямолинейным графиком $T = f(\theta)$.

3. **Два опыта по трению.** Azema J. Deux experiences sur le frottement. “Bull. Union physicians”, **1964**, 58, № 474, 470-472. [РЖ 1964-9А41].

Предлагаются два метода определения коэффициента трения скольжения. 1. Тело с массой m_1, лежащее на горизонтальной поверхности, привязывается нитью, перекинутой через блок, к телу массой m_2. При падении тела m_2 с высоты h будет иметь место равенство $m_2gh=(m_1+m_2)v^2/2+km_1gh$. После остановки тела m_2 тело m_1, имея начальную скорость v, пройдет по горизонтальной поверхности путь S; при этом будет : $mv^2/2=km_1gS$. Отсюда $k=m_2h[(m_1+m_2)S+m_1h]$. 2. Горизонтальная платформа скреплена с четырьмя одинаковыми рычагами, которые могут попарно вращаться вокруг неподвижных осей. Одна из пар рычагов снабжена указателем отклонения от вертикального положения. При скольжении тела по платформе наблюдается перемещение самой платформы. В момент начала скольжения тела рычаги отклоняются на угол θ от вертикального положения, тогда $k = \mathrm{tg}\theta$.

4. **Машина для измерения коэффициента трения.** Nahshol Daniel. Coefficient-of-friction machine. “Amer. J. Phys.”, **1965**, 33, № 2, 161-162. [РЖ 1965-7А41].

На вращающийся стол эксцентрично кладут пробное тело весом P, которое посредством тангенциально расположенного тонкого стержня соединено с пружинным динамометром. К стержню прикреплен указатель, скользящий вдоль зеркальной шкалы. Стол приводится во вращение электродвигателем. Отмечают значение силы F, растягивающей пружину динамометра в момент, когда указатель становится неподвижным или колеблется вокруг некоторого среднего положения. Измеренное значение F равно силе трения, а коэффициент трения $k=F/P$. Машина дает возможность измерять k при различных значениях относительной скорости трущихся тел.

5. **Изучение трения скольжения как физический эксперимент для студентов второго курса.** Fox J.A. Study of sliding friction as a sophomore physics experiment. “Amer. J. Phys.”, **1965**, 33, № 7, 587-588. [РЖ 1966 2А51].

Определение коэффициента трения скольжения часто выполняется в вводном курсе физики при помощи простого прибора, в котором перекинутый через блок груз заставляет скользить кубическое тело по гладкой горизонтальной поверхности. Если движение происходит с равномерной скоростью, то коэффициент трения скольжения μ определяется как W_2/W_1, где W_1 – вес скользящего тела, а W_2 – вес груза. Обычно среднее из серии опытов дает значение, находящееся в пределах ″допустимых″ значений, но отдельные значения могут отклоняться на

20%. Однако при изменении веса W_2 тело может продолжать равномерно двигаться. В специальной литературе указывается, что для скоростей, меньших 20 см/с, коэффициент μ пропорционален логарифму скорости скользящего тела и для двух деревянных поверхностей может изменяться в пределах до 70%. В связи с этим в лаборатории второго курса был поставлен эксперимент по определению коэффициента трения. Исследовалось трение соснового куба по дубовой доске. Измерение скорости производилось с помощью секундомера. Эксперименты дали вполне удовлетворительные результаты, обнаружившие линейную зависимость между μ и логарифмом скорости.

6. **Определение коэффициента силы трения скольжения и коэффициента полезного действия (К. П. Д.) мотора.** Под ред. В.И. Иверoновой. М. **1967**. Задача 15. С. 113-116.

7. **Определение коэффициента силы трения скольжения (трение гибкой ленты).** Под ред. В.И. Иверoновой. Физический практикум. М. **1967**. Задача `16. С. 117-120.

8. **Замечания о трении на поверхности скольжения твердого тела.** Schulz Karl. Bemerkungen zur Reibung an Gleitflacen fester Korper. “Prax. Naturwiss.”, **1972**, Teil 1, 21, № 8, 209-212. [РЖ 1973-1А50].

На примере двух простейших опытов рассматриваются понятия трения покоя и трения скольжения. В опытах используются железные плитки 45×20×10 мм^3 весом по 70 г и площадью опоры 4,5 см^2, скользящие по поверхности стеклянной пластины под действием нити с грузом, перекинутой через блок. Приводятся результаты опытов по определению зависимости силы трения от поверхности трения при постоянном давлении и от давления при постоянной поверхности трения.

9. **Экспериментальное изучение поверхностного трения.** McGinley Patton H. Cookie sheet friction. ″Phys. Teacher″, **1973**. 11. № 6, 362. [РЖ 1974-1А68].

Описан лабораторный эксперимент по изучению законов поверхностного трения. Экспериментальное оборудование состоит из небольшой доски, покрытой полосками тефлона размером 12,7×40,6 см^2, и деревянного бруска размером 15,2×7,6×2,5 см^3, основание и боковые стороны которого покрыты войлоком. Использование в качестве трущихся поверхностей пары тефлон-войлок позволяет продемонстрировать, что сила трения приблизительно не зависит от площади соприкосновения трущихся поверхностей. Связь между силой трения f_T и силой нормального давления $f_н$ для кинетического и статического случаев изучаются при различных нагрузках (500–3000 г) и измерении силы, которую необходимо приложить, чтобы привести брусок в движение, и силы, необходимой для того, чтобы брусок двигался с постоянной скоростью. Из наклона кривой, показывающей зависимость f_T от $f_н$, определяется коэффициент трения для кинетического ($\mu_к$) и статического ($\mu_с$) случаев. Отмечается, что описываемый эксперимент и его результаты обладают хорошей повторяемостью. Ошибка составляет 3%.

10. **Трение и потери механической энергии.** Flowers Kenneth. Friction and mechanical energy loss. “Phys. Teach.”, **1978**, 16, № 3, 173-175. [РЖ 1978-11А84].

Описана общая методика экспериментального изучения закона сохранения механической энергии и иллюстрации равенства между затратами механической энергии и работой, совершенной против сил трения. Эта методика предназначена для экспериментов, в которых используется измерительная лента с метками (опыты с движущимися тележками, падающими телами, опыты по изучению вращательного движения, движение на воздушной подушке и т. п.). Сначала с помощью ленты с метками снимается график зависимости перемещения от времени, откуда после арифметических вычислений строится график зависимости мгновенной скорости объекта от времени. Затем на графиках выбирается произвольный нулевой уровень, для некоторого числа точек (обычно от 6 до 8), вычисляется полная механическая энергия для каждой точки и строится график зависимости механической энергии от пройденного расстояния. Из графика вычисляется сила трения $F = -\Delta W/\Delta S$, где W – работа, совершенная против сил трения, S – перемещение. Результаты эксперимента сравниваются с результатами, полученными другими методами. Обсуждаются отдельные детали экспериментов.

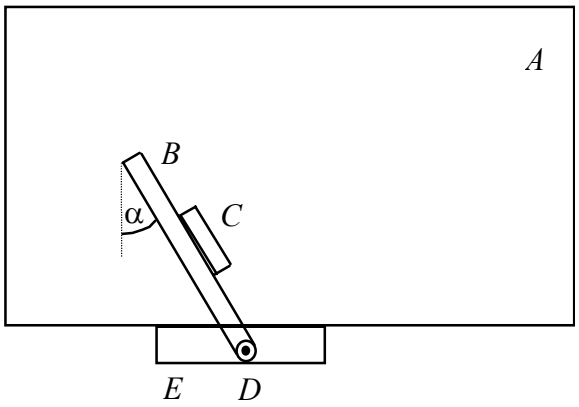
11. **Изучение эффекта проскальзывания катящегося шара.** Study of the slipping of a rolling sphere. Shaw D. E., Wunderlich F.,J. “Amer. J. Phys.”, **1984**, 52, № 11, 997-1000. [РЖ 1985-6А156].

Описана лабораторная работа по курсу физики для высшей школы по изучению движения металлического шара по наклонному желобу. Ширина желоба несколько меньше радиуса шара, и шар при спуске совершает вращательное движение. При подъеме желоба до некоторой критической высоты момент сил трения не сказывается на движении шара и зависимость средней поступательной скорости v от $\sqrt{h}$, где h– высота подъема верхнего конца желоба, носит линейный характер. При высоте h, большей критического значения, наклон зависимости $v(\sqrt{h})$ значительно возрастает, Показано, что в последнем случае имеет место частичное проскальзывание шара по направляющим желоба. Получены теоретические выражения для момента сил трения, углового ускорения и работы, совершаемой силами трения. Теоретическая зависимость $v(\sqrt{h})$ хорошо согласуется с экспериментальной. Дана принципиальная схема таймера с фототранзистором, позволяющая с точностью до 0,5 мс фиксировать время спуска шара. Приведены рекомендации по организации самостоятельной работы студентов при выполнении лабораторной работы.

12. **Определение коэффициентов трения скольжения.** Лаб. работа 14. В кн.: «Общий физический практикум. Механика.» Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Изд. Моск. ун-та. **1991.** С. 159-163.

Установка состоит из доски A с зажимом G, «рейсшины», состоящей из линейки B, планки E и винта D, и пластинки C (см. рис.). Пластинка кладется на горизонтальную поверхность доски A так, что одна боковая поверхность пластинки соприкасается с линейкой B. Коэффициент трения определяется для силы трения, возникающей между пластинкой C и ребром линейки B.

При равномерном движении «рейсшины» пластинка *C* движется поступательно и равномерно, скользя при этом по горизонтальной поверхности доски *A* и ребру линейки *B*.



Схематическое изображение установки для определения коэффициентов трения скольжения (вид сверху)

Эксперимент состоит в том, что планка *E* рукою студента равномерно перемещается вдоль ребра доски *A*. При этом так же плавно и равномерно перемещается ”рейсшина”, а пластинка *C* перемещается вдоль линейки *B*. На листе бумаги, наложенном на плоскость доски, отмечаются начальное и конечное положения центра масс пластинки. Линия, соединяющая эти две точки, является траекторией движения центра масс пластинки. Как показывает анализ движения пластинки, информацию о коэффициенте трения скольжения между пластинкой и линейкой, содержит угол φ между указанной линией и линейкой *B*:

$$k = \mathrm{tg}\varphi.$$

Выполнение аналогичного эксперимента при нагружении пластинки дополнительным разновесом позволяет убедиться в том, что изменение величины силы трения между нижней поверхностью пластинки и поверхностью доски не влияет на трение между боковой гранью пластинки и ребром линейки.

Ребро линейки – дюралевое, а пластинки используются латунная и резиновая.

13. **Эксперименты по трению с воротом.** Friction experiments with a capstan. Levin E. Amer. J Phys. **1991**. 59, № 1. С. 80-84. [РЖ 1А170].

Описана лабораторная работа для общефизического практикума по изучению сил трения при скольжении нагруженной нити по округлой поверхности. Если нить перекинута через закрепленный цилиндр и натяжение нити по разные стороны T_1 и T_2, то сила трения покоя экспоненциально возрастает с увеличением угла охвата θ нитью цилиндра. В этом случае малое натяжение нити T_1 на одном конце нити, обеспечивающее хороший контакт нити с цилиндром, создает условия для существенно более сильного натяжения нити на другом конце, достигающего максимального значения $T_2 = T_1 \exp(\mu, \theta)$. Справедливость этого соотношения проверяется для случая, когда нить скользит по цилиндру. По результатам измерений строятся зависимости $\mu(\theta)$ и $\mu(\mathrm{T}_1 + \mathrm{T}_2)$. Изменение угла θ обеспечивается с помощью дополнительного ворота. Для визуализации соотношения между T_1 и T_2 можно нить заменить достаточно мягкой пружиной.

14. **Определение средней силы сопротивления грунта забивке сваи на модели копра.** Работа 1-02. С.7-10. В.В. Ларионов, М.С. Иванкина, Л.Т. Мурашко, и др. Физический практикум. Томский политехнич. ун-т. **1993**. 91 с.

15. **Экспериментальная задача по определению коэффициента трения с помощью наклонной плоскости.** Василевская Л.И. В сб. «Проблемы учебного физического эксп-та». Вып. 3.-Глазов. ГППИ.-**1997**.-С.31-32.

16. **Экспериментальная задача по определению коэффициента трения с помощью наклонной плоскости.** Василевская Л.И. Учеб. физ. **1998**. № 2. 8-9, 77. [РЖ 1999.08-18А.93].

Обычно коэффициент трения находится с помощью трибометра и аналогичных установок. Авторы предлагают нетрадиционную экспериментальную задачу по определению коэффициента трения μ с использованием наклонной плоскости, угол которой с горизонтом α постоянен и таков, что $tg\alpha>\mu$.

17. **О простом способе определения коэффициента трения скольжения.** Пашун А.Д. Учебный физический эксперимент и его совершенствование: Научно-методическая конференция, Пенза, 22-24 нояб., **2000**: Межвузовский сборник научных трудов. Пенза, 2002. 15-19. [РЖ 03.08-18А.152].

Приведены теоретические сведения, описание установки, приборы и принадлежности для лабораторной работы по определению трения скольжения и проверки закона Амонтона-Кулона. Даны подробное описание хода работы и способ обработки результатов эксперимента.

18. **Некоторые формы физического эксперимента при формировании понятия «трения».** Лукиенко Д.А., Царев А.С. Учебный физический эксперимент и его совершенствование: Научно-методическая конференция, Пенза, 22-24 нояб., **2000**: Межвузовский сборник научных трудов. Пенза, **2002**. 68-79. [РЖ 03.08-18А.153].

Описаны и проанализированы опыты: движение по горизонтальной и гладкой поверхности; движение предметов разных масс по наклонной поверхности; падение одинаковых по размерам металлического и теннисного шарика. Даны ответы на вопросы: 1) Существует ли трение скольжения в состоянии невесомости? 2) Зачем на колесах автомобиля делают рисунок с глубоким вырезом? Дано описание исследования молекулярных взаимодействий, ведущих к «слипанию» объектов и связанных с атомными механизмами трения. Приведен демонстрационный эксперимент, показывающий с помощью вращающегося диска зависимость коэффициента трения скольжения пары трения и фронтальное исследование по определению коэффициента трения скольжения.

19. **О простом способе определения коэффициента трения скольжения.** Пашун А.Д. Учебный физич. эксп-т и его совершенствование: Научно-метод. конф. Пенза. 22-24 ноября. 2004 : Межвуз. сб-к научн. тр. Пенза. **2002**. 15-19. [РЖФиз. 03.08-18А.152].

Приведены теоретические сведения, описание установки, приборы и принадлежности для лабораторной работы по определению трения скольжения и проверки закона Амонтона–Кулона. Даны подробное описание хода работы и способ обработки результатов эксперимента.

20. **Шарики на наклонном желобе, скольжение и скачки.** .Balls on an incline roll, slide and skip. Gluck Paul. Phus. Educ. **2005** 40, № 3. 206-209. [РЖ 18. Физика Ч. I. 2007. № 2. 18А.130].

Дано описание экспериментов, в которых для изучения движения по наклонной плоскости использованы стальные шарики различного диаметра и веса. Угол наклона алюминиевого желоба легко изменяется. Скорость шарика можно точно измерять и просто установить функциональную зависимость от веса.

21. **Простой способ измерения коэффициента трения скольжения.** A simple measurement of the sliding friction coefficient. Gratton L. M., Defrancesco S. Phys. Educ. **2006**. 41. № 3. 232–235. [РЖ 18. Физика Ч. I. **2007**. № 11. 18А.107].

5.3. Трение качения

1. **Определение коэффициента силы сухого трения (трение качения).** Под ред. В.И.Ивероновой. Физический практикум. М. **1967**. Задача 17. С. 120-124.

2. **Сила трения, действующая на вращающиеся объекты.** Frictional force on rolling objects. Shaw Donald E. “Amer. J. Phys.”, **1979**, 47, № 10, 887-888. [РЖ 1980-5А113].

Описан лабораторный эксперимент по курсу механики, предназначенный для студентов вузов. Целью эксперимента является исследование концепции кинематического трения и закономерностей, которым оно подчиняется. Экспериментальное оборудование состоит из металлического цилиндра весом около 5 *кг*, на торцах которого имеются симметричные цилиндрические выступы различных диаметров d, оси которых совмещены. Цилиндр располагается на горизонтальной поверхности и может приводиться во вращение с помощью системы грузов, блоков и нитей, намотанных на цилиндрические выступы. Предполагается, что момент инерции блоков невелик, и нити невесомы и нерастяжимы. Для определения ускорения центра масс цилиндра, катящегося без проскальзывания по горизонтальной поверхности с помощью электронного таймера измеряется время, за которое цилиндр проходит известное расстояние. Высота блоков регулируется таким образом, чтобы нити, приводящие цилиндр во вращение, были расположены горизонтально, параллельно поверхности стола. Для каждого значения d проводится серия измерений величины ускорения. Сила трения f, действующая на цилиндр, катящийся без проскальзывания, может быть вычислена по формуле $f = 2mg - [M + 2m(1 + r/R)] \cdot a_c$, где M – масса цилиндра, R – радиус цилиндра, m – масса одного из грузов, подвешенных на нити, r – радиус цилиндрического выступа, a_c – ускорение центра масс цилиндра. Обсуждение результатов рекомендуется проводить в проблемном плане: студенты самостоятельно должны дать объяснение тому факту, что: 1) направление силы трения может совпадать с направлением движения центра масс цилиндра; 2) сила трения может быть направлена против движения центра масс; 3) для некоторого значения приложенного момента вращения сила трения равна 0 независимо от вида поверхности, по которой катится цилиндр. Приведена краткая теория эксперимента.

3. **Трение качения.** Работа 12. С. 118-123. Физический практикум. Под ред. Г.С. Кембровского. Минск. **1986**. 352 с.

Изучаются причины возникновения и свойства трения качения. Измеряются коэффициенты трения качения для различных материалов.

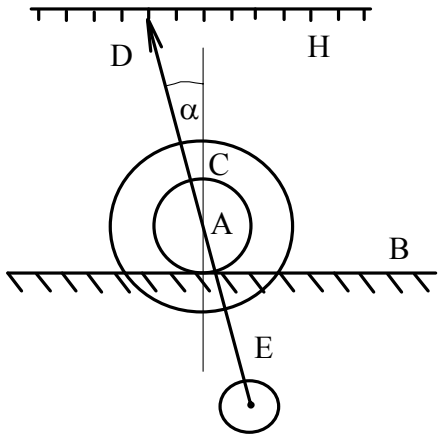
При рассмотрении качения колеса (цилиндра) по плоскости следует различать три вида трения: скольжения, сцепления и качения. Сила трения первого вида возникает при движении точек соприкосновения цилиндра относительно плоскости, т. е. при проскальзывании цилиндра. Эта сила аналогична силе трения скольжения при поступательном движении. Если проскальзывания цилиндра нет, то силы трения скольжения отсутствуют.

Сила трения сцепления возникает между покоящимися друг относительно друга точками цилиндра и плоскости тогда, когда на цилиндр действует момент внешних сил, стремящийся повернуть цилиндр относительно его оси. Эта сила аналогична силе трения покоя, возникающей между плоскими поверхностями соприкасающихся тел при стремлении сместить одно тело по поверхности другого. Благодаря силе трения сцепления осуществляется движение любого колесного транспорта. Если момент внешних сил равен нулю, то сила трения сцепления отсутствует.

Сила трения качения вызывается неупругими деформациями плоскости и цилиндра в местах соприкосновения. Поэтому наличие силы трения качения (в отличие от сил трения сцепления) связано с переходом части механической энергии в тепло, что в месте с трением о воздух приводит к замедлению движения.

4. **Определение коэффициентов трения качения.** Лаб. работа 15.В кн.: «Общий физический практикум. Механика.» Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Изд. Моск. ун-та. **1991.** С. 163-166.

В выполняемом эксперименте движение качения совершает стальной цилиндр на пластине из какого-либо материала. Схематически установка представлена на рисунке. Стальной цилиндр *A* находится на плоской металлической плите *B*. Цилиндр закреплен в обойме *C*, которая имеет стержни *D* и *E*. Первый является указателем угла отклонения системы от положения равновесия, отсчитываемого по шкале *H*. На втором, проходящем через отверстие в плите, закреплен груз *G*. Подвижная часть установки может быть названа «маятником». При выведении ее из положения равновесия она совершает затухающие колебания. Ось цилиндра при этом двигается поступательно, сам цилиндр вращается вокруг своей оси. Уменьшение угла отклонения за известное число периодов колебаний маятника дает возможность вычислить величину коэффициента трения качения *k*.



Схематическое изображение установки для изучения трения качения

Анализ движения маятника основан на приравнивании убыли его потенциальной энергии за один период работе против сил трения качения. Расчетная формула имеет вид:

$$k = \frac{L\left(S_0 - S_n\right)}{4\pi\left(L + R\right)},$$

где n – число полных периодов колебаний маятника, L – расстояние от оси цилиндра до шкалы, R – радиус цилиндра, S_0 – начальное отклонение маятника, S_n – его отклонение после n полных периодов его колебаний.

Под цилиндр можно подкладывать пластинки из различных материалов, что позволяет определять коэффициенты трения качения для различных пар материалов.

5. **Коэффициент трения качения и момент инерции осесимметричного тела.** Кабисов К.С., Лурье В.А. *МГОУ-XXI* – Нов. технол.2007. № 1. 53–55. [РЖ 18. Физика Ч. I. **2007**. № 11. 18А.108].

Рассматривается лабораторная работа по экспериментальному изучению динамики твердого тела на примере массивного цилиндра, скатывающегося по шероховатой наклонной плоскости.

5.4. Внутреннее трение

1. **Температурное изменение модуля жесткости и внутреннего трения: эксперимент с крутильным маятником.** Temperature variation of modulus of rigidity and internal friction. An experiment with torsional oscillator. Shanker Gauri, Gupta V.R., Saraf B., Sharma N. K. “Amer. J. Phys.”, **1985**, 53, № 12, 1192-1195. [РЖ 1986-7А133].

Описан эксперимент по определению температурной зависимости модуля жесткости и внутреннего трения для стержня, совершающего вынужденные крутильные колебания. Материал образцов – медь, железо, серебро; температурный интервал 300–1000 К. Изложена теория вынужденных крутильных колебаний при наличии трения. Дается описание аппаратуры. Стержень длиной 0,3 м и диаметром 3 *мм* зажат сверху, снизу к нему крепится вспомогательный алюминиевый стержень с постоянным магнитом для возбуждения колебаний и зеркальцем для измерения амплитуды. Образец нагревается наложенной катушкой. Для возбуждения колебаний используется функциональный генератор с разрешением 50 мГц в диапазоне 100–1000 Гц. Измеряется амплитуда колебаний на разных частотах вблизи резонанса. Из формы резонансной кривой вычисляется внутреннее трение. Приведены экспериментальные результаты.

2. **Устройство с обратным крутильным маятником для измерений внутреннего трения.** Montaje de un pendulo de torsion invertido para la medida de la friccion interna. Oleaga A., Hurtado I., No M.L., Esnouf C., San Juan J. An. Fis. B. Real soc. Esp. fis. **1989**. 85, № 3. С. 373-386. [РЖ 1990 10А124].

Приводится теоретическое обоснование и детальное техническое описание установки с обратным крутильным маятником для исследования явлений неупругости и микропластичности методом внутреннего трения. Описанное устройство позволяет измерять внутреннее трение в диапазоне от 10^{-4} до $5\cdot10^{-1}$ при частотах 0,1–10 Гц, температурах 78–750 К и амплитудах колебаний $5\cdot10^{-7}$–$5\cdot10^{-5}$ в контролируемой среде с использованием автоматизированной обработки данных. Изложена процедура калибровки системы и приведены некоторые полученные данные.

5.5. Вязкое трение

1. **Исследование сопротивления среды во время вращательного движения.** Pelsoczi Laszlo. A kozegellentallas vizsgalata kormozgas kozben. “Fiz. tanitaza”, **1962**, **1**, № 4, 118-119 (венг.) [РЖ 1963-4А69].

Описан опыт по изучению сопротивления среды при вращательном движении по окружности тел различной формы (шар, полусфера, диск и др.). Объекты крепились на конце стержня и вращались с помощью небольшого двигателя во-

круг оси, проходящей через другой конец стержня, перпендикулярно к нему. Изменение сопротивления воздуха, при смене объектов, отмечалось по изменению числа оборотов электромотора.

2. **Влияние вязкого трения на угловой момент частицы в поле центральной силы.** Parodi M., Pesseti D. Effect of a viscous friction force on the angular momentum of a particle in a central force field. “Amer. J. Phys.”, **1969**, 37, № 9, 936-937. [РЖ 1970 5А33].

Сохранение углового момента – общее свойство движения в поле центральной силы, однако при наличии сил трения закон сохранения углового момента не имеет места. В случае силы трения, пропорциональной скорости частицы, зависимость углового момента от времени выражается в виде $L=L_0\exp[-(k/m)t]$, где L_0 – угловой момент в момент времени $t = 0$, m – масса материальной частицы, k – постоянная. Движение в поле центральной силы можно получить экспериментально в лаборатории при помощи магнитных сил, действующих на постоянный магнит. Дано описание и и приведены снимки установки, в которой катушки, имитирующие центральное поле, расположены внутри пневматического столика из плексигласа, на поверхности которого движется постоянный магнит. Зависимость центральной силы от расстояния можно изменять, варьируя ток в катушках. Чтобы усилить влияние вязкого трения воздуха под движущимся магнитом, давление воздушной струи внутри пневматического столика поддерживалось на уровне 0,1 см вод. ст.; диск с установленным на нем подвижным магнитом весил 21 г. Приведены кривые, свидетельствующие о том, что угловой момент является экспоненциальной функцией времени и не зависит от закона зависимости силы от расстояния. Отмечается, что фрикционное затухание в некоторой степени всегда следует принимать во внимание при демонстрациях движения по орбите; даже при сильном притоке воздуха на пневматическом столике трудно добиться достаточно больших постоянных времени, чтобы можно свести сопротивление воздуха к пренебрежимо малой величине.

3. **Свободное падение в среде с трением.** Gribbin John E. Not-so-free fall. “Phys. Teacher”, **1972**. 10. № 3, 122-124. [РЖ 1972-8А51].

Описан простой эксперимент по исследованию свободного падения тела с учетом трения воздуха. При помощи стробоскопа положение падающего тела записывается через равные промежутки времени на фотопленку. Отсюда определяется кривая падения тела в зависимости от времени. Наклон этой кривой позволяет определять скорость как функцию времени. Приведены подробный математический анализ описываемого эксперимента и сравнение расчетных и экспериментальных результатов. Описанный эксперимент можно проводить в средних школах и на первых курсах физических колледжей.

4. **Исследование обтекания тел потоком воздуха.** Задача 6. С. 31-36. Физический практикум для нефизических специальностей. Часть I. Одесса. **1977**. 76 стр.

5. **Простой эксперимент для иллюстрации функциональной формы зависимости сопротивления воздуха.** Simple experiment to illustrate the functional form of air resistance. Lewis J. C., Kiefte H. “Amer. J. Phys.”, **1982**, 50, № 2, 145-147. [РЖ 1982-7А66].

Целью эксперимента является измерение величины сопротивления воздуха движению сферического объекта $R(v)$ и определение постоянной B в соотношении $R(v) = Bv^2$ (где v – скорость движения объекта относительно среды). Сферический объект (шарик для игры в пинг-понг) прикрепляется к нити, намотанной на вращающийся цилиндр. Цилиндр приводится во вращение электрическим двигателем, частота вращения может регулироваться. Вращающийся с постоянной скоростью шарик фотографируется камерой, установленной над устройством, в стробоскопическом свете. Фотографии дают возможность измерить расстояние от центра сферы до центра цилиндра и расстояние между двумя изображениями сферы для двух последовательных вспышек света, что дает возможность при известной частоте вспышек определить угловую скорость движения сферы и силу сопротивления воздуха. Масса сферы определяется взвешиванием, диаметр цилиндра измеряется с помощью микрометра. Отмечается, что опыт может быть расширен:

а) повышением точности измерений; б) проведением эксперимента с гладкой и шероховатой сферой одинаковой массы и радиуса; в) использованием дополнительно несферического объекта и сравнением величин сопротивления и др.

6. **Измерение скорости движения в воздухе шарика для пинг-понга с использованием преобразователя времени в амплитуду в миллисекундном диапазоне.** Measurement of the terminal velocity in air of a Ping-Pong ball using a time-to-amplitude coverter in the millisecond range. Brandan M.T., Gutierrez M., Labbe R., Menchaca-Rocha R. “Amer. J. Phys.”, **1984**, 52, № 10, 890-893. [РЖ 1985-5А112].

Прибор предназначен для измерения мгновенной скорости движущихся объектов в лабораторных опытах вводного курса механики. Измеряется время прохождения объекта между двумя освещаемыми фототранзисторами, разделенными известным расстоянием. Выходным сигналом преобразователя является положительный импульс напряжения от 0 до 10 B длительностью 100 мкс, который подается на стандартный многоканальный анализатор амплитуды. В качестве иллюстрации применения прибора измерена зависимость скорости свободно падающего в воздухе шарика для пинг-понга от высоты падения. Закон движения шарика широко описывается в рамках модели квадратичной зависимости сопротивления воздуха от скорости шарика. Измеренная конечная (асимптотическая) скорость шарика составила 9,5 м/с. При падении с высоты 12,5 м скорость шарика составляет уже 98% асимптотической.

7. **Сопротивление воздуха ускоренно движущемуся диску (лабораторный эксперимент).** The air drag on an accelerating disk: A laboratory experiment. Basano L., Ottonello P. Amer. J. Phys. **1989**. 57, № 11. С. 999-1004. [РЖ 1990-11А90].

При движении тела в вязкой среде с числом Рейнольдса более 1000 сопротивление среды описывается во многих случаях членом, пропорциональным квадрату скорости. В предлагаемом эксперименте осуществляется падение большого диска вдоль вертикального направляющего стержня длиной 5 м. В центре диска находится подшипник, который насаживается на стержень, благодаря чему обеспечивается движение диска таким образом, что его плоскость параллельна поверхности Земли. Электронное устройство, которое располагается на диске, имеет светодиод, сопряженный с ЭВМ, который подает ЭВМ сигнал о прохождении отметок, нанесенных на стержне через одинаковые интервалы.

Показано, что сопротивление воздуха адекватно описывается путем введения в уравнение движения члена вида $Av^2 + B\dot{v}v^2$.

8. **Задача о движении тела в вязкой среде под действием постоянной силы.** Майер Р.В. Пробл. учеб. физ. эксперим. **2003**. № 17. 43-45, 87. [РЖФиз. 04.01-18А.150].

Рассмотрена известная задача о движении брошенного вертикально вверх камня, в которой требуется сравнить время подъема со временем спуска, учитывая сопротивление воздуха. Проанализировано ее решение на качественном уровне и с помощью компьютерной модели. Предложена физическая модель явления, в которой в качестве вязкой среды используется налитая в сосуд вода, а вместо камня – тело со средней плотностью несколько меньшей плотности воды. При падении тела с некоторой высоты в сосуд с водой, в воде на него начинает действовать выталкивающая сила (аналог силы тяжести) и сила сопротивления воды (аналог силы сопротивления воздуха). Учащиеся убеждаются, время погружения тела в воду (аналог движения камня вверх) существенно меньше времени его всплытия (аналог падения камня).

9. **Оценка коэффициента сопротивления среды при движении тела по наклонной плоскости.** Бубликов С.В., Густенков П.Ф., Седеньо Х.А. Ф. Физика в школе и вузе : Международный сборник научных статей. Вып. 3. Рос. гос. пед. ун-т. СПб. **2005**. 56–59. [РЖ 18. Физика Ч. I. 2007. № 6. 18А.125].

Рассмотрена принципиальная возможность оценки коэффициента сопротивления воздуха, которая может быть реализована при комплексном использовании современного и самодельного оборудования школьного кабинета физики. Предложенный подход к оценке коэффициента сопротивления среды в конкретной ситуации позволяет учащимся познакомиться с особенностями изучения движения твердых тел в жидкостях и газах и служит пропедевтике необходимости экспериментальных и модельных методов изучения этих проблем.

10. **Влияние линейного и квадратичного сопротивления на падающие шары: лабораторная работа.** The effects of linear and quadratic drag on falling spheres: An undergraduate laboratory. Owen Julia P., ryu William S. Eur. J. Phys. **2005**. 26. № 6. 1085– 1091. [РЖ 18. Физика Ч. I. 2007. № 3. 18А.132].

Глава 6
ДЕФОРМАЦИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

6.1. Деформация растяжения и изгиба

1. **Определение модуля Юнга из растяжения и изгиба.** А.П. Соколов. Физический практикум. ОНТИ. **1937**. Задача 10. С. 122-132.

Упражнение 1. Определение модуля Юнга из растяжения. Измеряется удлинение ΔL отвесно висящей проволоки длины L с поперечным сечением S при различных ее нагрузках P и вычисляется модуль Юнга по формуле:

$$E = \frac{P \cdot L}{S \cdot \Delta L}$$

Упражнение 2. Определение модуля Юнга из изгиба. Стержень, подлежащий исследованию, своими концами кладется на опоры, а в средней своей части последовательно нагружается различными грузами. Модуль Юнга вычисляется по формуле

$$E = \frac{PL^3}{4ab^3\lambda},$$

где P – нагрузка, L – длина стержня, т. е. расстояние между опорами, на которые опирается стержень, и b – стороны прямоугольного сечения стержня, a – горизонтальная, b – вертикальная, λ – стрела прогиба.

2. **Определение модуля упругости методом растяжения.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 11а. С.166-168.

Для изучения растяжения проволоки используется прибор Лермантова. Исследуемая проволока длиной около одного метра своим верхним концом укреплена в зажиме кронштейна, а на нижнем конце несет груз, достаточный для ее выпрямления. Набор дополнительных грузов определенного веса помещается на особом держателе, который подвешен также к упомянутому кронштейну, так что, при перекладывании грузов с держателя на груз, уже имеющийся на проволоке, увеличивается нагрузка только проволоки, в то время как общая нагрузка кронштейна остается все время постоянной. Вертикальное перемещение нижнего конца проволоки вследствие ее удлинения приводит к повороту зеркальца, механически связанного с этим концом. Величина удлинения вычисляется по формуле:

$$\Delta l = \frac{nb}{2D},$$

где n – число делений шкалы, соответствующее повороту зеркальца, b и D – задаваемые параметры прибора. Модуль Юнга материала проволоки вычисляется по формуле:

$$E = \frac{l \cdot P}{\Delta l \cdot S},$$

где l – длина проволоки, P – нагрузка проволоки и S – площадь поперечного сечения проволоки.

3. **Определение модуля упругости методом изгиба.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 11b. С.168-169.

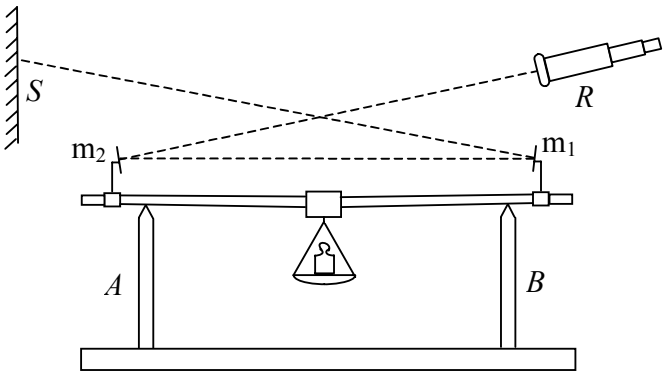
Стержень своими концами лежит на неподвижных опорах A и B. Между этими опорами посередине стержня находится некоторая нагрузка, под действием которой стержень прогибается. Стрела прогиба измеряется методом так называемого двойного зеркального отсчета, который является весьма точным. Прибор состоит из двух одинаковых вертикальных стоек A и B, укрепленных неподвижно на общей платформе. На верхних концах стоек установлены стальные призмы так, что их острые ребра, обращенные кверху, параллельны между собой. На эти призмы накладывают горизонтально исследуемые стержни, которые имеют прямоугольное сечение, причем концы стержней остаются свободными. На концах стержня устанавливают две небольшие стойки с зеркальцами обращенными друг к другу. Лучи от освещенной шкалы S падают на зеркальце m_1, затем на зеркальце m_2 и после этого попадают в зрительную трубу R. Модуль Юнга вычисляется по формуле:

$$E = \frac{3Pl^2\left(2D + d\right)}{2nab^3},$$

где P нагрузка в середине стержня, l – расстояние между точками опоры стержня, D – расстояние до шкалы, d – расстояние между зеркальцами, a и b – ширина и высота стержня соответственно.

4. **Определение модуля упругости методом изгиба.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 11b. С.168-169.

Для измерения деформации стержня при его изгибе применяется т. н. прибор Кенига.



Оба конца прямого горизонтального стержня, оставаясь свободными, лежат на неподвижных опорах A и B. Между этими опорами посередине стержня находится некоторая нагрузка, под действием которой стержень прогибается. Стрела прогиба измеряется методом так называемого двойного зеркального отсчета, который является весьма точным. Прибор состоит из двух одинаковых вертикальных стоек A и B, укрепленных неподвижно на общей платформе. На верхних концах стоек установлены стальные призмы так, что их острые ребра, обращенные кверху, параллельны между собой. На эти призмы накладывают горизонтально исследуемые стержни, которые имеют прямоугольное сечение, причем концы стержней остаются свободными. На концах стержня устанавливают две небольшие стойки с зеркальцами обращенными друг к другу. Лучи от освещенной шкалы S падают на зеркальце m_1, затем на зеркальце m_2 и после этого попадают в зрительную трубу R. Модуль Юнга вычисляется по формуле:

$$E = \frac{3Pl^2\left(2D + d\right)}{2nab^3},$$

где P нагрузка в середине стержня, l – расстояние между точками опоры стержня, D – расстояние до шкалы, d – расстояние между зеркальцами, a и b – ширина и высота стержня соответственно.

5. **Определение модуля сдвига статическим методом.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 11с. С.169-170.

6. **Определение модуля упругости из растяжения и изгиба.** Физический практикум. Руководство к практическим занятиям по физике. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. Сост.: А.Г. Белянкиным, Е.С. Четвериковой, И.А. Яковлевым. Изд. 2-е. М., **1951.** Задача 9. С. 72-82. **1953, 1955**. Лаб. работа 9. С. 74-84. **1962**. Лаб. работа 8. С. 76-81.

7. **Определение модуля Юнга по изгибу.** Физический рактикум. Часть 1. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск. **1959**. Работа 7. С. 35-37.

8. **Определение модуля Юнга из растяжения.** Физический практикум. Часть 1. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск. **1959**. Работа 8. С. 37-43.

9. **Точки Эри метровой линейки.** Phelps F. M., III. Airy Points of a meter bar. “Amer. J. Phys.” **1966**, 34, № 5, 419-422. [РЖ 1967-1А41].

При сравнении метровой линейки длиной l с эталоном метра H-образного сечения во избежание изменения расстояния между штрихами, нанесенными на линейке, при прогибе под действием силы тяжести необходимо установить линейку на две полуцилиндрические опоры, расположенные в «точках Эри», т. е. между двумя параллельными симметрично расположенными прямыми, отстоящими друг от друга на расстоянии $l/\sqrt{3}$. Указывается, что эта задача чрезвычайно поучительна и может быть использована в студенческом курсе механики. Приводятся краткие исторические замечания. Сообщается, что задача эта была решена для двух точек еще Бесселем в 1835 г. и обобщена на n точек Эри в 1844 г. Указывается также, что первый и единственный законный стандарт по мерам и весам, когда-либо принятый конгрессом США, относился к метрической системе (1866 г.).

10. **Изгиб стержней прямоугольного сечения.** Krumm Erlich. Biegung von Staben mit rechteckigem Querschnitt. “Prax. Naturwiss.” **1967**, A 16, № 7, 179-182. [РЖ 1968-1А65].

Описан экспериментальный способ получения формул для расчета модуля упругости по величине изгиба прямоугольного стержня, закрепленного с одной стороны и нагруженного с другой, и по величине прогиба стержня, закрепленного с двух сторон и нагруженного посередине.

11. **Определение модуля упругости из растяжения и изгиба.** Физический практикум. Под ред В.И. Ивероновой. М., **1967**. Лаб. работа 8. С. 82-86.

12. **Преобразование механической энергии в тепловую.** Kroncke H. Umkehrbare Umformung von mechanischer in Warmeenergie. “Math. Und naturwiss. Unter.”, **1969**, 22, № 4, 229. [РЖ 1970-1А61].

Описывается опыт, демонстрирующий преобразование механической энергии в тепловую. К стальной проволоке диаметром 0,5 мм, укрепленной на штативе, подвешивают груз до 4 кг. Изменение температуры проволоки вследствие ее натяжения отмечают по термотоку с помощью высокочувствительного усилителя, соединенного с измерительным прибором. Для этого к разным местам стальной проволоки припаивают медную и константановую проволоки диаметром 0,3 мм. Оба конца образованного таким образом термоэлемента ведут на вход усилителя. Вместо стальной проволоки можно использовать пружину, которая, как и проволока, при сжатии будет нагреваться, а при растяжении остывать. Если использовать пружину из материала, обладающего высокими упругими качествами, то опыт будет особенно интересным тем, что будет демонстрироваться случай обратимого преобразования механической энергии в тепловую. Даны рекомендации относительно пригодности для этого опыта различных материалов. Приводятся описание и результаты демонстрации такого опыта с помощью медной пружины диаметром 0,3 мм. В результате действия силы в 1,5 кг проволока нагревалась на 0,5°. Полученные в ходе опыта данные дают возможность определить механический эквивалент теплоты экспериментальным путем.

13. **Эксперимент Мельде и устройство для измерения натяжения.** Morgan Harold E., Ficken George W., Jr. The Melde experiment as a tension-measuring device. “Amer. J. Phys.”, **1972**, 40, № 2, 348. [РЖ 1972-7А96].

Описывается использование эксперимента Мельде для измерения силы натяжения в нити маятника в любой момент времени (сила натяжения является функцией угла, образованного нитью отклоненного маятника с вертикалью) при угле отклонения маятника, не превышающем 30°. Ошибка при измерении не превышает 3%.

14. **Простая машина для испытания на растяжение.** Morgan R. A simple tensile testing machine. “Phys. Educ.”, **1972**, 7, № 8, 503-505. [РЖ 1973-3А99].

Подробно описано устройство простого и недорогого аппарата для проведения экспериментов по изучению деформационных свойств твердых тел. Аппарат для испытания на растяжение относится к моделям, получившим название «тяжелый луч», и позволяет регистрировать очень небольшие изменения длины испытуемого образца. Закрепление образца осуществляется специальным зажимом и металлическим шкивом, отсчет производится с помощью светового луча от лампы, отраженного от системы зеркал (по типу зеркального гальванометра). Описан эксперимент с растяжением проволоки, в котором использован данный аппарат. Отмечается, что данный прибор пригоден как для проведения лабораторных работ, так и для лекционных демонстраций при изучении теории упругости.

15. **Изучение упругих свойств тел.** Задача 1. С. 14-18. Полищук Д.И. и др. Физический практикум для нефизических специальностей. Часть I. (Учебное пособие). Одесса. **1977**. 76 стр.

Определяется модуль Юнга из деформации растяжения стержня и деформции изгиба.

16. **Получение кривых зависимости растяжения от нагрузки для материалов, находящихся под воздействием растягивающей силы.** Extension – load curves for materials under tension. Richards D. A. ‘Phys. Educ.”, **1981**, 16, № 1, 44-46. [РЖ 19818А108].

Описан усовершенствованный вариант широко известной лабораторной установки для определения модуля Юнга, в которой измеряется удлинение образца, находящегося под воздействием растягивающей силы; в традиционных установках такого типа независимой переменной является растягивающая сила, а функцией – удлинение образца. В тех случаях, когда диапазон исследуемых напряжений лежит за пределами применимости закона Гука, более предпочтительной является установка, позволяющая определять зависимость силы как функции растяжения, что и предполагается в данной работе. Основным элементом установки служит оптическая скамья, вдоль которой перемещается ползунок. Исследуемый образец (отрезок проволоки) одним концом прикрепляется к ползунку, а другим – к коромыслу рычага с калиброванной нагрузкой на конце. Перемещая ползунок вдоль оптической скамьи, можно задавать произвольное растяжение образца. Поскольку соответствующий данному растяжению возвращающий момент пропорционален силе, вызывающей это растяжение, то смещение коромысла рычага может рассматриваться как мера деформирующей силы. Жестко связанный с коромыслом рычаг с укрепленным на нем фломастером позволяет получать графическую зависимость растягивающей силы от растяжения.

17. **Определение модуля упругости из растяжения и изгиба.** Общий физический практикум. Механика. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Изд. моск. ун-та. **1991**. Лаб. работа 17. С. 195-199.

Прибор для изучения деформации изгиба состоит из массивной платформы SS' с двумя стойками на концах (рис. 1.). На стойках укреплены стальные призмы так, что ребра их параллельны между собой. Для измерения вертикальных расстояний используется микроскоп, укрепленный в горизонтальном положении на раздвижной стойке, основанием которой служит треножник с установочными винтами. Микроскоп снабжен окулярным микрометром и свободно вращается около вертикальной оси. Стойка может раздвигаться и имеет шкалу с делениями.

При грубых измерениях и измерениях таких расстояний, которые превышают возможности окулярного микрометра, пользуются шкалой на стойке. При измерениях малых расстояний пользуются одним окулярным микрометром.

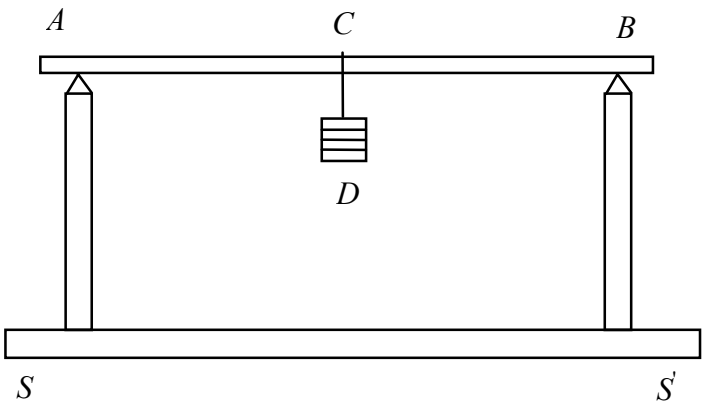


Рис. 1. Прибор для изучения деформации изгиба

На призмы прибора накладывается стержень AB прямоугольного сечения из исследуемого материала. К его середине C

подвешиваются грузы D. Измерения состоят в подвешивании грузов, вес которых P, и отсчете при этом величины прогиба середины стержня λ с помощью микроскопа. Линейность экспериментально получаемой зависимости $\lambda(P)$ выражает справедливость закона Гука для деформации стержня в проведенном эксперименте. Пользуясь результатами измерений, вычисляют модуль Юнга материала стержня по формуле

$$E = \frac{PL^3}{4ab^3\lambda},$$

где L – длина стержня, a – горизонтальный размер поперечного сечения стержня, b – вертикальный размер поперечного сечения стержня.

Для пружины крутильные колебания вызываются деформацией изгиба, сводимой к деформации сжатия (растяжения) продольных слоев ее материала, а вертикальные – деформацией изгиба, сводимой к сдвигу слоев в поперечном сечении материала пружины. В силу связи между этими деформациями наличие одной из них ведет к появлению другой.

Для пружин с малыми углами наклона витков к горизонтали обычно пренебрегают деформацией сжатия по сравнению с деформацией сдвига. Это позволяет при их растяжении рассматривать только вертикальные колебания. Для этих же пружин при их закручивании можно пренебречь деформацией сдвига и рассматривать только крутильные колебания. При этих условиях легко определить коэффициент Пуассона по измерениям периодов колебаний этих типов груза на пружине.

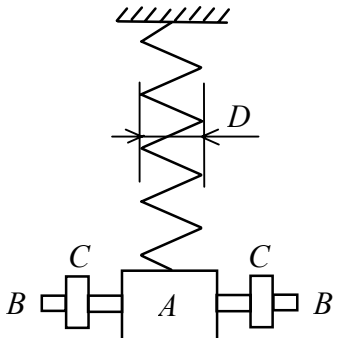


Рис. 2. Схема установки для наблюдения продольных и круильных колебаний пружины с грузом

Элементы установки для наблюдения продольных и крутильных колебаний пружины изображены на рис. 2. Пружина диаметром D с грузом A на ее нижнем конце верхним концом прикреплена к консоли. Тело A, выполняющее роль груза – составное. Сквозь него проходит стержень BB, по которому могут перемещаться диски C – такая конструкция позволяет менять момент инерции груза относительно вертикальной оси.

Коэффициент Пуассона материала пружины рассчитывается по формуле

$$|\mu| = \frac{4J}{mD^2}\left(\frac{T_1^2}{T_2^2} - 1\right),$$

где m и J – соответственно масса и момент инерции груза, D – диаметр пружины, T_1 и T_2 – периоды колебаний соответственно вертикальных и крутильных.

Если задачу о колебаниях рассматривать более полно, то груз, подвешенный на винтовой пружине, необходимо считать системой с двумя степенями свободы. Груз одновременно совершает движения двух видов: крутильные и вертикальные колебания. Формально это аналогично движению двух маятников, соединенных между собой легкой пружинкой (связанные маятники). В нашем случае роль ”пружинки” играет связь между деформацией сдвига и деформацией сжатия.

Нормальные частоты колебаний груза на винтовой пружине не равны между собой. В этом случае можно наблюдать каждое собственное колебание – это крутильные и вертикальные колебания. Частоты этих колебаний – нормальные частоты.

Конструкция груза позволяет, не изменяя его массы, изменить его момент инерции, а, следовательно, и период крутильных колебаний. Приближая этот период к периоду вертикальных колебаний, можно наблюдать, как и в случае двух связанных маятников, появление биений, т. е. периодических изменений во времени амплитуды вертикальных и крутильных колебаний.

Частота биений ω равна разности собственных частот, т. е. разности частот колебаний двух видов (вертикальных ω_1 и крутильных ω'_2):

$$\omega = \omega'_2 - \omega_1 .$$

При этом период биений

$$\tau = \frac{T_1 - T'_2}{T'_2 - T_1} .$$

18. **Компьютерная лабораторная работа: Линейная цепочка атомов - модель упругих свойств твердого тела.** Мирзоев А.А., Гельчинский Б.Р.Физ. обр. В вузах. **1997**, т.3, № 3, с. 145-146.

19. **Новые работы по изучению деформаций.**
Лазаренко Р.Н., Салецкий А.М., Слепков А.И.УФО-**98**, СЭ-30.

20. **Прибор по теплоте в механике (экспериментальное изучение закона Гука).** Царев А.С., Леонов Ю.В. Пробл. Учеб. физ. эксперим. **1998**. № 4. 59-62. [РЖ 01А 134].

Предложена методика использования известного прибора, предназначенного для демонстрации теплового расширения тел, при экспериментальном изучении закона Гука. Измерение абсолютной деформации осуществляется прибором для определения коэффициента линейного расширения металла с индикатором часового типа.

21. **Изучение демпфирующей способности материала.** Физическое образование в вузах. **2002**. Т. 8, № 3, с.50-54.

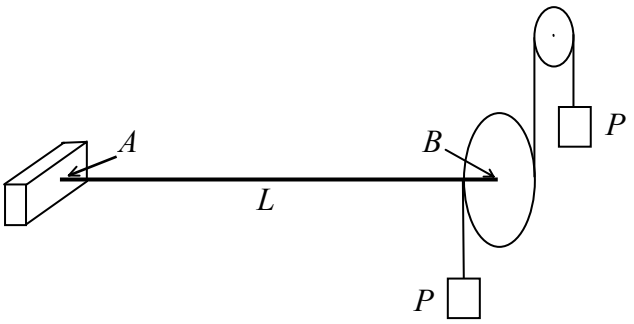
22. **Определение модуля Юнга для дерева.** Examining Young´s modulus for wood. Perkalskis B. S., Freeman R. I., Suhov A. Eur. J. Phys. **2004**. 25. № 2. 323-329. [РЖФиз. 05.06-18А.140].

23. **Изучение упругих свойств анизотропных тел.** Ларин В.Л., Назаров П.А., Сотириади Г.Н. Проблемы учебного физического эксперимента: Сборник научных трудов. Вып. 24. Материалы 11 Всероссийской научно-практической конференции «Учебный физический эксперимент: Актуальные проблемы. Современные решения», Москва, **2006**. М., 2006. 44–45. [РЖ Физика.09.01-18А.102].

6.2. Деформация кручения

1. **Определение модуля сдвига статическим методом.** А.П. Соколов. Физический практикум. ОНТИ. **1937**. Задача 11. Упражнение 2. Определение модуля сдвига по модулю кручения. С. 122-132.

Один конец испытуемой проволоки длины L и радиуса r зажат в неподвижной точке A, другой же конец B соединен с вращающимся диском радиуса R.



По окружности диска навиты в одну и ту же сторону две нити, к концам которых подвешиваются равные грузы. Оба груза P действуют как пара сил, приложенных в противоположных точках одного и того же диаметра диска. Необходимо обращать внимание на то, чтобы проволока при закручивании не изгибалась в стороны и чтобы ей была предоставлена возможность во время опыта свободно укорачиваться, иначе она будет работать не только на кручение, но и на изгиб и на растяжение. Последнее устраняется тем, что упор A, могущий перемещаться вдоль рельсов, оставляют незакрепленным.

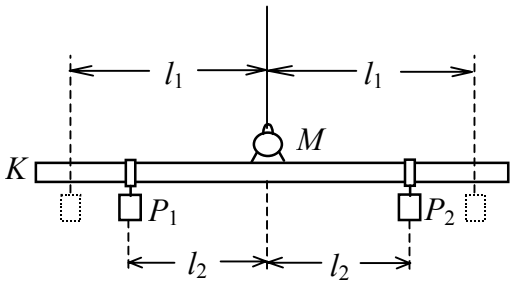
К свободным концам навитых по окружности диска нитей подвешивают по одинаковому грузу P и определяют угол закручивания проволоки φ. Величина модуля кручения вычисляется по формуле:

$$N = \frac{4RLP}{\pi \cdot r^4 \varphi}.$$

2. **Определение модуля сдвига методом колебаний.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 11d. С.170-172.

Верхний конец исследуемой проволоки укрепляется в зажиме кронштейна, а к нижнему концу проволоки подвешивается горизонтальная рейка K с зеркальцем M.

На рейке сделано четыре поперечные прореза, расположенные симметрично на ее концах, на расстоянии l_1 и l_2 от ее середины. Две цилиндрические гирьки P_1 и P_2 можно подвешивать к рейке, помещая их на прорезы l_1l_1 и ли l_2l_2. Равновесие системы при этих двух положениях гирек на рейке не нарушается, сохраняется постоянной и общая нагрузка проволоки, но момент инерции системы относительно оси проволоки изменяется, вследствие чего изменяется и период колебания системы. После выполнения измерений периодов колебаний системы t_1 и t_2 при расположении гирек на расстояниях l_1 и l_2 от оси проволоки соответственно вычисляется модуль кручения проволоки



$$f = \frac{8\pi^2 m\left(l_2^2 - l_1^2\right)}{t_1^2 - t_2^2},$$

где m – масса каждой гирьки, и модуль сдвига

$$N = \frac{16\pi mL\left(l_2^2 - l_1^2\right)}{r^4\left(t_2^2 - t_1^2\right)},$$

где L – длина проволоки, r – ее радиус.

3. **Определение модуля сдвига из кручения.** Физический практикум. Руководство к практическим занятиям по физике. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. М., **1951.** Задача 10.С. 82-85. **1953, 1955**. Лаб. работа 10. С. 85-87. **1962**. Лаб. работа 9. С. 81-86. **1967**. Лаб. работа 9. С. 87-92.

4. **Определение модуля сдвига из кручения.** Физический практикум. Часть 1. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск. **1959**. Работа 10. С. 45-51.

5. **Определение модуля сдвига стали из кручения.** Физический практикум. Руководство к лабораторным занятиям по физике. Часть I. Вердеревская. Н.Н., Иродов И.Е., Майкова В.И. и др. Под ред. проф. И.В. Савельева. Москва, **1961**. Работа 7. С.72-78.

6. **Определение коэффициента Пуассона и частоты биений.** Физический практикум. Под ред. В.И. Ивероновой. М., **1967**. С. 167-171.

7. **Определение модуля сдвига из кручения.** Лаб. работа 18. ”Общий физический практикум. Механика. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Изд. Моск. ун-та. **1991**. С. 199-202.

Хотя кручение не является элементарным видом деформации, но в каждом малом объеме тела, подвергающемся деформации кручения, происходит деформация сдвига. Таким образом, измерив характеристики деформации кручения конкретного тела, можно получить информацию, позволяющую вычислить модуль сдвига, являющегося элементарной деформацией.

В лабораторной работе деформацию кручения создают в проволоке радиусом r и длиной L. Изучение деформации кручения может быть выполнено статическим и динамическим методом. В первом случае имеет место закручивание проволоки под действием определенного закручивающего момента. Во втором случае закручивание проволоки происходит периодически по гармоническому закону в процессе колебаний маятника, подвешенного на исследуемой проволоке.

Прибор для изучения деформации кручения представляет собой следующее. К нижнему концу проволоки AB длиной L, подвешенной на раме C, прикреплен диск D радиуса $R_д$. По окружности диска навиты в одну сторону две нити, пропущенные через блоки F_1 и F_2 и несущие на концах два одинаковых груза P_1 и P_2. Эти грузы действуют как пара сил, приложенных в противоположных точках одного и того же диаметра диска. С диском жестко связано зеркальце, поворачивающееся на тот же угол φ, что и проволока под влиянием приложенной пары сил. Поворот зеркальца регистрируется на шкале, по которой перемещается отраженное от зеркальца изображение нити осветителя. При выполнении эксперимента статическим методом модуль кручения проволоки находится по формуле

$$f = \frac{2RP}{\varphi},$$

где R – радиус диска, P – вес груза. Модуль сдвига материала проволоки находится по формуле

$$G = \frac{2L}{\pi \cdot R^4} f = \frac{4RPL}{\pi \cdot r^4 \varphi}.$$

Динамический метод основан на зависимости периода крутильных колебаний маятника, подвешенного на проволоке, от упругих свойств материала проволоки. Опыт проводится на том же приборе, что и в статическом методе. Крутильным маятником служит диск D, который в данном случае не соединяется нитями с грузами. Период колебаний определяется по времени, в течение которого маятник совершает определенное число полных колебаний. Момент инерции маятника можно изменять, помещая на диске D дополнительные грузы. Модуль кручения проволоки определяется по формуле

$$f = \frac{16\pi^2 m\left(L_2^2 - L_1^2\right)}{T_2^2 - T_1^2},$$

где m – масса каждого из двух дополнительных грузов, размещаемых на диск D симметрично относительно его центра сначала на расстоянии L_1 (при этом период колебаний маятника получается T_1), а затем на расстоянии L_2 (при этом период колебаний маятника T_2. Модуль сдвига вычисляется по формуле

$$G = \frac{32Lm\pi\left(L_2^2 - L_1^2\right)}{r^4\left(T_2^2 - T_1^2\right)}.$$

8. **Отражение представлений современной физики в лабораторном практикуме (лаб. работа «Эффект памяти формы в монокристалле сплава медь-алюминий-никель»).** Агапова Е.М., Арсентьев И.Н., Безрядин Н.Н. и др.”Физическое образование в ВУЗах”. **2002**. Т. 8, № 3, с. 33-41.

6.3. Деформация пружины

1. **Новый способ проверки закона Гука.** Zirkel Wolfgang. Beue Darstellung des Hookeschen Gesetzes. “Prax. Naturwiss.” **1963**, **F12**, № 9, Physik, 238-240. [РЖ 1964-4А79].

Рекомендуется способ проверки закона Гука, исключающий влияние силы тяготения. Проверка проводится при помощи трех пружин. Сначала три пружины A, B C последовательно и измеряют их удлинения a, b и c под действием напряжения. Затем соединяют пружины B и C параллельно и присоединяют последовательно к пружине A. Если растянуть их на b и c соответственно, пружина A удлинится на $2a$. Если пружину B удлинить на $2в$, а пружину C – на $2c$, то пружина A удлинится на $3a$. При помощи серии аналогичных опытов можно доказать справедливость закона Гука.

2. **Опыт по определению дальности стрельбы пружинной пушки.** Cooper William E. Predicting the range of a spring cannon. “Phys. Teacher”, **1972**, 10, № 2, 94-95. [РЖ 1972-7А95].

Описан учебный эксперимент с пружинной пушкой, предназначенный для изучения различных форм механической энергии. Пружинная пушка представляет собой обычную пружину, устанавливаемую на наклонной плоскости, составляющей угол 45° с вертикалью. Если растянуть пружину на 20–30 см и затем отпустить ее, то потенциальная энергия, запасенная пружиной, превращается в кинетическую энергию самой пружины. В этом эксперименте студентам предлагается вычислить массу пружины и коэффициент жесткости пружины и рассчитать дальность полета для различных значений параметров.

3. **Измерение переменной силы с помощью тензодатчиков.** Lee Bruce E. Dynamic force measurement with strain gauges. “Amer. J. Phys.”, **1974**, 42, № 2, 108-110. [РЖ 1974-7А74].

Описана установка для измерения переменной силы в лаборатории общей физики. Установка состоит из четырех тензодатчиков, закрепленных по два на каждой стороне плоской пружины и образующих плечи мостика Уитстона. Анализируемые силы прикладываются к свободному концу пружины. Когда пружина изгибается, изменяется сопротивление тензодатчиков, что приводит к образованию на выходе мостика сигнала напряжения, который наблюдается на осциллографе. Рассмотрен эксперимент, в котором описанная установка используется для измерения центростремительной силы, действующей на маятник.

4. **Нелинейность поведения пружины.** Prior R.M. A nonlinear spring. “Phys. Teach.”, **1980**, 18, № 8, 601. [РЖ 1981-4А112].

Отмечается, что при проведении лабораторных экспериментов и аудиторных демонстраций необходимо учитывать пределы упругости пружин при больших нагрузках, при превышении которых наступает область пластических деформаций. Однако существует также область нелинейности растяжения пружины в зависимости от величины приложенной силы, имеющая место при малых нагрузках. Пружина из нержавеющей стали диаметром 1,6 см и длиной 5 см, круглого сечения, плотно навитая из проволоки диаметром 0,3–0,4 мм, подвешивается вертикально. К нижнему концу пружины прикрепляются различные грузы. Изучается зависимость между массой груза и длиной пружины. Приведены результаты измерений, демонстрирующие нелинейность растяжения пружины при массе грузов до 10 г. Обсуждаются возможные причины нелинейности.

5. **Эксперименты с пружиной больших размеров.** Large-scale experiment. Fyfe F.M., Stroink G., March R.H., Calkin M. G. “Amer. J. Phys.”, **1981**, 49, № 11, 1074-1075. [РЖ 1982-5А107].

Лабораторные опыты с пружинами проводятся при изучении концепций потенциальной и кинетической энергии, закона Гука, простого гармонического движения. Предлагаемый эксперимент с пружиной проводится аналогично традиционным экспериментам, однако в нем используется пружина большого размера, выдерживающая вес человеческого тела (постоянная пружины $k \approx 2500$ Н/м). Пружина прикрепляется к потолку аудитории с помощью специальной подвески, можно использовать несколько скрепленных пружин. В конструкции предусмотрено

устройство безопасности. К нижнему концу пружины прикрепляется платформа для груза, «грузом» могут быть сами учащиеся. Измеряется величина растяжения пружины. Постоянная пружины определяется из графической зависимости силы от растяжения; она также может быть получена из графика зависимости квадрата периода колебаний пружины от массы. Затем учащиеся определяют величину неизвестной массы по величине растяжения пружины и периода колебаний системы «масса–пружина».

6. **Измерения характеристик пружин, не подчиняющихся закону Гука.** Measurements of some properties of non-Hoookean springs. Lancaster G. “Phys. Educ.”, **1983**, 18, № 5, 217-220. [РЖ 1984-2А79].

Дано описание лабораторной работы для студентов первого курса по измерению характеристик пружин. Цель работы заключается в измерении величины, которую можно назвать "силой на единицу деформации". Измерения проводятся двумя способами: статическим (пружина находится в состоянии покоя) и динамическим (пружина совершает гармонические колебания). Особенность работы в том, что при малых нагрузках деформация пружины не подчиняется закону Гука. Студентам заранее не известно о том, что им предстоит лабораторная работа с использованием именно этого случая. Подбором соответствующих нагрузок студенты приходят к нужному результату.

7. **Определение коэффициента жесткости пружины в физическом практикуме вуза методом отброса шарика.** Таран В.Г. Ред. ж. ″Изв. Вузов. Физ.″. Томск, **1986**, 8 с. (Рукопись деп. в ВИНИТИ 5.03.86, № 1484-В).

Описана лабораторная работа по определению коэффициента жесткости пружины методом отброса шарика. В основе описываемого метода лежит закон сохранения механической энергии. Получена формула для расчета коэффициента жесткости по результатам измерения дальности полета шарика, его массы, угла наклона оси пружины к горизонту и величины деформации пружины. Даны рекомендации по постановке лабораторной работы, методике проведения эксперимента и обработке результатов. Указано два варианта использования работы в учебном процессе.

8. **Определение коэффициента Пуассона и частоты биений.** ”Общий физический практикум. Механика.” Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Изд. Моск. ун-та. **1991**. Лаб. работа 19. С. 203-208.

Как известно, при растяжении или сжатии тела, кроме их продольных размеров, меняются и поперечные размеры. Связь между продольными и поперечными деформациями определяется коэффициентом Пуассона μ. Деформации сдвига и растяжения являются в общем случае зависимыми друг от друга, причем модуль сдвига G и модуль упругости E (модуль Юнга) связаны между собой простым соотношением:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} .$$

При колебаниях груза, подвешенного на пружине, обычно рассматривают поступательное движение по вертикали вверх и вниз. Однако это движение не является единственным. Одновременно можно создать и наблюдать и периоди-

ческое вращение груза вокруг его вертикальной оси. Если груз, спокойно висящий, осторожно повернуть вокруг этой оси и отпустить, кроме крутильных колебаний можно наблюдать и вертикальные.

9. **Электрический метод измерения силы.** Красавин Г.В. Пробл. учеб. физ. эксперим. **1997**. № 3. 44, 100. [РЖ 1997.12А157].

Предлагается метод, основанный на линейной зависимости силы упругости от удлинения пружины, с одной стороны, и напряжения на выходе потенциометра от сопротивления, с другой стороны.

6.4. Соударение тел

1. **Определение продолжительности упругого удара баллистическим гальванометром.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 5а. С.111-115.

Наблюдается соударение двух стальных шаров m_1 и m_2, подвешенных бифилярно, т. е. на двух тонких проволоках, одна из которых одновременно служит для подвода электрического тока к шару. Для определения продолжительности удара двух металлических шаров в настоящей работе применяется метод конденсатора. Измерения при этом методе сводятся к тому, чтобы точно определить количество электричества, которое теряет заряженный конденсатор определенной емкости, если его обкладки оказываются замкнутыми в течение промежутка времени, равного продолжительности удара двух исследуемых шаров.

Для измерения начального заряда конденсатора q_0 и заряда q, оставшегося на конденсаторе после соударения, применяется баллистический гальванометр, из теории которого следует, что первое отклонение его катушки пропорционально количеству электричества, протекшему через нее. Поэтому, если разряжать конденсатор через баллистический гальванометр, то его отклонения будут пропорциональны зарядам конденсатора. Теоретический анализ приводит к следующей формуле для времени соударения τ двух металлических шаров:

$$\tau = 2RC\frac{n_0 - n}{n_0 + n},$$

где n_0 – отклонение гальванометра, когда через него проходит весь начальный заряд q_0 конденсатора, а n – отклонение гальванометра, когда через него проходит заряд q, оставшийся на конденсаторе после соударения шаров. Величины сопротивления резистора R, стоящего в цепи разряда конденсатора, и емкости конденсатора известны.

В лабораторной работе изучается зависимость между продолжительностью удара τи относительной скорости шаров v:

$$\tau = kv^z,$$

где k и z – некоторые коэффициенты, постоянные для данных двух шаров. Экспериментально определяются все величины, входящие в это соотношение.

2. **Определение времени соударения шаров при упругом ударе при помощи баллистического гальванометра.** Физический практикум. Под ред.

проф. В.И. Иверoновой. М., **1951.** Задача 12. С. 90-94. **1953, 1955**. Лаб. работа 12. С. 92-96.

3. **Опыт для определения коэффициента восстановления.** Ван-Нейм (Experiment for measuring the coefficient of restitution. Van Name F. W., Jr), Amer. J. Phys., **1958**, **26**, № 6, 386-388. [РЖ 1960-1-93].

При ударе подвижного шара о неподвижный изменяется нормальная (к поверхности шаров в точке удара) составляющая скорости. Определяется отношение ее значений до и после удара. Из этого отношения находится коэффициент восстановления, который оказывается независимым от угла удара.

4. **Прибор для демонстрации закона сохранения момента количества движения.** Marcley Robert G. Air-suspended pucks for momentum experiments. “Amer. J. Phys.”, **1960**, 28, 7, 670-674. [РЖ 1961-5А67].

Прибор состоит из двух шайб, расположенных на гладком горизонтальном столе. В центре каждой шайбы укреплена вертикальная трубка, по которой сверху подается сжатый воздух. Таким образом, между шайбой и столом создается воздушный слой, уменьшающий трение. Одну из шайб делают цилиндрической, другую – с закругленными краями, так что контакт между ними осуществляется в одной точке. При помощи такой системы можно изучать законы вращательного движения и, в частности, закон сохранения момента количества движения. Для создания газового слоя между шайбой и столом может быть также использован и сухой лед.

5. **Исследование соударений стальных шаров.** Egidy Till von. Utersuchungen uber den Stoβ von Stahlkugeln. “Z. angew. Phys.”, **1961**, **13**, № 10, 475-478. [РЖ 1962-4А51].

Два хорошо отполированных одинаковых шара из твердой стали подвешены на нитях так, что расстояние между точками подвеса меньше расстояния между центрами шаров. Если развести шары и отпустить их, то шары после первого столкновения отскакивают и продолжают соударяться все с большей частотой, так что возникает слышимый повышающийся тон, который, наконец, обрывается в пределах слышимости. Поставлена задача изучить это явление повышения частоты и в частности определить верхнюю границу частот. Шары имели диаметр 7 см, вес 1435 г. Проволока подвеса (стальная) имела диаметр 0,25 или 1 мм; применялись также нитяные подвесы длиной 10, 25 и 45 см. Полурасстояние между точками подвеса составляло 0,5 см. Соударения подсчитывались счетчиком, измерялось повышение частоты и определялась потеря энергии при каждом соударении. Продолжительность соприкосновения шаров и окончательная частота оценивались с помощью осциллографа. В отличие от обыкновенного (математического) маятника шары не возвращаются к вертикальному положению, вследствие чего период колебаний зависит от максимального отклонения и от энергии системы. Увеличение частоты при соударениях зависит от потери энергии. Относительная потеря энергии для энергий столкновений, превышающих 1500 эрг, зависит от подвеса, при меньших энергиях она почти постоянна. В процентном отношении потеря энергии при соударении для энергий, меньших 1500 эрг, <0,35%. Слышимый при соударениях тон создается попеременным засасыванием и выталкиванием воздуха в промежуток между шарами. Соударения прекращаются, когда максимальное

расстояние между шарами становится порядка шероховатости поверхности шаров; в этом случае продолжительность соприкосновения больше интервала между соударениями. Окончательная частота зависит от силы соударения и составляет 600–800 Гц. Подобные же явления можно наблюдать и со стеклянными шарами.

6. **Определение коэффициента восстановления и времени соударения упругих шаров.** Физический практикум. Под ред. В.И. Ивероновой. М., **1962**. Задача 12. С. 93-97. **1967**. Задача 12. С. 124-129.

7. **Закон сохранения количества движения.** Daw Harold A., MitchellJ. Preston. Conservation of momentum experiment. “Amer. J. Phys.”, **1962**, 30, № 7, 530-531. [РЖ 1963-1А96].

Описывается опыт, демонстрирующий закон сохранения количества движения и закон сохранения момента количества движения. Опыт проводится про помощи двух шариков одинаковой массы, симметрично подвешенных на шайбе, фотоаппарата и импульсной лампы, дающей 25 вспышек в 1 секунду. Шайбу надевают на объектив фотоаппарата, установленного на треножнике объективом вниз, и фотографируют движущиеся шарики до столкновения и после столкновения. Скорость шариков может быть рассчитана по расстоянию между отдельными изображениями шариков на фотографии. Таким образом может быть проверен закон сохранения количества движения в векторной форме. Если нанести на шарики метки и првести их во вращение, подобным образом можно проверить закон сохранения момента количества движения. Приведены уравнения и расчеты.

8. **Эксперимент по моменту количества движения для лаборатории вводного курса физики.** Palmieri J. N., Strauch Karl. An experiment on a angular momentum for the introductory laboratory. [РЖ **1963**-9А46].

Описан эксперимент, предназначенный для вводного курса физики для студентов, специализирующихся по физическим наукам, и способствующий усвоению принципа сохранения момента количества движения. Стальной шарик, движущийся на расстоянии $\vec{r}$ от неподвижного вала и обладающий линейным количеством движения $\vec{p}$, испытывает совершенно неупругое столкновение с твердым телом, обладающим свободой вращения вокруг вала. Момент количества движения шарика до столкновения сравнивается с моментом количества движения вращающейся системы после столкновения; расхождение не превышает 2%. Приведены описание и фотоснимок прибора и таблица полученных значений.

9. **Момент импульса силы и момент количества движения.** Kroncke Helmut. Drehimpuls und Drall. “Prax. Naturwiss.”, **1963**, **А 12**, № 4, Physik, 89-91. [РЖ 1963-11А94].

Описывается опыт по проверке закона сохранения момента количества движения. Установка состоит из горизонтального стержня с грузами на концах, который может вращаться вокруг вертикальной оси, и тележки с кольцевой пружиной в передней части. Направляющий рельс устанавливают так, что тележка при движении ударяет по одному из грузов, при этом стержень приходит во вращение. Если скорость тележки до соударения v_1, после соударения v_2, то импульс, переданный грузу, равен $\int pdt = M\left(v_1 - v_2\right)$, где M – масса тележки, а мо-

мент импульса соответственно равен $\int Ddt = aM\left(v_1 - v_2\right)$, где a – расстояние от груза до оси вращения. Если рассчитать момент инерции груза I и измерить угловую скорость ω, можно показать, что $\int Ddt = I\omega$. Кроме того, можно убедиться в том, что кинетическая энергия, полученная стержнем при упругом соударении, равна кинетической энергии, отданной тележкой. Из результатов измерений следует, что погрешность составляет 10–15% и может быть снижена до 1–5 %.

10. **Изменение импульса при упругом и неупругом ударе.** Krauns Peter. Impulsanderung bei elastischem und unelastischem Stoβ. “Prax. Naturwiss.”, **1963**, **A12**, № 5, Physik, 122-123. [РЖ 1963-11А95].

Описываются опыты, при помощи которых можно продемонстрировать и рассчитать изменение импульса при упругом и неупругом ударе. Опыты проводятся при помощи настольных весов, разновесов, мячика от настольного тенниса и стального шарика. Мячик падает с некоторой высоты на чашку весов и подскакивает вверх, при этом он отдает чашке количество движения $2m_1v$. Сила, с которой мячик ударяет по чашке, определяется разновесом по максимальному отклонению стрелки. Когда на чашку с той же высоты падает стальной шарик, он остается лежать на чашке, передав ей количество движения m_2v. Сила удара определяется так же, как и в первом случае, но из полученного результата нужно вычесть вес шарика. Так как шарики падали с одинаковой высоты и скорости их в момент удара были одинаковыми, то, зная массы шариков, можно показать, что в первом случае изменение импульса было равно $2m_1v$, а во втором – m_2v. Приведены расчеты, согласно которым ошибка составляет ~6%.

11. **Количественное изучение закона сохранения количества движения в двух измерениях при помощи дисков, приводимых в движение на прямоугольной «воздушной подушке».**Webb Helen H. Quantitative study of linear momentum in two dimensions by means of pucks operated on a rectangular air table. ″Amer. J. Phys.″, **1965**, 33, № 12, 1027-1032. [РЖ 1966-6А81].

Описан прибор, представляющий собой плоский ящик, в верхней поверхности которого проделаны многочисленные мелкие отверстия, образующие прямоугольную сетку, сквозь которые вытекает воздух, нагнетаемый под несколько повышенным давлением внутрь ящика и образующий «воздушную подушку» на поверхности. На этой воздушной подушке могут скользить два диска, сталкиваясь друг с другом. Траектории их движений отмечаются следами на листе вощеной бумаги. При помощи описанного прибора изучаются законы сохранения количества движения в двух измерениях, отношение начальной и конечной кинетических энергий, углы между линейными скоростями обоих дисков. Даны подробные указания относительно конструкции прибора и проведения экспериментов. Приведены результаты экспериментов.

12. **Регистрация соударений стального шарика с вогнутой поверхностью при помощи записи на магнитную ленту.** Grull Kurt. Der Kugeltanz-magnetographisch registriert. ″Prax. Naturwiss.″, **1966**, A15, № 12, ″Physic″, 315-317. [РЖ 1967 8А47].

Полированный стальной шарик диаметром 6 мм падает с высоты 14 см на вогнуто-выпуклую линзу, лежащую вогнутостью кверху. При помощи кристалла

сегнетовой соли, расположенного под линзой, удары шарика о линзу преобразуются в электрические импульсы, которые подаются на радиовход магнитофона и регистрируются на магнитофонной ленте. После обработки ленты в ферромагнитной суспензии на ней остаются четкие метки в количестве до 550. Предварительно на ленту при помощи импульсного прибора наносят отметки времени. Магнетограмму проецирую на экран. Из анализа результатов опыта следует, что время между двумя ударами уменьшается в геометрической прогрессии. Кроме того, можно рассчитать относительную потерю энергии при соударениях и др.

13. **Регистрация удара при помощи записи на магнитофонной ленте.** Brockmeyer Heinrich. Der Kraftstoss – magnetographisch registriert. ″Prax. Naturwiss.″, **1967**, A 16, № 9, Physik, 244-246. [РЖ 1968-3A55].

Вагончик движется по рельсам до упора, снабженного амортизирующей пружиной, и после удара о пружину откатывается назад. На вагончике установлена гребенка с расстоянием между зубьями ≈1 мм. Гребенка пересекает луч света, падающий на фотоэлемент, и импульсы тока регистрируются магнитофоном. Магнитофонная лента после регистрации протягивается через тонкий железный порошок, который пристает к намагниченным областям. ″Магнитное изображение″ импульсов переносится на бумагу контактным способом. По расстоянию между импульсами вычисляют зависимость скорости вагончика от времени в течение удара, сжатие пружины и другие параметры удара.

14. **Столкновения с потерей энергии; эксперимент на пневматическом треке.** Still John L. Lossy cjllisions: an air track experiment. ″Phys. Teacher.″, **1969**, 7, № 4, 225-226. [РЖ 1970-1A60].

Для демонстрации зависимости коэффициента ″восстановления″ e от относительной скорости соударения предлагается воспользоваться пневматическим треком. К салазкам трека жестко крепится пробирка, частично наполненная водой. Представлена кривая логарифма расстояний между последовательными соударениями с нижним концом наклонного трека, как функция числа соударений. Оказываетя, что даже в тех случаях, когда между последовательными соударениями вода не успевает успокоиться, коэффициент ″восстановления″ e остается тем же. Приведена также графическая зависимость коэффициента ″восстановления″ e от количества воды в пробирке. Указывается, что при малых количествах воды из элементарных соображений можно получить приближенную формулу: $e = (m_0 e_0 - m_w)/(m_0 + m_w)$, где m_0 – масса салазок, m_w – масса воды, e_0 – коэффициент ″восстановления″ при m_w=0.

15. **Эффект усиления скорости при ударе идеально упругих тел.** Harter William G. Velocity amplification in cjllision experiments involving superballs. ″Amer. J. Phys.″, **1971**, 39, № 6, 656-663. [РЖ 1971-12A108].

Описан поучительный опыт из механики: если устройство, состоящее из резинового шара диаметром ~8 см и воткнутого в него металлического стержня , сбросить с некоторой высоты, то при ударе о пол стержень вылетает из шара со скоростью, достаточной, чтобы удариться о потолок комнаты средней высоты. Отношение величины скорости, с которой стержень покидает шар после удара к величине скорости в момент удара, автор называет коэффициентом усиления

скорости стержня. Коэффициент усиления скорости зависит от отношения масс шара и стержня n. Оно максимально ($n \cong 1{,}8$), когда масса шара примерно в 5 раз больше массы стержня. При этом высота подъема стержня более чем в 3 раза превышает первоначальную высоту. В статье дано объяснение опыта, приводятся выражения для коэффициента усиления скорости как функции n, предложена аналоговая схема для моделирования эксперимента, рассмотрено как линейное, так и нелинейное приближение. Приведены рисунки, поясняющие постановку эксперимента и графики с результатами теоретических и экспериментальных исследований эффекта.

16. **Изучение времени соударения шарика с плитой при помощи баллистического гальванометра.** Работа 9. Руководство к лабораторным работам по физике. Часть I. Механика. Молекулярная физика. Под ред. А.П. Максименко. Днепропетровск. гос. ун-т. **1973**. Работа 1–9. С. 69-73.

17. **Две работы лабораторного практикума по механике.** Токмашев М.Г., Кундозерова Л.И. В сб. ″XII науч. Конф. Новокуз. Гос. Пед. Ин-т. Вып. 3. Секц. Физ.-мат. И общетехн. Дисциплин. Тезисы докл.″ Новокузнецк, **1974**, 47-49. [РЖ 1975-4А76].

Представлены основные идеи по изготовлению установок и методике выполнения двух лабораторных работ по механике: 1) проверка закона сохранения импульса; 2) изучение затухающих и вынужденных колебаний. В описаниях работ приведены краткая теория изучаемых явлений и необходимая литература. Описаны конструкции установок, даны советы по методике выполнения работ и предлагаются контрольные вопросы.

18. **Опыты по косому соударению.** Zeuner Hermann. Versuche zum schiefen Stoss. ″Prax. Naturwiss. Phys.″, **1975**, 24, № 11, 292-295. [РЖ 1976-5А105].

В опыте по соударению подвешенных шаров предлагается отмечать метками проекции шаров на горизонтальный стол в положениях равновесия и максимального отклонения. По полученным меткам легко и наглядно восстанавливаются импульсы тел до и после соударения. Рассматриваются упругое соударение шаров равной и различной масс и неупругое соударение. В опытах возможна проверка закона сохранения энергии. Помещение внутрь шаров магнитов позволяет исследовать соударение взаимодействующих тел.

19. **Изучение сохранения углового и линейного моментов на столе с воздушной подушкой.** Rockefeller Roger R. Conservation of angular and linear momentum on an air table. ″Amer. J. Phys.″, **1975**, 43, № 11, 981-983. [РЖ 1976-5А106].

Описан лабораторный эксперимент по механике, в котором изучается одновременное сохранение углового и линейного моментов в механической системе. Лабораторное оборудование состоит из стола с воздушной подушкой, небольшого диска с мишенью, которая может перемещаться по диску, и воздушного пистолета. Диск приводится в движение при помощи пули массой в 1 г, выпущенной из пистолета в мишень на диске. Диск совершает поступательное движение для случая, когда мишень расположена в центре диска, и поступательное и вра-

щательное – когда мишень расположена на краю диска. Приведена теория эксперимента и анализ его результатов.

20. **Опытная проверка закона сохранения импульса.** Ватахов К., Кокошаров И. Опитна проверка на закона за запазване на импулса. ″Мат. И физика (НРБ)″, **1975**, 18, № 2, 43-45. [РЖ 1975-10А60].

Описана методика выполнения работы по проверке закона сохранения импульса путем анализа стробоскопических снимков соударения двух упругих бильярдных шаров одинаковых размеров и масс на горизонтальной плоскости. Показано, что вращение шаров можно не принимать во внимание.

21. **Количественные опыты со столкновениями для демонстрации закона сохранения импульса.** Ziebur Fredi. Quantitative Stossversuche zum Impulssatz. ″Prax. Naturwiss. Phys.″, **1976**, 25, № 7, 169-174. [РЖ 1977-2А92].

Описана установка для демонстрации закона сохранения импульса в случае удара шаров. Установка состоит из желоба с горизонтальным участком, оканчивающимся на краю стола. По желобу в опыте скатывается ударяющий стальной шар (I). У края стола на поворотной подставке находится другой (стальной или пластилиновый) шар (II). После удара шары летят на пол, как горизонтально брошенные тела. По высоте и длине полета определяется скорость до удара шара (I) и скорость после удара шаров (I) и (II). Приводятся рекомендации по юстировке прибора и методике выполнения работы. Предложен вариант теории косого упругого и неупругого удара. Приводятся типичные результаты. Точность проверки закона в упругом ударе 3% и выше, в неупругом ударе несколько ниже. С помощью указанной установки хорошо проверяется закон сохранения энергии.

22. **Новый метод измерения коэффициента восстановления.** Bernstein Alan D. Listening to the coefficient of restitution. ″Amer. J. Phys.″, **1977**, 45, № 1, 41-44. [РЖ 1977-9А82].

Описан лабораторный эксперимент по определению коэффициента восстановления при столкновении шара с горизонтальной поверхностью. В эксперименте шарик свободно падает с небольшой высоты на горизонтальную поверхность и затем несколько раз подпрыгивает на ней. Метод измерений основан на зависимости коэффициента восстановления ε_n от времени между n-м и $(n+1)$-м соударением шарика с поверхностью, числа соударений n и скорости шарика при 1-м соударении. Звук, производимый шариком при ударе, фиксируется микрофоном, усиливается; показания усилителя регистрируются самописцем. В экспериментах регистрируется время между двумя последовательными столкновениями шарика. Скорость шарика при 1-м соударении может быть определена по формуле $mgh_0 = mv_0^2/2$, где h_0 – высота, с которой шарик падает. Экспериментальные данные обрабатываются на ЭВМ. Приведены результаты, полученные в экспериментах с пластмассовым шаром диаметром 1,56 см, падающим с высоты 1 м на гладкую каменную плиту. Найдено, что коэффициент восстановления уменьшается с увеличением относительной скорости столкновения.

23. **Баллистические весы для измерения импульса тела.** Achilles Manfred. Ballistische Waage zur Messung des Impulses. ″Prax. Naturwiss. Phys.″, **1977**, 26, № 2, 36-38. [РЖ 1977-8А110].

Описано устройство для непосредственного измерения импульса падающего стального шарика. Устройство состоит из рычажных весов, на одной чашке которых установлена под углом пластина, на другой чашке – противовес. На пластину падают стальные шарики, удерживаемые до опыта электромагнитом. Импульс шарика во время удара о пластину измеряется в относительных единицах по отклонению весов. Из-за неидеальности удара пластину приходится установить под углом не 45°, а 41,5° к горизонту. Описаны эксперименты по исследованию зависимости импульса от массы шарика и времени его падения.

24. **Изучение фотографических методов в лабораторных работах по механике и молекулярной физике.** Бухман С.В. В сб. ″Вопр. методики преподавания физики в вузе″. Томск, **1977**, 107-110. [РЖ 1978-1А51].

Изучение методов экспериментальной физики должно продолжаться в специальных курсах, а не ограничиваться курсом общей физики. С другой стороны, нецелесообразно сводить фотопрактикум к обучению студентов обработке фотоматериалов при обычной фотосъемке. Даны рекомендации по использованию метода скоростной фотографии в курсе физического практикума с помощью простой техники в следующих лабораторных опытах. Первая работа физического практикума по разделу ″Механика″ связана с исследованием упругого и неупругого соударения шаров. Шары на подвесах длиной 1,5–2 м располагаются так, чтобы расстояние между точками подвеса было равно сумме радиусов шаров, что позволяет производить соударения под разными углами. Ниже шаров на расстоянии 1 м устанавливается фотокамера. Соударение шаров фотографируется в затемненном помещении на фоне черного экрана в стробоскопическом освещении. По известному времени между вспышками рассчитывается скорость шаров до и после удара. Вторая работа – по разделу ″Молекулярная физика″ – заключается в нахождении коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом отрыва капель, для чего требуется измерить диаметр шейки капли в момент ее отрыва. В последнем случае во время съемки следует перемещать фотоаппарат, чтобы новое изображение приходилось на незасвеченный участок пленки. По аналогичной методике может быть исследован процесс дробления капли в потоке воздуха.

25. **Определение времени и средней силы удара двух шаров.** Полищук Д.И. и др. Физический практикум для нефизических специальностей. Часть I. (Учебное пособие). Одесса. **1977**. Задача 3. С. 22-25.

26. **Эксперименты с осевыми ударами стержней.** Britton W.G.B., Fendley J.J., Michael M.E. Longitudinal impact of rods. A continuing experiment. ″Amer. J. Phys.″, **1978**, 46, № 11, 1124-1130. [РЖ 1979-5А70].

Описан цикл лабораторных экспериментов по курсу физики вузов, проводимых в течение нескольких лет обучения. Эксперимент первого года обучения состоит в измерении времени контакта металлического стержня. Ударяющегося о стальное основание, как функции силы ударов, длины, диаметра и материала стержня. Время контакта измеряется электромагнитным реле времени. Студенты

второго года обучения проводят более детальное исследование осевых ударов двух стержней. Описана методика проведения экспериментов со сталкивающимися стержнями для студентов третьего года обучения.

27. **Об экспериментальном определении времени взаимодействия в процессах столкновения.** Zur experimentellen Bestimmung der Stoβzeit bei Stoβvorgangen. Riedel G. ″Phys. Sch.″, **1982**, 20, № 6, 247-248. [РЖ 1983-1А107].

Описана простая схема, позволяющая экспериментально измерять время взаимодействия сталкивающихся тел. В качестве одного из тел используют металлический шарик, подвешенный на проводящей нити, другим – служит массивная гиря с тщательно зачищенным дном, о которое ударяется шарик. Во время их касания замыкается электрическая цепь, запускающая вычислительное устройство Polydigit. Время столкновения, определенное в таком эксперименте, порядка 10^{-5} с.

28. **Как функционирует цепочка шаров?** How does the ball-chain work? Herrmann F., Seitz M. ″Amer. J. Phys.″, **1982**, 50, № 11, 977-981. [РЖ 1983-4А124].

Исследовано столкновительное движение в горизонтальной цепочке упругих шариков, подвешенных на тонких вертикальных нитях таким образом, что в исходном состоянии они касаются друг друга. Показано, что поведение такой сплошной цепочки шаров может быть описано системой пространственно-разделенных точечных масс, соединенных пружинами, упругая возвращающая сила F которых связана со смещением от положения равновесия Δx соотношением $F = k\left(\Delta x\right)^n$, где показатель n =1,5. Проведено численное моделирование описанной цепочки шаров.

29. **Соударение неодинаковых шаров.** Burger Wolfgang. Zusammenstoβe – keine Chancengleicheit fur ungleiche Partner. ″Phys. Unserer Zeit″, **1983**, 14, № 5, 140-143. [РЖ 1984-1А89].

Рассматриваются возможности демонстрации законов сохранения импульса и механической энергии на примере соударения двух упругих шаров неодинакового диаметра, расположенных рядом на бифилярных подвесах. Рекомендован удобный графический способ расчета результатов соударений на координатной плоскости. Рассмотрены эксперименты с тележками, на которых закреплены соударяющиеся шары, и опыты с соударяющимися упругими цилиндрами.

30. **Определение времени контакта при ударе шара о преграду.** Гладков Н.А., Беззубов Ю.И.. Сб. научно-методич. статей по физике. М. В. школа. Вып.10. **1984** г. С. 90-98.

31. **Изучение механических свойств полиборосилоксана методом соударения.** Impact studies on the mechanical properties of polyborosiloxane. Juhasz A., Tasnadi P., Fabry L. ″Phys. Educ.″, **1984**, 19, № 6, 302-304. [РЖ 1985-113].

Предлагается простое лабораторное устройство для изучения механических свойств и процессов деформации в полимерах. В качестве образца полимера используется пластина полиборосилоксана, в структуре которого некоторые атомы Si в непрерывной цепочке Si–O–Si заменены атомами B. Исследуемый образец помещается в стальной блок, опущенный в термостатирующую жидкость. На высоте $l \leq 1$м над поверхностью образца находится электромагнит, притяги-

вающий металлический шарик. При отключении электромагнита шарик падает нба поверхность образца, и, в зависимости от степени упругости соударения с образцом поднимается затем на некоторую высоту h. По величине $(1-h/l)$ можно судить о части механической энергии шарика, затраченной на деформационные процессы. Приведены экспериментальные зависимости энергии деформации от высоты подъема шарика; качестве параметров выбраны диаметр шарика и температура образца (в диапазоне 9–40°С).

32. **Возбуждение сложной структуры при столкновениях.** Exitation of a composite struture by collision. Newby Neal D. ″Amer. J. Phys.″, **1984**, 52, № 8, 745-748. [РЖ 1985-3А72].

Описана модель для изучения колебаний сложной структуры, возникающих при столкновении 2-атомной молекулы с упругой преградой. Молекула смоделирована двумя шариками равной массы, соединенными пружиной с коэффициентом упругости k_1. Преграда смоделирована пластиной пренебрежимо малой массы, соединенной со стенкой с помощью пружины с коэффициентом упругости k_2. Шарики движутся по направлению к пластине с общей скоростью v_0. После столкновения с пластиной шарики движутся обратно уже с неодинаковыми скоростями v_1 и v_2, т. е. Возникают колебания ″молекулы″. Приведена диаграмма в пространстве скоростей (v_1, v_2), иллюстрирующая динамику этих колебаний. Колебания развиваются существенно различным образом для случаев $k_1 < k_2$ и $k_1 > k_2$. Проведен расчет зависимости энергии колебаний от параметра $\beta = k_1/k_2$. Зависимость имеет квазипериодический характер. Максимальный коэффициент трансформации начальной кинетической энергии в энергию колебаний составляет 23 % при β = 2,2. Для $\beta \approx 3{,}9$ наблюдается эффект двойного удара, при котором ″молекула″ отделяется от пластины, но через некоторое время снова соударяется с ней.

33. **Прибор для измерения времени удара.** Pristroy na mereni doby razu. Kubes J. Sb. Red. Fak. Plzni. Elektron. **1989**. 1. С. 51-57. [РЖ 1990 4А149].

Рассмотрена теория определения времени удара двух тел, выведена расчетная формула, описан прибор для измерения времени удара. Принцип измерения времени соударения двух проводящих шариков основан на том, что время их соприкосновения равно времени прохождения электрического импульса тока определенной частоты, зарегистрированного с помощью электронного счетчика. Полученные эмпирические данные сравниваются с теоретическими значениями. Кратко описаны возможности использования прибора в процессе изучения физики в средней и высшей школе.

34. **Определение времени соударения шаров и модуля Юнга.** Общий физический практикум. Механика. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Изд. моск. ун-та. **1991**. Лабораторная работа 20. С. 208-214.

Изучается соударение шаров, которые первоначально соприкасаются, будучи подвешенными на нитях одинаковой длины. При отведении одного из шаров в сторону (при сохранении нити натянутой) и предоставлении затем ему возможности двигаться с нулевой начальной скоростью в поле силы тяжести в сторону покоящегося шара и происходит соударение. При столкновении оба шара деформируются, что определяет возникновение упругих сил. Кинетическая энергия шаров в процес-

се соударения переходит в потенциальную и опять в кинетическую (если удар упругий). Таким образом, теоретический анализ движения шаров при их соударении проводится с использованием законов кинематики движения материальной точки в поле силы тяжести, закона сохранения механической энергии шаров, состоящей из кинетической, упругой и потенциальной их энергий. В результате этого анализа получаются выражения для времени соударения

$$\tau = 1{,}47R\left[100\pi^2 (gH)^{-1/2}\rho^2\left(1-\mu^2\right)^2 E^{-2}\right]^{1/5}\alpha^{-1/5}$$

и модуля Юнга

$$E = 10\pi\rho\left(1-\mu^2\right)\left(\frac{1}{gH\alpha^2}\right)^{1/4}\left(\frac{1{,}47R}{\tau}\right)^{5/2},$$

где R – радиус шаров, H – длина нитей подвеса, ρ – плотность материала шаров, μ – коэффициент Пуассона материала шаров.

Схема расположения шаров в проводимом эксперименте изображена на рисунке. Шары и нити подвеса – проводящие. Это позволяет собрать электрическую цепь, время замыкания которой определяется временем соприкосновения шаров. В состав установки входит электронный измеритель временных интервалов, а также осциллограф для визуализации импульса напряжения, соответствующего замкнутому состоянию цепи.

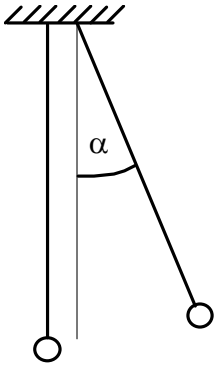


Схема расположения шаров в эксперименте по изучению их соударения

Эксперимент состоит в следующем. Один из шаров отклоняется на измеряемый угол α (в пределах от одного до пятнадцати градусов с шагом в один градус) и отпускается. Измеряется время соударения τ, которое изменяется по мере изменения угла α. На основании проделанных измерений строится график зависимости времени соударения шаров τ от величины $\alpha^{-1/5}$. Крутизна наклона A получающейся при этом линейной зависимости содержит информацию о величине модуля Юнга материала шара. Модуль Юнга вычисляется по формуле

$$E = 10\pi\rho\left(1-\mu^2\right)\left(\frac{1}{gH}\right)^{1/4}\left(\frac{1{,}47R}{A}\right)^{5/2}.$$

Указанные измерения проводятся для стальных и латунных шаров.

Сопоставление углов отклонения шаров в результате упругого и неупругого ударов проводится при использовании пластилинового шара.

35. **Определение момента инерции стержня из упругого удара.** В.В. Ларионов, М.С. Иванкина, Л.Т. Мурашко, и др. Физический практикум. Томский политехн. университет. **1993**. Работа 1-18. С. 28-30.

36. **Определение кинетической энергии тела по данным измерений деформации.** Perez R.J., Castellvi F., Rosell J.I. Phys. Educ. **1996**. 31. № 4. 218-222. [РЖ 1997.09А80].

Простая техника измерения деформации произведенной в пластическом материале посредством падения мяча, может быть использована для вычисления кинетической энергии мяча. Варьируя параметры в этом простом эксперименте, можно получить точные результаты и дать студентам хорошее понимание метода измерений энергии.

37. **Определение времени соударения металлических шаров.** Иноземцев В.А., Иноземцева С.В., Степанищева М.Н. Преподавание физ. в высш. шк. **1996**. № 8. 21-23, 99. [РЖ 1997. 11А131].

Предлагается несколько способов определения времени соударения металлических шаров с помощью осциллографа.

38. **Автоматизированная установка для определения модуля Юнга из измерений скорости и времени соударения шаров.** Авакянц Л.П., Желтяков П.А., Китов И.А., Салецкий А,М., Червяков А.В. УФО-**98**, СЭ-31.

39. **Исследование неупругого механического удара с помощью лабораторной модели строительного копра.** Колпаков А.Б.СФП-**2002**, С.-П. Тез. Докл. М.-2002, с 114.

40. **Простой способ измерения скорости соударения при пластическом столкновении.** A simple way to measure impact velocity in a plastic collision. Gluck P. Phys. Educ.**2005**. 40. № 5. 418-420. [РЖ 18. Физика Ч. I. 2007. № 6. 18А.128].

41. **Изучение упругих свойств анизотропных тел.** Ларин В.Л., Назаров П.А., Сотириади Г.Н. Проблемы учебного физического эксперимента : Сб. научных трудов. Вып. 24. Материалы 11 Всеросс. Научно-практ. конф. “Учебный физический эксперимент : Акт. проблемы. Совр. решения”, Москва, 2006. М., 2006. 44-45. [РЖ 09.01. -18А. 102].

Предлагается описание прибора и и методика определения упругих характеристик анизотропного тела (древесины). Решение задачи основано на измерении высоты H, с которой падает изотропный шар на деревянную пластину, и высоты оскока h. Коэффициент упругости в этом случае может быть легко рассчитан. Точность измерений ≈ 10–12%. Устройство может быть использовано в учебном лабораторном практикуме.

Глава 7
КОЛЕБАНИЯ

7.1. Физический маятник

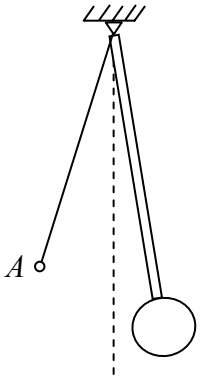
1. **Определение напряжения силы тяжести посредством маятника.** А.П. Соколов. Физический практикум. Задача 4. ОНТИ. **1937**. С. 94-100.

Упражнение 1. Определение *g* методом Борда.

Маятник состоит из латунного шарика *A*, подвешиваемого на тоненькой проволоке перед часами с секундным маятником. Для определения периода колебаний маятника фиксируют с помощью секундомера моменты времени, когда колебания двух маятников совпадают по фазе.

Ускорение свободного падения g находится из соотношения

$$T = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}\cdot\left(1+\frac{1}{4}\sin^2\frac{\alpha}{2}\right),$$

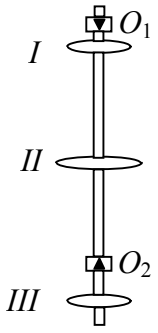


где α – угол отклонения маятника от вертикали, $l = K/Ma$ – приведенная длина физического маятника, $K = M\left(a^2 + 2r^2/5\right)$ – момент инерции маятника относительно оси колебаний, M – масса маятника, a – расстояние между осью колебаний и центром тяжести маятника.

С поправкой на то, что маятник качается в воздухе (а не в вакууме), истинное значение ускорения свободного падения находится по формуле

$$g' = g\frac{M}{M-m},$$

где m – масса вытесняемого шариком воздуха.



Упражнение 2. Определение *g* оборотным маятником.

Оборотный маятник состоит из металлического стержня длиною свыше одного метра, в любом месте которого можно закреплять передвижные тяжелые чечевицы *I*, *II*, *III* и опорные призмы O_1 и O_2. Ускорение свободного падения определяется формулой

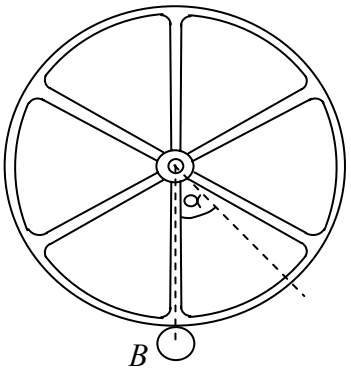
$$g = \frac{\pi^2\left(a_1 + a_2\right)}{T^2},$$

где a_1 и a_2 – расстояния от центра тяжести оборотного маятника до таких осей качания, что периоды колебаний около каждой из них одинаковы и равны T. Эта формула показывает, что при определении *g* оборотным маятником главная задача состоит в нахождении на маятнике таких двух асимметричных относительно центра тяжести положений качаний, при колебании около которых период колебаний оставался одним и тем же. Тогда расстояние между этими осями даст

нам величину a_1+a_2, входящую в вышеприведенную формулу. Период T определяется секундомером.

2. **Определение момента инерции махового колеса методом колебаний.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 2b. С.88-90.

На обод махового колеса радиуса r прикрепляется при помощи винта вспомогательный шарик B массы m и радиуса ρ, вследствие чего безразличное равновесие системы становится устойчивым.



Поэтому маховое колесо, выведенное из положения равновесия, начинает совершать колебания с некоторым периодом T и амплитудой α. Для достаточно малой амплитуде колебаний, а также в пренебрежении силами трения и сопротивлением воздуха, для момента инерции колеса получается формула:

3. **Определение ускорения силы тяжести с помощью маятника.** Физический практикум. Под ред. проф. В. Иверoновой. М., **1951**. Задача 4. С. 46-51.

4. **Простые инерционные весы для количественных измерений.** Эдуардс, Брадфорд (Simple inertia balance suitable for quantitative measurements. Edwards Ray L., Bradford James M.), Amer. J. Phys., **1958**, **26**, 6, 399. [РЖ 1959-5-9729].

Предлагается простое устройство для сравнения масс, исключающее действие силы тяжести: тело прикрепляется к концу стержня, другой конец которого закреплен неподвижно; такая система приводится в колебания в горизонтальной плоскости. Масса определяется по величине периода колебаний.

5. **Определение момента инерции махового колеса методом колебаний.** Физический практикум. Часть 1. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск. **1959**. Работа 12. С. 56-57.

6. **Экспериментальное и методическое изучение момента инерции при помощи самодельной вращающейся оси.** Ewert Erich. Die experimentelle und methodische Behandlung des Tragheitsmoments mit einer selbstgebauten Drillachse. “Prax. Naturwiss.”, **1960**, A9, № 9, Physik, 243-245. [РЖ 1961-5A66].

Обычно для определения момента инерции пользуются опытом с крутильными колебаниями проволоки, к которой подвешивается тело. Наряду с этим можно определять момент инерции при помощи предложенной Полем “вращательной оси”, пользуясь упругостью на изгиб спиральной ленточной пружины, один конец которой закреплен на оси, а другой на раме, в гнездах которой вращается ось. Тело, момент инерции которого относительно оси определяется, можно закреплять на выступающем из рамы конце “вращательной оси”. Приведено описание прибора и его применение к определению момента инерции.

7. **Определение момента инерции при помощи вращающейся оси.** Аренс Кристиан. Bestimmung des tragheitsmoments mit einer Drillachse. Ahrens Christian. “Prax. Naturwiss”, **1960**, **A9**, № 12, Physik, 318-319. [РЖ 1961-8A62].

В дополнение к статье (РЖФиз, 1961, 5А66) описывается способ определения момента инерции при помощи оси и втулки велосипедного колеса. Ось устанавливают вертикально в гнездах рамы, спиральную пружинку прикрепляют одним концом к втулке, другим к раме. Тела, момент инерции которых относительно оси нужно определить, закрепляют на столике, установленном на втулке.

8. **Прибор для измерения моментов инерции.** Fouille A. Inertiemetre A. F. "Bull. physiciens", **1964**, 58, № 477, 775-782. [РЖ 1964-1А77].

Прибор предназначен для измерения момента инерции тела произвольной формы относительно произвольной оси. Прибор состоит из прямоугольной рамки, через медианную плоскость которой проходят две полуоси. Между полуосями зажимают испытуемое тело так, чтобы оно оказывается внутри рамки. Рамка вместе с телом может качаться, опираясь на выступающие концы полуосей. На верхнюю и нижнюю перекладины рамки можно надевать грузы с известной массой и моментом инерции. Измеряют период качания рамки с зажатым телом. Момент инерции вычисляется по формуле, аналогичной формуле качания маятника.

9. **Точное измерение зависимости периода маятника от его амплитуды.** Smith Malcolm K. Precision measurement of period vs amplitude for a pendulum. "Amer. J. Phys.", **1964**, 32, № 8, 632-633. [РЖ 1965-2А71].

Маятник представляет собой цилиндрический железный брусок, подвешенный на стальной струне длиной l =3 м. Струна проходит между двумя линзами оптического конденсатора, который фокусирует лучи света от автомобильной лампы на малое отверстие в экране фотоэлемента. При качании маятника на фотоэлемент периодически падает тень от струны, что дает на выходном сопротивлении электрический импульс. Автоматическое устройство измеряет интервал времени между первым и одиннадцатым импульсом, равный 10 полупериодам маятника. Амплитуда качаний маятника измеряется по шкале, помещенной под железным бруском. Результаты измерений дают линейную зависимость T от a^2, что согласуется с известной формулой $T(a)=T_0(1+a^2/16l^2)$. Наклон прямой $\Delta T/\Delta a^2 = T_0/16l^2$ дает возможность независимо определить l маятника.

10. **Определение ускорения силы тяжести с помощью маятника.** Под ред. В.И. Ивероновой. Физический практикум. М., **1967**. Задача 4. С. 54-62.

11. **Изучение собственных колебаний сосредоточенной системы.** Под ред. В.И .Ивероновой. Физический практикум. М., **1967**. С. 156-158.

12. **Физический маятник. К вопросу об изложении в курсе лабораторной физики.** Лисенков Н. А. ″Изв. высш. учебн. заведений. Физика″, **1967**, № 5, 116-119. [РЖ 1967-10А64].

Исследуются некоторые преимущества рассмотрения физического маятника в качестве самостоятельного объекта вне его связи с математическим. Определяется, на каком расстоянии должна проходить ось вращения, чтобы маятник имел заданный период колебаний. Квадратичное уравнение, получаемое из формулы периода колебаний, приводит к двум значениям расстояния. В связи с этим предлагается новая формулировка понятия приведенной длины и название ″со-

пряженная длина″. На основании этих сведений развивается количественная теория маятника Катера, не излагаемая в известных руководствах. В результате получается зависимость периода колебаний прямого и перевернутого маятников от положения центра тяжести. Ее графическое изображение в виде двух пересекающихся кривых дает возможность студенту понять, что же происходит с маятником, когда он перемещает грузы. Предлагаются названия ″короткий″ и ″длинный″ маятники, имеющие определенный физический и методический смысл.

13. **Моменты инерции однородных тел прямоугольной формы.** Stahl Wilhelm. Zum Tragheitsmoment Homogener quaderformiger Korper. ″Prax. Naturwiss.″, **1968**. A17, № 1, Physik, 13-16. [РЖ 1968-7А75].

Описывается экспериментальный метод получения формулы моментов инерции тел прямоугольной формы: бруска, кубика, планки. В центре каждой грани высверливают небольшое отверстие. В отверстия вставляют штифты с крючками. Брусок подвешивают на крутильном подвесе и определяют периоды колебания относительно трех взаимно перпендикулярных направлений. Затем строят график зависимости периода колебаний (T) от величины диагоналей (d) граней бруска. Из графика следует, что $T = \lambda d$, или $T = \sqrt{\left(\lambda^2 p/m\right)\left(md^2/p\right)}$, где m – масса бруска, p – постоянная величина, которую нужно определить. Сравнивая эту формулу с формулой периода крутильных колебаний $T = \sqrt{(4\pi^2/D)\,\theta}$, можно принять, что $\theta = md^2/p$ (1) и $\lambda^2 p/m = 4\pi^2/D$ (2). Величину p определяют экспериментально по формуле (2) и подставляют в (1).

14. **Эксперименты со стержневым маятником.** Bukovszky Ferenc. Kiserletek rudingaval. ″Fiz. szemle″, **1969**, 19, № 9, 282-285 (венг.)

Описаны простые эксперименты с физическим маятником, представляющим собой стержень диаметром 10 мм длиной ≈1300 мм, снабженный сдвигаемой и закрепляемой насадкой, которые можно применять при обучении физике в средней и высшей школе. На основании определения периода колебаний и составления графика соотношения между периодом колебаний и длиной маятника можно определить связь между физическим и математическим маятниками, значение ускорения силы тяжести для данной географической широты, а также определить длину эквивалентного маятника.

15. **Определение ускорения силы тяжести при помощи математического маятника.** Работа 2. Руководство к лабораторным работам по физике. Часть I. Механика. Молекулярная физика. Под ред. А.П. Максименко. Днепропетровский. гос. ун-т. **1973**. 130 с.

16. **Изучение физического маятника.** Работа 3. Руководство к лабораторным работам по физике. Часть I. Механика. Молекулярная физика. Под ред. А.П. Максименко. Днепропетровский. гос. ун-т. **1973**. 130 с.

17. **Цилиндрическиц маятник как ″физический маятник″.** Stahl Wilhelm. Das Stabpendel als ″Physikalishes Pendel″. ″Prax. Naturwiss.″, **1974**, Teil 1, 23, № 3, 74-79. [РЖ 1974-8А83].

Для объяснения перехода от математического маятника к физическому предлагается опыт с цилиндрическим маятником. Маятник изготовлен из медной трубки диаметром 8 мм длиной 1,6 м. На конце трубки и в нескольких местах на ней предусмотрены места для подвеса. Кроме того, на трубке могут закрепляться грузы в виде массивных цилиндрических шайб. Экспериментальная зависимость колебаний маятника от распределения массы и от точки подвеса сравнивается с предсказанием теории.

18. **Конструкция недорогого маятника для изучения движения при больших углах отклонения.** Scherry Stephen D. Design of an large-angle motion. ″Amer. J. Phys.″, **1976**, 44, № 7, 666-670. [РЖ 1977-1А117].

Рассматривается студенческая работа по исследованию движения маятника при отклонении его на большие углы, когда период колебаний уже заметно зависит от амплитуды. В работе использовались обычные лабораторные материалы и приспособления. Теоретически исследовано влияние на период колебаний массы опоры, растяжимости нити подвеса, затухания колебаний. Экспериментально определялась зависимость времени затухания амплитуды колебаний (45°÷30°) от длины подвеса, в качестве которого используется рояльная проволока диаметром 0,06 см. Для свинцового груза массой 318 г оптимальная длина подвеса оказалась равной 70 см. Приводится оценка влияния массы опоры. Хорошие результаты получены при подвешивании маятника в дверном проеме стены массой не менее 2000 г. Расчеты производились численным методом с использованием мини-ЭВМ PDP-9, что позволило обойтись без специального исследования дифференциальных уравнений, эллиптических функций или теории возмущений. Данные эксперимента согласуются с расчетом с точностью не хуже 10^{-3}.

19. **Влияние массы нити на период колебаний простого маятника.** Armstrong H. L. Effect of the mass of the cord on the period of a simple pendulum. ″Amer. J. Phys.″, **1976**, 44, № 6, 564-566. [РЖ 1976-11А85].

Решена задача о влиянии массы нити m длиной l на период колебаний простого маятника массой M. Для этого составляется уравнение движения элемента нити. Функция, описывающая форму нити при колебаниях маятника, имеет вид $y = z_0\left[\left(4\omega^2/g\right)\left(Ml/m + x\right)\right]^{1/2}$, где z_0 – функция Бесселя. Если m – мало, то $T = 2\pi\left(l/g\right)^{1/2}\left(1 + m/6M\right)$. Если $M = 0$, то $T = 2\pi/1,2024\left(l/g\right)^{1/2}$.

20. **Изучение физического маятника и определение ускорения силы тяжести с помощью маятника.** Задача 7. С. 36-40. Физический практикум для нефизич. специальностей. Часть I. (Учебное пособие). Одесса. 1977. 76 с.

21. **Физический маятник в практикуме и демонстрациях.** Pedersen N.F., Soerensen O. Hofmann. The compound pendulum in intermediate laboratories and demonstrations. ″Amer. J. Phys.″, **1977**, 45, № 10, 488-489. [РЖ 1994-1А98].

Описана лабораторная работа для студентов первого курса по изучению свойств физического маятника. Экспериментальная установка состоит из двух маятников, соединенных общей осью с двумя алюминиевыми дисками. Установка приводится в движение сжатым воздухом, струя которого направлена на один из дисков, в котором просверлены отверстия. Предусмотрено демпфирование колебаний маятника с помощью электромагнита. Приведено теоретическое и экспериментальное описание работы маятника как в режиме колебаний, так и в режиме вращения.

22. **Эксперимент с физическим маятником.** Kolodiy George Oleh. An experiment with a physical pendulum. ″Phys. Teach.″, **1979**, 17, № 1, 52. [РЖ 1979-6А108].

Описана методика проведения лабораторной работы по курсу механики ″Исследование периода колебаний физического маятника″. В качестве физического маятника выбрана деревянная рейка длиной 1 м, подвешенная в точке, удаленной на некоторое расстояние x от центра масс по длине рейки. Исследовалась зависимость периода колебаний физического маятника T от расстояния x. Полученные экспериментальные результаты сравнивались с результатами, вычисленными по формуле $T = 2\pi\sqrt{\left(0,08 + x^2\right)} / gx$, где g – ускорение свободного падения. Приведен типичный экспериментальный график. Отмечается, что минимальный период наблюдается при $x = 0,3$.

23. **Физический маятник: расширенный лабораторный эксперимент с применением ЭВМ.** The physical pendulum: A cjmputer-augmented laboratory exercise. Mills David S. ″Amer. J. Phys.″, **1980**, 48, № 4, 314-316. [РЖ 1981-1А72].

Описана лабораторная работа, в которой изучаются особенности поведения гармонического осциллятора. Маятник представляет собой деревянную линейку длиной 1 м, подвешенную на горизонтальном штыре на некотором расстоянии от центра масс. В верхней половине линейки имеется 9 отверстий, просверленных через каждые 5 см; это позволяет экспериментально изучить зависимость периода колебаний T маятника от расстояния x между точкой подвеса и центром масс. Наличие отверстий смещает центр масс линейки на 0,2 см. Обработка данных производится с помощью ЭВМ HD 2000 F, работающей в режиме разделенного времени, и графопостроителя: 1) на основе данных эксперимента строится графическая зависимость $T(x)$; 2) строится графически математическая модель процесса, т. е. график функции $T = 2\pi\left[\left(l^2/12 + x^2\right)/gx\right]^{1/2}$, где l – длина маятника, g – ускорение свободного падения; 3) проводится регрессионный анализ величин с использованием матричной алгебры, строится кривая среднеквадратичной регрессии и сравнивается с построенным графиком теоретической зависимости $T(x)$. Студенты пользуются готовой программой для ЭВМ, написанной на языке BASIC, однако должны самостоятельно получить требуемые регрессионные соотношения.

24. **Эксперимент с простым маятником.** The simple pendulum experiment. Curtis Robert Kern. ″Phys. Teach.″, **1981**, 19, № 1, 36. [РЖ 1981-6А87].

Эксперимент по нахождению зависимости периода колебаний простого маятника от величины его амплитуды может служить хорошей иллюстрацией ограниченности физических идеализаций. При проведении эксперимента учащиеся измеряют с помощью секундомера величину периода колебаний маятника длиной 0,985 м при углах отклонения маятника 10°, 20°, …, 90°. Результаты опыта демонстрируют явную зависимость величины периода колебаний от амплитуды, не согласующуюся с известной школьникам формулой $T = 2\pi\sqrt{l/g}$. Далее обсуждается причина этого несоответствия и рассматривается явления затухания.

25. **Период колебаний маятника.** The period of a pendulum. Madrid A. Cervantes. ″Phys. Educ.″, **1983**, 18, № 6, 271-272. [РЖ 1984-5А119].

Обсуждается способ измерения периода колебаний маятника. Для измерения периода маятника необходимо измерить время *t* нескольких колебаний *n*, период *T* находится по формуле *T* = *t*/*n*. Обсуждаются оптимальные значения числа *n*. Ана-лизируются проведенные эксперименты с простейшим маятником, когда число *n* менялось в пределах от 2 до 80. Зависимость периода от числа колебаний *n* выявляет роль флуктуаций при определении *T* для различных значений *n*. Одной из причин флуктуаций является время реакции наблюдателя при определении момента начала и конца отсчета общего времени. По мере роста числа колебаний роль этих флуктуаций уменьшается и, начиная с некоторого значения $n \approx 40$, криволинейная зависимость превращается в прямолинейную.

26. **Об экспериментальном определении осевых моментов инерции и статических моментов тел.** Мельников Г.И., Матвеев Н.С. ″Изв. вузов. Приборостр.″, **1985**, 28, № 1, 61-63. [РЖ 1985-6А157].

Рассматривается способ определения осевых моментов инерции и статических моментов тел, использующий восемь измеренных угловых скоростей регулируемой маятниковой системы. Получены расчетные формулы и формулы для оценки погрешностей. Показано, что по данному способу с высокой точностью учитываются силы трения.

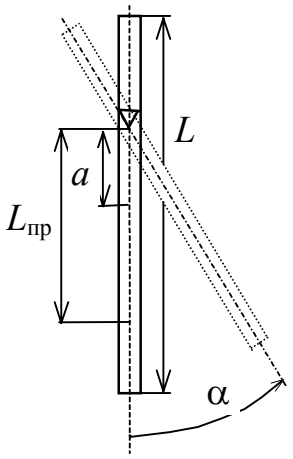
27. **Учебный эксперимент по изучению инерционных свойств твердого тела.** Armstrong H.L. An experiment on the inertial properties of a rigid body. ″Phys. Educ.″, **1985**. 20, № 3, 138-141. [РЖ 1986-1А111].

Предложена простая лабораторная установка и методика определения положения главных осей и моментов инерции тела треугольной формы. Методика основана на измерении периодов колебаний тела при подвешивании в трех вершинах и графического вычисления положения главных осей и моментов инерции. Установка представляет собой закрепленный на лабораторном штативе вилкообразный кронштейн, на котором с помощью ножевых опор подвешивают составной маятник, имеющий форму прямоугольной треугольной пластины с углами 30° и 60°, длиной 22 см и толщиной 9,5 мм, выполненной из легкого сплава. Установка позволяет приводить маятник в колебания относительно осей, параллельных и перпендикулярных его плоскости. Основное достоинство предложенной методики в наглядности и отсутствии громоздких математических

вычислений, отвлекающих внимание от физической сущности изучаемого явления. Приведены чертежи лабораторной установки.

28. **Изучение эллипсоида инерции твердых тел.** Л.Г. Деденко, Д.Ф. Киселев, В.К. Петерсон, А.И. Слепков. Общий физический практикум. Механика. Под ред. А.Н. Матвеева, Д.Ф. Киселева. Лаб. работа 7. с. 108–112. Изд. моск. ун–та. **1991**.

Тело, для которого определяются моменты инерции, – однородный металлический параллелепипед. Оно закреплено таким образом, что может вращаться вокруг неподвижного центра масс. В середине каждой грани параллелепипеда сделаны небольшие углубления для его закрепления, обеспечивающего вращение вокруг осей, проходящих через эти углубления. Параллелепипед неподвижно укрепляется в рамке, которая подвешена на упругой металлической проволоке и может совершать крутильные колебания. В состав установки входят также электронный таймер и фотоэлектрическая система, регистрирующая число полных периодов колебаний рамки.



Схематическое изображение физического маятника

29. **Изучение колебаний физического маятника.** Матвеев А.Н., Киселев Д.Ф. Общий физический практикум. Механика. Изд. моск. ун-та. **1991**. С. 91–94. Лаб. работа 2.

В этой лабораторной работе, хотя слово ”колебание” вынесено в название работы, существенным является сам объект движения – твердое тело простой геометрической формы, а именно длинный однородный металлический стержень, обладающий известным моментом инерции . Этот стержень имеет легкую передвижную шайбу с опорными призмами, которая может закрепляться в любом месте стержня. Для определения положения закрепления опорных призм на стержень нанесена шкала (см. рис. 1).

Период колебаний изучаемого маятника определяется формулой

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J_0 + ma^2}{amg}} = 2\pi\sqrt{\frac{a_0^2 + a^2}{ag}},$$

где $J_0 = mL^2/12 = ma_0^2$ – момент инерции маятника относительно центра масс, a – расстояние от центра масс до точки подвеса, m – масса маятника, a_0 – радиус инерции. Эта формула верна в приближении малых амплитуд, т. е. в приближении $\sin\alpha \approx \alpha$. В работе пренебрегается моментом сил трения, а также массой подвижной шайбы с опорными призмами по сравнению с массой самого стержня.

Содержание работы состоит в следующем. Опорную призму укрепляют на конце маятника на крайнем делении шкалы. Устанавливают диапазон амплитуд, в пределах которого период колебаний маятника можно считать независимым от амплитуды. Для этого отклоняют маятник примерно на 15° и измеряют при помощи фотоэлектрической системы период его колебаний. Затем постепенно уменьшают амплитуду до тех пор, пока измеряемые периоды колебаний

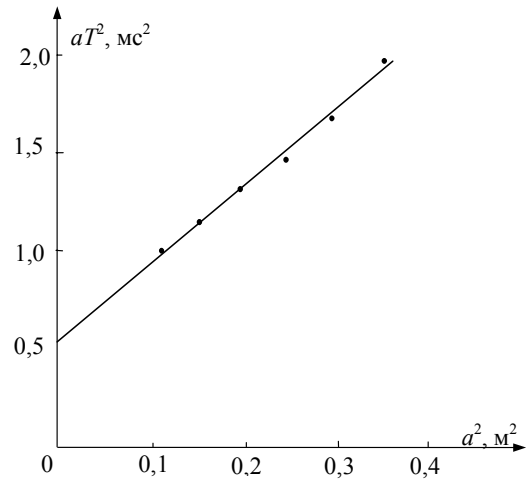
перестанут отличаться друг от друга в пределах случайных ошибок эксперимента.

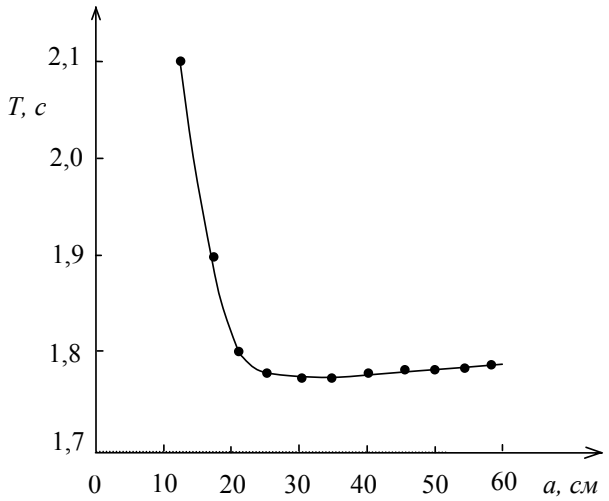
Исследование зависимости периода колебаний T от величины a. После получения экспериментальной зависимости строят график зависимости aT^2 от величины a^2:

Методом наименьших квадратов аппроксимируют полученную зависимость прямой линией и находят из графика величины a_0^2 и $4\pi^2 a^2/g$. Вычисляют значение a_0 и сравнивают его с определенным из непосредственных измерений $a_0 = L/\sqrt{12}$ /. Вычисляют значение g и сравнивают его с табличным значением.

Для 2–3 значений “а” вычисляют значение приведенной длины маятника $L_{пр}$ и на опыте проверяют обратимость точки подвеса и точки качания.

Представляют графически также зависимость периода колебаний T от величины a.





Хотя и слабо, но виден минимум в этой зависимости

30. **Лабораторный макет по изучению физического маятника-стержня.** Авотин С. С., Авотин Г. С. Харьк. техн. ун-т радиоэлектроники. Харьков. **1995**. 6 с. Рус. Деп. В ГНТБ Украины 26.06.945. № 1609-ук 95. [РЖ 1996.1А84].

В физическом лабораторном практикуме применяют оборотный физический маятник, состоящий из стержня с двумя опорными призмами и перемещаемых грузов. К недостаткам такого маятника следует отнести возможность подгонки результатов измерений и трудности в обеспечении полного равенства периодов колебаний для двух положений путем изменения его центра масс. Лишенный указанных недостатков лабораторный макет представляет собой однородный металлический стержень с кольцевыми канавками. Стержень легко перемещается в отверстии оси и закрепляется в любом положении. Ось маятника свободно вращается в подшипниках, закрепленных на стойке. Резьбовые отверстия на краях стержня позволяют крепить демпфирующий диск и стрелку-указатель при изучении затухающих колебаний.

31. **Изучение физики колебаний на базе лабораторной работы ”Изучение колебаний физического маятника”.** Васильева И.А., Коротаева Е.А. Преподавание физ. в высш. шк. **1996**. № 7. 32-36. [РЖ 1997.11А134].

32. **Определение тензора инерции твердого тела.** А.М. Салецкий, А.И. Слепков. Механика твердого тела. Лабораторный практикум. Москва. Физический факультет МГУ. **1999**. Лаб. работа 6. С. 59-69.

С помощью крутильного маятника, представляющего собой рамку с исследуемым телом, закрепленную на упругом подвесе, определяется момент инерции тела относительно закрепленной оси. Сравнивая период колебаний маятника без тела и с телом, можно найти момент инерции тела относительно фиксированной оси. Компоненты тензора инерции относительно системы координат, жестко связанной с телом, определяются из нескольких таких опытов, отличающихся направлением оси вращения тела при колебаниях маятника.

33. **Физический маятник: пути повышения точности измерения g.** Акимов А.И., Баранов А.Н., Салецкий А.М.ФОВ-**2000**, т.6, № 2, с. 52-61.

34. **Запись колебаний маятника на магнитном планшете.** Майер В.В., Демьянова О.Н. Проблемы учебного физического эксперимента: Сборник научных трудов. Вып. 24. Материалы 11 Всероссийской научно-практической конференции “Учебный физический эксперимент: Актуальные проблемы. Современные решения”, Москва, **2006**. М., 2006. 46–47. [РЖ Физика.09.01-18А.101].

35. **Зависимость периода колебаний маятника от амплитуды.** Сорокин Н.А., Хайрутдинов Р.М., Костина Т.С. 4 Региональная научно-практическая конференция студентов и курсантов “Физика – проблемы, перспективы развития”, Тольятти, 23 марта, 2007 Сборник докладов. Тольятти, **2007**. 50-55. [РЖФиз. 08.05-18А.128].

Экспериментально исследована зависимость периода колебаний от амплитуды при произвольных, не обязательно малых, ее значениях. Проведены теоретические расчеты. Эксперимент показывает, что колебания маятника, строго говоря, не являются изохронными – период колебаний монотонно увеличивается с ростом амплитуды. Однако при малых угловых амплитудах зависимость периода от амплитуды выражена слабо. Так, например, при угловой амплитуде α_m=90° период колебаний превышает период колебаний T_0 с предельно малой амплитудой не более чем на 2%, а для α_m= 90° превышение периода составляет примерно 20%.

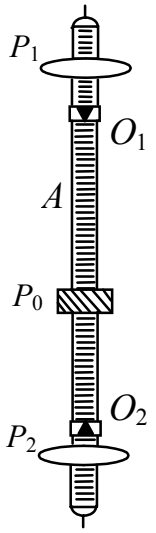
7.2. Оборотный маятник

1. **Определение ускорения силы тяжести методом оборотного маятника.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 6а. С.117-122.

Период колебаний математического маятника длины l зависит от величины ускорения свободного падения g следующим образом:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Эта же формула выражает период колебаний физического маятника, если l – его приведенная длина. В “методе оборотного маятника” приведенная длина физического маятника измеряется непосредственно. Этот метод основан на теореме о сопряженности точки подвеса и центра качания физического маятника. Расстояние между этими двумя точками равно приведенной длине физического маятника. Для того, чтобы можно было это расстояние определить, необходимо найти положение центра качания маятника, иными словами, необходимо найти две точки маятника, лежащие по *разные* стороны его центра тяжести, которые обладают свойством сопряженности, т. е. такие две точки, чтобы, поворачивая маятник и подвешивая его последовательно за ту или другую из них, мы получали бы один и тот же период колебания. Расстояние между такими двумя точками и дает приведенную длину физического маятника, т. е. величину l в приведенной выше формуле. Определив одновременно абсолютную величину периода колебаний этого маятника и, если нужно, его амплитуду, мы можем вычислить абсолютное значение g.



Маятники, основанные на этом принципе, получили название оборотных. Один из наиболее простых типов оборотного маятника, применяемый в данной работе, изображен на рисунке. Этот прибор состоит из прочной металлической штанги A с остриями на концах, длиной около одного метра, на который укреплены две опорные призмы O_1 и O_2.

Они расположены перпендикулярно к штанге A и своими острыми ребрами обращены друг к другу. Кроме призм на штанге находятся три груза P_0, P_1 и P_2, которые можно передвигать вдоль штанги и закреплять в любом месте. Два груза P_1 и P_2 имеют обыкновенно форму чечевиц и расположены на концах штанги за призмами. По внешнему виду они одинаковы, но их вес различен, так как одна из чечевиц имеет внутри свободную полость. Третий груз P_0 расположен между призмами несколько ближе к легкой чечевице. Очевидно, что период колебания маятника будет изменяться с изменением положения грузов на штанге. При работе с прибором все необходимые изменения его периода колебаний достигаются перемещением крайних чечевиц, и положение среднего груза обыкновенно остается неизменным.

Для наблюдения колебаний маятника его подвешивают последовательно ребром той и другой призмы на стальную пластинку, укрепленную горизонтально на очень прочном штативе или стенном кронштейне, и затем, несколько отклонив маятник от вертикали, сообщают ему колебание небольшой амплитуды. Таким образом, ребра призм служат попеременно точками подвеса маятника.

В оборотном маятнике этого типа опорные призмы укреплены на штанге неподвижно, и расстояние между их острыми ребрами обыкновенно дается, как некоторая постоянная прибора. Это расстояние будет равно приведенной длине маятника l, если мы подберем такое положение грузов P_1 и P_2 на штанге, при котором период колебания маятника остается одним и тем же, независимо от того, какая из призм, O_1 или O_2, служит для подвеса маятника. Действительно, при равенстве периодов в первом и во втором положениях маятника ребро одной из призм всегда, очевидно, соответствует центру качания маятника, а ребро другой

призмы служит его точкой подвеса, и расстояние между ребрами призм определяет приведенную длину маятника l.

Отсюда следует, что для определения g оборотным маятником данного типа необходимо, во-первых, установить грузы на штанге в такое положение, при котором наблюдается равенство периодов колебания в первом и втором положениях маятника, т. е. при его повороте, и, во-вторых, определить абсолютную величину этого периода. После этого значение g можно вычислить на основании приведенной выше формулы, так как l соответствует расстоянию между ребрами призм, которое дается как постоянная прибора, а соответствующее ей значение T определяется из измерений.

Так как, однако, достичь полного равенства периодов колебания в обоих положениях маятника не представляется возможным, то на практике принято ограничиваться лишь приближенным равенством периодов, т. е. наблюдения над колебаниями маятника прекращают, когда его периоды, T_1 и T_2 в первом и втором положениях становятся близкими друг к другу, например, отличаются один от другого на 10^{-3} или 10^{-4} секунды. При этом условии можно с достаточной точностью вычислить значение периода T, которое мы получили бы при полном совпадении периодов колебания маятника в первом и втором положениях. Для этого при определении g не особенно высокой точности достаточно взять среднее арифметическое величин T_1 и T_2. При более точных определениях g применяют более точную формулу:

$$T = \frac{T_1 + T_2}{2} + \frac{T_1 - T_2}{2} \frac{l}{d_1 - d_2}.$$

Здесь величины d_1 и d_2 обозначают расстояния от центра тяжести маятника до точек опоры, т. е. до ребер призм.

В значение T, вычисленное по формулам, приведенным выше, можно ввести поправку на амплитуду α, которую вычисляют по формуле:

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left(1 + \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\alpha}{2} \right).$$

Изменение длины маятника с температурой вызывает необходимость ввести соответствующую поправку. Значение приведенной длины маятника, которое дается как постоянная прибора, соответствует $0°C$, тогда как наблюдения ведутся при температуре лаборатории. Отсюда следует, что при вычислении g, вводя поправку на температуру, надо поставить не длину l, т. е. постоянную прибора, а величину l_t, которая может быть вычислена по обычной формуле линейного расширения твердых тел:

$$l_t = l(1 + \alpha t),$$

где l – постоянная прибора, t – температура помещения и α – коэффициент расширения материала, из которого сделана штанга маятника.

2. **Установка с оборотным маятником для лабораторных занятий.** Lik Jaromin, Sommer Jaroslav. Uprava reverzniho kyvadla pro laboratoni cviceni. ″pokr. mat., fyz. a astron.″, **1970**, 15, № 5, 207-215. [РЖ 1971-6А68].

Описано устройство оборотного маятника, который рекомендуется использовать для определения ускорения свободного падения. Время колебаний маятника измеряется с помощью фотоэлемента. Приводится блок-схема электронной части установки, служащей для измерения интервалов времени, дается описание принципа ее действия.

3. **Методические указания к постановке работы с оборотным маятником в физических практикумах втузов.** Стародубровская И.Н. Сб. научно-методич. статей по физике. М. В. школа. Вып.6. **1978** г. С. 44-46.

4. **Маятник: большие возможности простой системы.** The pendulum – Rich physics from a simple system. Nelson Robert A. ″Amer. J. Phys.″, **1986**, 54, № 2, 112-121. [РЖ 1987-1А141].

Описан эксперимент по измерению ускорения силы тяжести с помощью маятника. Обсуждаются поправки, которые необходимо учитывать при измерении: конечность амплитуды, конечная масса нити, влияние воздуха и др. Всего в итоговой таблице 16 поправок. Наиболее существенны поправки на конечность амплитуды, массу нити, увлечение воздуха телом маятника, архимедову силу. Приводится подробная теория поправок на учет воздуха и на упругость маятника и подвеса. Окончательно для ускорения силы тяжести получается 9, 8015 ± 0,0035 м/с^2, что весьма близко к референтному значению. Для большей точности измерения ускорения силы тяжести используется оборотный маятник.

5. **Определение ускорения свободного падения при помощи оборотного маятника (метод Бесселя).** Лаб. работа 3. ”Общий физический практикум. Механика.” Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Изд. Моск. ун-та. **1991**. С. 94-97.

6. **Маятник Капицы.** Учеб. физ. **1998**. № 2. 58-64, 79. [РЖ 1999.08-18А.57].

В конце сороковых и начале пятидесятых годов П.Л. Капица, будучи в опале, продолжал серьезные теоретические и экспериментальные исследования в своей частной лаборатории на своей даче на Николиной горе. Именно в это время увидели свет две работы, посвященные перевернутому маятнику. Содержание этих работ положено в основу предлагаемой статьи.

7.3. Конический маятник

1. **Эксперимент с коническим маятником.** Proctor Ivan, Edwards T. H. Conical Pendulum experiment. ″Amer. J. Phys.″, **1968**, 36, № 6, 555-556. [РЖ 1969-1А65].

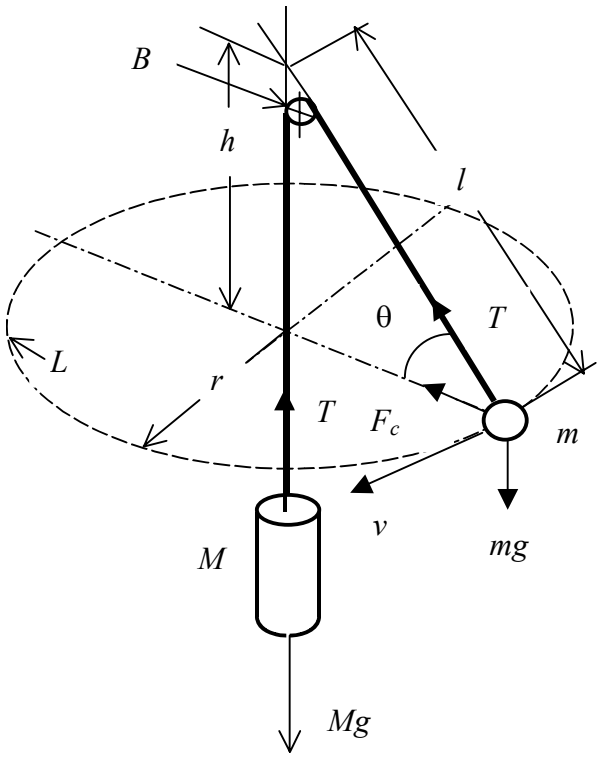
В эксперименте используется стробоскопическая фотокамера, с помощью которой делается снимок движения конического маятника. Исходя из известного значения ускорения силы тяжести, определяется центростремительная сила и сравнивается с ее значением, вычисленным из формулы mv^2/R. В другом варианте эксперимента определяется ускорение силы тяжести. Приводится подробное описание эксперимента. Указывается, что главный источник ошибок – определение угла при вершине конуса, т. к. траектория маятника может быть не точной окружностью, а этот угол трудно определить с точностью, превышающей 0,5°. Суммарная точность эксперимента ≈1%.

2. **По поводу статьи Проктора и Эдвардса ″Эксперимент с коническим маятником″.** Schaefer J.A., Walker C.T. Letter re:″Conical pendulum experiment″, by I. Proctor, T. H. Edwards. ″Amer. J. Phys.″, **1969**, 37, № 9, 943. [РЖ 1970-5А39].

Авторы отмечают, что эксперимент с коническим маятником, описанный Проктором и Эдвардсом (РЖФиз, 1969, 1А65), был описан ранее Хейзеном и др. (РЖФиз, 1959, № 12, 26435) и сообщают, что эти статьи были использованы ими в эксперименте по изучению движения по круговой орбите и I-III законов Кеплера.

3. **Эксперимент по определению величины центростремительной силы.** Ein quantitativer Handversuch zur Zentripetalkraft. Kappelmeier Katharina, Luchner Karl. ″Phys. und Didakt.″, **1984**, 12, 2, 168-172. [РЖ 1984-12А102].

Описан простой эксперимент, позволяющий определить величину центростремительной силы при движении тела по окружности известного радиуса с помощью конического маятника.



Маятник вначале отклоняют от положения равновесия на некоторый угол и измеряют динамометром возвращающую силу. Затем ему сообщают такую скорость в направлении, перпендикулярном плоскости, проходящей через вертикаль и нить, чтобы он двигался по окружности, радиус которой равен величине отклонения. В этом случае возвращающая сила будет играть роль центростремительной силы. Необходимую скорость можно сообщить с помощью второго маятника той же массы, положение равновесия которого совпадает с точкой, в которой находится отклоненный первый маятник. В этом случае скорость легко подсчитывается на основе законов сохранения энергии и импульса.

Так как M, m и натяжение нити T постоянны, то при изменении ω будет изменяться длина отрезка нити l. При достаточно малом трении l изменяется медленно, допуская точное измерение параметров l (или r), θ и ω. Влияние изменения любого из параметров на центробежную силу $F=m\omega^2$ можно легко определить. Рекомендуется произвести ряд наблюдений с различными значениями m и M. Прибор позволяет также определить g с точностью до нескольких процентов из равенства $g=h\omega^2$. Дано подробное описание конструкции прибора.

4. **Исследование законов сохранения с использованием конусообразного маятника.** Investigation of cjnservation laws using a conical pendulum. Bambill H. R.> Benito M. R., Garda G. R. *Eur. J. Phus.* **2004**. 25. № 1. 31-35. [РЖФиз. 05.06-18А.135].

5. **Экспериментальное исследование момента инерции конуса: угловые колебания и эллипсоид инерции.** Pintao C. A. F., de Souza Filho M. P., Usida W. F., Xavier J. A. Eur. J. Phys. **2007**. 28, № 2. 191-200. [РЖ Физика. 08.12-18А.111].

7.4. Крутильный маятник

1. **Определение момента инерции методом трифилярного подвеса.** К.П.Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. **1946** г. Работа 2d. С. 91-93.

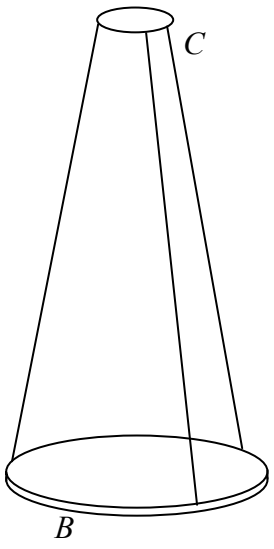
Трифилярный подвес состоит из трех металлических нитей длиной *l*, расположенных симметрично по вершинам равностороннего треугольника и равномерно нагруженных весом диска *B* (масса диска *m)*. Расстояния от точек прикрепления нитей до центров диска *B* и шайбы *C*, соответственно, *R u r*. На этот диск помещают тело, момент инерции которого определяется, располагая его так, чтобы равномерное натяжение нитей не нарушалось. Если диск повернуть на небольшой угол около вертикальной оси, проходящей через его центр, то все три нити принимают наклонное положение и центр тяжести системы несколько приподнимается. Вследствие этого предоставленный самому себе прибор начинает совершать колебания около вертикальной оси, период которых зависит от момента инерции подвешенной системы.

Момент инерции диска относительно вертикальной оси, проходящей через его центр, выражается формулой:

$$J = \frac{T^2}{4\pi}\frac{mgRr}{l},$$

где T – период колебаний маятника.

Вначале необходимо определить момент инерции ненагруженного прибора J_0. После этого на диск прибора помещают одно из тел, момент инерции которого определяют, располагая его центр тяжести на оси прибора. Вновь сообщая прибору колебания, определяют их период. Из результатов этих измерений по приведенной формуле находят момент инерции всей системы, т. е. сумму моментов инерции самого прибора J_0 и лежащего на диске тела J. Чтобы определить последнюю величину в отдельности, надо из полученного значения вычесть J_0. При вычислении момента инерции всей системы, $J_0 + J$, ее масса определяется как сумма масс ненагруженного прибора m_0 и массы измеряемого тела.



При проверке на этом приборе теоремы Штейнера пользуются двумя одинаковыми грузами, например, двумя половинами разъемного цилиндра. Измерения выполняются при двух положениях тел на диске *B*. Вначале определяют момент инерции одного из тел относительно вертикальной оси, проходящей через его центр тяжести, т. е. при центральном положении тела по отношению к диску *B*. Затем оба тела помещают симметрично по краям диска. Определив момент инерции системы при таком положении тел, находят момент инерции одного из них по отношению к вертикальной оси, которая лежит от центра тяжести тела на расстоянии, равном половине расстояния между центрами тел в этой геометрии. Полученное значение момента инер-

ции тела сравнивается с теоретическим, которое находят на основании теоремы Штейнера.

2. **Определение момента инерции и проверка теоремы о переносе осей моментов инерции методом крутильных колебаний.** Задача 11.С. 85-90. Физический практикум. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. М., **1951. 1953, 1955**. Лаб. работа 11. С. 92.

3. **Изучение явления резонанса на крутильном маятнике.** Физический практикум. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. М., **1953, 1955.** Задача 13. С. 95-98.

4. **Определение момента инерции методом трифилярного подвеса.** Физический практикум. Часть 1. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск. **1959**. Работа 14. С. 61-64.

5. **Определение модуля сдвига из крутильных колебаний.** Физический практикум. Часть 1. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск. **1959**. Работа 13. С.58-61.

6. **Крутильный маятник для измерения моментов инерции.** Грин (Calibrated torsion pendulum for moment of inertia measurements. Green Ralph E.), Amer. J. phys., **26**, 498-499. [РЖ **1959**-5-9728].

Предлагается графический метод измерения моментов инерции при помощи крутильного маятника. На поверхности маятника диаметром 40 см нанесены десять концентрических окружностей на расстоянии 1 *см* друг от друга, радиус наименьшей 10 см. На каждой окружности через 120° сделаны три углубления. На нижней стороне диска в центре укреплена картонная трубка, в которой помещаются три стальных шарика радиусом 2,5 см. Определяют период колебаний системы, когда шарики находятся в трубке и на каждой окружности и строят калибровочный график зависимости периода колебаний маятника от момента инерции системы, который рассчитывают по формуле $I=mr^2$, где I – момент инерции, m – общая масса шариков, r – радиус окружности. При определении момента инерции исследуемое тело помещают в центр диска, шарики убираются в трубку. Измеряется период колебаний системы, а по графику определяется момент инерции.

7. **Крутильный баллистический маятник.** Физический практикум. Под ред. В.И. Ивероновой. М., **1962**. Задача 14. С. 100-105;**1967**. Задача 20. С. 132-136.

8. **Определение момента инерции и проверка теоремы Штейнера методом крутильных колебаний.** Физический практикум. Под ред В.И. Ивероновой. М., Лаб. работа 11. **1962**. С. 90-93. **1967**. С. 95-98.

9. **Демонстрации и лабораторные работы с применением крутильного маятника.** Вологодский В. “Научно-метод. сб. Курганск. Гос. пед. ин-т. Физ.-матем. Фак.” Курган, **1962**, 233-238. [РЖ 1963-11А97].

Описывается несколько лабораторных работ и демонстрационных опытов, которые могут быть выполнены с применением крутильных маятников. Маятник для изучения свободных колебаний подвешен на двух растяжках. При помощи специальной механической пушки в пластину стреляют, при этом можно проверить закон сохранения количества движения, закон сохранения момента количества движения, зависимость момента количества движения от величины плеча, явление действия и противодействия. Описывается также маятник для изучения вынужденных колебаний, при помощи которого можно изучить зависимость периода колебаний от момента инерции, определить модуль сдвига проволоки, изучить явление резонанса.

10. **Изучение основного закона вращательного движения твердого тела на крестообразном маятнике.** Работа 5. Руководство к лабораторным работам по физике. Часть I. Механика. Молекулярная физика. Под ред. А.П. Максименко. Днепропетровский. гос. ун-т. **1973**. 130 с.

11. **Определение момента инерции стержня методом крутильных колебаний.** Wyznaczanie momentu bezwladnosci preta metoda drgan torsypnych. Skora Wladyslaw. ″Fiz. szk.″, **1984**, 30, № 4, 238-240. [РЖ 1985-4А115].

В предлагаемой лабораторной работе установка состоит из тонкого стержня, подвешенного при помощи двух нитей горизонтально на перекладине штатива. В работе определяется момент инерции стержня относительно оси, перпендикулярной горизонтальной плоскости и проходящей через середину стержня. Для этой цели при помощи секундомера измеряется период малых крутильных колебаний. Даются примеры вычислений и методические указания по проведению работы.

12. **Практикум по изучению колебаний.** Scgwingungen im Praktikum/ Blumel Wolfgang. ″Phys. Und Didakt.″, **1987**, 15, № 2, 154-160. [РЖ 1987 12А116].

Изучение различных форм колебаний (К) – свободных, вынужденных, связанных – осложняется тем, что для демонстрации каждой из форм К используются разные модели. Необходимость изучения принципиально различных элементов в демонстрационных моделях затрудняет восприятие общих особенностей К. Предложена конструкция модели на основе крутильного маятника с электрическим управлением, пригодной для демонстрации всех форм колебаний.

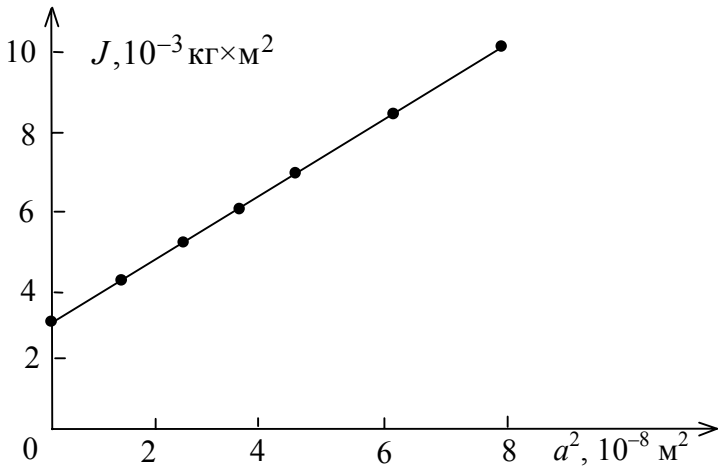
13. **Определение моментов инерции тел простой формы и проверка теоремы Гюйгенса-Штейнера методом крутильных колебаний.** Общий физический практикум. Механика. Под ред. А.Н. Матвеева, Д,Ф. Киселева. Изд. Моск. ун–та. **1991**. Лаб. работа 5. С. 101–104.

В работе используется трифилярный подвес, представляющий собой круглую платформу, подвешенную на трех симметрично расположенных нитях, укрепленных у краев этой платформы. Наверху эти нити также симметрично прикреплены к диску несколько меньшего диаметра, чем диаметр платформы.

Платформа может совершать крутильные колебания вокруг вертикальной оси, перпендикулярной к ее плоскости и проходящей через ее середину; центр тяжести платформы при этом перемещается по оси вращения. Период колебаний определяется величиной момента инерции платформы; он будет другим, если платформу нагрузить каким-либо телом; этим и пользуются в настоящей работе. Момент инерции и пустой платформы и платформы с каким-либо телом, расположенным на ней, вычисляется по формуле

$$J = \frac{mgRr}{4\pi^2 l} T^2,$$

где m – масса платформы (или платформы с телом), R – расстояние от центра платформы до точек крепления нитей на ней, r – радиус верхнего диска, l – длина нитей подвеса, T – период колебания. Момент инерции исследуемого тела находится как разность моментов инерции платформы с этим телом и пустой платформы.



При помощи трифилярного подвеса может быть проверена и теорема Гюйгенса–Штейнера, для сего необходимо иметь два совершенно одинаковых тела. Сначала определяют момент инерции этих тел, положив их одно на другое в центре платформы. Затем оба тела располагают симметрично на платформе и определяют их момент инерции при таком расположении. Половина этой величины и будет давать момент инерции одного тела, находящегося на фиксированном расстоянии от оси вращения. Зная это расстояние, массу тела и момент инерции тела, положенного в центре платформы, можно проверить указанную теорему. На графике представлена зависимость момента инерции тела относительно некоторой оси от квадрата расстояния этой оси до центра масс тела. Линейность этой зависимости и выражает справедливость теоремы Гюйгенса–Штейнера.

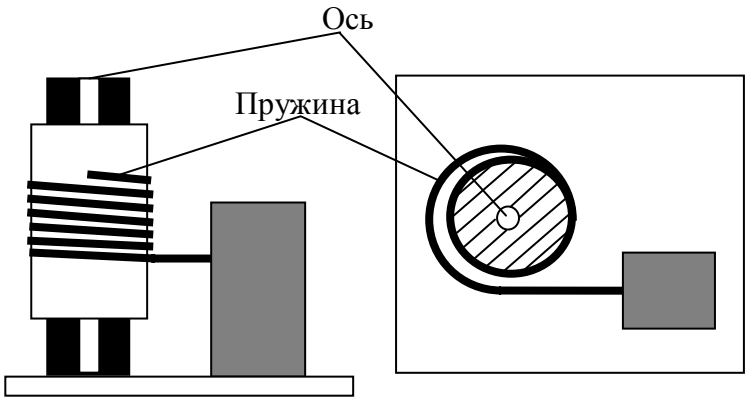
14. **Система на основе крутильного маятника для измерения модуля сдвига и внутреннего трения в магнитоупругих аморфных проволоках.** Torsional pendulum system for measuring the shear modulus and internal friction of magnetoelastic amorphous wires. Atalay S., Squire P. T. Meas. Sci. and Tecnol. **1992**. 3. № 8. С. 735-739.

Описана обращенная торсионная маятниковая система для измерения модуля сдвига и внутреннего трения в аморфных проволоках в функции приложенного поля и аксиальных напряжений. Аксиальное напряжение может быть уменьшено менее чем до 0,5 МПа (груз 6 *мН*). Емкостной регистратор вращения обладает чувствительностью в отношении углового положения 0,5 и позволяет измерение уровня напряжения менее чем 2,5 $\pm 10^{-4}$. Колебания отцифровываются и находится кривая в области времени, чтобы получить значения модуля с типичным разрешением $1 \cdot 10^4$. Даны примеры результатов, полученных с проволоками на основе Fe.

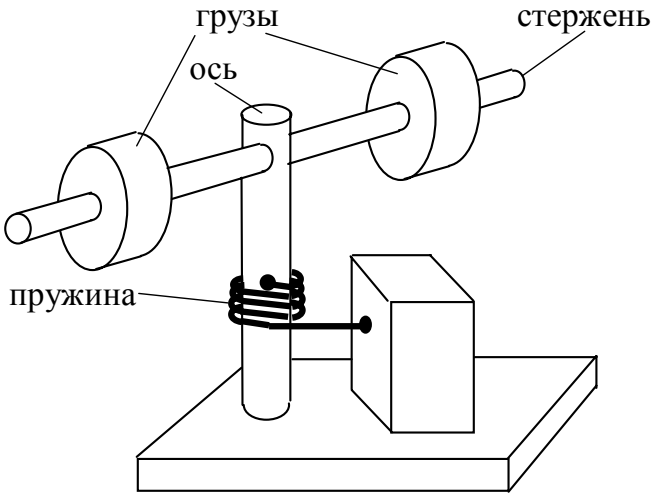
15. **Определение моментов инерции тел простой формы и проверка теоремы Гюйгенса-Штейнера методом крутильных колебаний.** А.М. Салецкий, А.И. Слепков. Механика твердого тела. Лабораторный практикум. Москва. Физический факультет МГУ. **1999**. Лаб. работа 2. С. 24-30.

16. **Определение момента инерции тел простой формы.** А.М. Салецкий, А.И. Слепков. Механика твердого тела. Лабораторный практикум. Москва. Физический факультет МГУ. **1999**. Лаб. работа 3. С. 31-37.

Идея эксперимента состоит в использовании связи между периодом колебаний крутильного маятника и его моментом инерции. Исследуемое тело является составной частью крутильного маятника с пружиной.



Схематическое изображение крутильного маятника



Расположение исследуемых тел на крутильном маятнике.

На вертикальном стержне, выполняющего роль оси маятника, закрепляют горизонтальный стержень, на котором симметрично располагают исследуемые грузы. Производят измерения периода ***T*** малых колебаний маятника для различных положений грузов, характеризуемых расстоянием ***a*** от центра груза до оси маятника. Период колебаний маятника следующим образом связан с параметрами эксперимента:

$$T^2 = 4\pi^2 \left(\frac{J_0 + J_c + 2J_{гр}}{D} \right) + \frac{4\pi^2 \cdot 2m_{гр}}{D} a^2 . \qquad (1)$$

Здесь J_0 – момент инерции той части маятника, на которой крепятся все остальные элементы кроме грузов, J_c – момент инерции горизонтального стержня, $J_{гр}$ – момент инерции груза относительно его центра масс, $m_{гр}$ – масса груза, ***D*** – жесткость пружины.

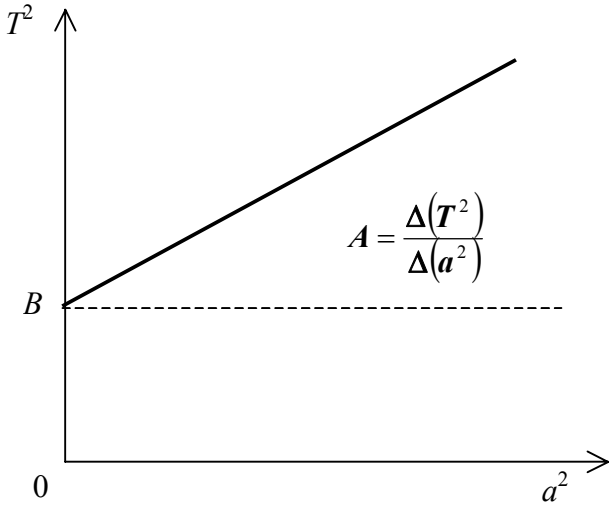
Зависимость между экспериментально определенными величинами $\boldsymbol{T}^2$ и $\boldsymbol{a}^2$ представляется графически.

Зависимость (1) можно представить в виде

$$T^2 = B + A \cdot a^2 . \qquad (2)$$

Тогда по наклону этой прямой можно определить жесткость пружины

$$D = 4\pi^2 \frac{2m_{\text{гр}}}{A} . \qquad (3)$$



Вычислив предварительно величины $J_{\text{с}}$ и $J_{\text{гр}}$ по известным формулам (геометрия этих тел известна) и определив по графику величину $\boldsymbol{B}$, находят величину момента инерции тела маятника $\boldsymbol{J}_0$:

$$J_0 = \frac{BD}{4\pi^2} - J_{\text{с}} - 2J_{\text{гр}} . \qquad (4)$$

Если теперь вместо стержня с грузами в состав маятника включить тело с неизвестным моментом инерции J_x, то период колебаний такого маятника будет выражаться формулой

$$T_x = 2\pi\sqrt{\frac{J_0 + J_x}{D}} , \qquad (5)$$

откуда

$$J_x = \frac{T_x^2 D}{4\pi^2} - J_0 .$$

17. **Новые подходы к сбору данных в экспериментах с крутильным маятником.** Jiang D., Xiao J., Li H., Dai Q. Eur. J. Phys. **2007**. 28, № 5. 977–982. [РЖ Физика.08.10-18А.109].

7.5. Крутильный гравитационный маятник

1. **Крутильные весы для демонстрации всемирного тяготения. Перселл.** (Gravitation torsion balance. Purcell E. M.), Amer. J. Phys., **1957**, 25, 6, 393-394. [РЖ 1958-5-9825].

Описана конструкция весов Кавендиша, изготовленных фирмой Levbold в ФРГ. Отмечаются большие достоинства прибора и удобство его для школьных демонстраций.

2. **Новый метод проведения опытов с гравитационными крутильными весами. Хехт** (Neues Verfahren zum Experimentieren mit der Gravitations-Drehwaage. Hecht Karl), Prax. Naturwiss., **1958**, A7, № 4, 106-107. [РЖ 1959-199].

Описаны простые крутильные весы, при помощи которых можно определять величину сил тяготения и гравитационную постоянную (ГП). Предложены два метода измерений: 1. Метод ускорений. Измеряют среднее ускорение за время, равное примерно 1/10 периода, т. е. ~ 1 мин., и рассчитывают ГП согласно закону Ньютона. Метод недостаточно точен, но нагляден и прост. 2. Метод конечных отклонений. При подсчете ГП по разности конечных отклонений необходимо знать момент крутильной нити. Измерения продолжаются примерно 3/4 часа. Предложен новый метод торможения колебательной системы, основанный на диамагнитных свойствах меди. Этот метод может быть использован для определения диамагнитных свойств меди.

3. **Весы Кавендиша.** Payз (Cavendish balance. Rouse Arthur G.), Amer. J. phys., **1958**, 26, 7, 503-504. [РЖ 1959-6-12075].

Описаны простые демонстрационные весы Кавендиша. Нить выполнена из фосфористой бронзы сечением 0,0125 *мм*^{2}, длиной 42 *см*. Малые грузы представляют собой полые цилиндры весом по 15 *г*, укрепленные на стержне длиной 10 *см*. Большие грузы – полые цилиндры весом по 5 *кг*. Световой луч от зеркальца на нити отражается на шкалу, находящуюся на расстоянии 4,5 *м*. Период колебаний составляет примерно 6 мин. Гравитационная постоянная может быть определена при помощи весов с точностью до 5%.

4. **К истории гравитационных крутильных весов как демонстрационного прибора.** – Zur Geschichte der Gravitations-Drehwaage als Unterrichtsgerat. “Leybold-Welle”, **1961**, 2, 7, 25-29. [РЖ 1964-2А62].

Описывается краткая история создания школьного прибора фирмы Leybold для определения гравитационной постоянной, который демонстрировался на Международной конференции по преподаванию физики в 1960 г. в Париже.

5. **Самодельные весы Кавендиша.** Block B., Moore R. D., Roos P. Do-it-yourself Cavendish balance. ″Amtr. J. Phys.″, **1965**, 33, № 11, 963-965. [РЖ 1966-5А73].

Описаны простые весы Кавендиша, разработанные для лаборатории студентов II курса. Студентам вручались основные детали весов и свинцовый груз весом 10 кг и предлагалось измерить и подобрать соответствующие параметры(постоянную кручения, прочность нити на разрыв, плечо рычага), позволяющие непосредственно наблюдать гравитационную силу.

6. **Экспериментальное доказательство закона тяготения.** Russel Konrad. Die experimentelle Bestatigung des Gravitationsgesetzes. ″Prax. Naturwiss.″, **1966**, F 15, 8б Physik, 211-214. [РЖ 1967-2А54].

Описывается устройство крутильных весов, при помощи которых можно показать зависимость силы тяготения от расстояния между массами, зависимость силы от тяготеющих масс и определить гравитационную постоянную. Приведены методические указания и расчеты.

7. **Аппаратура для проведения опыта Кавендиша.** Skorobijin M. Aparatura za Kevendisov ogled. ″Radovi Zavoda fiz. Univ. Beogradu″, **1967**, 7, 44-45 (сербскохорв.; рез. англ.) [РЖ 1970-9А78].

Описаны конструкция и принцип работы установки по определению качественных закономерностей гравитационного взаимодействия двух тел. Установка состоит из двух пар шаров – больших неподвижных и маленьких, закрепленных на вращающейся оси. Угол поворота малых шаров при гравитационном взаимодействии отсчитывается по перемещению светового зайчика от зеркала, закрепленного на оси подвижных шаров.

8. **Улучшение метода определения гравитационной постоянной.** Zimmermann Otto. Eine Verbesserung der Beschleunigungsmethode zur Bestimmung der Gravitationskonstanten. ″Prax. Naturwiss.″, **1969**, Teil 1, 18, № 11, 281-284. [РЖ 1970-5А36].

Отмечается, что при определении гравитационной постоянной при помощи крутильных весов, основной источник ошибок связан с неточностью в измерениях смещений и ускорений в начальный момент. В связи с этим описывается метод измерения смещений, обеспечивающий достаточную точность. Приведены выводы расчетных формул и результаты измерений, на основании которых получено значение гравитационной постоянной $f = (6{,}3 \pm 0{,}4)\cdot 10^{-11}$ м^3/кг$^{-1}$с$^{-2}$.

9. **Измерение гравитационной постоянной без юстировки прибора.** Eter. Die Messung der Gravitationskonstante ohne Geratejustierung. ″Prax. Naturwiss.″ **1973**, Teil 1, 22, ¹ 7, 172-175. [РЖ 1973-12А91].

Измерение гравитационной постоянной с помощью крутильных весов предлагается строить на измерении периода и огибающей затухающих крутильных колебаний. Смещенное положение равновесия крутильных весов после установки дополнительного шара, также как и начальное положение равновесия определяется как средняя линия между симметричными, приближенно экспоненциальными ветвями огибающей. Такая методика позволяет избежать тщательной юстировки нуля прибора, требующей весьма значительного времени из-за малого трения в системе и дрейфа нуля вследствие неравномерного нагрева прибора, движения воздуха в помещении, вибраций и т. п.

10. **Измерение гравитационной постоянной методом крутильных весов.** Zouzelka Jan, Siroka Miroslava. Mereni gravitacni konstanty metodou torznich vah. ″Mat. A fyz. Sk.″, **1975**, 6, № 4, 283-288. [РЖ 1976-7А109].

Кратко описаны принцип действия крутильных весов и использование их для измерения гравитационной постоянной. С помощью крутильных весов фирмы Leybold для гравитационной постоянной получены значения в пределах 5,7–6,4·10^{-11} Н·м^2/кг^2. Показано, как можно повысить точность измерений.

11. **Определение гравитационной постоянной и массы Земли в лабораторном практикуме.** Ахматов А.С., Еланский В.А., Островский М.С., Быстрова Г.В. ″Сб. науч.-метод. статей по физ. М-во высш. и средн. спец. образования СССР″, **1975**, вып. 4, 59-61. [РЖ 1976-5А109].

Предлагается лабораторная работа по определению гравитационной постоянной и массы Земли, поставленная на кафедре физики Московского станкоинструментального института. При выполнении работы не требуется использования малодоступной для большинства учебных лабораторий тонкой кварцевой нити, а также наличия ″светового луча″ большой длины. Крутильные весы име-

ют следующие параметры: диаметры свинцовых шаров 68 и 16 мм, расстояние между центрами малых шаров 120 мм. В качестве нити подвеса использована вольфрамовая проволока диаметром 30 мкм и длиной 0,3 м; при отсутствии вольфрамовой проволоки может быть использована медная проволока диаметром не более 100 мкм, причем для достижения необходимой чувствительности следует увеличить ее длину до 1,5 м. Для обеспечения высокой чувствительности подвижной системы она должна иметь период колебаний 300–600 с. Для определения гравитационной постоянной измеряется диаметр больших шаров, период колебаний подвижной системы, ширина коробки, в которой размещена подвижная система, а также смещение центра одного из малых шаров под действием притяжения к большому шару. Приведены замечания к выполнению работы и по конструкции прибора.

12. **Оптоэлектронное устройство для определения периода колебаний гравитационных крутильных весов.** Opto-elektrische Aufzeichnung der schwingungsdauer einer Gravitationsdrehwaage. Logl Stefan. ″Phys. Und Didakt.″, **1984**, 12, № 4, 314-318. [РЖ 1985-5А117].

Предлагается автоматическое устройство для записи затухающих колебаний в процессе успокоения гравитационных крутильных весов с целью определения периода этих колебаний и последующего нахождения гравитационной постоянной G. При обычном способе определения периода T по установившемуся отклонению весов коромысла требуется время ≈ 1 ч при периоде колебаний ≈ 10 мин. Приведена схема усилителя, на входе которого включается солнечный элемент; выход усилителя подключен к самописцу. Чувствительность самописца с усилителем составляет 50 мВ/см; скорость развертки 5 мм/мин. При перемещении луча, отраженного от зеркала весов по активной поверхности солнечного элемента, выходной сигнал прямо пропорционален засвечиваемой части этой поверхности. Точность определния G на основе записи затухающих колебаний составляет ≈1%.

13. **О гравитационном эксперименте Кавендиша в учебной лаборатории.** Кузьменко Г.И., Позывайло Ю. Г.; Ред. Ж. Изв. Вузов. Физ. Томск, **1998**. 6 с.: ил. Рус. Деп. В ВИНИТИ 30.09.88, № 7249-В88. [РЖ 1989-1А115 ДЕП.].

Сконструирована установка для фиксирования гравитационного притяжения. Приведены ее характеристики. Установка весьма доступна для лабораторий кафедр физики, где может быть налажена для учебной работы.

14. **Измерение гравитационной постоянной в учебной лаборатории.** Степанов Н.С., Шишарин А.В. Успехи физ. наук. **2002**. 172. № 5. 606-613. [РЖ 2002.12-18А.154].

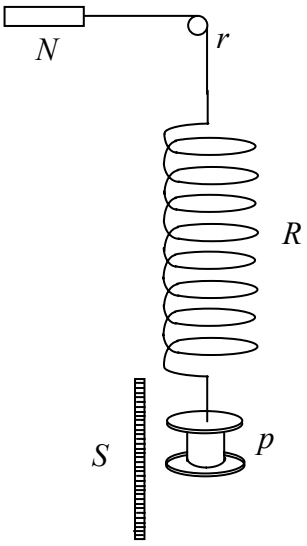
Описывается установка, позволяющая в условиях обычного лабораторного практикума для студентов провести измерение гравитационной постоянной. Установка содержит крутильный маятник, который в ходе эксперимента раскачивается за счет сил гравитационного притяжения со стороны дополнительных грузов с помощью специального устройства периодически в такт колебаниям маятника, меняющих свое положение. Гравитационная постоянная вычисляется по амплитуде установившихся колебаний. Излагается процедура эксперимента и расчетов, приводятся оценки погрешности измерений. Использование описанной установки в студенческом практикуме методически более уместно в разделе

”Колебания и волны”, т. е. на II курсе, когда изучаются закономерности свободных и вынужденных колебаний осцилляторов различной природы (так поступили авторы в Нижегородском университете), хотя университетские программы по общей физике предусматривают рассмотрение гравитационных сил уже на I курсе.

7.6. Пружинный маятник

1. **Изучение резонансных явлений при колебаниях пружинного маятника.** К.П.Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. **1946** г. Работа 4а. С. 105-106.

Пружинный маятник, применяемый в данной работе, состоит из цилиндрической спирально пружины *R* с грузом *p* на нижнем конце. Такой маятник может совершать вертикальные колебания, период которых зависит от упругих свойств пружины *R* и величины груза *p*. Верхний конец пружины *R* прикреплен к шнурку, который перекинут через небольшой блок *r* и присоединен к горизонтальному стержню *N*.



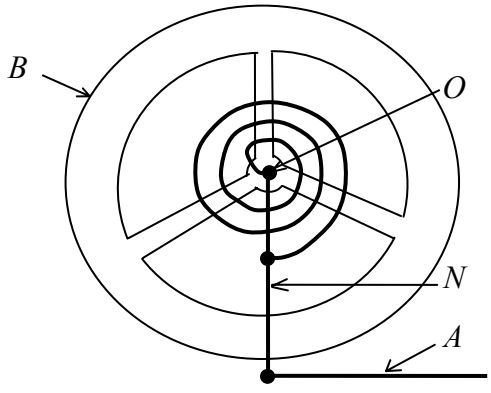
Стержень *N*, соединенный с эксцентриком мотора *постоянного* тока, совершает синусоидальные колебания, которые при помощи пружины *R* передаются грузу *p*. Таким образом, груз *p* находится под действием внешней периодической силы синусоидального характера. Ее амплитуда, определяемая ходом эксцентрика, остается постоянной, так же как и ее величина, которая определяется упругой силой пружины. Что же касается периода возбуждения, то его можно изменять в широких пределах соответствующим изменением числа оборотов мотора – для этого в цепь мотора введен реостат. Амплитуда вертикальных колебаний, которые совершает груз *p*, измеряется по шкале *S*.

Металлические диски, укрепленные вверху и внизу груза *p*, служат для того, чтобы несколько увеличить силы сопротивления, возникающие при его колебаниях.

В результате измерений частот собственных свободных колебаний груза и частот колебаний стержня строят резонансную кривую.

2. **Изучение явлений резонанса на приборе Поля.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. **1946** г. Работа 4с. С. 105-106.

В приборе Поля для изучения резонанса при механических колебаниях применяется пружинный маятник. Он представляет собой медное колесо, укрепленное на горизонтальной оси, которое совершает колебания под действием упругой силы плоской спиральной пружины.



Один конец ее прикреплен к оси колеса *O*, а другой – к рычагу *N*, который при помощи шарнира соединяется с длинным стержнем *A*, имеющим свободное движе-

ние в горизонтальном направлении. Второй конец стержня *A* присоединен к эксцентрику, укрепленному на оси электрического мотора *постоянного* тока. При вращении вала мотора стержень *A* совершает горизонтальные колебания, и конец спиральной пружины получает воздействие, которое при равномерном вращении вала мотора отвечают синусоидальному закону. Их частота определяется числом оборотов вала мотора в секунду. В цепи мотора включен реостат, что дает возможность изменять число оборотов вала мотора, т. е. частоту внешней силы, возбуждающей пружинный маятник. Затухание при колебаниях маятника *B* вызывается действием токов Фуко. Для этого служит электромагнит, установленный так, что колесо *B* совершает колебания в зазоре между его полюсами. Реостат, включенный в цепь электромагнита, дает возможность, регулируя силу тока, изменять напряженность магнитного поля между полюсами электромагнита. В соответствии с этим изменяется декремент затухания колебаний. При наступлении резонанса период внешней возмущающей силы и период свободных колебаний маятника должны быть равны, а сдвиг фазы должен быть равным 90^0.

3. **Изучение резонансных явлений при колебаниях пружинного маятника.** Физический практикум. Часть 1. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск. **1959**. Работа 17. С. 68-71.

4. **Определение ускорения свободного падения при помощи плоскопружинного маятника.** Хуска (A nehezsegi gyorsulas meghatarozasa lemezrugos ingaval. Huszka Ernone), Termeszettud. Tanitasa, **1959**. 3, 5-6 (венг.). [РЖ 1960-5-10226].

5. **Определение ускорения силы тяжести при помощи плоской пружины.** Май (g-Bestimmungen mit dem Blattfederpendel. May Kurt), Prax. Naturwiss., **1959**, 8, 1, Physik, 12-13 (нем.). [РЖ 1959-10-21717].

На конце длинной (17–18 см) плоской пружины укрепляют груз и определяют период колебания полученного пружинного маятника в трех положениях: 1) пружина расположена вертикально, укреплена внизу, груз находится наверху; пружина с грузом расположена горизонтально; 3) пружина расположена вертикально, укреплена наверху, груз находится внизу. Длина маятника во всех положениях остается постоянной. При этом получаются три значения для периода колебаний, что обусловлено различным значением коэффициента упругости пружины *k* в каждом отдельном случае. Приведены уравнения для определения величины *k*, из которых, зная периоды колебаний и длину маятника, можно рассчитать величину ускорения силы тяжести.

6. **Изучение собственных колебаний сосредоточенной системы.** Физический практикум. Под ред. В.И. Ивероновой. М., **1962**. задача 19. С. 120-122.

7. **Прибор для определения ускорения свободного падения.** Mitchell J. Taylor. Acceleration of gravity apparatus. “Amer. J. Phys.”, **1963**, 31, № 5, 392-393. [РЖ 1964-2А63].

К спиральной стальной пружине длиной ~1 м, подвешенной на штативе, прикрепляется конусообразная чашечка. В нее кладется стальной шарик. Измеряются частота и амплитуда возникающих колебаний. При прохождении чашеч-

ки через положение равновесия она останавливается, и шарик по инерции, имея скорость $v = a\omega$ (a – амплитуда колебаний), поднимается вверх на высоту h. Измеряя h, можно вычислить g по формуле: $g = v^2/2h$. Опыт дает значения g 975–985 см/с^2.

8. **Колебания пружины с грузом – эксперимент, часто неправильно истолковываемый.** Armstrong H.L. The oscillating spring and weight – an experiment often misinterpreted. ″Amer. J. Phys.″, **1969**, 37, № 4, 447-449. [РЖ 1970-1А59].

В экспериментах по изучению колебаний пружины с подвешенным на ней грузом обычно измеряются растяжение пружины и период вертикальных колебаний груза. Считается, что результаты этих экспериментов иллюстрируют закон Гука и гармонические колебания груза. Эксперимент очень прост, но в истолковании его существуют трудности, о которых студенты едва ли подозревают. Прежде всего, в действии цилиндрической пружины студент не в состоянии разобраться, а из имеющихся у студентов данных нельзя сделать заключения о подтверждении закона Гука. На самом деле сила, растягивающая цилиндрическую пружину, не строго пропорциональна удлинению, хотя при обычных условиях эксперимента этим можно пренебречь. Студенты обычно также не знают, что при растяжении цилиндрической пружины материал подвергается не растяжению, а скручиванию. Движение груза не является простым гармоническим; очевидно только, что период изменяется с нагрузкой. Наконец, едва ли можно пренебречь весом пружины, хотя обычно этому обстоятельству уделяется мало внимания. В заметке рассматривается влияние веса пружины. Автор считает, что эксперименты обычно проводятся с пружинами весом 100-200 *г*, и подвешиваемые грузы весят от 50 до 500 *г*, так что заведомо не всегда верно, что массой пружины можно пренебречь. Но суть в том, что ряд неправильных допущений взаимно компенсируется, и в результате получается правильный результат.

9. **Пружинный маятник.** Antoine Daniel. Pendule elastique. ″Bull. Union physiciens″, **1969**, 63, № 516, 1055-1056. [РЖ 1970-2А49].

При изучении поступательных колебаний тяжелого тела с массой M, подвешенного к пружине жесткости k, не учитывается масса пружины, которой нельзя пренебрегать по сравнению с массой подвешенного тела. Поэтому формула периода колебаний такого маятника $T = 2\pi\sqrt{M/k}$ не дает правильных результатов, даже если учесть все экспериментальные ошибки. Показано, как путем простых вычислений учесть массу пружины. Приведены результаты проведенных экспериментов.

10. **Вывод поправки на массу пружины.** Sears Francis W. A demonstrat5ion of he spring-mass correction. ″Amer. J. Phys.″, **1969**, 37, № 6, 645-648. [РЖ 1970-3А35].

11. **Эффективная масса колеблющейся пружины.** Fox J. G., Mahanty J. The effective mass of an oscilating spring. ″Amer. J. Phys.″, **1970**, 38, № 1, 98-100. [РЖ 1970-7А49].

Рассматривается осциллятор, состоящий из упругой пружины массой m и подвешенного к ней тела массой M. Из решения уравнения движения показано.

Что эффективная масса пружины изменяется от $4m/\pi$ до $m/3$ при изменении M от 0 до ∞.

12. **Вычисление констант пропорциональности в уравнении простого гармонического колебания.** Kruschwitz Walter H. Simple harmpnic motion and calculating a constant. ″Phys. Teacher″, **1970**, 8, № 8, 4586-459. [РЖ 1971-5А106].

Предлагается вариант лабораторного опыта по определению зависимости периода колебаний груза, подвешенного на пружине. Обычно в таком опыте измеряется период колебаний грузов разной массы и строится экспериментальная зависимость вида $T^2 \sim m$. Затем определяется упругая постоянная пружины k и экспериментальные данные сравниваются с известной формулой для периода колебаний $T=2\pi(m/k)^{1/2}$. В описанном варианте предлагается, кроме измерения зависимости $T^2 \sim m$ для разных масс, подготовить несколько калиброванных пружин и экспериментально определять зависимость вида $T \sim 1/k$ при постоянной массе груза для разных пружин. Сравнивая полученную зависимость с соотношением $T^2 \sim m$, можно легко получить более полную экспериментальную зависимость для периода колебаний вида $T2 \sim (m/k)$, из которой легко вычислить коэффициент пропорциональности, равный 2π, с точностью до 5–7%.

13. **Экспериментальное определение функционального соотношения для периода малых колебаний.** Grauer Albert D., Pittman Charles E. Experimentally determined functional relationships for small-amplitude oscillations. ″Amer. J.Phys.″, **1973**, 41, № 12, 1328-1331. [РЖ-74 5А74].

Описана постановка и результаты эксперимента по определению функциональной зависимости периода малых колебаний пружинного маятника от массы груза и коэффициента упругости пружины. Рассмотрены два метода обработки результатов эксперимента, позволяющие установить вид искомой функциональной связи (степенная функция) и определить с помощью ЭВМ показатели степени для массы груза и коэффициента упругости пружины. Определенные для типичных результатов эксперимента средние значения показателей степени оказались соответственно равными 0,498 и –0,504, а среднее значение коэффициента пропорциональности равно 6,47. Таким образом, по форме выражение для периода малых колебаний, определенное на основе рассмотренного эксперимента, полностью совпадает с известной формулой, получаемой аналитически с учетом закона Гука, причем показатели степени отличаются меньше чем на 1%, а коэффициент пропорциональности – меньше чем на 3%.

14. **Простое гармоническое движение и синусоидальная волна.** Eich Alfred M., Jr. Simple harmonic motion and the sinusoidal wave. ″Phys. Teacher″, **1973**, 11, № 1, 46-47. [РЖ 1973-5А60].

Описан лабораторный метод изучения вертикальных перемещений груза некоторой массы, подвешенного на пружине. Регистрация колебаний груза, освещаемого стробоскоскопической лампой, осуществляется на фотопленке с помощью обычного фотоаппарата, установленного на вращающемся столе. Показано, что зарегистрированные колебания имеют синусоидальный характер. Приведены результаты экспериментов для частоты вспышек стробоскопа 10 и 60 Гц. Для выявления связи между вертикальными перемещениями и синусоидальными ко-

лебаниями предлагается использовать картонный диск с двумя параллельными вертикальными прорезями, устанавливаемый перед экраном осциллографа.

15. **Определение периода колебаний вертикального пружинного осциллятора.** Walsh William Dillon. Predicting the period of a vertical spring system. ″Phys. Teacher″, **1976**, 14, № 3, 174-175. [РЖ 1976-8А69].

Описан простой метод выбора массы груза и пружины для пружинного осциллятора с заранее заданным периодом колебаний. Получено аналитическое выражение, связывающее изменение длины пружины при нагрузке с периодом колебаний системы и массой груза. Приведен пример расчета параметров системы для периода, равного ¾ с.

16. **Поведение мягкой пружины.** Heard Thomas C., Newby Neal D., Jr. Behavior of a soft spring. ″Amer. J. Phys.″, **1977**, 45, № 11, 1102-1106. [РЖ 1978-6А123].

Описывается эксперимент по изучению динамики поведения мягкой пружины. Результаты этого эксперимента показывают, что элементарная формула для периода колебаний и модифицированная формула, содержащая поправочный член для массы пружины, не описывают адекватно динамику системы. Построена простая теоретическая модель, позволяющая получить хорошее согласие с экспериментальными данными. Простота эксперимента позволяет проиллюстрировать взаимосвязь физического и математического аппарата для описания системы.

17. **Эквивалентная масса пружины. Период продольных колебаний винтовых пружин с учетом их массы.** Bubeck Heinrich. Federsatzmasse? oder: Die Schwingungdauer von Langsschwingungenden Schraubenfedern unter Beruckzichtigung ihrer Masse. ″Prax. Naturwiss. Phys.″, **1977**, 26, № 12, 317-327. [РЖ 1978-7А86].

Для учета массы пружины, на нижнем конце которой колеблется подвешенный груз, часто вводится эквивалентная масса (ЭМ) пружины. Предлагается другой способ учета массы пружины, позволяющий добиться лучшего согласования теории и эксперимента. При расчете периода колебаний нагруженной пружины используется условие равенства максимальной кинетической и потенциальной энергии. Из формулы периода ненагруженной пружины получено выражение ЭМ пружины. Предложен способ расчета периода колебаний для нагруженной пружины, в которой часть некоторой гипотетической первоначальной пружины заменяется грузом, подбираются условия равенства периодов колебаний груза и оставшейся части пружины. Рассмотрены два экстремальных соотношения масс пружины и груза. Приводится таблица типичных результатов измерений и расчетов по определению периодов колебаний. Обсуждается возможность дедуктивного изложения теории.

18. **Измерения характеристик пружин, не подчиняющихся закону Гука.** Measurements of some properties of non-Hoookean springs. Lancaster G. "Phys. Educ.", **1983**, 18, № 5, 217-220. [РЖ 1984-2А79].

Дано описание лабораторной работы для студентов первого курса по измерению характеристик пружин. Цель работы заключается в измерении величины, которую можно назвать "силой на единицу деформации". Измерения проводятся двумя способами: статическим (пружина находится в состоянии покоя) и дина-

мическим (пружина совершает гармонические колебания). Особенность работы в том, что при малых нагрузках деформация пружины не подчиняется закону Гука. Студентам заранее не известно о том, что им предстоит лабораторная работа с использованием именно этого случая. Подбором соответствующих нагрузок студенты приходят к нужному результату.

19. **Еще раз о системе ″пружина-груз″. The spring-mass system revisited. Cushing James T.** ″Amer. J. Phys.″, **1984**, 52, № 10, 925-933. [РЖ 1985-5А118].

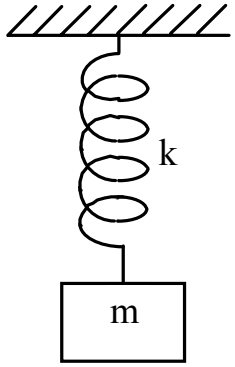
Обсуждается движение системы, состоящей из вертикально подвешенной за верхний конец массивной пружины и груза, закрепленного на нижнем конце пружины. Задача рассматривается для произвольного соотношения между массами пружины и груза. Движение такой системы не является простым гармоническим, а состоит из множества налагающихся гармоник. Показано, что движение груза описывается, в основном, колебаниями низшей моды. Влияние остальных гармоник несущественно при любых массах груза и пружины. Предложенное упрощенное решение, доступное для студентов начальных курсов, позволяет легко понять поведение системы. Предсказания теории можно проверить простыми опытами в лаборатории вводного курса физики. Рассмотрен также электрический контур, являющийся аналогом рассматриваемой механической системы. Таким аналогом является коаксиальный кабель с распределенными емкостью и индуктивностью, нагруженный на выходном конце индуктивностью. Подавая на вход сигнал с генератора, можно легко наблюдать на экране осциллографа резонансы на частотах гармоник.

20. **Експериментальные задачи по теме ″Механические колебания″.** Експериментални задачи по темата ″Механични трептения″. Иванов Д., Терзийски Т. ″Физика″ (НРБ), **1987**, 12, № 1, 16-21. [РЖ 1987-8А127].

Предложены условия и решения 8 экспериментальных задач на механические колебания: на определение периода колебаний пружинного маятника, масса груза которого равна сумме масс грузиков двух пружинных маятников с известными периодами колебаний, на определение периода колебаний столбика жидкости в сообщающихся сосудах, стержня, плавающего вертикально в жидкости, на измерение времени опускания маятника Максвелла, на измерение периода колебаний подвешенного обруча, измерение скорости звука в воздухе и т. д.

21. **Собственные колебания пружинного маятника.**

Матвеев А. Н., Киселев Д. Ф. Общий физический практикум. Механика. Изд. Моск. ун-та. **1991**. С. 226–232. Лаб. работа 21.



Маятник состоит из тела массы m и легкой, имеющей достаточно большое число витков пружины с жесткостью k (рис. 1).

В общем случае в зависимости от способа возбуждения (начальных условий) пружинный маятник может совершать достаточно сложные колебательные движения в пространстве. Однако если оттянуть тело маятника строго вертикально вниз на небольшое расстояние и отпустить его, то оно начнет совершать колебания только вдоль вертикальной линии. В этом случае для описания указанных

колебаний требуется только один параметр (координата), определяющий положение центра масс маятника по вертикальной оси. Таким образом реализуется случай колебаний с одной степенью свободы.

В данной лабораторной работе исследуются собственные колебания пружинного маятника, т. е. те колебания, которые возникают в системе после снятия воздействия внешней силы, выведшей маятник из состояния равновесия. При малых отклонениях x тела маятника от положения равновесия (и малой скорости его движения) колебания маятника описываются уравнением

$$m\ddot{x} = -h\dot{x} - kx,$$

где h – коэффициент вязкого трения, испытываемого телом маятника при его движении в воздухе. Это уравнение затухающих колебаний гармонического осциллятора.

Схема установки для изучения собственных колебаний пружинного маятника представлена на рис:

В нее входит собственно маятник, состоящий из легкой с достаточно большим числом витков пружины жесткости k и двух тел с массами соответственно m_1 и m_0. Тело m_1 выполнено в виде полого цилиндра, внутри которого находится постоянный магнит. Другое тело выполнено из железа и может быть помещено в стакан, наполненный водой. При движении тела в воде возникает вязкое трение, которое при небольшой амплитуде колебаний пропорционально скорости. Рядом с телом m_1 размещена измерительная катушка $L_{изм.}$, подключенная к основному входу осциллографа (вход y). В этой катушке при колебаниях маятника вследствие наличия в теле m_1 магнита возникает электродвижущая сила индукции, которая пропорциональна скорости движения маятника.

При изучении собственных колебаний для задания начального отклонения на катушку возбуждения $L_{возб.}$, расположенную под телом m_0, на короткое время подается постоянное напряжение от какого-либо источника, вследствие чего тело m_0 притягивается к этой катушке. При выключении напряжения исчезает сила притяжения между телом m_0 и катушкой $L_{возб.}$ и в системе возникают собственные затухающие колебания. Для наблюдения на экране осциллографа фигур Лиссажу необходим генератор переменного напряжения, которое подается на вход x осциллографа.

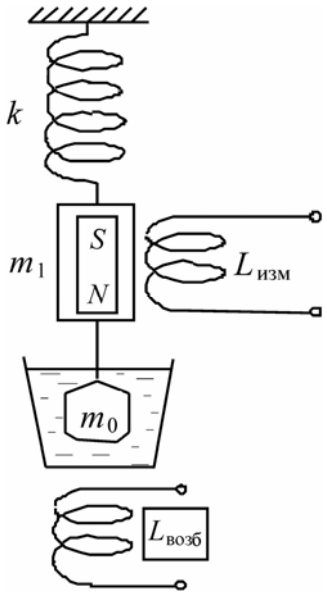
Содержание работы: – определение коэффициента жесткости пружины k статическим методом:

$$k = \frac{M_i g}{x_i} /,$$

где M_i – масса груза, растягивающего пружину на величину x_i; – вычисление собственной частоты маятника:

$$v_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m_0 + m_1}};$$

– измерение собственной частоты маятника динамическим методом.



Первоначально наблюдают вид собственных колебаний маятника, возбужденных с помощью источ-

ника, на экране осциллографа в режиме внутренней развертки. Затем определяют частоты собственных колебаний методом фигур Лиссажу. Для этого осциллограф переводится в режим внешней развертки, которая осуществляется от генератора переменного напряжения.

Измерение времени затухания колебаний τ и логарифмического декремента затухания θ. При этом на возбуждающую катушку устанавливается стакан, наполненный водой, и в нее погружается тело m_0.

Измерение величин τ и θ можно проводить двумя способами. В каждом из них на экране осциллографа наблюдают цуг затухающих колебаний. Первый способ состоит в измерении числа делений на экране осциллографа вдоль горизонтальной оси, в пределах которых амплитуда колебаний маятника уменьшается в e раз. Зная скорость развертки, это число делений пересчитывают во время τ и затем рассчитывают величину логарифмического декремента затухания

$$\theta = \frac{1}{\tau \nu_0}.$$

Второй способ состоит в счете числа колебаний N, при котором амплитуда колебаний маятника уменьшается в e раз. Тогда величина логарифмического декремента затухания будет

$$\theta = \frac{1}{N}.$$

На основании полученных значений логарифмического декремента затухания θ вычисляется значение добротности колебательной системы

$$Q = \frac{\pi}{\theta}.$$

22. **Определение коэффициента Пуассона и частоты биений.** ”Общий физический практикум. Механика.” Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Изд. моск. ун-та. **1991**. Лаб. работа 19. С. 203-208.

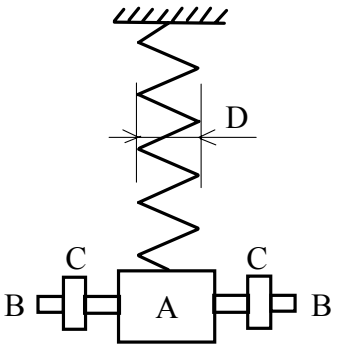
Как известно, при растяжении или сжатии тела, кроме их продольных размеров меняются и поперечные размеры. Связь между продольными и поперечными деформациями определяется коэффициентом Пуассона μ. Деформации сдвига и растяжения являются в общем случае зависимыми друг от друга, причем модуль сдвига G и модуль упругости E (модуль Юнга) связаны между собой простым соотношением:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}.$$

При колебаниях груза, подвешенного на пружине, обычно рассматривают поступательное движение по вертикали вверх и вниз. Однако это движение не является единственным. Одновременно можно создать и наблюдать и периодическое вращение груза вокруг его вертикальной оси. Если груз, спокойно висящий, осторожно повернуть вокруг этой оси и отпустить, кроме крутильных колебаний можно наблюдать и вертикальные.

Для пружины крутильные колебания вызываются деформацией изгиба, сводимой к деформации сжатия (растяжения) продольных слоев ее материала, а вертикальные – деформацией изгиба, сводимой к сдвигу слоев в поперечном сечении материала пружины. В силу связи между этими деформациями наличие одной из них ведет к появлению другой.

Для пружин с малыми углами наклона витков к горизонтали обычно пренебрегают деформацией сжатия по сравнению с деформацией сдвига. Это позволяет при их растяжении рассматривать только вертикальные колебания. Для этих же пружин при их закручивании можно пренебречь деформацией сдвига и рассматривать только крутильные колебания. При этих условиях легко определить коэффициент Пуассона по измерениям периодов колебаний этих типов груза на пружине.



Элементы установки для наблюдения продольных и крутильных колебаний пружины изображены на рисунке. Пружина диаметром D с грузом A на ее нижнем конце верхним концом прикреплена к консоли. Тело A, выполняющее роль груза – составное. Сквозь него проходит стержень BB, по которому могут перемещаться диски C – такая конструкция позволяет менять момент инерции груза относительно вертикальной оси.

Коэффициент Пуассона материала пружины рассчитывается по формуле

$$|\mu| == \frac{4J}{mD^2}\left(\frac{T_1^2}{T_2^2} - 1\right),$$

где m и J – соответственно масса и момент инерции груза, D – диаметр пружины, T_1 и T_2 – периоды колебаний соответственно вертикальных и крутильных.

Если задачу о колебаниях рассматривать более полно, то груз, подвешенный на винтовой пружине, необходимо считать системой с двумя степенями свободы. Груз одновременно совершает движения двух видов: крутильные и вертикальные колебания. Формально это аналогично движению двух маятников, соединенных между собой легкой пружинкой (связанные маятники). В нашем случае роль ”пружинки” играет связь между деформацией сдвига и деформацией сжатия.

Нормальные частоты колебаний груза на винтовой пружине не равны между собой. В этом случае можно наблюдать каждое собственное колебание – это крутильные и вертикальные колебания. Частоты этих колебаний – нормальные частоты.

Конструкция груза позволяет, не изменяя его массы, изменить его момент инерции, а, следовательно, и период крутильных колебаний. Приближая этот период к периоду вертикальных колебаний, можно наблюдать, как и в случае двух связанных маятников, появление биений, т. е. периодических изменений во времени амплитуды вертикальных и крутильных колебаний.

Частота биений ω равна разности собственных частот, т. е. разности частот колебаний двух видов (вертикальных ω_1 и крутильных ω_2):

$$\omega = \omega_2' - \omega_1 .$$

При этом период биений

$$\tau = \frac{T_1 - T_2'}{T_2' - T_1}.$$

23. **Изучение сложных деформаций на примере колебаний пружинного маятника.** Салецкий А.М., Слепков А.И. Шестая межд. конф. ”Физика в системе совр. Образования (ФССО-01)”. Ярославль. **2001**. Тез. докл. Том II. С. 147-148.

24. **Затухающие колебания пружинного маятника с переменной массой.** Damping in a variable mass on a spring pendulum. Digilov Rafael M., Reiner M., Weizmann Z. Amer. J. Phys. **2005.** 73. № 10. 901–905. [РЖ 18. Физика Ч. I. 2007. № 4. 18А.130].

7.7. Бифилярный маятник

1. **Несколько интересных вариантов колебательных систем.** Бартунек (Some interesting cases of a vibrating systems. Bartunek Paul F.), Amer. J. phys., **1956**, 24, № 5, 369-373. [РЖ 1956-12-33615].

Бифилярный маятник представляет собой груз, подвешенный на двух параллельных нитях равной длины. Такой маятник может качаться как обычный маятник с двойным подвесом, может совершать вращательное движение вокруг оси симметрии и, наконец, может качаться в плоскости подвесов. Показано, что анализ третьего вида колебаний дает наиболее простое решение при определении величины *g*. Тройной маятник, представляющий собой диск, который подвешен на трех нитях, позволяет легко определить момент инерции диска. Качающаяся на цилиндре линейка с равными грузами, установленными на равном расстоянии от середины, представляет собой систему, которая легко может быть сооружена в любой лаборатории. Система удобна в том отношении, что позволяет быстро и наглядно изменять как величину момента инерции, так и упругость системы. Проводится анализ указанных колебательных систем.

2. **Бифилярный маятник (лабораторная работа повышенной трудности).** Then John W. Bifilar pendulum – an experimental study for the advanced laboratory. ″Amer. J. Phys.″, **1965**, 33, № 7, 545-547. [РЖ 1966-2А52].

Выведены формулы для периода колебаний бифилярного маятника – тела, подвешенного на двух нитях и совершающего малые колебания в горизонтальной плоскости. Простейший случай бифилярного маятника – стержень длиной *d*, подвешенный на двух вертикальных нитях, прикрепленных к стержню на расстоянии ± *b* от его центра. В более сложных случаях тело имеет произвольную форму, а нити наклонены под углом β к вертикали. Работа заключается в сравнении экспериментальных значений *T* с расчетными, а также в определении момента инерции тел исходя из определенного на опыте периода колебаний маятника.

3. **Экспериментальное определение момента инерции при помощи бифилярного маятника).** Then John W., Chiang Kang-rong. Experimental determination

of moments of inertia by the bifilar pendulum method. ″Amer. J. Phys.″, **1970**, 38, № 4, 537-539. [РЖ 1970-9А79].

По измерению периода колебаний бифилярного маятника вычислялись моменты инерции тел различной конфигурации, симметричных относительно оси, соединяющей точки подвеса. Сравнение с теоретически вычисленными значениями показывает, что ошибка при экспериментальном определении не превышает 2%. Отмечаются простота и наглядность опытов по определению моментов инерции с использованием бифилярного маятника.

7.8. Маятник Максвелла

1. **Движение маятника Максвелла.** Физический практикум. Под ред. В.И. Ивероновой. М., **1962**. Задача 15. С. 105-107.

2. **Изучение движения маятника Максвелла.** Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. В.И. Ивероновой. М.-**1967**. с. 137-139.

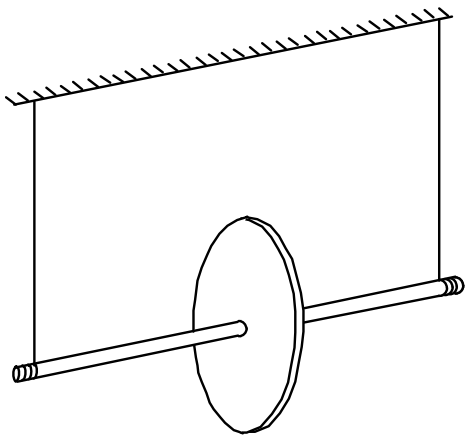
3. **Лабораторная работа по изучению колебаний маятника Максвелла.** Михайлов Б.Г. В сб. ″Физика″. Вып. 1. Алма-Ата, **1974**, 202-210. [РЖ 1976-5А111].

Рассмотрена теория колебаний маятника Максвелла, выведены формулы для основного параметра маятника (отношение энергии вращения к энергии поступательного движения), ускорения движения, времени рывка, создаваемого маятником, и т. д. Описано устройство прибора и методика выполнения лабораторной работы по определению основного параметра маятника, проверке уравнения для ускорения, определению времени рывка и силы рывка, проверке закона затухания колебаний маятника и др.

4. **Лаб. работа ”Изучение движения маятника Максвелла”.** Общий физический практикум. Механика. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. **1991.** Лаб. р. 11. С. 131-145.

Цель лабораторной работы – ознакомление с плоским движением твердого тела на примере движения маятника Максвелла. В лаборатории имеются три типа установок, различающихся деталями конструкции и измеряемыми величинами.

Вариант А. Маятник состоит из тонкого металлического стержня с симметрично укрепленным на нем диском.



К концам стержня прикреплены нити, на которых он и подвешен. Нити тщательно, виток к витку, наматываются на стержень (при этом стержень с диском поднимаются вверх). После освобождения маятника он начинает движение из верхнего положения под действием силы тяжести: поступательное - вниз и вращательное – вокруг своей оси симметрии. Вращение, продолжаясь по инерции в низшей точке, когда нити уже размотаны, приводит вновь к наматыванию нитей на стер-

жень, а следовательно, и к подъему маятника. Затем движение маятника вверх замедляется, он останавливается, снова начинается движение вниз и т. д. Такой колебательный характер движения вверх-вниз напоминает движение маятника, и поэтому устройство называется маятником Максвелла.

Цикл движения маятника Максвелла может быть подразделен на три стадии, а именно: спуск, ”удар”, поднятие вверх.

В ходе выполнения опыта по вертикальной шкале, расположенной в непосредственной близости к маятнику, делаются отсчеты, соответствующие начальному положению маятника, самому низкому в процессе его движения и самому высокому при его движении вверх, что позволяет определить длину спуска h_1 и длину подъема h_2. Измеряются времена движения маятника вниз (t_1) и вверх (t_2).

В ходе обработки результатов эксперимента вычисляются величины ускорений маятника при спуске (a_1) и подъеме (a_2)(в предположении, что эти движения равноускоренные. Затем вычисляются величины скоростей маятника до и после удара и коэффициент восстановления скорости, вычисляется момент инерции маятника. Используя данные о геометрических размерах маятника и плотностях материалов, из которых он изготовлен, рассчитывают теоретическое значение момента инерции и сопоставляют его с экспериментально полученным значением. Вычисляется время удара и максимальное увеличение силы натяжения нитей во время удара.

В качестве дополнительных заданий предлагается оценить величину удлинения нитей, возникающего при ударе, а также выяснить роль диаметра нитей в связи линейного и углового ускорений стержня маятника.

Вариант В. Маятник Максвелла подвешивается к концу коромысла лабораторных равноплечных весов вместо снятой платформы. Весы используются для взвешивания как неподвижного маятника (в нижнем его положении), так и для взвешивания движущегося маятника. Последняя операция позволяет определить ускорение маятника по разности натяжений нитей в этих двух случаях.

Вариант С. Маятник, применяемый в данном случае, отличается от тех, которые используются на установках типа А и В, тем, что его момент инерции можно изменять, надевая на диск сменные кольца.

5. **Маятник Максвелла и некоторые другие практические работы.**Colas J.-L. Bull. Union Phys. .-**1994** .-88 , № 765 .- С. 1059-1067 . Фр. [РЖ 1995.1А55].

Описана лабораторная работа по программе 15 класса. Представлена схема изложения темы. Фотография движущейся тележки с закрепленной в ней маятником Максвелла позволяют определить траекторию маятника относительно неподвижной системы. Вычислительно-графические работы помогают понять суть относительного движения.

6. **Лабораторные работы с использованием маятника Максвелла.** Ермакова Т.И. Учеб. Физ. **2007**. № 1, 37-41.

Предлагаются две лабораторные работы с использованием маятника Максвелла (“Расчет и измерение скорости падения маятника Максвелла” и “Определение момента инерции маятника Максвелла”), которые можно использовать при изучении динамики вращательного движения в классах физико-математического профиля. [РЖ Физика.08.06-18А.134].

7.9. Маятник Фуко

1. **Опыт с маятником Фуко, в котором применяется лазер и дифракционная решетка.** Fiklocki Stefan. Der Foucault-Pendelversuch mit Laser und optischem Gitter. ″Prax. Naturwiss. Phys.″, **1976**, 25, № 6, 154-157. [РЖ 1977-1А118].

Описан вариант опыта с маятником Фуко. Луч лазера разделяется в горизонтальном направлении с помощью дифракционной решетки. При повороте плоскости колебаний маятника его нить пересекает один за другим дифрагировааные лучи, что регистрируется на экране и дает возможность определить угловую скорость поворота. В одном из опытов получена угловая скорость поворота плоскости колебаний маятника $5{,}54\cdot10^{-5}$ $с^{-1}$, при более точном определении – $5{,}40\cdot10^{-5}$ $с^{-1}$.

2. **Портативный, непрерывно действующий маятник Фуко.** Portable, continuously operating Foucault pendulum. Kruglak Naum,Pittet Rene. ″Amer. J. Phys.″, **1980**, 48, № 5, 419-420. [РЖ 1981-1А80].

Описана конструкция портативного маятника Фуко с электромагнитным возбуждением, предназначенного для проведения опыта по демонстрации неинерциальности геоцентрической системы отсчета как в лекционных, так и в лабораторных помещениях. Устройство состоит из двух стальных платформ толщиной 0,64 см, размерами $15{,}2\times15{,}2$ $см^2$ и 61×61 $см^2$ соответственно, помещенных в тетраэдральную раму. Высота рамы составляет 160 см. Плексигласовый диск диаметром 8, 64 см и толщиной 1,59 см с системой зажимов для подвешивания маятника монтируется в середине верхней платформы. Маятник представляет собой чугунный шарик диаметром 7,62 см, подвешенный на проволоке диаметром 0,056 см. В приборе предусмотрено устройство для стабилизации амплитуды колебаний маятника, приведена соответствующая электрическая схема. В качестве электромагнита в приборе используется силовой трансформатор, размещенный на нижней платформе. Отмечается, что прибор должен быть огражден от воздушных потоков.

3. **Портативный маятник Фуко.** Kruglak Naym. A very short, portable Foucault pendulum. ″Phys. Teach.″, **1983**, 21, № 7, 477-479. [РЖ 1984-4А74].

Описана портативная модель маятника Фуко, которую легко сделать с помощью простых инструментов из дешевых деталей. На подвесе длиной 50 см стальной гитарной струны подвешивается железный груз. Под грузом устанавливается электромагнит с управляемой схемой электропитания на тиристоре. На электромагните укрепляется пластмассовый диск с делением для отсчета угла прецессии. Измеренная скорость прецессии маятника согласуется с теоретическими расчетами в пределах 2 %. Возможные причины погрешности – влияние магнитного поля Земли и намагничивания груза.

4. **Маятник Фуко. Ч. III. Реализация.** Le pendule de Foucault. Realization. Jouanisson Roland. ″Bull. Union. Phys.″, **1983**, 77, № 652, 735-739. [РЖ 1983-9А87].

Описан способ реализации простого маятника Фуко, позволяющего определить скорость вращения Земли с точностью до 10%. Стальной шар весом 0,8 кг на рояльной струне диаметром 0,3 мм и длиной не менее 2 м крепится к карда-

новому подвесу. Для запуска маятника с нулевой начальной скоростью используется электромагнит. Поворот плоскости качания маятника измеряется с помощью лазера.

5. **Измерение угловой скорости вращения Земли с помощью маятника Фуко.** Дымченко Н.П. СФП-**2002** С.-П. Тез. Докл. М.-2002, с. 272.

7.10. Маятник Вильберфорса

1. **Снова о маятнике Вильберфорса.** Wilberforce′s pendulum revisited. Kopf Ulrich. Amer. J. Phys. **1990**. 58, № 9. С. 833-837. [РЖ 91-7А150].

В 1985 году Р.Л. Вильберфорсом были проанализированы колебания обычного пружинного маятника, в котором в качестве груза использовался металлический цилиндр. Момент инерции маятника мог изменяться в небольших пределах при помощи больших гаек на шпильках, прикрепленных к цилиндру крестообразно в горизонтальной плоскости. При правильно подобранном моменте инерции и других параметрах маятника в такой системе возникают биения как результат сложения крутильных и продольных колебаний. Приводятся экспериментальные результаты. Анализируются теоретические результаты Зоммерфельда, полученные в 1905 году, но не получившие широкой известности.

2. **Колебания маятника Вильберфорса и моды колебаний.** Wilberforce pendulum oscillations and normal modes. Berg R.E., Marshall T.S. Amer. J. Phys. **1991**. 59, № 1. С. 32-38. [РЖ 92-1А172].

Маятник Вильберфорса, названный так по имени его изобретателя, демонстратора физических экспериментов в кавендишской лаборатории Кэмбриджа, состоит из тела, подвешенного на гибкой спиральной пружине, что обеспечивает реализацию продольной и вращательной мод колебаний. Маятник может быть эффективно использован в экспериментах по определению коэффициента Пуассона, а также для демонстрации передачи механической энергии между продольной и вращательной модами. Описана демонстрация нормальных координат и процедура теоретического и экспериментального определения частоты нормальных колебаний. Разработана программа дл ПЭВМ на языке Бейсик, позволяющая моделировать колебания маятника Вильберфорса.

7.11. Маятник Катера

1. **Определение ускорения силы тяжести по способу оборотного маятника Катера.** Физический практикум. Часть 1. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск. **1959**. Работа 4. С. 26-30.

2. **Маятник Катера.** (Замечания по статье Н.А. Лисенкова ″Физический маятник″). Сенеш Г. ″Изв. высш. учебн. заведений. Физика″, **1968**, № 6, 125-126. [РЖ 1968-12А56].

Излагается общая теория реального маятника Катера, дающая ответ на ряд вопросов, которые не обсуждались в статье Н.А.Лисенкова (РЖФиз, 1967, 10А64), а именно: в каких условиях проблема имеет решение, сколько имеется решений и каковы свойства этих решений.

3. **Возможный источник ошибок при использовании маятника Катера.** Jesse K.E., Born H.J. Possible source of error when using the Kater pendulum. ″Phys. Teacher″, **1972**, 10, № 8, 466. [РЖ 1973-3А100].

Отмечается, что в известном эксперименте с маятником Катера величина ускорения силы тяжести g не может быть определена однозначно из измерений величины периодов и приравнивания их для случая, когда центр масс системы находится посредине между осями вращения, без дополнительного измерения радиуса вращения маятника. Аналитически показано, что величина k, входящая в выражение для определения периода колебания, в этом случае может принимать все возможные значения в зависимости от расположения регулирующих масс маятника. Т. к. периоды колебаний являются функциями k, то их величина тоже будет изменяться в широких пределах. Но в случае, если центр масс системы не находится посредине между точками вращения, k имеет единственное значение, которое и определяет величину четырех равных периодов. Предложенный метод расчета дает более точный расчет величины g.

4. **Маятник Катера.** Reynolds James M. Kater′s pendulum. ″Eal. Rev.″, **1977**, 1, № 4, 2-3. [РЖ 1979-4А113].

Разработана методика экспериментального изучения физических свойств сложного маятника. Приведено простое доказательство утверждения, что если сложный маятник (тело распределенной массы) имеет равные периоды колебаний относительно точек подвеса, расположенных на неравных расстояниях от его центра масс, то сумма этих расстояний эквивалентна длине простого математического маятника с таким же периодом. Выведено уравнение для периода колебаний сложного маятника относительно таких точек, в которое не входят момент инерции и масса маятника. Предложен учебный эксперимент, иллюстрирующий описанное свойство. В эксперименте определяются периоды колебаний оборотного маятника относительно фиксированных точек подвеса для различных положений груза. Строится график зависимости периодов колебаний как функций положения груза. Данные эксперимента можно использовать для определения ускорения свободного падения с ошибкой <1%.

7.12. Другие маятники

1. **Определение ускорения силы тяжести методом Борда.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 6b. С.122-124.

Физический эффект – колебания маятника, состоящего из металлического шарика, подвешенного на очень тонкой проволоке, наблюдаемые на фоне колебаний секундного маятника (физического маятника, период колебаний которого равен одной секунде). Величина ускорения свободного падения определяется по формуле:

$$g = \frac{\pi^2}{T^2}(l' + r)\left(1 + \frac{1}{4}\sin^2\frac{\alpha}{2}\right)^2,$$

где l' – длина нити подвеса, r – радиус шарика, α – амплитуда колебаний маятника. Период колебаний маятника T устанавливается по методу совпадений отклонений обоих маятников. По формуле

$$g_0 = \frac{G}{G - v\gamma}$$

вычисляется истинное значение ускорения свободного падения g_0, в то время как g – его кажущееся значение в воздухе; вес шарика в пустоте $G = P + v\gamma$, где P – вес шарика в воздухе, v – объем шарика, γ – удельный вес воздуха при температуре наблюдения.

2. **Определение ускорения силы тяжести маятником Бесселя.** Физический практикум. Часть 1. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск. **1959**. Работа 3. С. 24-26.

3. **Исследование колебаний камертона при помощи осциллографа.** Heise Hans. Zur Untersuchung von Stimmgabelschwingungen mit dem Oszillographen. “Prax. Natuwiss,” **1960**, F9, № 12, Physik, 309-311.

[РЖ 1961-8А65].

Сообщается о методике исследований колебаний камертона с использованием электронного осциллографа. Перпендикулярно к ножкам камертона на 125 герц, длина которых 20 см, помещается высокоомный телефон, соединенный с осциллографом. Легким прикосновением к ножкам у их основания погашался обертон, и на экране осциллографа наблюдалась осциллограмма основного тона. Прикосновением же на расстоянии около 1/5 от свободного конца ножки можно было погасить основной тон и наблюдать обертон. Основной тон можно наблюдать также, если перемещать вдоль ножки камертона освобожденный от ярма полюс телефонного магнита: когда полюс магнита находится вблизи пучности колебаний, на экране наблюдается основной тон.

4. **Исследование соударений стальных шаров.** Egidy Till von. Utersuchungen uber den Stoβ von Stahlkugeln. “Z. angew. Phys.”, **1961**, 13, № 10, 475-478. [РЖ 1962-4А51].

Два хорошо отполированных одинаковых шара из твердой стали подвешены на нитях так, что расстояние между точками подвеса меньше расстояния между центрами шаров. Если развести шары и отпустить их, то шары после первого столкновения отскакивают и продолжают соударяться все с большей частотой, так что возникает слышимый повышающийся тон, который, наконец, обрывается в пределах слышимости. Поставлена задача изучить это явление повышения частоты и в частности определить верхнюю границу частот. Шары имели диаметр 7 см, вес 1435 г. Проволока подвеса (стальная) имела диаметр 0, 25 или 1 *мм*; применялись также нитяные подвесы длиной 10, 25 и 45 см. Полурасстояние между точками подвеса составляло 0,5 см. Соударения подсчитывались счетчиком, измерялось повышение частоты и определялась потеря энергии при каждом соударении. Продолжительность соприкосновения шаров и окончательная частота оценивались с помощью осциллографа. В отличие от обыкновенного (математического) маятника шары не возвращаются к вертикальному положению, вследствие чего период колебаний зависит от максимального отклонения и от энергии системы. Увеличение частоты при соударениях зависит от потери энергии. Относительная потеря энергии для энергий столкновений, превышающих 1500 эрг, зависит от подвеса, при меньших энергиях она почти постоянна. В процентном от-

ношении потеря энергии при соударении для энергий, меньших 1500 эрг, <0,35%. Слышимый при соударениях тон создается попеременным засасыванием и выталкиванием воздуха в промежуток между шарами. Соударения прекращаются, когда максимальное расстояние между шарами становится порядка шероховатости поверхности шаров; в этом случае продолжительность соприкосновения больше интервала между соударениями. Окончательная частота зависит от силы соударения и составляет 600–800 гц. Подобные же явления можно наблюдать и со стеклянными шарами.

5. **Знакомство со специальным случаем колебательного движения.** Toth Lajos. Kulonleges “ingarmozgas” bemutatasa. “Fiz. tanitasa”, **1962**, 1, № 2, 54-57 (венг.) [РЖ 1963-1А99].

Выводится формула для периода колебаний тела, двигающегося без трения по двум симметричным по отношению к горизонтальной поверхности наклонным пересекающимся плоскостям. Подробно описано проведение опыта по экспериментальному изучению такого вида колебательного движения с учетом трения.

6. **Маятник с цепью.** Krumm Erich. Die Kettenpendel. “Prax. Naturwiss.”, **1963**, A12, № 6, Physik, 152-154. [РЖ 1964-1А76].

Маятник состоит из двух цилиндрических сосудов, подвешенных на нити, перекинутой через неподвижный блок. На крючки, приделанные ко дну каждого сосуда, надета цепь, подобная велосипедной (сгибается в одной плоскости). В сосуды насыпают дробь. При помощи полученного таким образом маятника можно показать ряд демонстрационных опытов и проверить формулу свободных колебаний. Приведены формулы, результаты измерений и расчеты.

7. **Вертикальный баллистический маятник.** Weltin Hans. Vertical ballistic pendulum apparatus. “Amer. J. Phys.”, **1963**, 31, № 9, 719-722. [РЖ 1964-2А64].

Вертикальный баллистический маятник состоит из прямоугольной коробочки, наполненной песком и бифилярно подвешенной к пружине, закрепленной на неподвижном штативе. Отмечается, что преимущество вертикального баллистического маятника перед горизонтальным заключается в том, что при проведении опытов не требуется орудия для выстреливания снаряда; достаточно подвесить стальной шарик над маятником на некоторой высоте и дать ему возможность упасть. Помещая шарик на различной высоте относительно маятника, можно также исследовать поведение нагруженной пружины в гравитационном поле.

8. **Газовый маятник.** Шакуров П.Ф. “Приборы и техника эксперимента”, **1963**, № 6, 192-193. [РЖ 1964-5А80].

Разработан новый принцип физического маятника, который заключается в следующем. В основании маятника, состоящего из твердого материала (металл), сделано сферическое углубление. На это основание поставлен диск, поверхность которого точно пришлифована к поверхности углубления. При подаче сжатого газа через дросселирующее отверстие (фильеру), проходящее в основании маятника, между сопряженными поверхностями образуется ламинарный слой газа толщиной в несколько микрон, благодаря чему диск оказывается взвешенным в газе и приобретает способность скользить с весьма малым трением по ламинар-

ному слою газа. При отклонении диска от положения равновесия диск приходит в колебательное движение, подобное колебательным движениям обычного маятника. Период колебаний газового маятника зависит от кривизны поверхности углубления и вычисляется по обычной формуле для физического маятника

$$T = 2\pi\sqrt{I/mgr},$$

где r – расстояние центра тяжести диска до воображаемой оси вращения, I – момент инерции диска относительно этой оси. В газовом маятнике нет стержня, призм, стоек, благодаря чему он приобретает ряд важных качеств. При периоде 5–10 сек. Размеры маятника малы (~2–3 см), тогда как обычный маятник с таким периодом должен быть длиной в десятки метров со стойками такой же длины. Благодаря малым размерам сферический газовый маятник удобно применять для демонстрации в планетариях, школах, вузах, напр., для доказательства вращения Земли.

9. **Опыты по динамике твердых тел.** Weltin Hans. Experiment in rigid-body dynamics. ″Amer. J. Phys.″, **1966**, 34, № 9, Part 1, 764-766. [РЖ 1967-2А57].

Стальной шарик колеблется около положения равновесия на вогнутой поверхности стеклянной линзы. Цель работы заключается в измерении периода колебаний от радиуса шарика и радиуса кривизны поверхности линзы, сравнении измеренных значений с расчетными, исследовании зависимости периода колебаний от чистоты поверхности. Оказывается, что наилучшее совпадение данных опыта с расчетными значениями периода получается не в случае идеально чистых поверхностей, а при загрязнении их пальцами рук, т. е. тонким слоем жира. Дано объяснение этого эффекта.

10. **Определение ускорения свободного падения при помощи водяного столба и математического маятника.** Kroncke Helmut. Wassersaule und Faden pendel. ″Prax. Naturwiss.″, **1967**, À 16, 7, 172-174. [РЖ 1968-1А64].

Описывается оригинальный способ определения ускорения свободного падения при помощи водяного столба, заключенного в U-образной трубке. Если A – общая длина трубки, a – расстояние от концов трубки до спокойной поверхности воды, то период может быть рассчитан по формуле $T = \left(2\pi^2 A/g\right) - \left(4\pi^2 a/g\right)$. Приведены результаты измерений, согласно которым получено значение g = 9,5 м/с^2. Ошибка обусловлена затуханием колебаний вследствие трения. Аналогичные измерения можно провести с математическим маятником, общая длина которого L состоит из участка постоянной длины L_0 и участка a, длину которого можно изменять. Практически нить такого маятника состоит из двух проволочек с загнутыми в виде крючков концами, обращенными к середине. Крючки соединены шнуром. Период колебаний измеряют для двух разных значений a и определяют g по формуле $g = 4\pi^2(a_1 - a_2)/\left(T_1^2 - T_2^2\right)$. Ошибка измерений не превышает 2%.

11. **Определение гравитационной постоянной методом весов Ождьяни.** Cseko Arpad. A gravitacios allando meghatarozasa Ozsgyani laszlo gravitacios ingajaval. ″Fiz. szemle″, **1967**, 17, № 2, 59-60 (венг.) [РЖ 1968-3А59].

12. **Эквивалентные длины маятников, образованных плоскими круговыми кольцами.** Jensen H.C., Haisley W.E. On the equivalence of truncated ring pendula. ″Amer. J. Phys.″, **1967**, 35, №10, 971-972. [РЖ 1968-7А65].

В лаборатории по общей физике студентам предлагается вывести эмпирически зависимость периода колебаний кольцевого маятника от диаметра. При этом получается, что эквивалентный простой маятник имеет длину, равную диаметру кольца, и что период маятника не изменяется с уменьшением сектора, симметричного относительно вертикальной оси. В заметке предлагается распространение этой функциональной зависимости на случай, когда толщина кольца в направлении радиуса не пренебрежимо мала. В более общем случае уменьшение симметричного сектора также не оказывает влияния на период, а эквивалентный простой маятник имеет длину, равную половине длины радиуса инерции кольца относительно его геометрического центра. В заметке приведено доказательство этого предложения. Показано, что длина эквивалентного маятника равна средней квадратичной внешнего и внутреннего диаметра.

13. **Измерение массы независимо от веса.** Terenyi Lajos. Das Messen der Masse unabhangig vom Gewicht. ″Prax. Naturwiss.″, **1969**, Teil 1, 18, № 3, 79-80. [РЖ 1969-10А53].

Прибор состоит из двух плоских деревянных брусков, соединенных упругими пластинками. Один брусок при помощи зажимов укрепляют на краю стола так, чтобы другой мог быть приведен в колебательное движение в горизонтальной плоскости. На второй брусок помещают различные тела и измеряют периоды колебаний. Если одно из тел принять за эталон, можно по отношению периодов колебаний определить массу тела в сравнении с эталоном. Взвешивая эти же тела на весах, можно убедиться в том, что отношение масс тел равно отношению их весов.

14. **Сохранение механической энергии.** Biancone A., Rubini M., Zambelli M. ″G. fis. soc. Ital. fis.″, **1969**, 10, № 3, 222-233 (итал.) [РЖ 1970-4А94].

Справедливость закона сохранения энергии в механике проверяется с помощью маятника, заполненного внутри песком, высыпающимся через отверстие диаметром 4 мм. Изучение изменения массы маятника в функции времени, а также распределение высыпающегося песка по различным участкам позволяет с сравнительно большой точностью определить скорость маятника и величину его смещений.

15. **Малоизученный пример простого гармонического движения.** Metzger Eli. An unusual case of simple harmonic motion. ″Amer. J. Phys.″, **1972**, 40, № 8, 1167-1168. [РЖ-73 1А52].

Рассмотрена система, в которой горизонтальный брусок свободно размещен на опорах, представляющих собой два валка, вращающихся с очень большой скоростью. С учетом сил трения получены уравнения и проанализирована динамика движения для трех возможных вариантов вращения валков, при которых векторы тангенциальной скорости в точках касания с бруском направлены: а) навстречу друг другу, б) в разные стороны, в) в одном направлении. В первом случае устанавливается режим гармонического движения, в двух других смещение бруска относительно положения равновесия имеет необратимый характер.

Отмечается, что в установившемся режиме движения система ведет себя подобно упругой пружине с грузом, закрепленным на ее конце. Однако в подобной аналогии необходимо отметить очень существенное различие. В случае упругой пружины силы торможения возникают внутри самой системы, а для рассмотренного примера они существенно зависят от кинематических и динамических характеристик вращательного движения и определяются поступлением внешней энергии, необходимой для постоянного вращения валков.

16. **Колебания жидкости в U-образной трубке.** Morinigo Fernando B. Fluid odcillations in a *U* tube. ″Amer. J. Phys.″, **1972**, 40, № 2, 350-351. [РЖ 1972-7А98].

Разработана задача общего физического практикума, посвященная изучению затухающих колебаний, а также адиабатического сжатия и расширения воздуха. Используется U-образная трубка длиной 120 см, диаметрами (внешним и внутренним) 3,6 и 3,0 см; расстояние между вертикальными коленами 12 см. Диаметр изогнутой части равен диаметру прямой. Трубка наполняется различными количествами воды, которая выводится из состояния равновесия. Экспериментально устанавливается зависимость среднего периода (для 10–20 колебаний) от количества воды, изучается затухание колебаний, определяется коэффициент затухания. При изучении адиабатических процессов трубка с одной стороны закрывается. Длина трубки в этом случае должна быьб несколько больше так, чтобы прямая часть составляла по 60 см, а столб воды 50 см. При этом период колебаний в начале составит 1/3 с. Задача удобна для ознакомления с использованием логарифмической и полулогарифмической миллиметровой бумаги.

17. **Запись колебаний в U-образной трубке.** Seufert Wolfgang. Aufzeichnung von U-Rohr-Schwingungen. Prax. Naturwiss.″, **1972**, Teil 1, 21, № 5, 114-117. [РЖ 1972-10А104].

Если в U-образную трубку налить жидкость и вывести ее из положения равновесия, то жидкость при отсутствии трения совершает гармонические колебания. Приводится доказательство этого положения и выводится формула длительности периода колебаний. Описана экспериментальная установка для наблюдения колебаний жидкости (ртути) в U-образной трубке, состоящей из трубки со столбом ртути высотой 85 см, потенциометра, моста Уитстона и регистрирующего прибора (самописца).

18. **Изучение собственных колебаний сосредоточенной системы.** Руководство к лабораторным работам по физике. Часть I. Механика. Молекулярная физика. Под ред. А.П. Максименко. Днепропетровский. гос. ун-т. **1973**. Работа 6.

19. **Упругий маятник.** Dobrovolskis A. Rubber band pendulum. ″Amer. J.Phys.″, **1973**, 41, № 9, 1103-1106. [РЖ-74 2А46].

Получено аналитическое выражение зависимости силы от расстояния при вертикальных колебаниях маятника, где в качестве упругого тела используется полоска резины. При выводе предполагалось, что напряжения подчиняются закону Гука. Полученное выражение использовано для предсказания поведения реального упругого маятника с грузом на конце. Показано, что для малых, но конечных амплитуд колебаний движение является изохронным, а период колебаний не зависит от амплитуды; в случае, когда амплитуда колебаний превыша-

ет некоторую величину, зависимость периода колебаний от амплитуды имеет более сложный вид. Приведен краткий анализ колебаний такого маятника для трехмерного случая.

20. **Две работы лабораторного практикума по механике.** Токмашев М.Г., Кундозерова Л.И. В сб. ″XII науч. конф. Новокуз. гос. пед. ин-т. Вып. 3. Секц. Физ.-мат. и общетехн. Дисциплин. Тезисы докл.″ Новокузнецк, **1974**, 47-49. [РЖ 1975-4А76].

Представлены основные идеи по изготовлению установок и методике выполнения двух лабораторных работ по механике: 1) проверка закона сохранения импульса; 2) изучение затухающих и вынужденных колебаний. В описаниях работ приведены краткая теория изучаемых явлений и необходимая литература. Описаны конструкции установок, даны советы по методике выполнения работ и предлагаются контрольные вопросы.

21. **Колебания нагруженной резиновой ленты. Дискуссия по статье Добровольскиса ″Резиновый маятник″.** King Allen L. Oscillations of a loaded rubber band. Discussion on the paper: ″Rubber band pendulum″ by A. Dobrovolskis. ″Amer. J.Phys.″, **1974**, 42, № 8, 699-701. [РЖ-75 3А69].

Критикуется статья ″Резиновый маятник″ (РЖФиз, 1974, 2А46), в которой анализировались колебания груза, подвешенного на полоске резины, на основе использования закона Гука. Дается краткий качественный обзор теории растяжения резин и предлагается применять закон деформации статистической теории высокоэластичности. Описываются колебания маятника, следующие из этого закона. Отмечается, что изучение колебаний резинового маятника может быть полезной лабораторной работой для студентов различного уровня.

22. **Маятник с переменным *g*, оценка.** Hennig Lee Ann A. Variable g pendulum, an evaluation. ″Phys. Teacher.″, **1975**, 13, № 6, 365-366. [РЖ 1976-2А107].

Описано устройство лабораторного маятника, сконструированного и изготовленного фирмой Physics Apparatus Research Inc. Конструкция маятника позволяет изменить плоскость качания маятника по отношению к вертикали. На период качания маятника влияет только гравитационная составляющая в плоскости качания. Случай, когда плоскость качания маятника составляет 0^0 к вертикали, соответствует земному гравитационному притяжению и g=980 *см/с*^{2}, а для плоскости качания под углом в 90^0 к вертикали g=0. Измеряя период колебаний маятника, учащиеся по известной формуле вычисляют величину g для данного угла качания. Представлен перечень усовершенствований данной конструкции, предложенный учащимся средней школы, которые первыми использовали маятник в своих экспериментах.

23. **Простое экспериментальное введение при изучении гармонических колебаний.** Bonera C. I., Villa M. Simple experimental introduction to harmonic oscillations. ″Amer. J. Phys.″, **1976**, 44, № 11, 1121-1123. [РЖ 1977-5А89].

Описана экспериментальная установка, предназначенная для использования в лабораторном курсе физики при изучении гармонических колебаний. Установка, имитирующая осциллятор, представляет собой ″водяной потенциометр″, и состоит из кюветы, наполненной водой, двух медных электродов, соединенных с

двумя батареями постоянного тока, и маятника, на конце которого имеется металлическая игла. Колебания маятника регистрируются с помощью самописца. Для одновременной записи колебаний нескольких осцилляторов используется набор последовательно соединенных ″потенциометров″, имеющих маятники различных масс. Приведены экспериментальные результаты, полученные на данной установке. Обсуждаются преимущества описанной установки по сравнению с традиционными установками, использующими проволочные потенциометры.

24. **Лабораторный эксперимент с маятником, совершающим колебания с большой амплитудой. Другой подход.** Hall Donald E., Shea Michael J. Large-amplitude pendulum experiment: another approach. ″Amer. J. Phys.″, **1977**, 45, № 4, 355-357. [РЖ 1977-9А83].

Описана методика проведения лабораторного эксперимента по изучению движения маятника, совершающего колебания с амплитудой $>160^0$. В ходе эксперимента студенты исследуют зависимость периода колебаний маятника от амплитуды и определяют несколько членов в ряде Тейлора, описывающем указанную зависимость. Большое внимание уделяется графическому анализу получаемых в эксперименте данных. Подробно описаны конструкция маятника и используемая аппаратура. Эксперимент рекомендуется проводить в лабораторном практикуме повышенного типа.

25. **Демонстрация сохранения механической энергии.** Demonstration of the conservation of mechanical energy. Chinn Leung. ″Phys. Teach.″, **1979**, 17, № 6, 385. [РЖ 1980-2А84].

Обычно в лабораторном курсе для проверки закона сохранения механической энергии используется баллистический маятник, с помощью которого демонстрируется принцип сохранения момента количества движения. Предложен более прямой метод иллюстрации закона сохранения энергии с помощью обычного маятника, состоящего из шарика, подвешенного на нерастяжимой нити. Опыт сводится к прямой проверке равенства кинетической ($1/2\ mv^2$) и потенциальной энергии ($mgL\cos\theta_0$, где L – длина нити, θ_0 – угол отклонения маятника от вертикали), в котором все величины, кроме скорости маятника v, легко измеряются. Для нахождения v используется соотношение

$F - mg = mv^2/L$, где F – натяжение нити в момент прохождения маятником положения равновесия; F измеряется с помощью динамометра, к которому подвешивается маятник. Рекомендуется вводит поправки к длине маятника из-за растяжения пружины динамометра. Отмечается, что период колебаний маятника должен быть мал по сравнению с периодом системы. Точность предложенного метода составляет около 5%.

26. **Экспериментальное изучение механических колебаний с помощью тензометрических полос.** Die experimentelle Darstellung mechanischer Schwingungen mit Hilfe von Dehnungsmeβstrreifen. Kleinstuck Gert. ″Prax. Naturwiss. Phys.″, **1980**, 29, № 10, 289-296. [РЖ 1981-4А113].

Металлическая тензометрическая полоса (МТП) представляет собой сетку из металлического проводника очень малого сечения. При растяжении или сжатии МТП ее электрическое сопротивление меняется. В случае небольших относи-

тельных изменений длины (порядка 10^{-3}) изменение сопротивления оказывается пропорциональным удлинению. Описана демонстрация записи механических колебаний с помощью МТП. На конце жестко подвешенного плексигласового стержня помещены тяжелые свинцовые бруски, к которым прикреплены небольшие магниты. МТП укреплены вблизи точки подвеса стержня. Сигналы от них регистрируются самопишущим потенциометром. Исследуются свободные колебания стержня, а также затухающие колебания. Кроме того, прибор позволяет изучать вынужденные колебания стержня, вызванные внешним переменным магнитным полем, а также колебания под действием двух переменных полей с разными частотами.

27. **Энергия и центростремительная сила.** Energy and centripetal force for under two dollars. Pitucco Anthony. ″Phys. Teach.″, **1981**, 19, № 2, 121-122. [РЖ 1981-7А100].

Описан простой и недорогой эксперимент, демонстрирующий концепцию механической энергии и центростремительной силы. Механический маятник, подвешенный к одному из плеч равноплечного балансира, уравновешивается грузом, подвешенным к другому плечу. Маятник при этом находится в состоянии покоя. При приведении маятника в состояние колебаний балансир выходит из равновесия; натяжение нити маятника максимально при прохождении его через наинизшую точку траектории. Увеличение массы уравновешивающего груза (от1 до 10 г) вновь восстанавливает равновесие весов. Полученная из эксперимента зависимость массы груза от величины массы маятника, длины нити маятника, а также максимальной высоты подъема колеблющегося маятника относительно наинизшей точки его траектории сравнивается с зависимостью, предсказанной теоретически. Проведенное сравнение подтверждает ряд фундаментальных соотношений классической механики. Описаны детали экспериментального оборудования. Ошибка эксперимента составляет 1–2%.

28. **Математический маятник во вращающейся системе отсчета.** The simple pendulum in a rotating frame. Abdel-Rahman A.-M. M. "Amer. J. Phys.", **1983**, 51, № 8, 721-724. [РЖ 1984-2А45].

Рассматривается математический маятник, совершающий колебания в плоскости, вращающейся относительно вертикальной оси с постоянной угловой скоростью. Проанализированы классический, полуклассический и квантовый аспекты движения маятника при отрицательных значениях полной энергии во вращающейся системе отсчета. Изучаются движение маятника при угловых скоростях, превышение которых связано с нарушением симметрии задачи. Показано, что при незначительном превышении критической скорости поведение системы хорошо описывается полуклассическим приближением, приводящим к задаче с дискретными энергетическими уровнями. При дальнейшем увеличении скорости все более начинают сказываться квантовые эффекты, приводящие к задаче с уравнением Шредингера, собственными функциями которого являются функции Матье четного и нечетного порядка.

29. **Маятник с ЭВМ для дидактики.** A computer assisted pendulum for didactics. Di Licto A., Fenicia S., Mancini P. Eur. J. Phys. **1991**. 12, № 1. С. 51-52. [РЖ 91-6А101].

Кратко описана новая установка, используемая для учебных целей. Она включает маятник с возможностью многократных вращений, оптический датчик положения маятника, построенный на вращающихся поляризаторах, микроЭВМ, осуществляющую высокоскоростную выборку данных об угловой позиции маятника, предварительную обработку и пересылку данных через последовательный канал стандарта RS-232 в персональную ЭВМ. Сигнал, вырабатываемый детектором положения, представляет собой импульс, длительность которого пропорциональна абсолютному угловому смещению маятника. Метод обеспечивает высокую точность измерений (относительная погрешность порядка $2 \cdot 10^{-4}$) для любого числа оборотов маятника. Система проста и понятна с точки зрения обучения.

30. **Изучение хаотических колебаний в лабораторном практикуме.** Ездов А.А., Ильин В.А., Петрова Е.Б. Преподавание физ. в высш. шк. **1994**. № 1. 40-52, 104. [РЖ 1997.04А81].

Лабораторная работа поставлена в специальном практикуме педагогического вуза и посвящена изучению хаотических колебаний в детерминированных системах. В работе предусматривается выполнение математического моделирования и компьютерного эксперимента, а также непосредственное исследование возникновения хаоса в некоторых электронных устройствах.

Обсуждаются две методики графического представления данных при выполнении лабораторной работы.

31. **Фигуры Лиссажу в физическом практикуме.** Николаев В.И., Бушина Т.А. Шестая межд. конф. ФССО-01. Ярославль. **2001**. Тез. докл. Том II. С 164.

32. **Сложение колебаний и волн.** Водолазская-ФОВ-**2001**, т.7, № 1, с. 98.

33. **Сила трения как причина возникновения гармонических колебаний.** Бубликов С.В. Учеб. физ. **2001**. № 6. 9-11. [РЖФиз. 03.11-18А.150].

Изложен учебный вариант теории колебаний стержня, лежащего на двух цилиндрах, вращающихся в противоположные стороны с одинаковыми скоростями.

34. **Исследование основных параметров колеблющегося флага.** Калиткин М.Ю.СФП-**2002.** С.-П. Тез. Докл. М.-2002, с. 284.

35. **Учебная установка для изучения колебаний столба жидкости.** Карпова Г.В., Пауков В.М., Полунин В.М., Сычев Г.Т. Сб. тезисов докладов VII уч.-методич. конференции стран Содружества ”СФП”. С.-Пет. **2002**. С.117.

36. **Осциллятор переменной массы. Variable mass oscillator.** Flores J., Solovey G., Gil S. Amer. J. Phys. **2003**. 71, № 7. 721-725. [РЖФиз. 04.09-18А.170].

37. **Качание “ньютоновской колыбели” [колебания соприкасающихся шаров, подвешенных по одной линии].** Pocking Newton’s cradle. Hurder Stefan, Defaney Gary, Weaire Denis. MacLeod Finn. Amer. J. Phys. **2004**. 72. № 12, 1508-1512. [РЖФиз. 06.10-18А.94].

38. **Анализ линейности полупериодов лоренцевского маятника.** Analysis of the linearity of half periods of the Lorentz pendulum. Wickramasinghe T., Ochoa R. Amer. J. Phys. **2005**. 73. № 5. 442–445. [РЖ 18. Физика Ч. I. 2007. № 3. 18А.134].

Анализируется движение лоренцевского маятника – простого маятника, длина которого изменяется с постоянной скоростью k. Аналитически и численно показано, что полупериод T_n, то есть время между двумя полуосцилляциями, измеряемое от средней точки до средней точки в процессе движения, линейно возрастает с числом n как $T_{n+1} - T_n \approx k\pi^2/2g$, где g – ускорение свободного падения. Для съемки осцилляций и проверки линейности T_n от числа колебаний использовалась видеокамера.

39. **Учебное исследование маятника с внезапно изменяющейся массой.** Майер В.В., Рудин А.С. Учеб. Физ. **2007**. № 1, 46-51. [РЖ Физика.08.06-18А.135].

Рассмотрена задача о высоте поднятия математического маятника, масса груза которого в нижней точке траектории внезапно увеличилась. На этом простом примере демонстрируется экспериментальное подтверждение законов сохранения энергии и импульса в механике. Показано, как эта учебная задача может быть использована для организации исследования учащихся, приводящего к объективно новому результату в учебной физике.

40. **Исследование хаотического двойного маятника в лаборатории физики на базовом уровне.** Vanko P. Eur. J. Phys. **2007**. 28, № 1. 61–69. [РЖ Физика.08.07-18А.126].

41. **Эксперименты с магнитно управляемым маятником.** Rraftmacher Y. Eur. J. Phys. **2007**. 28, № 5. 1007– 1020. [РЖ Физика.08.10-18А.108].

42. **Изохронность циклоидального маятника.** Кабисов К.С., Харитонов И.Е. МГОУ-XXI – Нов. Технол. **2007**. № 1. 55–57. [РЖ 18. Физика Ч. I. **2007**. № 11. 18А.105].

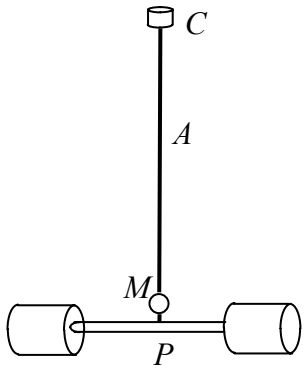
Рассматривается лабораторная работа по изучению колебаний циклоидального маятника (массивный цилиндр движется так, что центр его основания описывает циклоиду). Момент инерции такого тела определяется по периоду его колебаний. Характер движения цилиндра определяется из предположения, что сила трения качения так мала, что можно пренебречь диссипацией энергии, но при этом исключается проскальзывание цилиндра при его качении по направляющим. Задача решается двумя способами с использованием закона сохранения механической энергии и уравнения Лагранжа второго рода.

7.13. Колебания с трением

1. **Определение декремента затухания упругих колебаний.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. **1946** г. Работа 3а. С. 97-98.

Физический эффект: Затухающие колебания физического маятника (груза, подвешенного на тонкой проволоке).

Прибор для наблюдения упругих колебаний состоит из металлической проволоки *A*, верхний конец которой закреплен. На ее нижнем конце подвешен груз *P*, центр тяжести которого расположен на продолжении оси проволоки *A*. В верхней части груза на его оси вращения прикреплено зеркальце *M*. Если груз *P* повернут на некоторый угол около вертикальной оси, то проволока закручивается, и в ней появляются упругие силы. Вследствие этого система, предоставленная самой себе, начинает совершать упругие (крутильные) колебания около вертикальной оси, постепенно затухающие. Момент инерции груза сделан достаточно большим, так что период крутильных колебаний достигает 5–6 секунд. Наблюдение колебаний и измерение их амплитуд производится методом зеркала и шкалы. Для того, чтобы можно было груз *P* приводить в крутильные колебания, не сообщая ему одновременно маятникообразных колебаний, верхний конец нити *A* прикреплен к горизонтальной шайбе *C*, укрепленной на кронштейне, которую можно при помощи шнурка поворачивать на небольшой угол около



вертикальной оси, после чего шайба с действием спиральной пружины возвращается в прежнее положение.

При приборе имеются две проволоки для подвеса груза, стальная и медная. Соответственно различным коэффициентам упругости стали и меди декремент затухания в том и другом случаях имеет различную величину.

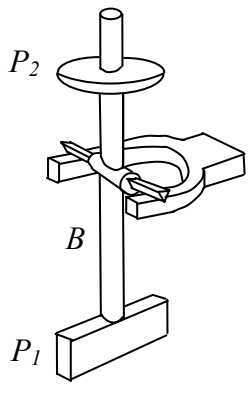
Измеряется период колебаний системы, величины последовательных амплитуд. По формулам

$$D = \frac{a_n}{a_{n+2}} = e^{\delta T},\ \theta = \ln\frac{a_n}{a_{n+2}} = \ln e^{\delta T} = \delta T$$

вычисляют декремент затухания колебаний *D*, логарифмический декремент затухания θ и коэффициент затухания δ.

2. **Определение декремента затухания при колебаниях маятника.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. **1946** г. Работа 3б. С. 98-101.

Маятник, который применяется в данной работе, кроме тяжелого груза p_1 на нижнем конце штанги *B*, имеет еще дополнительный груз p_2, расположенный выше точки опоры маятника. Груз p_2 можно передвигать вдоль штанги, закрепляя его в любом положении. Трение в точках опоры маятника (ребро стальной трехгранной призмы) очень незначительно, так что колебания маятника происходят с весьма малым затуханием.



Чтобы его увеличить, применяется электромагнитное торможение: нижним грузом маятника служит массивная металлическая пластина, которая при колебаниях маятника движется в магнитном поле между полюсами двух соленоидов. Вследствие этого в ней возникают токи Фуко, которые производят тормозящее действие и увеличивают затухание колебаний.

Декремент затухания в этих условиях зависит от напряженности магнитного поля в пространстве между полюсами соленоидов. Отсюда следует, что декремент затухания будет изменяться при изменении силы тока в цепи соленоидов, которая измеряется по показаниям амперметра, магнитное поле, даваемое соленоидами, не является однородным, вследствие этого декремент затухания зависит от амплитуды колебаний. Отсюда следует, что все измерения с прибором следует производить по возможности при одной и той же амплитуде колебаний. С этой целью, сообщая маятнику колебания, его отклоняют всегда на один и тот же угол. Таким образом, начальная амплитуда колебаний маятника остается всегда постоянной. Логарифмический декремент затухания ϑ следующим образом связан с характеристиками эксперимента:

$$\vartheta = k\frac{I^2T}{2RJ},$$

где k – некоторый постоянный коэффициент, I – сила тока через соленоид, T – период колебаний маятника, R – сопротивление пластины p_1, J – момент инерции маятника относительно его точки опоры. Эта формула показывает, что логарифмический декремент затухания при колебаниях маятника в магнитном поле соленоида должен изменяться прямо пропорционально квадрату силы тока в цепи соленоида и обратно пропорционально омическому сопротивлению пластины ρ_1 при условии, что период колебаний и момент инерции маятника остаются постоянными. При приборе имеется три пластины, сделанные из меди, латуни и цинка, одинакового размера. При этом условии омическое сопротивление пластин можно считать пропорциональным удельному сопротивлению их материала. Таким образом, применяя написанную выше формулу к двум пластинам одинакового размера, но из разных материалов, можно для одной и той же силы тока написать (при условии, если отношение T/J для различных пластин сохраняет постоянное значение):

$$\frac{\vartheta_1}{\vartheta_2} - \frac{R_2}{R_1} = \frac{\rho_2}{\rho_1},$$

где ρ_1 и ρ_2 – удельные сопротивления той и другой пластины.

Логарифмический декремент затухания вычисляется по результатам измерений последовательных амплитуд колебаний по формуле

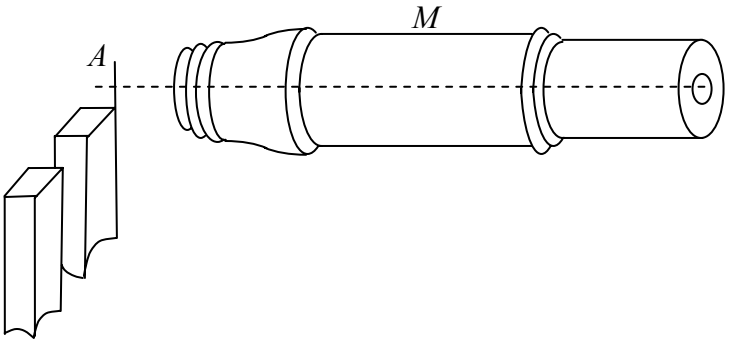
$$. \vartheta = \ln\frac{a_n}{a_{n+2}}$$

Результаты определения декремента затухания при различных силах тока изображают графически, откладывая по оси абсцисс логарифмический декремент затухания, а по оси ординат – силу тока.

Те же самые измерения повторяют с латунной и цинковой пластинами, причем необходимо при перемене пластин проверять период колебания маятника. Если период заметно изменился по сравнению с его начальным значением при медной пластине, то необходимо привести его к прежнему значению, соответственно изменяя положение груза p_2. Определять декременты затухания для ла-

тунной и цинковой пластин следует при тех же силах тока в соленоиде, какие были для медной пластины.

3. **Определение декремента затухания камертона при помощи микроскопа.** П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 16а. С.222-224.



Измерения амплитуд колебаний камертона в данной работе производится при помощи микроскопа *M* с окулярным микрометром, шкала которого расположена горизонтально. На конце одной ветви камертона укреплено тонкое, отполированное острие *A*. Его изображение наблюдается в микроскопе, укрепленном горизонтально на штативе. При этом оптическую ось микроскопа направляют перпендикулярно к плоскости колебания камертона.

При его звучании резкое изображение острия в поле микроскопа растягивается в светлую горизонтальную полоску, длину которой измеряют в относительных единицах по числу делений шкалы окулярного микрометра.

Камертон приводится в колебание легким ударом резинового молотка. Для того, чтобы при этом камертон не сдвигался с места, нижнюю доску его резонаторного ящика закрепляют неподвижно при помощи зажима, укрепленного на столе. Такие же наблюдения повторяют для камертона без резонансного ящика, закрепляя его за ножку в массивных металлических тисках. В этом случае звук, даваемый камертоном, значительно ослабевает. Это показывает, что количество звуковой энергии, которое камертон отдает в окружающую среду в единицу времени, при наличии резонансного ящика оказывается значительно больше, что следует также и из теории резонаторов. Измерения в данной работе имеют своей целью выяснить влияние резонансного ящика на затухание камертона. Эти измерения выполняются последовательно для двух камертонов различной частоты, которая на них указана. Собственно измерения состоят в определении того промежутка времени *t*, в течение которого амплитуда колебаний камертона уменьшается в два раза по отношению к его начальной амплитуде. Вычисляется логарифмический декремент затухания *D* по формуле:

$$D = \sqrt[n]{2},$$

где *n* – число колебаний камертона за время *t*.

4. **Определение декремента затухания при колебаниях маятника.** Физический практикум. Часть 1. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск. **1959**. Работа 11. С. 52-55.

5. **Оборотный маятник с затуханием.** Обсуждение статьи ″Аналитическое решение для перевернутого маятника″ Фелпса и Хантера. Ответ авторов. Joshi S.S.

Inverted pendulum with damping. Discussion on the paper: ″An analytical solution of the inverted pendulum″ by F.M. Phelps, III and J.H. Hunter, Jr.-Author′s reply. ″Amer. J. Phys.″, **1966**, 34, № 6, 533-535. [РЖ 1967-1А36].

В статье Иоши указывается, что в работе Фелпса и Хантера (РЖФиз, 1965, 12А60) об оборотном маятнике не учитывается затухание. Если принять затухание пропорциональным скорости, то решение получается аналогичным путем, причем возникает вопрос о возможности неограниченного роста амплитуды. В ответе Фелпса и Хантера указывается, что затухание, обусловленное сопротивлением воздуха, пренебрежимо мало, что подтверждается согласием с опытом тех значений амплитуды, вычисленных без учета затухания, при которых наступает неустойчивость. Кроме того, отмечается, что затухание правильнее считать пропорциональным квадрату, а не первой степени скорости.

6. **Определение периода колебаний для случая одномерного затухающего гармонического движения.** Allen Mildred, Saxl Erwin J. The period of damped simple harmonic motion. ″Amer. J. Phys.″, **1972**, 40, № 7, 942-944. [РЖ 1972-12А86].

При помощи теоретических расчетов и эксперимента показано, что для точного определения периода колебаний в случае одномерного затухающего гармонического движения нельзя пользоваться произвольной точкой начального отсчета. Наиболее точные результаты получаются в случае, если в качестве точки отсчета принято положение равновесия маятника. Менее удовлетворительным, но допустимым вариантом является использование в качестве контрольной точки одного из положений максимального отклонения.

7. **Лабораторная работа по теме ″Гармонические колебания″ для студентов инженерно-механических и инженерно-электрических специальностей.** Vibration laboratory work for mechanical and electrical engineering undergraduates. Lloyd D., Breckell T. H. ″Proc. 4 Brit. Conf. Teach. Vibr. And Noise, Sheffield, 6-8 July, **1982**″. Sheffield, 1982, 251-259. [РЖ 1983-11А139].

Описывается лабораторная работа по теме ″Гармонические колебания″ для студентов. Работа заключается в исследовании характеристик затухающих гармонических колебаний механической пружины и построении расчетной модели этого процесса на основе модельного электрического контура. Такая методика позволяет достичь понимания того, что явления различной физической природы могут быть описаны одними и теми же математическими выражениями. Кроме того, работа позволяет привить навыки в применении моделей для описания различных физических процессов.

8. **Изучение затухающих и вынужденных колебаний в учебной лаборатории.** Teaching damped and forced oscillations in the student laboratory. Boving R., Hellemans J., De Wilde R. ″Phys. Educ.″, **1983**, 18, № 6, 275-276. [РЖ 1984-5А120].

Описана установка для демонстрации изучения затухающих и вынужденных колебаний системы. Измерение характеристик линейной системы второго порядка может быть проведено тремя различными независимыми путями – на основе изучения свободного движения, по амплитудному отклику, по фазовому отклику. Экспериментальные результаты могут быть легко сопоставимы с точными формулами.

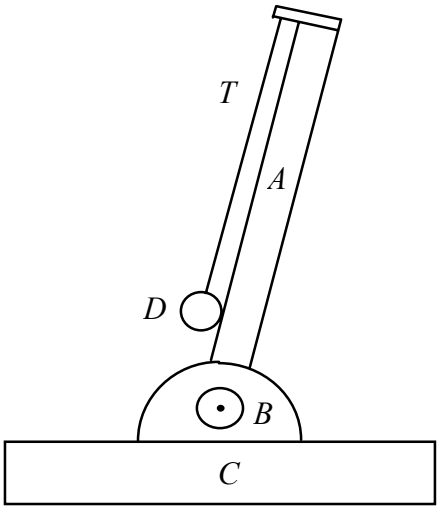
9. **Колебания с линейным демпфированием.** Linear gedampfte Schwingungen. Kursawe Klaus. ″Prax. Naturwiss. Phys.″, **1984**, 33, № 11, 327-331.

Рассмотрен случай гармонических затухающих колебаний с амплитудой, спадающей во времени по линейному закону. Сила сопротивления – $F_R \cdot \frac{v}{|v|}$, где v – скорость тела, постоянная по величине и изменяющая знак при переходе через точку нулевого смещения. Проведен анализ решения дифференциального уравнения колебаний с постоянной силой трения. Показано, что количество полупериодов колебаний до полного затухания амплитуды смещения равно $s_0 D / 2F_R$, где s_0 – начальное смещение, D – коэффициент упругости пружины. Полное время затухания составляет при этом $s_0 DT / 4F_R$, где T – период колебаний. Описана экспериментальная модель пружинного маятника, в которой постоянная сила трения создается при перемещении угольной пластины по металлическому штативу, а величина силы упругости и смещения измеряется электронными весами с самописцем на выходе. Приведены экспериментальные графики колебательных процессов с линейно спадающей амплитудой.

10. **Использование видеозаписи для изучения затухающего движения маятника. Лабораторная работа.** Using videotapes to study underdamped motion of a pendulum: A laboratory project. Greenwood Margaret Stautberg. ″Amer. J. Phys.″, **1987**, 55, № 7, 645-648. [РЖ 1988-3А105].

Описана методика проведения лабораторной работы по исследованию движения маятника с использованием видеозаписи. Работа включает проведение трех экспериментов: измерение периода колебаний маятника, качающегося с большой амплитудой, определение зависимости углового отклонения маятника, качающегося с большой амплитудой, от времени и исследование влияния сопротивления воздуха на движение маятника небольшой массы. Экспериментальные результаты сравниваются с рассчитанными на ЭВМ решениями дифференциального уравнения, описывающего движение маятника. Отмечается удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных результатов.

11. **Собственные линейные и нелинейные колебания, измерение коэффициентов трения.** Лаб. работа 16 в кн.: ”Общий физический практикум. Механика.” Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Изд. моск. ун-та. **1991.** С. 167-179.



Основным элементом экспериментальной установки является стержень *A*, который с помощью шарнирного устройства *B* может быть закреплен под произвольным углом к вертикали.

Шарнирное устройство расположено на массивной платформе *C*. К верхнему концу стержня *A* на нити *T* подвешен стальной шарик *D* массой *m*. При вертикальном расположении стержня *A* шарик не соприкасается со стержнем и может совершать колебания, затухание которых определяется в основном

сопротивлением воздуха. Измерив продолжительности n колебаний t_n, за которые амплитуда колебаний уменьшается от величины a_0 до a_n, можно вычислить декремент затухания δ:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{a_0}{a_n}$$

логарифмический декремент затухания θ:

$$\theta = \frac{1}{n} \ln \frac{a_0}{a_n}$$

и коэффициент трения шарика о воздух b:

$$b = 2m\delta .$$

При ориентации стержня A под углом $\gamma > 0$ к вертикали шарик соприкасается с поверхностью стержня. Если при этом отклонить шарик от положения равновесия, шарик будет перекатываться по поверхности стержня, совершая сложное колебательное движение, при котором имеет место поступательное движение центра масс шарика и вращательное движение относительно оси, совпадающей с нитью подвеса шарика. Уравнения этих движений соответственно

$$mL_0\ddot{\beta} = -mg\cos\gamma\beta + F_{\text{тп}}$$

и

$$J_0\ddot{\varphi} = -F_{\text{тп}}r + M_{\text{тк}} .$$

Здесь $L_0 = L+r$, L – длина нити подвеса, r – радиус шарика, β – угол отклонения нити от вертикали, $F_{\text{тп}}$ – сила трения покоя, J_0 – момент инерции шарика относительно оси, совпадающей с нитью подвеса, φ – угол поворота шарика относительно этой оси $M_{\text{тк}}$ – момент силы трения качения относительно этой же оси.

Момент силы трения качения пропорционален силе нормального давления:

$$M_{\text{тк}} = \pm k_1 mg\sin\gamma.$$

Здесь k_1 – коэффициент силы трения качения (он имеет размерность длины). Решение этих уравнений приводит к выражению для коэффициента силы трения качения:

$$k_1 = \frac{a_0 - a_n}{4nL_0} r \cdot \text{ctg}\gamma .$$

12. **Изучение и реализация затухающего пружинного маятника.** Etude et realization d'un pendule elastique amorti. Nourtier A. Bull. Union Phys. **1992**. 86, № 747. С. 1207-1218. Фр.

Представленная конструкция позволяет изучать свободные колебания пружинного маятника и причины затухания. Интересны два момента; 1) затухание колебаний осуществляется с помощью токов Фуко. В этом случае сила трения пропорциональна скорости движения колеблющегося тела и коэффициекнт трения легко подсчитывается с помощью приборов, включенных в электрическую схему; 2) положение колеблющегося тела фиксируется величиной сигнала, зависящего от глубины погружения тела в соленоид. Приведены данные всех эле-

ментов устройства. По кривой свободных затухающих колебаний рассчитан логарифмический декремент затухания. Рассмотрено влияние массы пружины на свободные колебания. Изучена эффективность устройства, предназначенного для затухания колебаний.

13. **Лабораторная работа "Изучение затухающих крутильных колебаний, упругих и неупругих свойств материала".** Качевский А.Н. Физическое образование в ВУЗах. Т. 6, № 3, **2000** г., с. 46-48.

14. **Затухающий маятник под действием постоянного крутящего момента.**

A damped pendulum forced with a constant torque. Coullet P., Gilli J. M., Monticelli M., Vandenberghe N. Amer. J. Phys. **2005**. 73. № 12. 1122–1128. [РЖ 18. Физика Ч. I. 2007. № 8. 18А.128].

Теоретически и экспериментально изучается динамика затухающего маятника под действием постоянного момента кручения. Это простое устройство используется для демонстрации некоторого общего динамического поведения, включая потерю равновесия или бифуркацию седлового узла *c* и без гистерезиса гомоклинической бифуркации. Для выявления роли двух безразмерных параметров, соответствующих затуханию и силовому воздействию, развит количественный анализ.

15. **Изучение затухающих колебаний в колебательном контуре с использованием виртуальных приборов.** Куватов З. Х., Абакачев Ф. Ф. Международная уфимская зимняя школа-конференция по математике и физике для студентов, аспирантов и молодых ученых. Уфа, 30 нояб.-6 дек., **2005** : Тезисы докладов. Уфа. 2005.127. [РЖ 18. Физика Ч. I. 2007. № 1. 18А.127].

16. **Контролируемое затухание физического маятника: эксперименты вблизи критических условий.** Controlled damping of a physical pendulum: Experiments near critical coditoons. Gonzalez M. I., Bol A. Eur.J. Phys. **2006**. 27. № 2. 257–264. [РЖ 18. Физика Ч. I. 2007. № 11. 18А.106].

7.14. Маятник с колеблющейся точкой подвеса

1. **Маятник с препятствующим штифтом.** Friedrich Artur. Das Hemmungspendel. "Prax. Naturwiss."**, 1970,** Teil 1, 19, № 6, 148-150. [РЖ 1970-12А57].

Маятник представляет собой тяжелый шарик, подвешенный на нити. На одной вертикали с точкой подвеса помещают штифт, препятствующий свободному движению нити. Таким образом получается маятник, у которого продолжительность одного полупериода T_1 соответствует его полной длине l_1**,** а продолжительность второго T_2 – зависит от положения штифта. Опыт 1. Помещая штифт на различных расстояниях от оси вращения, проверяют соотношение $T_1/T_2 = \sqrt{l_1}/\sqrt{l_2}$, где l_2 – длина заторможенного маятника, отсчитываемая от штифта. Опыт 2. Определение *g* методом Бесселя по величине разности длин двух маятников: свободного и заторможенного штифтом. Опыт 3. Если опускать штифт, длина заторможенного маятника будет уменьшаться. Согласно закону сохранения энергии укороченный маятник будет подниматься все выше и при

некотором соотношении между длинами свободного и заторможенного маятника сможет описать полную петлю.

2. **Вынужденные колебания маятника с движущейся точкой подвеса.** Общий физический практикум. Механика. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. **1991.** Лаб. р. 24. С. 243-247.

Вынужденные колебания в системе возникают в том случае, если на нее действует внешняя периодическая сила. В настоящей работе рассматриваются малые колебания маятника, точка подвеса которого сама совершает гармонические колебания по горизонтальной линии. В этом случае точка подвеса будет испытывать периодически меняющееся со временем ускорение. Уравнение движения маятника имеет вид

$$J\ddot{\alpha} = -k\alpha - h\dot{\alpha} + mlb\omega^2 \sin \omega t\,,$$

где J – момент инерции маятника, α – угол отклонения маятника от положения равновесия, k – коэффициент момента возвращающих сил, h – коэффициент трения, m – масса маятника, l – расстояние от точки подвеса до центра масс маятника, b – амплитуда отклонения точки подвеса, ω – частота колебаний точки подвеса. Отметим, что амплитуда момента внешнего воздействия зависит от частоты ω. Закон движения маятника после затухания его собственных колебаний соответствует вынужденным колебаниям

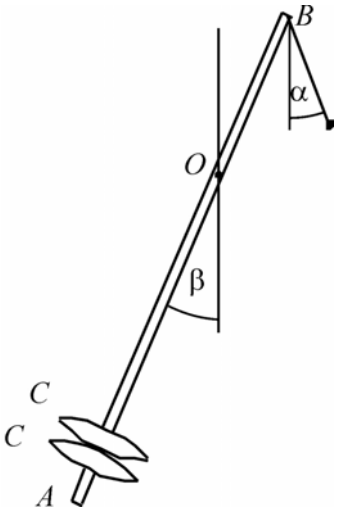
$$\alpha = \alpha_0 \sin\left(\omega t + \varphi\right),$$

амплитуда которых

$$\alpha_0 = \frac{mlb\omega^2}{J\sqrt{\left(\omega_0^2 - \omega^2\right) + 4\omega^2\delta^2}},$$

а сдвиг фаз

$$tg\varphi = \frac{2\omega\delta}{\omega_0^2 - \omega^2}\,.$$



Исследуемый маятник (шарик R на стальной спице) подвешен к значительно большему по размерам физическому маятнику (см. рис.). Этот маятник состоит из стержня AB, опирающегося на стальную призму в точке O, и двух массивных чечевиц CC, закрепляемых на нем. Маятник может совершать колебания в вертикальной плоскости. Перемещение чечевиц по стержню позволяет получать различные периоды колебаний. При колебаниях этого большого маятника малый маятник с движущейся точкой подвеса совершает вынужденные колебания. Если угол отклонения большого маятника незначителен ($\sin\beta \approx \beta$), то точку подвеса можно считать движущейся по горизонтальной прямой.

Затухание большого маятника очень мало. Это позволяет считать его колебания незатухающими (за время установления вынужденных колебаний малого маятника) с амплитудой, равной начальному отклонению.

В состав экспериментальной установки входят также шкалы для отсчетов углов отклонения маятников от своих положений равновесия α и β, прибор для измерения периодов колебаний.

Предварительно определяются циклическая частота Ω_1 и декремент затухания δ собственных колебаний малого маятника. Измеряется время τ_0, за которое они полностью затухают. Величины α и ω измеряют, помещая чечевицы последовательно в разных положениях на стержне большого маятника. Полученный экспериментальный материал представляют в виде графика зависимости $\alpha_0(\omega)$.

Наблюдая колебания малого маятника, необходимо убедиться, что при малых частотах ($\omega << \Omega$) смещение малого маятника находится практически в фазе со смещением точки подвеса (в противофазе со смещением нижней части большого маятника). Сдвиг фаз между отклонением малого маятника и внешней силой в этом случае близок к нулю ($\varphi \approx 0$). При больших частотах ($\omega >> \Omega$) смещение малого маятника находится практически в противофазе со смещением точки подвеса. Сдвиг фаз в этом случае близок к 180° ($\varphi = -\pi$). Устанавливают предельные значения (0 и π) угла сдвига фаз, что находится в полном согласии с уравнением

$$\mathrm{tg}\varphi = -\frac{2\omega\delta}{\omega_0^2 - \omega^2} = \frac{2\omega\delta}{\Omega^2 + \delta^2 - \omega^2}.$$

Зная величины Ω и δ, пользуясь этой формулой, можно рассчитать и другие значения угла сдвига фаз, находящиеся между предельными значениями. Результаты расчета представляют графически в виде угла сдвига φ от частоты ω.

3. **Установка для изучение параметрического резонанса на маятнике с колеблющейся точкой подвеса.** Кабасов Ю.К., Вилков П.П., Груздев А.О., Коханый В.В. Пробл. учеб. Физ. эксперим. **1998**. № 5. 46-49, 80. [РЖ 01А116].

Предлагаемый прибор состоит из физического маятника, точка подвеса которого соединена с валом двигателя и при его вращении совершает колебания. Рассмотрена методика теоретического и экспериментального изучения колебаний маятника с колеблющейся точкой подвеса, определены условия, при которых его центр масс выше точки подвеса.

4. **Установка для изучения параметрических колебаний маятника.** Кабасов Ю.К., Вилков П.П., Груздев А.О., Коханый В.В. Учеб. физ. **1998**. № 2. 65067, 79. [РЖ 1999.08-А55].

Выводится уравнение движения маятника, точка подвеса которого совершает заданное периодическое движение при наличии силы трения, пропорциональной скорости. Оно численно решается на компьютере; описывается разработанный и изготовленный маятник для изучения колебаний при различных частотах возбуждения колебательного движения.

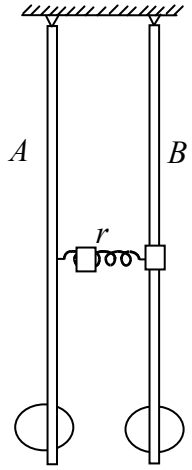
5. **Эксперимент с колебаниями двойного маятника: поиск лучшего удара.** A double pendulum swing experiment: In search of a better bal. Cross Rod. Amer. J. Phys. **2005**. 73. № 4. 330–339. [РЖ 18. Физика Ч. I. 2007. № 4. 18А.129].

Представлены экспериментальные результаты по исследованию движения двойного маятника с большой амплитудой. Начальная часть колебаний воспроизводима и интересна с точки зрения моделирования различных движений человека. Особое внимание уделяется первой половине цикла. Для больших времен движение является хаотическим. Проанализировав силы, действующие на каждый сегмент маятника, дано объяснение их движению.

7.15. Связанные маятники

1. **Изучение законов сложения гармонических колебаний методом двойного маятника.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. **1946** г. Работа 3с, с. 101-103.

Двойной маятник, который применяется в этой работе, состоит из основного маятника с массивной шайбой на нижнем конце, в отверстии которой находится второй – пружинный маятник. Затухание при колебаниях обоих маятников очень незначительно, так что амплитуды четырех–шести последовательных колебаний практически остаются постоянными.



Запись траектории колебаний производится при помощи электрической искры. Для этого непосредственно под бумажной лентой находится горизонтальный металлический столик, хорошо изолированный. Он присоединяется к одному из полюсов небольшой индукционной катушки. Ее второй полюс, так же, как и все металлические части прибора, отведен к земле. Вследствие этого, несмотря на наличие высокого потенциала, можно безопасно касаться руками всех частей прибора, кроме столика.

При замыкании цепи индуктора между концом острия и металлической поверхностью под ним образуется искра. Она оставляет на бумаге очень ясный след. Поэтому цепь индуктора достаточно замыкать на короткие промежутки времени, так что искра вдоль каждого направления в отдельности проходит только 1–2 раза. Этот метод записи колебаний совершенно не увеличивает их затухания.

2. **Изучение резонансных явлений при колебаниях связанных маятников.** К.П. Яковлев. ОГИЗ. **1946** г. Работа 4б. С. 106-108.

Прибор для наблюдения резонансных явлений, применяемый в данной работе, состоит из двух маятников обычного типа *A* и *B*, которые связаны между собой легкой спиральной пружинкой *r*. Оба маятника совершают колебания в одной и той же плоскости, а именно в плоскости чертежа. Таким образом колебания одного маятника, например *A*, передаются пружинкой *r* другому маятнику *B*, т. е. возбуждают его колебания. Тот же процесс протекает и в обратном направлении, маятник *B* возбуждает колебания маятника *A*. Точки прикрепления пружинки *r*можно перемещать вдоль штанги маятников. Этим достигается изменение силы взаимной связи между маятниками.

Для возбуждения колебаний в системе при произвольных начальных условиях следует оба маятника вывести из положения равновесия, отклонив их на некоторые углы, и затем предоставить им совершать колебания. Наблюдая колебания маятников, нетрудно заметить, что амплитуды колебаний каждого из маят-

ников обнаруживают медленные периодические изменения, так называемые *биения*. При этом в соответствии с законом сохранения энергии, в тот момент, когда амплитуда колебаний одного из маятников достигает максимума, амплитуда колебаний второго маятника имеет минимум, и обратно. Таким образом, происходит непрерывная передача энергии от одного маятника к другому, и обратно. Это явление в наиболее отчетливой форме обнаруживается при наличии резонансных условий, т. е. во-первых, периоды обоих маятников должны быть равны, и, во-вторых, разность фаз обоих маятников должна быть равна $\pi/2$, т. е. в начальный момент один из маятников должен быть в положении равновесия, а другой отклонен на некоторый (максимальный) угол. При этих условиях наблюдается полная передача энергии, и попеременно то один, то другой маятник останавливаются, т. е. возникает явление резонанса. Если же фазы колебаний обоих маятников в начальный момент оказываются одинаковыми или отличаются на π, то передача энергии не происходит, и оба маятника совершают колебания с одинаковыми амплитудами, которые постепенно уменьшаются вследствие затухания.

В ходе выполнения работы измеряются периоды колебаний маятников, частота биений при разных положениях пружинки, частоты колебаний системы при разных начальных условиях. Зависимость частоты биений от расстояния пружинки от точки подвеса маятников представляется графически.

3. **Изучение колебаний связанных систем.** Задача 14. С. 99-101. Физический практикум. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. М., **1951.**

4. **Изучение колебаний связанных систем.** Физический практикум. Под ред. В.И. Ивероновой. М., **1953, 1955**. Задача 14. С. 101-103. **1967**. Задача 21. С. 126-131.

5. **Изучение передачи энергии в связанных системах. Определение частоты колебаний струны при помощи монохорда.** Работа 15. С. 64-68. Физический практикум. Часть 1. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск. **1959**.

6. **Изучение колебаний связанных систем.** Физический практикум. Под ред. В.И. Ивероновой. М., **1962**. Задача 29. С. 163-167.

7. **Прибор для демонстрации фигур Лиссажу.** Dindorf W., Szymanski Cz. Przyrzad do kreslenia krzywych Lissajous. ″Zesz.nauk. Wyzszej szkoly ped. Opolu Fiz.″, **1964**, 4, 27-41. [РЖ 1968-7А82].

Прибор состоит из двух маятников с самописцами. Маятники могут совершать колебания во взаимно-перпендикулярных плоскостях, при этом траектория движения вычерчивается на движущейся бумажной ленте.

8. **Связанные колебания и нормальные координаты.** Chen Henry S. C. Coupled oscillators and normal coordinates. ″Amer. J. Phys.″, **1967**, 35, № 10, 924-926. [РЖ 1968-7А80].

В курсе теоретической механики рассматривается вопрос о нормальных координатах и связанных колебаниях. Однако у студентов обычно остается впечатление, что этот вопрос имеет только чисто математический интерес. Поэтому

эксперимент по изучению нормальных координат является интересным и желательным. Такой эксперимент не ставился ранее из-за наличия сил трения. В настоящее время благодаря применению приборов на воздушных подушках это затруднение устранено. В статье описан эксперимент по применению нормальных координат к системе, состоящей из двух блоков и трех пружин.

9. **Система для изучения чисто механических вынужденных колебаний.** Ion system. "Phys. Educ.", **1972**, 7, № 6, 391-494. [РЖ 1972-12А85].

Предлагается чисто механическая система, состоящая из двух маятников разной массы, связанных упругой пружиной. Для исследования процессов затухания один из маятников может быть погружен в жидкость. В такой системе все процессы и явления доступны прямому наблюдению, что значительно облегчает их исследование и вывод количественных соотношений. Подробно описано устройство экспериментальной установки, методика проведения основных опытов, приведены примеры полученных экспериментальных зависимостей.

10. **Эллиптическое движение шара и пружины.** Elliptical motion a ball and spring. Greiner Mark. ″Amer. J. Phys.″, **1980**, 48, № 6, 488-489. [РЖ 1981-1А81].

Комментарий к статьям М. Ольсона (см. Am. J, Phys., 1976, 44, 1121) и Т. Кайтона (см. Am. J. Phys., 1977, 45, 723), в которых рассматривалось движение пружинного маятника, совершающего вертикальные колебания. Были указаны оптимальные условия, при которых происходит перекачивание энергии между двумя видами колебаний – вертикальным и горизонтальным: $\omega_s/\omega_p = 2/n$, где ω_s – угловая частота пружины, ω_p – частота колебаний маятника, n = 1, 2, 3… Показано, что для n = 1 это требование означает, что масса, подвешенная к пружине, должна ее растягивать на 1/3 первоначальной длины, т. е. $L = 4L_0/3$. В статье Ольсона также отмечалось, что существует единственный случай, когда урвнения движения для горизонтальной и вертикальной компонент не связаны и наблюдается два независимых колебания; это происходит, когда $\omega_s = \omega_p$ (эллиптическое движение). Условия выполняются лишь для $L_0 = 0$, откуда был сделан вывод о невозможности наблюдения этого случая в эксперименте. Однако автором настоящей статьи предложено устройство, в котором это условие реализуется. Устройство состоит из горизонтально подвешенной с помощью нитей пружины. Груз прикрепляется к пружине с помощью лески, перекинутой через блок. Величина $\Delta L = L - L_0$ в данном случае измеряется от точки прикрепления груза до точки контакта лески с блоком и представляет собой вертикальную компоненту ″пружины″, появившуюся в результате растяжения пружины грузом. Отмечается, что необходимо использовать груз достаточно большой массы, чтобы обеспечить продолжительные колебания пружины.

11. **Простой опыт с резонансными колебаниями пружинного маятника.** Ein einfacher Versuch zur Resonanz der Federschwingung. Schwarz Otto. ″Phys. und Didakt.″, **1981**, 9, № 4, 330-333. [РЖ 1982-7А72].

Описан эксперимент с двумя пружинными маятниками с пружинами одинаковой жесткости. Масса одного из маятников постоянна, массу другого можно менять в небольших пределах. Первый маятник подвешен к рычажку телеграфного ключа, замыкающего и размыкающего цепь питания электромагнита. При замыкании к сердечнику электромагнита притягивается якорь, к которому при-

креплен второй маятник. Исследуются условия резонанса при изменении массы второго маятника, а также скачок фазы при переходе через резонанс.

12. **Связанные колебания.** Coupled oscillations. Richards D. A. ″Phys. Educ.″, **1981**, 16, № 2, 83-85. [РЖ 1981-12А181].

Описывается методика проведения учебного эксперимента по изучению связанных колебаний механической системы, состоящей из двух маятников, соединенных пружинами между собой и с опорами. Дается вывод и решение уравнений движения системы. Приводится чертеж подвески маятников и принципиальная схема включения фотодатчика системы измерения периодов колебаний маятников.

13. **Об изучении биений в физическом практикуме вуза.**

Гене В.В., Рязанцев О.В., Шульга В.И. Ред. ж. ″Изв. вузов. Физ.″. Томск, **1983**, 5 с., ил. Библиогр. 2 назв. (Рукопись деп. В ВИНИТИ 19 июля 1983 г., № 4062-83 Деп.)

Описана установка, состоящая из связанных между собой физического и математического маятников. Показана возможность изучения на ней резонансных явлений и биений.

14. **Резонанс математического маятника.** Zur Resonanz von Fadenpendeln.

″Phys. und Didakt.″, **1983**, 11, № 2, 166. [РЖ 1983-12А95].

Предложен опыт по изучению резонанса двух математических маятников. На концах длинной нити закрепляются два одинаковых груза, причем точки подвеса грузов располагаются несимметрично. Получаются два маятника разной длины. Раскачивается один маятник вручную. В результате колебания маятников происходят с частотой, равной частоте собственных колебаний одного из маятников. Результат опыта состоит в следующем: сначала колеблются обе нити; спустя некоторое время одна из них успокаивается. Возможно и одновременное возбуждение колебаний обоих маятников. Для этого частота колебаний руки должна быть равна разности частот собственных колебаний маятников. Приводятся численные параметры такого опыта.

15. **Маятник для определения силы прибоя.** A tidal force pendulum. Gron O. ″Amer. J. Phys.″, **1983**, 51, № 5, 429-431. [РЖ 1983-12А93].

Предложен маятник, состоящий из двух грузов, связанных между собой жестким стержнем и колеблющихся в вертикальной плоскости вокруг центра масс. Описанный маятник для локального определения сил прибоя может служить хорошей демонстрацией формализма принципа эквивалентности. Приведены три метода расчета периода колебаний маятника, которые могут использоваться как задача для студентов вузов различных курсов при изучении гравитации.

16. **Качающаяся машина Атвуда.** Swinging At wood′s Machine. Tufillaro Nicholas B. , Abbott Tyler A., Griffiths David J. ″Amer. J. Phys.″, **1984**, 52,

№ 10, 895-903. [РЖ 1985-5А111].

Качающаяся машина Атвуда представляет собой два груза разной массы, подвешенные на разных концах одной нити, перекинутой через два блока. При этом один из грузов может качаться в одной плоскости. В реальном эксперименте нить пропускается через отверстие в плоской пластине, вдоль которой может

качаться груз. Отверстие заменяет один из блоков. Эта модель представляет собой простейший пример нелинейной динамической системы с двумя степенями свободы. Уравнения движения системы решаются для различных начальных условий. Найдены различные классы траекторий движения системы: ограниченные и неограниченные, периодические, сингулярные и замкнутые сингулярные. Траектории, построенные с помощью ЭВМ, представлены на рисунках. Для некоторых классов траекторий найдены приближенные аналитические решения и формулы для критических масс.

17. **Резонанс в системе многих тел.** Rezonans w ukladzie wielu cial. Kaczmarski Andrzej, Siegel Krystyna, Sokalski Krzysztof. ″Post.fiz″, **1986**,37, № 6, 569-572. [РЖ 1987-9А87].

Анализируется сложная механическая система, состоящая из четырех маятников, связанных между собой одинаковыми пружинами. Один из крайних маятников также при помощи пружины соединен с диском эксцентриком, насаженным на вал электромотора с редуктором. Такая система может быть использована в лабораторной работе, цель которой заключается в нахождении зависимости амплитуды одного из маятников от частоты вынуждающей силы. Приводится типичная резонансная кривая системы. Благодаря универсальной конструкции, прибор может видоизменяться для изучения колебаний (вынужденных или свободных) двух или трех маятников. Даны методические указания по постановке лабораторной работы.

18. **Конструкция переменного маятника.** Zur Konstruktion eines interessanten Wechselschwingers. Schlichting J. ″Phys. Und Didakt.″, **1986**, 14, № 1, 69-71. [РЖ 1986-9А106].

Описан переменный маятник (ПМ), состоящий из стального шарика, подвешенного на пружине. В случае, когда полупериод горизонтальных колебаний ПМ оказывается кратным периоду его вертикальных колебаний, возникающие резонансные явления способствуют обмену энергией между двумя формами колебаний, что приводит к появлению четко выраженных фаз вертикальных и горизонтальных колебаний ПМ.

19. **Колебания связанных маятников.** Матвеев А.Н., Киселев Д.Ф. Общий физический практикум. Механика. Изд. Моск. ун-та. **1991**. С. 236-242. Лаб. работа 23.

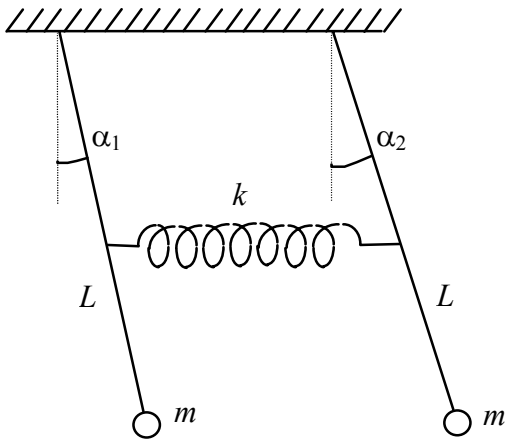
Два математических маятника, связанных между собой пружинами, являются простейшим примером связанной системы.

Каждый свободный математический маятник, как известно, обладает двумя степенями свободы, т. е. для описания его движения требуется два параметра - углы смещения в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Система из двух маятников описывается четырьмя параметрами и, следовательно, имеет четыре степени свободы. Если колебания, соответствующие каждой из степеней свободы, независимы, то задача описания движения системы является чисто кинематической, т. е. задачей разложения сложного движения на сумму более простых движений. Если между движениями по различным степеням свободы имеется динамическая связь, при которой движение по одной степени свободы вызывает динамические изменения во всех остальных степенях свободы, то это при-

водит к обмену колебательной энергии между степенями свободы, приводя к новым физическим явлениям, отсутствующим у независимой системы.

В настоящей лабораторной работе изучаются колебания системы из двух связанных одинаковых маятников, имеющих только две степени свободы. Для этого подвес каждого маятника осуществляется при помощи маленьких подшипников, обладающих малым трением, которые позволяют маятникам двигаться только в вертикальной плоскости, проходящей через линию, соединяющую точки подвеса (см. рис.). Два одинаковых маятника подвешены на деревянной раме, обеспечивающей жесткость конструкции. Маятники состоят из длинных легких стержней L, на нижних концах которых укреплены чечевицы массы m. Верхние концы стержней укреплены во внутренние шайбы приборных подшипников, внешние шайбы которых крепятся к раме таким образом, чтобы плоскость подшипников, а следовательно, и плоскость движения маятников совпадала с плоскостью рамы. На расстоянии L_1 от точки подвеса (центра подшипника) в стержнях L просверлены маленькие отверстия для крепления легкой пружины связи, длина которой в недеформированном состоянии точно равна расстоянию между стержнями маятников в равновесном положении. Ниже маятников установлен специальный стартовый механизм, который позволяет плавно запускать систему при различных начальных отклонениях маятников от положения равновесия.



Система двух связанных маятников

Установка комплектуется набором пружин с различной жесткостью, секундомером и специальным станком для определения жесткости пружин статическим методом, который представляет собой укрепленную вертикально на штативе линейку с миллиметровой шкалой и набор различных грузов с известной массой.

Масса чечевиц маятников m, эффективная длина L (расстояние от точки подвеса до центра чечевицы) и расстояние L_1 известны, и их величины указаны на каждой установке. Движение каждого маятника представляет собой суперпозицию двух гармонических колебаний, которые получили название нормальных колебаний. Выполнение лабораторной работы начинается с проверки вертикальности установки рамы – при этом трение в подшипниках будет минимальным. Затем на специальном станке статическим методом определяют коэффициенты жесткости k_i используемых пружин связи. После этого приступают к изучению движения системы связанных маятников. Первоначально определяются периоды собственных колебаний каждого маятника в отдельности. Убеждаются, что периоды колебаний обоих маятников совпадают (в пределах погрешности измерений). По среднему значению периода T_1 вычисляется первая нормальная частота $\omega_1 = 2\pi/T_1$. Затем устанавливается та или иная пружина связи и наблюдаются связанные колебания.

Сначала реализуются начальные условия, при которых оба маятника отклоняются в одну сторону на одинаковый угол. Измеряют при этом период колебаний одного маятника и другого (они должны оказаться одинаковыми). Из полу-

ченных результатов измерений вычисляют первую нормальную частоту колебаний ω_1 и сравнивают ее с величиной, вычисленной по формуле

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{g}{L}} \ .$$

Наблюдая движение системы маятников, убеждаются в синфазности их колебаний. Затем устанавливаются начальные условия, соответствующие отклонению обоих маятников на равный начальный угол, но в противоположных направлениях от положения равновесия (при $t = 0$), вычисляется вторая нормальная частота колебаний ω_2 и сравнивается с вычисленной по формуле

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{g}{L} + \frac{2kL_1^2}{mL^2}} \ .$$

Наблюдая движение системы маятников, убеждаются в противофазности их колебаний.

В заключение реализуют начальные условия, при которых в начальный момент времени один маятник находится в состоянии покоя, а другой отклонен на некоторый начальный угол. Определяются период $T_б$ и частота $\omega_б$ биений, для чего измеряют время между двумя последовательными остановками в движении каждого маятника.

20. **Использование связанных систем при изучении сложения механических колебаний.** Стрелков Л.А., Загребин Л.Д. Пробл. учеб. физ. эксперим. **1995**. № 1. 93-95, 134. [РЖ 1998.01-18F.127].

Предлагается для качественного наблюдения и количественного изучения закономерностей при сложении механических колебаний (взаимно-перпендикулярных и одного направления) использовать связанные системы. Приведено описание установки.

21. **Экспериментальное исследование механических колебаний сложных систем в учебной физической лаборатории.** Соловьев В.Г. Пробл. учеб. физ. эксперим. **2000**. № 10. 94-96. [РЖ 01. 02-18A.122].

В разделе ”Механика” обычно рассматриваются колебания простейших гармонических осцилляторов с одной степенью свободы, например математического, физического и пружинного маятников. С научной и технической точек зрения интерес представляет и более трудная проблема исследования механических колеббаний сложных систем – как дискретных, так и с непрерывно распределенными параметрами. Описана лабораторная работа, в первой части которой исследуется колебательная система из двух одинаковых механически связанных нитяных маятников, а во второй – изучаются поперечные колебания упругой спицы, возбуждаемые электромагнитом.

22. **Связанные моды.** Водолазская-ФОВ-**2001**, т.7, № 1, с. 98.

23. **О связанных механических гармонических осцилляторах, переходных и изолированных осциллирующих системах.** On coupled mechanical har-

monic oscillatos, transients, and isolated oscillating systems. McCarthy L. Amer. J. *Phys.* **2003**. 71. № 6. 590-598. [РЖФиз. 05.02-18А.109].

7.16. Вынужденные колебания

1. **Определение частоты и гармонических составляющих вибраций методом резонанса.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 4d. С.109-110.

Физическое явление – вибрации стола, на котором укреплен электромотор, работающий в разных режимах.

Для регистрации вибраций используется т. н. виброметр Фрама. Он состоит из набора плоских стальных пружин, или язычков, укрепленных вертикально своими нижними концами на общем основании. На верхнем свободном конце пружин прикреплены грузы различной величины, которые подобраны так, что период колебания (частота) последовательных пружин постепенно изменяется. Таким образом прибор охватывает некоторый диапазон частот, которые определены для каждой пружины и непосредственно даются на приборе. Прибор прикрепляется к вибрирующей машине, и та пружина, собственная частота которой совпадает с частотой вибраций, окажется в резонансе. Поэтому она начинает колебаться с очень большой амплитудой, тогда как соседние пружины остаются почти в покое. Если система совершает сложный колебательный процесс, который состоит из нескольких простых гармонических колебаний с различной частотой, то в виброметре начинают резонировать несколько пружин, соответственно составу вибраций. Таким образом можно сложные вибрации разлагать на ряд гармонических составляющих, или определять их спектральный состав.

2. **Изучение явления резонанса на крутильном маятнике.** Физический практикум. Под ред. В.И. Ивероновой. М., **1953, 1955**. Задача 13. С. 97-100.

3. **Исследование собственных колебаний струны методом резонанса.** Физический практикум. Под ред. В.И. Ивероновой. М., **1953, 1955**. Задача 15. С. 103-106.

4. **Опыт с механическими резонансными колебаниями.** Мак-Даниэл (An experiment in mechanical resonance vibrations. McDaniel Boyce), Amer. J. Phys., **1953**, 21, № 7, 551-555. [РЖ 1954-5-4515].

Описана учебная установка для изучения механического резонанса, состоящая из крутильного маятника, подвешенного на нити, верхний конец которой приводится в приблизительно гармонические колебания при помощи эксцентрика, связанного с нитью длинным рычагом. Затухание системы переменное, электромагнитного типа. Для наблюдения амплитуды применяется метод зеркала и шкалы. Для наблюдения фазы колебаний используется щель, связанная с эксцентриком и закрывающая на определенное время источник света, освещающий зеркало прибора. Собственная частота прибора ~5 *Гц*. Добротность при отсутствии электромагнитного затухания ~600; при затухании она может быть снижена до нескольких единиц. Эксцентрик приводится во вращение электродвигателем с регулируемой частотой вращения.

5. **Камертон с электронным возбуждением для студенческих работ.** Doran G. A. Electronically maintained tuning fork for use bystudents. “Amer. J. Phys.”, **1960**, 28, № 5, 505-506. [РЖ 1961-2А66].

Описана лабораторная работа по определению частоты камертона, возбуждаемого гармоникой другого камертона, частота которого регулируется насадками на ножках. Эксперимент служит одновременно демонстрацией вынужденных колебаний. Вместо механического прерывателя в эксперименте использована простая электрическая схема. У ножки камертона частотой 58–75 Гц помещен постоянный магнит с катушкой, в которой при колебаниях ножки наводится синусоидальная э. д. с., подаваемая на вход лампового усилителя. Выходная лампа усилителя работает в режиме перевозбуждения, и на ее выходе, кроме основной частоты камертона, получаются гармоники до 15-й, с амплитудами, достаточными для возбуждения на них второго камертона, катушка возбуждения которого подключена к выходу усилителя. При помощи того же усилителя питают синхронный моторчик, служащий для определения частоты камертона.

6. **Изучение явления резонанса на крутильном маятнике.** Физический практикум. Под ред. В.И. Ивероновой. М., **1962**. Задача 20. С. 122-126.

7. **Эксперимент для студенческой лаборатории повышенного типа по изучению движения при вынужденных колебаниях.** Bueche F., Pavelka C. An advanced undergraduate laboratory experiment for studying the motion jf forced vibration. “Amer. J. Phys.”, **1964**, 32, № 11, 857-859. [РЖ 1965-11А72].

В лабораториях повышенного типа часто проводятся эксперименты по изучению свойств механической системы, совершающей вынужденные колебания. Предлагается новый подход проведения экспериментов, представляющий ряд преимуществ, которыми не обладают обычно применяемые методы. Изучается поведение горизонтального стержня прямоугольного сечения при вынужденных поперечных колебаниях. Для изучения используется сравнительно простая оптическая система. Студенту предлагается установить аппаратуру и измерить амплитуду и фазу колебаний в функции частоты при наличии и при отсутствии затухания; затем на основании полученных результатов вычислить различные параметры совершающей колебания системы, в том числе добротность. При таком методе проведения этого эксперимента студенты знакомятся с рядом интересных приемов экспериментальной техники: фигурами Лиссажу, муаровыми полосами, применением фотоэлементов, механизмами привода и затухания. Поэтому следует всячески поощрять применение этого метода.

8. **Изучение явления резонанса на крутильном маятнике.** Физический практикум. Под ред. В.И. Ивероновой. М., **1967**. Задача 28. С. 158-162.

9. **Изучение явления резонанса.** Руководство к лабораторным работам по физике. Часть I. Механика. Молекулярная физика. Под ред. А.П. Максименко. Днепропетровский. гос. ун-т. **1973**. Работа 8.

В работе изучаются вынужденные колебания маятника при действии на него гармонически изменяющейся со временем внешней силы.

10. **Лабораторная работа по изучению вынужденных колебаний.** Михайлов Б.Г. ″Уч. зап. Иванов. гос. пед. ин-т″, **1973**, 121, 51-59. [РЖ 1973-7А86].

Описана лабораторная работа, целью которой является наблюдение переходных колебаний и построение резонансной и фазовой кривых. Прибор для получения вынужденных колебаний состоит из двух основных частей: небольшого цилиндрического магнита, катающегося по участку стеклянной сферической поверхности, и математического маятника, выполненного в виде стального шара, колеблющегося на бифилярном подвесе. В статье приводится краткая теория лабораторной работы, описываются прибор и методика выполнения работы.

11. **Установка для изучения резонанса.** Длужневский Г.И. ″Вестн. высш. школы″, **1973**, № 4, 17-18. [РЖ 1973-8А64].

Горизонтальная металлическая площадка, вмонтированная в стенку, служит опорой для физического и математического маятников. Оба маятника могут колебаться в параллельных плоскостях. При колебании физического маятника его импульсы через площадку передаются математическому маятнику. Для усиления связи маятников на физическом маятнике укреплены две пластинки, которые воздействуют на нить математического маятника, в результате чего он совершает вынужденные колебания. С помощью этой установки выполняется лабораторная работа по выяснению зависимости амплитуды колебаний математического маятника от роста отношения периода собственных колебаний математического маятника и периода колебаний физического маятника.

12. **Изучение резонанса при вынужденных колебаниях″связанных″ маятников.** Длужневский Г.И. ″Изв. высш. Учеб. Заведений. Физика″, **1973**, № 7, 145-146. [РЖ 1973-12А93].

Установка для изучения вынужденных колебаний состоит из физического и математического маятников, подвешенных к горизонтальной металлической площадке, которая служит опорой одновременно двум маятникам. Физический маятник выполнен в виде двух параллельных прутков, на нижнем конце которых укреплен диск. Длина математического маятника может изменяться. При колебании физического маятника его импульсы через площадку передаются математическому маятнику Период колебаний физического маятника рассчитывается по результатам измерения времени некоторого числа его полных колебаний. Периоды собственных колебаний математического маятника зависят от его длины и вычисляются по обычной формуле. Изменение отношений периодов обоих маятников достигается изменением собственного периода колебаний математического маятника.

13. **Изучение явления резонанса.** Руководство к лабораторным работам по физике. Часть I. Механика. Молекулярная физика. Под ред. А.П. Максименко. Днепропетровский. гос. ун-т. **1973**. 130 с. Работа № 1–8. С. 65-69.

Изучается резонанс колебаний в механической системе.

14. **Лабораторный опыт по вынужденным линейным колебаниям.** Gruber G.M., Baart E. E. Laboratory experiment on forced linear oscillations. ″Amer. J. Phys.″, **1975**, 43, № 10, 926-927. [РЖ 1976-3А79].

Опыт по изучению вынужденных колебаний с демпфированием скорости лучше всего проводить, используя смонтированный на стене зеркальный гальванометр, возбуждаемый генератором синусоидальных колебаний. При выполнении опыта строится зависимость показаний гальванометра от частоты при разных значениях затухания и определяется постоянная затухания разными способами.

15. **Резонансные кривые пружинного маятника.** Achatz Helmut. Resonanzkurven eines Federpendels. ″Prax. Naturwiss. Phys.″, **1977**, 26, № 5, 113-116. [РЖ 1977 12А-97].

Описано устройство для наблюдения резонансных кривых пружинного маятника. Возбудителем колебаний служит электромотор с насаженным на ось эксцентриком. С эксцентриком связан маятник – пружинные демонстрационные весы. Частота вращения мотора определяется с помощью диска с отверстиями, перекрывающего пучок света. Амплитуда колебаний маятника определяется по теневой проекции. Измеряется также коэффициент затухания при колебаниях маятника в различных средах – воздухе и воде.

16. **Изучение резонансных явлений.** Физический практикум для нефизических специальностей. Часть I. Одесса. **1977**. Задача 8. С. 40-43.

17. **Эксперименты по изучению колебаний в тонких мембранах.** Experiment on the vibration of a plate. Kautz Allan D. ″Amer. J. Phys.″, **1980**, 48, № 5, 358-361. [РЖ 1981-1А83].

Описана методика проведения учебных экспериментов по изучению резонансных явлений в тонких мембранах: определение частот основного резонанса и гармоник, снятие резонансных кривых, определение коэффициента затухания и добротности, исследование нелинейных явлений. Указывается, что предлагаемые эксперименты имеют большую дидактическую ценность по сравнению с традиционными опытами по изучению колебаний маятника, пружинного подвеса и электрических аналогов механических колебательных систем. Приводится схема экспериментальной установки, обсуждаются результаты экспериментов.

18. **Исследование явления резонанса в лабораторном практикуме.** Ein Praktikumsversuch zur Resonanz. Simon Franz J. ″Phys. Und Didakt., **1984**, 12, № 1, 72-79. [РЖ 1984-8А90].

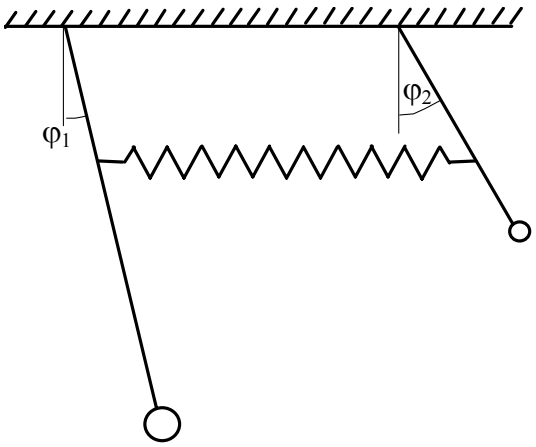
Приведено описание лабораторной установки, позволяющей провести экспериментальное количественное изучение в учебном физическом практикуме вынужденных колебаний и явления резонанса. В систему входит маятник (длина подвеса 220 см), который находится между двумя пружинами, одна из которых связана с шаговым электродвигателем. Применяемая электрическая схема использует низкое безопасное напряжение в 5 В. В эксперименте можно измерить амплитуду вынужденных колебаний в зависимости от возбуждающей частоты. Приведена подробная методика обработки экспериментальных данных и результаты измерений.

19. **Эксперимент по механическому резонансу с динамическими потоками жидкости.** A mechanical resonance experiment with fluid dynamic undercurrents. Greenhow R. C. ″Amer. J. Phys.″, **1988**. 56, № 4. С. 352-357. [РЖ 1989-1А118].

Описан учебный эксперимент, в котором рассматривается простое вынужденное гармоническое движение механической системы с затуханием. Стальной шар, вертикально подвешенный на пружине, помещается в жидкое масло. Верхний конец пружины приводится в колебание электрическим вибратором, присоединенным к НЧ-генератору. Помимо характеристик колебательного движения, в том числе явления резонанса, изучаются законы гидродинамики. Эксперимент предлагается в качестве лабораторной работы повышенной сложности для старшеклассников.

20. **Вынужденные колебания пружинного маятника и явление резонанса.** Общий физический практикум. Механика. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Изд. Моск. ун-та. **1991**. Лаб. работа 22. С. 233-236.

21. **Вынужденные колебания в системе с двумя степенями свободы.** Общий физический практикум. Механика. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Изд. Моск. ун-та. **1991**. Лаб. работа 25. С. 248 - 254.



Изучается движение двух математических маятников, связанных пружиной и совершающих колебания в вертикальной плоскости (см. рис.).

Каждый из этих маятников характеризуется собственной частотой колебаний, которая для системы является парциальной (она характеризует колебания системы с одной степенью свободы). Система в целом также характеризуется собственными колебаниями, которых можно возбудить великое множество. Но в случае колебаний системы с постоянной во времени амплитудой движения всех элементов системы такие колебания называют собственными или нормальными для этой системы. Одна из целей лабораторной работы - нахождение этих ее характерных частот.

Вынуждающая сила в исследуемой системе действует со стороны специального устройства с двигателем, входящего в комплект экспериментальной установки, на один из маятников, обозначаемый далее индексом ”1”. Частота вынуждающей силы может изменяться в диапазоне от 0,25 Гц до 1,5 Гц. Амплитуда момента силы варьируется перемещением соединительной пружины жесткости k вдоль маятника.

В состав установки входит также устройство для регистрации периода колебаний. Максимальная длина маятника – 0,5 м, масса перемещаемых грузов – 0,1 кг. Амплитуда колебаний регистрируется по отградуированной шкале, расположенной между концами – указателями маятников.

Рассматриваемая колебательная система имет два типа нормальных колебаний: синфазные с частотой $\omega_{СФ} = \sqrt{g/L}$, противофазные с частотой $\omega_{ПФ} = \sqrt{g/L + 2ka^2/mL^2}$ а также два типа парциальных колебаний, совпадающих по частоте: $\nu = \sqrt{g/L + ka^2/mL^2}$.

При измерении частоты парциальных колебаний один из маятников закрепляется и измеряется частота колебаний свободного маятника. Частоты нормальных колебаний $\omega_{СФ}$ и $\omega_{ПФ}$ измеряются для разных положений пружины связи по длине маятников. Результаты измерений представляются графически. На основе экспериментальных зависимостей вычисляется коэффициент жесткости пружины k.

Для изучения резонанса смещений в системе с двумя степенями свободы пружина, связывающая маятники, устанавливается в положение, обеспечивающее максимальное различие $\omega_{СФ}$ и $\omega_{ПФ}$. Далее, изменяя частоту вращения двигателя и выжидая установления колебаний, снимается зависимость амплитуды колебаний второго маятника от частоты вынуждающей силы. Результаты измерений представляются графически.

22. **Прототип осциллятора: акустический резонатор Гельмгольца.** Un archetype d´oscillateur : Le resonateur acoustique de Helmholtz. Bernadot F., Bruneaix J., Matricon J. Bull. Union phys. **2002**. 96. № 845. 1055-1077. [РЖФиз. 04.10-18А.132].

Описаны несложные эксперименты, которые можно провести на простом резонаторе Гельмгольца (исследования явления резонанса и свободных колебаний) и на двух связанных резонаторах (доказательство существования мод колебаний, их селективное возбуждение, биения). Эти акустические эксперименты иллюстрируют общие свойства осцилляторов и количественно анализируются в рамках теории, развитой по аналогии с хорошо известной системой масса-пружина.

23. **Изучение электромеханического резонанса в лабораторном эксперименте.** Кашицын А.С., Пронин А.А. Учеб. физ. **2004**. № 4. 38-41. [РЖФиз. 05.09-18А.126].

Рассмотрена методика изучения электромеханического резонанса в лабораторном эксперименте при использовании типового герметизированного кварцевого резонатора, имеющего высокую добротность (более 40000) и небольшой резонансный интервал. Показано, что реакция кварцевого резонатора на внешнюю электрическую цепь эквивалентно реакции некоторого LC-контура, имеющего индуктивность $L_к$, емкость $C_к$ и сопротивление $R_к$ (параллельно этой цепи подключена межэлектродная статическая емкость $C_о$.

24. **Магнитоэлектрический привод незатухающих колебаний трифилярного подвеса.** Выборнов Ф.И., Чандаева С.А. Проблемы учебного физического эксперимента: Материалы 11 Всероссийской научно-практической конференции “Учебный физический эксперимент: Актуальные проблемы. Современные решения”, Москва, **2006**: Сборник научных трудов. Вып. 23. М., 2006. 42–43. [РЖ Физика.08.12-18А.114].

25. **Изучение параметрического резонанса в физическом практикуме.**Башкатов А.Н. Школа и вуз: достижения и проблемы непрерывного физического образования: Сборник научных трудов 4 Российской научно-методической конференции учителей школ и преподавателей вузов. Ектеринбург, **2006**. Екатеринбург, 2006. 133–138. [РЖ 18. Физика Ч. I. 2007. № 10. 18А.129].

Параметрические колебания рассматриваются на примере маятника в виде груза, подвешенного на нити, длину которой можно изменять, тем самым модулируя колебания маятника. Приведено решение для случая модуляции с частотой $2\omega_0$, где ω_0 – первоначальная частота колебаний системы. Приведен эскиз установки по изучению параметрического резонанса, перечислены задачи, которые выполняют студенты на этой установке.

26. **Резонанс против резонанса.** Майер В. Квант. **2007**. № 3. 41-42. [РЖ Физика.08.06-18А.139].

Рассмотрена теория резонансного демпфирования колебаний, проведена экспериментальная проверка теории. Обсуждение и анализ полученных результатов позволяют подобрать необходимые параметры демпфера. Показано, что эффективным средством борьбы с нежелательным резонансом является само явление резонанса.

7.17. Нелинейные колебания

1. **Упругая пластинка, зажатая с одной стороны [в тиски] как пример негармонического осциллятора 2-го рода (в экспериментальном изложении).** Stahl Wilhelm. Die einseiting eingespannte Blattfeder als Beispiel fur einen nichtharmonischen Oszillator 2. Art–in experimenteller Behandlung. ″Prax. Naturwiss.″, **1970**, Teil 1, 19, № 11, 287-293. [РЖ 1971-5А107].

Приводятся результаты работ по изучению колебаний упругой пружины как осциллятора 2-го рода. Даны дидактические замечания по теме, а также методические замечания к проведению опытов с упругой пластинкой. В качестве пластинки во всех опытах используется стальная лента для упаковки ящиков. Нижний конец пластинки зажат в тиски. На полученном таким образом осцилляторе демонстрируют вынужденные колебания. Вынуждающая система приводится в движение мотором; пластинка соединена с мотором посредством шатунно-кривошипного механизма и проволоки. Подбирая число оборотов мотора, получают колебания с гармоническими составляющими 10-го и 2-го порядков. Установив резонанс колебаний, определяют численное значение резонансной частоты при $f_{\text{собств}}=f_{\text{вынужд}}$, используя для этого счетчик числа оборотов и секундомер. Полученные в ходе опыта результаты сравнивают с теоретическими. Описаны опыты, предназначенные для демонстрации свободных и вынужденных колебаний пластины и изучения зависимости частоты колебаний от параметров колебательной системы. Описан также принцип работы простейшего музыкального инструмента, на котором можно демонстрировать получение звуков различной окраски с помощью обертонов, и устройство, с помощью которого можно наблюдать траекторию движения, возникающего при сложении двух взаимно перпендикулярных колебаний с соотношением частот собственных колебаний 2:1 (фигуры Лиссажу).

2. **Демонстрация резонанса в ангармоническом осцилляторе.** Experimental demostration of the resonance effect of an anharmonic oscillator. Jansen H.J., Serneels R., Beerden L., Flerackers E.L. M. ″Amer. J. Phys.″, **1983**, 51, № 7, 655-658. [РЖ 1984-1А96].

При изучении явления резонанса рекомендуется не ограничиваться рассмотрением поведения линейных колебательных систем. Приводятся теоретические сведения о резонансе в нелинейных колебательных системах. Предлагается установка для демонстрации резонанса ангармонического осциллятора. Установка состоит из пружинного маятника, располагаемого вертикально, и вибратора (приводиться схема электронной цепи вибратора). Нижний конец пружины фиксируется; нить, прикрепленная к верхнему концу пружины, через неподвижный блок прикрепляется к стержню вибратора; на пружине, вблизи ее нижнего и верхнего концов, монтируются ограничители.

3. **Эксперименты по исследованию бифуркаций вынужденных колебаний нелинейного маятника.** Experiments on the bifurcation behavior of a forced nonlinear pendulum. Beckert S., Schock U., Schulz C.-D., Weidlich T., Kaiser F. ″Phys. Lett.″, **1985**, A 107, № 8, 347-350. [РЖ 1985-8A96].

Изучались нелинейные колебательные процессы крутильного маятника, представляющего собой однородный диск, вращающийся в вертикальной плоскости. Возвращающая сила обеспечивалась пружиной часового типа, сила сопротивления, пропорциональная угловой скорости, была обусловлена действием электромагнита с регулируемым током, вынуждающая сила действовала от электромотора с кварцевым стабилизатором частоты вращения. В отличие от ранее исследованных систем диск нагружался дополнительной точечной массой, вследствие чего маятник имел два устойчивых состояния при углах отклонения ±60° по отношению к вертикали. Подробно исследованы режимы колебаний с двойным и тройным периодами, а также непериодические режимы. Приведены диаграммы наблюдаемых бифуркаций в диапазоне частот вынужденных колебаний до 0,5 Гц. Осуществлено математическое моделирование нелинейного уравнения колебаний, показаны фазовые диаграммы колебательных процессов.

4. **Линейные и нелинейные колебания: эксперимент для студентов.** Linear and nonlinear oscillatons: an experiment for students. Grosu Ioan, Yrsu Dodu. ″Eur. J. Phys.″, **1986**, 7, № 2, 91-94. [РЖ 1987-2A55].

Предлагается демонстрационная установка для показа линейных и нелинейных колебаний. Установка представляет собой горизонтально ьрасположенную стеклянную трубу с поршнем в виде пластикового цилиндра с укрепленным внутри постоянным магнитом. Поршень приводится в колебательное движение при помощи синусоидального напряжения, подаваемого с генератора на пару катушек, расположенных на трубе вблизи концов поршня. Между этими управляющими катушками расположена третья (измерительная) катушка, сигнал с которой подается на вход демонстрационного осциллографа. Уравнение колебаний для такой системы имеет вид $\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x + \alpha x^3 = f_0 \cos\omega t$ *b* и при малых смещениях *x* становится линейным. Приводятся экспериментальные графики резонанса в линейном и нелинейном контуре. Даются практические советы по показу демонстрации.

5. **Исследование переходных процессов в простой нелинейной системе.** Measurements of transient motion of a simple njnlinear system. Ojha A., Moon S., Hoeling B., Siegel P.B. Amer. J. Phys. **1991**. 59, № 7. С. 614-619. [РЖ 92-1A172].

Описано простое и недорогое оборудование для использования в лабораториях практикума по курсу общей физики при изучении нелинейных систем. Свободно вращающаяся магнитная стрелка помещается над соленоидом и между катушками Гельмгольца. С помощью фотодиода измеряется угловая скорость вращения стрелки в вертикальном (или горизонтальном) постоянном магнитном поле соленоида и переменном поле катушек. Описанная схема позволяет достаточно просто реализовать эксперимент по изучению динамики переходного процесса и отклика системы на возмущающее воздействие, так же как наблюдение удвоения частоты колебаний. На основе экспериментальных данных рассчитываются собственные значения якобиана для нелинейной системы.

6. **Осциллятор на воздушной дорожке с возвращающей силой, пропорциональной кубу смещения.** A cube-law air track oscillator. Whineray S. Eur.J. Phys. **1991**. 12, № 2. С. 90-95. [РЖ 91-9А53].

Описана конструкция механического осциллятора, для которого возвращающая сила пропорциональна кубу смещения из положения равновесия. Обсуждается математическое описание движения такого осциллятора, из которого, в частности, следует, что произведение периода колебаний на амплитуду смещения является постоянной величиной. Приведена аргументация выбора параметров экспериментальной установки и материалов для ее изготовления. Сообщаются экспериментальные результаты исследования движения осциллятора. Наблюдается хорошее соответствие этих результатов и теоретических предсказаний. Исследование свойств такого осциллятора в лаборатории позволит студентам перейти от линейного осциллятора к изучению нелинейных явлений.

7. **Воздушный трековый осциллятор, (подчиняющийся) кубическому закону.** A cube-law air track oscillator. Whineray S. Eur. J. Phys. **1991**. 12, № 2. С. 90-95. [РЖ 92-1А171].

Описывается механический осциллятор, для которого возвращающая сила пропорциональна кубу смещения. Осциллятор представляет собой тело, закрепленное с двух сторон пружинами и перемещающееся перпендикулярно пружинам по специальному рельсу. Должны выполняться два условия:

1) Пружины не должны быть деформированы в положении равновесия тела;

2) пружины должны быть идентичными (первое условие обеспечивает отсутствие линейного члена в разложении возвращающей силы в ряд по смещению). Произведение периода колебаний осциллятора на их амплитуду не зависит от времени.

8. **Постой опыт по демонстрации малых нелинейных механических колебаний.** Бубликов С.В. Проблемы учебного физического эксперимента. Вып 3. Глазов. **1997** г. С. 27-29.

Глава 8
УПРУГИЕ ВОЛНЫ

8.1. Упругие волны в газе

1. **Определение частоты колебаний методом биений.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 13а. С.208-210.

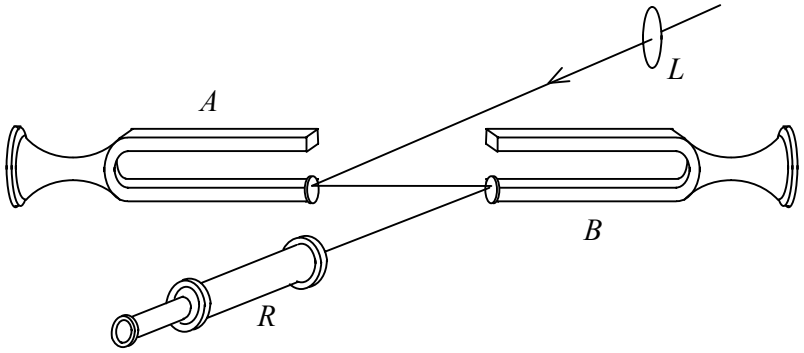
Физический эффект: биения звуковых колебаний.

Звуковые колебания в воздухе создаются двумя камертонами. На пластине одного из них имеется дополнительный груз, перемещение которого приводит к изменению частоты колебаний. Камертон без груза принимается за эталонный, а по частоте биений колебаний камертонов определяется частота колебаний камертона с грузом:

$$\nu_x = \nu_0 + N,$$

где v_0 частота колебаний эталонного камертона, v_x – частота колебаний камертона с грузом N – частота биений.

Определение частоты биений производится визуальным методом. Для этого оба камертона A и B, укрепленные горизонтально на штативах, имеют на конце одной ветви небольшие зеркальца, причем зеркальце эталонного камертона снабжено диафрагмой с очень маленьким отверстием.

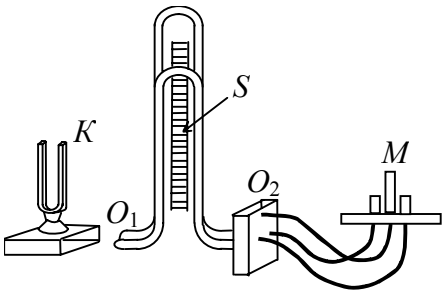


Камертоны расположены так, что их колебания происходят в вертикальных плоскостях.

Лучи источника света, установленного в главном фокусе двояковыпуклой линзы L, направляют на зеркальце эталонного камертона B и после отражения от него проходит в оптическую трубу R, в поле которой свет луча виден, как светлое пятнышко. При звучании камертонов, одного или обоих, пятнышко растягивается в вертикальную полоску. Ее длина при одновременном звучании обоих камертонов зависит от результата сложения их колебаний, т. е. определяется амплитудами и разностью фаз того и другого колебания. При полном совпадении частот обоих камертонов разность начальных фаз колебаний остается постоянной, и длина полоски в поле трубы лишь очень медленно уменьшается вследствие затухания колебаний. Но если частоты камертонов несколько различны, то длина полоски начинает периодически увеличиваться и уменьшаться вследствие возникновения биений, которые одновременно можно наблюдать и непосредственно на слух. Измерения сводятся к тому, чтобы, определив по секундомеру промежуток времени, в течение которого происходит определенное число биений, вычислить отсюда их частоту N, а затем и частоту измеряемого камертона v_x. Такие измерения повторяются при нескольких различных положениях груза на ветви камертона B.

2. **Определение длины звуковых волн в газах методом Квинке.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 14a. С.212-214.

Метод Квинке основан на явлении интерференции двух проходящих волн. Их разность хода постепенно изменяют, измеряя ее в тот момент, когда она оказывается равной нечетному числу полуволн, например, одной или трем полуволнам. При этом условии наблюдается ослабление звука до полного его исчезновения при равенстве амплитуд обеих волн.



Прибор Квинке состоит из латунной трубы, которая вблизи своих концов O_1 и O_2, остающимися открытыми, раздваивается, образуя два колена. Длину одного колена можно увеличивать, поднимая изогнутую часть трубки. Удлинение колена измеряется по шкале *S*. Источником звука служит камертон на резонансном ящике, приводимый в звучание легкими ударами резинового молотка. При измерениях отверстие резонансного ящика камертона помещают вблизи входного отверстия прибора O_1. Звуковые колебания, входя внутрь прибора, разделяются на две части, которые проходят по тому и другому колену и вновь соединяются вместе у выходного отверстия O_2, имея разность хода, равную нулю, и при интерференции взаимно усиливаются. Но если увеличивать длину раздвижного колена, то разность хода той и другой волн получает значения, отличные от нуля, и может оказаться равной одной полуволне. При этом условии звук у отверстия O_2 почти совершенно исчезает. При дальнейшем удлинении колена можно наблюдать второй минимум звука, когда разность хода волн оказывается равной трем полуволнам. При камертонах с большой частотой колебаний можно наблюдать еще следующий минимум звука, отвечающий разности хода, равной пяти полуволнам.

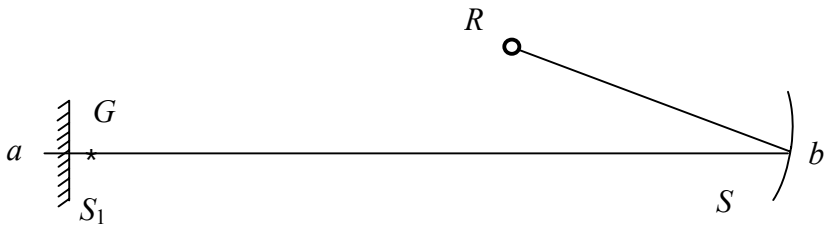
Установка на минимум звука производится при помощи манометрической капсулы с пламенем, которая надевается на выходной конец прибора и имеет три мембраны *M*. Две крайние мембраны возбуждаются колебаниями, которые выходят непосредственно из того и другого колена. Средняя мембрана соединена с отверстием O_2. Таким образом, если рассматривать огоньки во вращающемся зеркальном многограннике, то оказывается, что зубцы на средней полоске исчезают (почти совершенно) при установке прибора на минимум звука, в то время как зубцы на крайних полосках сохраняются при всех положениях раздвижного колена.

Длина звуковой волны в воздухе при 0°C вычисляется по формуле:

$$\lambda_0 = \frac{4n}{\sqrt{1+\alpha \cdot t}},$$

где n – расстояние между последовательными минимумами, отсчитанное по шкале прибора, α – температурный коэффициент расширения воздуха, t – температура воздуха при измерениях.

3. **Определение длины звуковых волн в воздухе методом интерферометра.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 14b. С.214-215.



Звуковой интерферометр одного из наиболее простых типов, применяемых в данной работе, схематически изображен на рисунке. Свисток Гальтона *G*, который служит источником звуковых волн, установлен перед плоским зеркалом S_1. Таким образом, по направлению *ab*, перпендикулярному к зеркалу, распространяются два ряда волн. Один ряд волн выходит непосредственно от свистка, а другой получается после отражения от плоского зеркала S_1. В результате оба луча получают некоторую разность хода, равную удвоенному расстоянию свистка от зеркала, которую затем сохраняют на всем дальнейшем пути. Падая на вогнутое зеркало *S*, которое устанавливается на большом расстоянии от прибора и, отражаясь от него, лучи собираются в фокус на звуковом радиометре *R*. Его отклонения измеряются методами зеркала и шкалы.

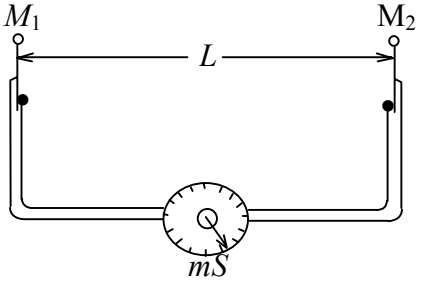
Очевидно, что эффект, даваемый радиометром, будет определяться разностью хода обоих лучей. Ее величину можно изменять, если изменять расстояние между свистком и зеркалом S_1. С этой целью зеркало S_1 укрепляется на подвижной подставке, и его расстояния от свистка можно измерять по шкале с точностью до 0,2 мм. Перемещая зеркало S_1, мы наблюдаем максимумы и минимумы отклонений радиометра, так как разность хода лучей при этом периодически меняется, получая значения, равные четному или нечетному числу полуволн. Длина звуковой λ волны при данной частоте свистка Гальтона выражается через перемещение *n* зеркала S_1, отвечающее двум соседним минимумам отклонений радиометра, следующим образом:

$$\lambda = 2n\,.$$

Таким образом, работа с прибором сводится к тому, чтобы, постепенно перемещая зеркало S_1, измерять соответствующие отклонения радиометра. На основании результатов измерений строят график, по которому определяют среднюю величину перемещения зеркала S_1, отвечающего соседним минимумам отклонений радиометра, т. е. величину *n*.

4. **Определение скорости звука в воздухе при помощи миллисекундомера.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 15а. С. 218.

Относительно небольшая скорость распространения звука в воздухе дает возможность непосредственно определить ее значение в закрытых помещениях, если применять приборы для точного измерения небольших промежутков времени. Для последней цели в данной работе применяется электрический миллисекундометр *mS*.



Это прибор имеет неподвижную стрелу *N* и циферблат, разделенный на тысячные доли секунды, который приводится в равномерное движение током от источника электрической энергии. Миллисекундомер соединен с мембранами M_1 и M_2, расстояние *L* между которыми, равное

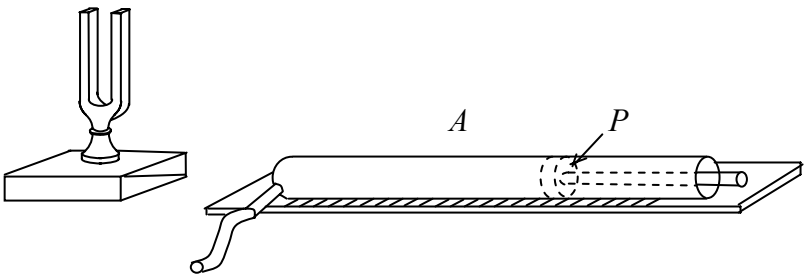
приблизительно 15–20 м, измеряется при помощи рулетки. Миллисекундомер устроен так, что при размыкании контакта мембраны M_1 циферблат миллисекундомера приходит в движение, а при размыкании контакта мембраны M_2 он останавливается. Размыкание контактов происходит под действием звуковой волны, посылаемой источником звука A, который находится вблизи мембраны M_1. Звук вызывается ударом деревянного молотка по футбольному мячу. Скорость звука вычисляется по элементарной формуле $v = L/\tau$, где τ – промежуток времени между размыканиями обоих контактов, отсчитанный по миллисекундомеру. В результате этих измерений мы получаем значение скорости звука в воздухе v_t при температуре наблюдения t. Зная t, скорость звука v_0 при температуре 0°C можно вычислить на основании формулы

$$v_0 = \frac{v_t}{\sqrt{1+\alpha \cdot t}},$$

где α – коэффициент расширения воздуха.

5. **Определение скорости звука в воздухе методом стоячей волны.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 15b. С.218-219.

Скорость звука v можно определить, если измерить длину звуковой волны λ, даваемую источником звука с известной частотой ν: $v = \nu\lambda$. Измерение длины волны удобнее производить по отношению к стоячим волнам. Прибор, применяемый для измерения скорости звука, схематически изображен на рисунке.



Широкая стеклянная труба A, открытая с обоих концов, имеет боковой отросток, на который надета резиновая (слуховая) трубка с наконечником, и поршень P, который свободно передвигается внутри трубы A. На доске рядом с трубой укреплена шкала, по которой определяют положение поршня в трубе. Источниками звука служат камертоны на резонансных ящиках, открытые концы которых при измерениях располагают вблизи свободного конца трубы A.

Частота камертонов известна. При их звучании звуковые волны, входя внутрь трубы, отражаются от поршня P и идут в обратном направлении. В результате возникает явление интерференции встречных колебаний, и внутри трубы образуется система плоских стоячих волн. Положение их узлов и пучностей зависит от положения поршня в трубе. Таким образом, при перемещении поршня сила звука, воспринимаемого через слуховую трубку, изменяется. Измерения сводятся к тому, чтобы, перемещая поршень P вдоль трубы, определить те положения его свободного конца, при которых в слуховой трубке слышны *максимумы* (или минимумы) *звука*. Число их на протяжении всей трубы зависит от частоты камертона, а расстояние между двумя положениями поршня, отвечающими соседним максимумам (или минимумам), определяет половину длины волны данного камертона λ. Определив скорость звука при температуре t, ее можно привести к температуре 0°C, по формуле:

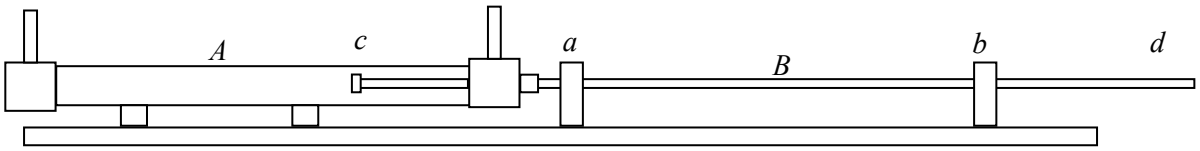
$$v_0 = \frac{v}{\sqrt{1+\alpha \cdot t}},$$

где α – коэффициент расширения воздуха.

6. **Определение скорости звука в газах методом Кундта.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 15с. С.219-221.

Метод Кундта определения скорости звука в газах основан на интерференции встречных колебаний. Стоячие волны, которые возникают в результате интерференции, при одном и том же источнике звука в различных газах имеют различную длину. Определяя длину стоячей волны в воздухе и в исследуемых газах, можно определить скорость звука в этих газах по отношению к скорости звука в воздухе, причем частота источника звука может оставаться неизвестной. Источником звука в методе Кундта служит металлический или стеклянный стержень, который приводится в продольные колебания, а определение положения узлов и пучностей стоячих волн производят при помощи так называемых пыльных фигур, или фигур Кундта.

Прибор Кундта состоит из широкой стеклянной трубы *A* около 1 *м* длиной, которая свободно лежит на подставках в горизонтальном положении.



Оба конца трубы закрыты металлическими оправами с боковыми отростками, которые служат для наполнения трубы исследуемыми газами. Краны в боковых отростках оправ (на рисунке не показаны) дают возможность отделить газ в трубе от окружающего пространства. В одной из оправ сделано широкое отверстие, через которое внутрь трубы входит латунный стержень *B* с шайбой *c*на конце, соединенный с оправой мягкой резиновой трубкой. Это дает возможность несколько перемещать трубу по отношению к стержню, не нарушая герметичности соединения. Стержень *B* закреплен в двух зажимах, которые устанавливаются на расстояниях одной четверти его длины, так что $ab = 2ca = 2bd$. Если стержень натирать продольно в части *ab* фланелью с порошком канифоли, то он начинает звучать, издавая, при указанном положении зажимов, свой первый обертон. При этом в стержне образуются стоячие волны, узлы которых совпадают с зажимами, а пучности находятся на концах стержня и на середине его. При звучании стержня внутри трубы распространяются звуковые волны, которые отражаются от оправы на противоположном конце трубы. В результате внутри трубы образуется система плоских стоячих волн. Положение их узлов и пучностей можно определить, если внутрь трубы *A* ввести небольшое количество легкого порошка, например, мелких пробковых опилок, распределив их равномерно по всей длине трубы. При звучании стержня опилки собираются, образуя характерные фигуры Кундта, которые приобретают особенно отчетливый вид, если между закрытым концом трубы *A* и шайбой стержня укладывается *целое число* стоячих волн. Этого можно достичь, несколько перемещая трубу относительно стержня. Измерения сводятся к тому, чтобы получить возможно отчетливую

картину фигур Кундта в воздухе и в исследуемом газе и определить длину стоячей волны в обоих случаях. Если в результате оказывается, что длина волны в воздухе и газе равна, соответственно, λ и λ_x, то скорость звука в газе:

$$v_x = v\frac{\lambda_x}{\lambda},$$

где v – скорость звука в воздухе. Так как табличные значения скорости звука относятся к 0°С, то необходимо ввести поправку на температуру, подставив вместо v ее величину v_0, определяемую формулой

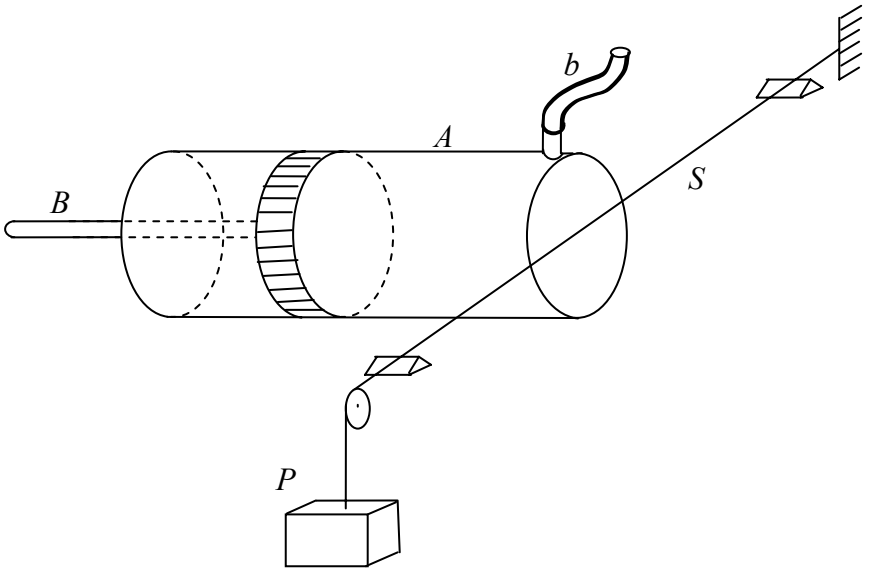
$$v_0 = \frac{v}{\sqrt{1+\alpha\cdot t}},$$

где α – коэффициент расширения воздуха, t – температура газа при измерениях. Таким образом, окончательно

$$v_x = v_0\frac{\lambda_x}{\lambda}\sqrt{1+\alpha\cdot t}\ .$$

В лабораторной работе определяют скорость звука в углекислом газе и в светильном газе.

7. **Определение резонансной частоты воздушного резонатора при помощи стоячей волны.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 17а. С.224-225.



Изучаемый резонатор представляет собой стеклянную открытую трубу *A* с поршнем *B*. Вблизи свободного конца трубы сделан боковой отросток *b*, на который надета резиновая слуховая трубка, наконечник которой при измерениях плотно прижимается к уху. Шкала, укрепленная на подставке прибора, позволяет измерять длину резонатора, т. е. расстояние от свободного конца трубы *A* до передней поверхности поршня. В качестве эталона переменной частоты применяется монохорд со струной *S* постоянной длины.

Частота колебаний струны изменяется при помощи добавочных грузов и вычисляется по формуле:

$$\nu = \frac{1}{2Lr}\sqrt{\frac{P}{\pi D}},$$

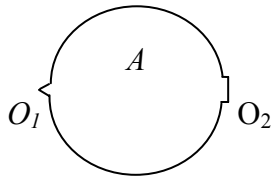
где L – длина струны, r – ее радиус, P – вес груза на конце струны, D – плотность материала струны. Целью работы является проверка формулы:

$$\nu = \frac{\mathrm{v}}{4L},$$

где v – скорость звука в воздухе. Для этого, поставив монохорд на определенную частоту, измеряют ту длину резонатора, при которой возникают резонансные явления, что обнаруживается резким усилением звука в слуховой трубе. Полученное значении длины резонатора сравнивают с ее теоретической величиной.

8. **Анализ сложных звуков при помощи резонатора Гельмгольца.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 18a. С.228-229.

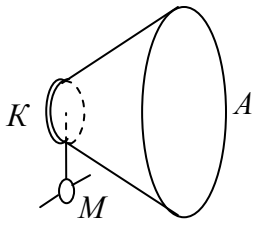
Шаровой резонатор Гельмгольца представляет собой полый металлический или стеклянный шар, в котором имеется два отверстия O_1 и O_2, расположенных по концам одного диаметра. Через более широкое отверстии O_2 внутрь резонатора поступают звуковые колебания. Узкое отверстие O_1 отводится к индикатору звуковых колебаний, например, к манометрической капсуле или соединяется слуховой трубкой с ухом, если наблюдения производят непосредственно на слух.



Каждый шаровой резонатор, в зависимости от его размеров и диаметра отверстия O_2 имеет определенную резонансную частоту. Вследствие этого каждый простой тон, входящий в состав сложного звука, будет особенно сильно возбуждать резонатор, близкий к нему по частоте. Для анализа сложных звуков применяются различные наборы резонаторов Гельмгольца с определенными частотами, значение которых непосредственно указывается на резонаторах. Их слуховые отверстия обыкновенно отводятся к манометрическим капсулам, огоньки которых наблюдаются при помощи вращающегося зеркального многогранника. Приборы такого типа, которые обыкновенно называются анализаторами Кенига, дают возможность весьма просто производить частотный анализ звуков. Что же касается амплитудного анализа, то при помощи анализаторов Кенига удается только очень приближенно определять относительную силу отдельных составляющих сложного звука. Это можно установить, наблюдая форму и и глубину зубцов на светлых полосках во вращающемся зеркале, так как более сильные составляющие характеризуются большей глубиной и резкостью очертаний зубцов.

В данной работе исследуется частотный состав звука трех небольших духовых труб, имеющих различную частоту основного тона. Трубы приводятся в звучание при помощи непрерывной воздушной струи. Два камертона, которые имеются при приборе, служат для того, чтобы наглядно убедиться в различном действии на анализатор звуков, простых по составу (камертон) и сложных (трубы). Результаты наблюдений изображают в виде диаграмм, на которых качественно указывают относительную силу гармонических составляющих звука (сильный, средний, слабый). На тех же диаграммах указывают частоты того или другого камертона.

9. **Изучение акустического спектра сложных звуков при помощи прибора П.Н. Лебедева.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 18b. С.229-230.



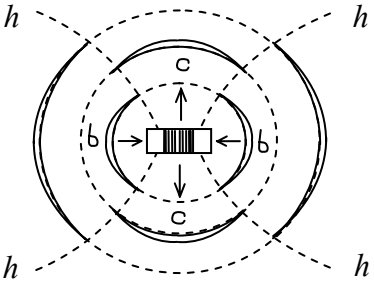
Основной частью прибора П.Н. Лебедева является небольшой рупор *A*, дном которого служит тонкая пробковая мембрана *K*. Она соединена с очень маленьким зеркальцем *M*, которое может свободно вращаться около горизонтальной оси.

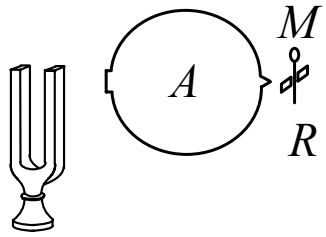
Лучи света, вышедшие из узкой диафрагмы, отражаются от зеркальца *M* и падают на зеркальный многогранник, отбрасывающий их на экран из матового стекла, на котором нанесена координатная сетка. На пути лучей стоит линза, которая служит для того, чтобы получить на экране отчетливое изображение светлого пятнышка. Под действием звуковой волны мембрана *K* приходит в колебательное движение, и пятнышко на экране растягивается в вертикальную полоску. При вращении зеркального многогранника она развертывается в горизонтально расположенную волнообразную линию, которая весьма точно воспроизводит акустический состав звука, так как все колеблющиеся части прибора сделаны очень легкими, и их инерция большого влияния не оказывает. Получаемые кривые должны быть периодическими, если спектр звука остается постоянным.

В данной работе исследуется акустический спектр звука трех небольших духовых труб, имеющих различную частоту основного тона. Трубы приводятся в звучание при помощи непрерывной воздушной струи. Два камертона, которые имеются при приборе, служат для того, чтобы наглядно выяснить различия в характере кривой при простых (камертон) и сложных (труба) звуках.

10. **Изучение звукового поля камертона при помощи радиометра.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 19а. С.232-233.

При звучании камертона его ветви одновременно сближаются или удаляются. Вследствие этого образуются две звуковые волны, которые в результате интерференции усиливают колебания в части пространства *bb* и ослабляют в части *CC* до полного исчезновения звука в направлении кривых *hh*. Таким образом, распределение силы звука в пространстве около камертона, или его звуковое поле, оказывается неравномерным.





В данной работе исследуется звуковое поле камертона в плоскости, перпендикулярной его ветвям, т. е. определяется относительная сила звука, который посылает камертон в этой плоскости по различным направлениям.

Для этого камертон, электромагнитным возбуждением укреплен вертикально на подставке, которая может поворачиваться около вертикальной оси и имеет угловую шкалу. Вблизи ветвей камертона расположено отверстие шарового резонатора Гельмгольца соответствующей частоты. Звуковые колебания, которые выходят из слухового отверстия резонатора, падают на звуковой радиометр *R*. Этот прибор представляет собой очень легкую мельничку с двумя или четырьмя крылышками и

очень маленьким зеркальцем *M*, которая может вращаться около вертикальной оси. Скорость вращения мельнички зависит от силы звука и одновременно от его частоты. При постоянной частоте источника звука скорость вращения оказывается пропорциональной силе звука, которая, таким образом, может быть без труда измерена, но, очевидно, только в относительных единицах. Для определения скорости вращения мельнички ее зеркальце освещают лампой и, получив от него зайчик на шкале, измеряют по секундомеру промежуток времени, в течение которого мельничка делает определенное число оборотов.

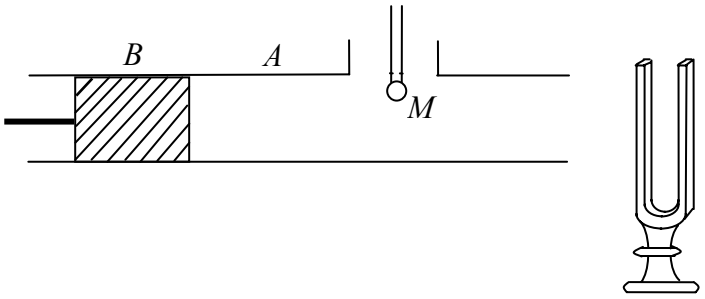
По результатам измерения определяют относительную силу звука по различным направлениям и строят в полярных координатах диаграмму звукового поля камертона, откладывая по радиальным направлениям относительную силу звука.

11. **Определение коэффициента поглощения звука при помощи стоячей волны.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. **1946**. Работа 20а. С. 234-235.

Полное отсутствие колебаний в узлах стоячей волны наблюдается только в том случае, если амплитуды падающей и отраженной волн равны. Если же при отражении звука происходит его частичное поглощение, то в узлах стоячих волн должен сохраняться колебательный процесс, амплитуда которого определяется разностью амплитуд падающей и отраженной волн. Отсюда следует, что амплитуда колебаний в узлах стоячих волн, при образовании их в результате отражения от некоторой поверхности, должна зависеть от коэффициента поглощения звука этой поверхностью. Зависимость между коэффициентом поглощения α отражающей поверхности и звуковым давлением в пучностях p_n и узлах p_y стоячей волны выражается формулой:

$$\alpha = \frac{4 p_n p_y}{\left(p_n + p_y \right)^2}.$$

На этих соображениях основан один из методов определения коэффициента поглощения звука различными телами. Прибор, которым пользуются при этих измерениях, состоит из широкой металлической трубы *A*, открытой с обоих концов, в которой имеется поршень *B*.



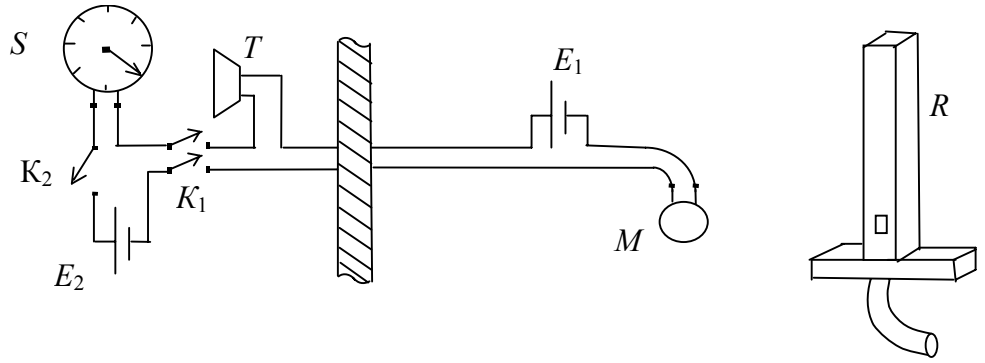
Источником звуковых колебаний служит камертон с электромагнитным возбуждением, который помещают вблизи свободного конца трубы. На некотором расстоянии от конца трубы находится очень маленький микрофон *M*. он соединен с измерительным прибором, который показывает звуковое давление в относительных единицах. Исследуемые образцы различных материалов в виде круглых шайб укрепляются на свободном конце поршня *B*. В настоящей работе исследуются алюминий, пробка и войлок.

Измерения состоят в том, что на конце поршня укрепляют один из исследуемых образцов и, приведя камертон в звучание, устанавливают поршень в такое положение, при котором микрофон обнаруживает максимум давления. При этом производят отсчет показания измерительного прибора. Затем, постепенно отодвигая поршень, находят такое положение его, при котором показание прибора минимально. Вычисления по приведенной выше формуле дают значение коэффициента поглощения испытуемого материала.

12. **Определение времени реверберации методом непосредственного отсчета.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 20b. С.235-236.

Один из наиболее простых методов определения продолжительности реверберации, предложенный Сэбином, основан на непосредственном измерении по секундомеру того промежутка времени, который протекает между моментами выключения источника звука и ослабления послезвучания до порога слышимости. Для того, чтобы на основании подобных измерений можно было определить время реверберации, необходимо или определить начальную громкость звука, или установить его на определенный уровень, например, миллион раз больше порога слышимости. Таких измерений в данной работе не выполняют. Таким образом, результаты измерений, описываемых ниже, дают лишь чисто относительную характеристику реверберационных свойств помещения.

Расположение приборов, применяемых при измерениях, схематически дано на рисунке. Источником звука служит органная труба *R*, которая устанавливается в исследуемом помещении и приводится в звучание непрерывной струей воздуха.



Силу струи можно изменять винтовым регулятором. Вблизи трубы помещается ленточный микрофон *M*, питаемый источником электрической энергии E_1. Телефон *T*, связанный с микрофоном, находится в отдельном помещении, хорошо изолированном акустически. Там же находится электрический секундомер, питаемый от батареи E_2. В цепи телефона находится двойной ключ K_1, связанный с краном, подающим воздух в трубу *R*, и одновременно с секундомером *S*, в цепи которого имеется еще второй ключ K_2. Ключ K_1 установлен так, что пока звучит органная труба, цепь микрофона остается разомкнутой. Но в тот момент, когда прекращается звучание трубы, замыкаются одновременно цепь телефона и цепь секундомера, если предварительно был замкнут ключ K_2. Таким образом, если приложить телефон к уху и в некоторый момент прекратить звучание трубы, то секундомер приходит в движение, а в телефоне можно слышать послезвучание, постепенно ослабевающее. В то момент, когда звучание в телефоне со-

вершенно исчезнет, секундомер следует остановить, размыкая его цепь при помощи ключа K_2. Вновь приводя трубу в звучание, ключ K_2 следует замкнуть.

13. **Определение скорости звука в газах методом интерференции и методом стоячей волны.** Задача 16. С. 104-109. Физический практикум.

Под ред. проф. В.И. Ивероновой. М., **1951. 1953, 1955**. Задача 16. С. 106-111.

15. **Определение скорости звука в воздухе методом стоячей волны.** Работа 18. С. 71-73. Физический практикум. Часть 1. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М. А. Большаниной. Томск. **1959**.

16. **Определение скорости звука по резонансу в открытых трубках.** Ainslie D. S. Measurement of velocity of sound from resonance in open pipes. “Amer. J. Phys.”, **1960**, **28**, № 2, 167. [РЖ 1961-1А111].

Скорость звука определяется при помощи стеклянной трубки.

У одного конца трубки укрепляют громкоговоритель, связанный с генератором звуковой частоты, у другого конца располагается микрофон, связанный с катодным осциллографом. Микрофон перемещают внутри трубки и отмечают его положение в моменты максимума или минимума звука. По известной частоте звука и измеренному перемещению микрофона рассчитывают скорость звука в воздухе. Результаты, полученные автором для частот 636–2260 Гц, отличаются на 0,24% от табличных данных.

17. **Измерение скорости звука с использованием электронного осциллографа.** Lehotsky Dobroslav. Meranie rychlosti zvuku pomocou elektronoveho oscilografu. “Prirod. Vedy skole”, **1960**, 10, № 4, 334-336 (словацк.). [РЖ 1961-2А65].

Метод измерения основан на сложении двух гармонических колебаний с одинаковой частотой и амплитудой и разными фазами. Для этого используется осциллограф, одна пара пластин которого подключается к выходу репродуктора, подключенного к звуковому генератору, другая – к микрофону. При изменении расстояния между источником и приемником звука изменяется фаза волны, приходящей к микрофону. Таким образом можно определить два последующих положения микрофона, при которых наблюдаются одинаковые фигуры Лиссажу. Скорость звука вычисляется по определенной таким способом длине волны и известной частоте звукового генератора. Указывается, что по такому же принципу можно определять зависимость скорости звука от плотности и температуры среды, в которой распространяется звук.

18. **Измерение длины звуковой волны при помощи усилителя.** Frießem Gunter. WellenLange des Schalls mit NF-Verstarker. “Prax/ Naturwiss.”, **1961**, A10, № 1, Physik, 18-19. [РЖ 1961-8А66].

Описывается опыт, демонстрирующий получение незатухающих звуковых колебаний при помощи акустической обратной связи и измерение длины звуковой волны. Опыты проводятся при помощи усилителя с регулировкой степени усиления, громкоговорителя и микрофона. Громкоговоритель устанавливают на расстоянии 1–3 м от микрофона и соединяют с усилителем в обычном порядке. При перемещении микрофона относительно громкоговорителя положительная

обратная связь имеет место только в том случае, когда $s = n\lambda$, где s – расстояние между громкоговорителем и микрофоном, λ – длина волны, $n = 1, 2, 3$ и т. д.; при промежуточных значениях $s = 3/2\ \lambda$, $5/2\ \lambda$ и т. д. наступает отрицательная обратная связь и звук затухает. Указанным методом может быть определена собственная частота мембраны громкоговорителя.

19. **Лабораторные работы по акустике ультраакустике в физическом практикуме высшей школы.** Кустова А.В., Ноздрина Г.В. В сб. ″Применение ультраакуст. к исслед. вещества″. Вып. 19. М., **1964**, 39-44. [РЖ 1966-4А102].

Описаны две лабораторные работы: определение упругих свойств высокомолекулярных веществ ультразвуковым методом и измерение скорости звука в смесях газов. Работы знакомят студентов с основными методами измерения скорости звука: импульсным, резонансным и фазовым, а также с некоторыми применениями упругих волн.

20. **Измерение скорости и поглощения ультразвука.** (Лабораторная работа). Кошкин Н.И., Добромыслов Н.А. “Уч. зап. моск. обл. пед. ин-та”, **1964**, 147, 107-111. [РЖ 1965-12А96].

Установка состоит из генератора прямоугольных колебаний, импульсы от которого подаются на излучатель, в результате чего пластинка совершает механические колебания собственной частоты. Ультразвуковые волны, прошедшие через исследуемую среду, принимаются второй пластинкой и преобразуются в электрические импульсы, которые после усиления подаются на осциллограф. Приведены описание отдельных элементов установки и расчетные формулы.

21. **Радиолокационный способ определения скорости движущегося объекта.** Dopler-Radar. “Prax. Naturwiss.”, **1965**, A14, № 3, , 60-62. [РЖ 1965 12А91].

В качестве передатчика используется небольшой громкоговоритель, соединенный с генератором звуковой частоты. Звуковые волны, от передатчика направляют на объект. Отраженные волны регистрируются приемником, состоящим из пьезоэлектрического микрофона с низкочастотным усилителем и осциллографом. Если привести объект в движение, наблюдается отчетливое изменение частоты сигнала, обусловленное эффектом Допплера. Скорость объекта рассчитывается по формуле $f_s = 2f_0v/c$, где f_s – частота биений. Приведены методические указания и результаты измерений.

22. **Измерение скорости звука в газах методом трубы.** Romer I. Carl, Jr, Koentop Preston E. Tube method for measuring the velocity of sound in gases. ″Amer. J Phys.″, **1965**, 33, № 10, 803-806. [РЖ-66 6А87].

Описан метод измерения скорости звука в газах, заключенных в трубах, состоящий в выделении двух точек с одинаковыми фазами в свободно распространяющихся бегущих волнах и основанный на приборе, описанном Ангона (РЖФиз, 1954, № 9, 10608). Приведена схема прибора и даны указания к проведению экспериментов. Прибор проще по устройству, чем многие другие, применяемые для этой же цели установки. Вследствие того, что в описываемом методе используются не стоячие, а бегущие волны, не ограниченные определенными частотами, он пригоден в широком диапазоне температур и давлений. Результа-

ты, полученные этим методом, очень близки к принятым значениям скоростей звука в газах.

23. **Измерение скорости звука на небольшом расстоянии.** Semeraro S. Misura della velocita del suono su breve distanza. ″Giorn. fis. Soc. ital. fis.″, **1965**, 6, № 4, 277-278 (итал.). [РЖ 1967-2А59].

Для измерения скорости звука на небольшом расстоянии применяется установка, описанная ранее (РЖФиз, 1966, 2А57).

24. **Определение скорости звука в газах.** Steketee J. Bepaling van de geluidssnelheid in gassen. ″Nederl. Tijdschr. natuurkunde″, **1965**, 31, № 10, 370-372 (гол.). [РЖ 1967-2А58].

Описана лабораторная установка для измерения скорости звука в газах, собранная по простой схеме и из простых приборов. Дан пример измерения скорости звука в воздухе и в углекислом газе.

25. **Измерение длины волны звуковых волн.** Sears Francis W. Measurement of the wawelength of sound wawes. ″Phys. Teacher″, **1965**, 3, № 2, 79. [РЖ 1966-3А79].

В связи с заметкой Кристенсена (РЖФиз, 1965, 12А95), в которой автор ссылается на ″Лекционные демонстрации по физике″ под редакцией Иверoновой, отмечается, что описываемый Кристенсеном метод измерения длины волны звука, по-видимому, впервые предложен Патчетом в 1943 году и в дальнейшем был неоднократно описан. Аналогичный метод описан в 1959 году (Hovi V. ″Ann. Acad. Sci. Fennicae″, ser. AVI, 1959, № 18) и затем в несколько модифицированном варианте в 1963 году. (РЖФиз, 1963, 10Ж417; 1964, 5Ж326). Отмечается также, что Кристенсен недостаточно подчеркивает то, что отличает этот метод от других, а именно, что это – единственный метод, при котором измерения проводятся на бегущей волне и что длина волны здесь определяется как расстояние между двумя соседними точками, в которых фазы колебаний совпадают. Описываются измерения, проведенные этим методом по вводному курсу физики в Дартмутском колледже.

26. **Электроакустические измерения скорости звука в трубке Кундта.** Siroka Miroslava, Zouzelka Jan. Elektroakusticka mereni rychlosti zvuku v Kundtove trubici. ″Acta Univ. palack. Olomuc.″, **1965**, 18, 171-175 (чешск.; рез. русск., англ.)

Рассмотрено несколько способов измерения скорости звука в трубках Кундта как темы для физического практикума: три способа измерения скорости звука при постоянной температуре и способ измерения скорости звука в зависимости от температуры.

27. **Использование акустического интерферометра в лабораторных работах исследовательского характера.** Boyer Robert A. Acoustical interferometer for ″open-ended″ laboratory experiments. ″Amer. J Phys.″, **1966**, 34, № 10, 946-948. [РЖ-67 5А49].

Акустический интерферометр состоит из телескопической системы труб, в одном конце которой установлен небольшой репродуктор, а в другом – микрофон. Расстояние между репродуктором и микрофоном можно менять в широких

пределах. Репродуктор питают от звукового генератора переменной частоты, а микрофон подсоединен к электронному осциллографу. С помощью этого прибора учащийся может изучать по произвольной программе такие явления, как резонанс в открытых и закрытых трубах, продольный характер звуковых колебаний, возбуждение различных гармоник, поглощение энергии акустических колебаний и т. п. Ценность этой лабораторной работы заключается в том, что она дает возможность пытливому студенту самостоятельно разобраться во многих акустических явлениях.

28. **Эксперименты со вторым звуком при лабораторных работах повышенной трудности.** Merrill John R. Second-sound experiment for advanced laboratories. ″Amer. J Phys.″, **1968**, 36, № 2, 137-139. [РЖ-68 9А93].

Описывается постановка и методика проведения экспериментов по определению скорости и поглощения второго звука (как импульсным, так и резонансным способами) в рамках студенческого практикума.

29. **Влияние движения среды на разность фаз между колебаниями источника и приемника звука.** Робинсон Б. ″Успехи физ. наук″, **1968**, 94, № 4, 742-743. [РЖ 1968-10А57].

Описан более удобный вариант опыта, предложенного Баранским Зубаревой (РЖФиз, 1966, 10А48), заключающийся в том, что репродуктор и микрофон закреплены на столе и с помощью настольного вентилятора создается искусственный ″эфирный ветер″, что практически исключает влияние отражений внутри помещения. Вентилятор диаметром 30 см создает направленный поток воздуха скоростью ≈3 м/с на протяжении ≈1 м. Так как эта скорость больше скорости, которую удобно получить с помощью маятника, наблюдение сдвига фаз становится более отчетливым. Для частоты 10 кГц и средней скорости воздуха 3 м/с на протяжении 1 м $\Delta\varphi = 90°$. Если ω подобрать так, чтобы на экране осциллографа получилась прямолинейная фигура Лиссажу, после включения вентилятора получается почти круговая фигура. Скорость воздуха измеряется анемометром. Избирательный усилитель или простой фильтр верхних частот в центре микрофона помогает устранить шумы вентилятора и помещения.

30. **Исследование в трубке Кундта с помощью термистора.** Hastings R.B. Thermistor explorations in a Kundt tube. ″Amer. J Phys.″, **1969**, 37, № 7, 709-712. [РЖ-70 3А68].

С помощью термистора изучалось распределение температуры в стоячих звуковых волнах, образующихся в трубке Кундта. Регистрировался либо ток, протекающий через термистор, либо сопротивление термистора при перемещении последнего вдоль трубки. В обоих случаях наблюдалось периодическое изменение измеряемой величины. По измеренному изменению сопротивления термистора сделана оценка распределения температуры в стоячей звуковой волне, а также рассчитана скорость звука.

31. **Электроакустический метод определения скорости звука в воздухе.** Попов Б. Един електроакустичен метод за определяне скоростта на звука вьв въвздух. ″Мат. и физика″ (НРБ), **1971**, 14, № 3, 53-56 (болг). [РЖ 1972-1А121].

Описана установка для определения скорости звука в воздухе посредством регистрации стоячих волн, образующихся вследствие интерференции падающей и отраженной от экрана звуковой волны. Установка состоит из генератора звуковой частоты, к выходу которого подключен громкоговоритель. На расстоянии 1-1,5 *м* от громкоговорителя установлен экран размером 50×70 см. Между экраном и громкоговорителем установлен электродинамический микрофон, подключенный к входу усилителя низкой частоты. К выходу усилителя подключен демонстрационный миллиамперметр, последовательно с которым включен полупроводниковый диод. Перемещением микрофона определяют положение максимумов и минимумов стоячей волны, затем измеряют расстояние между максимумами, вычисляют длину звуковой волны и, зная частоту звука, определяют скорость звука.

32. **Акустический способ измерения расстояний.** Barnes George. Echo ranging. ″Phys. Teacher″, **1973**, 11, № 4, 243-248. [РЖ 1973-8А66].

Подробно описан лабораторный эксперимент по определению расстояния акустическим методом. Экспериментальное оборудование состоит из обычного громкоговорителя, импульсного генератора звуковой частоты, предусилителя, отражателя, микрофона и осциллографа. Приведены принципиальные схемы генератора и предусилителя. Представлена теория эксперимента. Отмечается, что описываемый эксперимент может служить также демонстрационным экспериментом по определению скорости звука в воздухе.

33. Измерение скорости звука в воздухе с помощью электронного осциллоскопа. Иванов Д. Измерване скоростта на звука във вхздух с помощта на електронен осцилоскоп. ″Мат. и физика (НРБ)″, **1973**, 16, № 6, 51-52. [РЖ 1974 6А71].

Предложен новый вариант постановки опыта по измерению скорости заука в воздухе методом модуляции электронного пучка по яркости с использованием электронного осциллоскопа. В качестве источника звука используется электродинамический громкоговоритель без трансформатора, который подключается к звуковому генератору. Приемником звука служит динамический микрофон, подключенный к входу вертикального отклонения осциллоскопа.

34. **Определение длины звуковой волны и скорости звука в воздухе.** Работа 10. Руководство к лабораторным работам по физике. Часть I. Механика. Молекулярная физика. Под ред. А.П. Максименко. Днепропетровский. гос. ун-т. **1973**. 130 с.

35. **Практикум по музыкальной акустике.** Firth Ian. Projects in musical acoustics. ″Phys.Educ.″, **1974**, 9, № 7, 479-485. [РЖ 1975-5А87].

Представлен подробный методический материал для выполнения практикума по музыкальной акустике при изучении общей физики в средних школах и университетах США. Описано несколько возможных экспериментов по изучению стоячих волн в колеблющихся струнах и резонаторах музыкальных инструментов; исследованию физических свойств древесных пород, из которых изготовлены музыкальные инструменты; типов колебаний, возбуждаемых в реальных музыкальных инструментах и проводить частотный анализ возбуждаемых колебаний. Приведены результаты экспериментов для некоторых струнных музыкальных инструментов.

36. **Упрощенное измерение скорости звука с помощью электроники.**

Ludwig V. Vereinfachte elektronische Schallgeschwindigkeitmessung. ″Naturwiss. Unterr.″, **1974**, 22, № 1, 12-16. [РЖ 1974-6А72].

Описан упрощенный метод прямого измерения скорости звука путем счета импульсов заданной частоты стандартным декадным счетчиком, запускаемым и останавливаемым фронтом звуковой волны, прошедшим заданное расстояние. Основа упрощения – использование самодельной схемы из двоичного счетчика и генератора прямоугольных импульсов на трех интегральных схемах, одном триоде и одном диоде. Первым импульсом генератора запускается счетчик и возбуждается через динамик фронт звуковой волны. Сигнал о достижении фронтом микрофона останавливает генератор и позволяет по состоянию счетчика определить число импульсов, насчитанных за это время, и вычислить скорость распространения звука. Дополнительно учащиеся проверяют свои знания двоичной системы записи чисел. Приводятся подробные схемы прибора.

37. **Измерение скорости звука в физическом практикуме с использованием бегущих звуковых волн и импульсов звука.** Hageseth G.T., Muir R.B. Pulsed and traveling sound waves in the introductory physics laboratory. ″Phys. Teach.″, **1974**, 12, № 2, 385. [РЖ 1974-7А82].

Установка состоит из генератора синусоидальных колебаний и прямоугольных импульсов и осциллографа. На одном конце плексигласовой трубы длиной 1,2 *м* и наружным диаметром 4,5 см укреплен миниатюрный динамик, воспроизводящий диапазон частот 400 – 3000 Гц. Микрофон укрепляется на более тонкой (диаметр ~1,2 см) трубке длиной 1 м и может перемещаться в большой трубе. Скорость звука можно измерить косвенно и непосредственно. В первом случае динамик возбуждается непрерывным сигналом с частотой ~1000 Гц. Этот же сигнал подается на горизонтальные пластины осциллографа. На вертикальные пластины подается выходной сигнал с микрофона. Перемещая микрофон, находят точки, в которых фигуры Лиссажу одинаковы; это позволяет найти длину волны. Частота колебаний определяется с помощью осциллографа, а затем вычисляется скорость. Во втором случае динамик возбуждается коротким (~0,1 мс, частота повторения 600 Гц) импульсом и по осциллографу измеряется время его распространения между двумя положениями микрофона. С помощью этой же установки можно измерять величины, от которых зависит скорость звука (напр., отношение удельных теплоемкостей), а также зависимость скорости звука от молекулярного веса газа. При этом нужно соответствующим образом герметизировать трубу бегущей волны.

38. **Определение скорости звука по резонансу.** Guy Buford, Allen Jim. Velocity of sound by resonsnces. ″Phys. Teach.″, **1974**, 12, № 2, 117. [РЖ 1974-7А83].

В традиционном опыте в физическом практикуме студенты определяют скорость звука, возбуждая камертон и возбуждая с его помощью резонансные колебания в трубе. Предлагается заменить камертон динамиком (диаметр ~7 см) и возбуждать его с помощью генератора. К зажимам динамика присоединяется осциллограф. При выполнении условий резонанса напряжение на зажимах динамика возрастает (динамик действует и как микрофон), что отмечается по осциллографу. Кроме устранения шума в лаборатории, этот способ позволяет определять скорость звука на большом количестве частот (вместо 2–3 у камертона) и предлагать различные варианты опыта. Авторы используют частоты 400–3000 Гц.

39. **Измерение скорости звука.** Samide Karola. Messung der Schallgeschwindigkeit. ″Prax. Naturwiss. Phys.″, **1976**, 25, № 6, 148-150. [РЖ 1977-1А122].

Предлагается модификация известного опыта по определению скорости звука в газе методом стоячей волны в трубе. Источник и приемник звука (динамик и микрофон) располагаются на фиксированном расстоянии друг от друга. Стоячая волна создается путем подбора частоты. Предлагаемая модификация позволяет проводить измерения с разными газами и при разных давлениях. Приведены результаты измерений скорости звука в воздухе и углекислоте.

40. **Определение скорости звука (в воздухе) методом интерференции волн.** Физический практикум для нефизических специальностей. Часть I. (Учебное пособие). Полищук Д.И. и др. Одесса. **1977**. Задача 9. С. 43-45.

41. **Определение скорости звука (в воздухе) методом резонанса. Образование стоячих волн.** Физический практикум для нефизических специальностей. Часть I. (Учебное пособие). Полищук Д.И. и др. Одесса. **1977**. Задача 10. С. 46-48.

42. **Измерение скорости звука.** The great beer bottle experiment. Smith Gary R., Loly P. D. ″Amer. J. Phys.″, **1979**, 47, № 6, 515-518. [РЖ 1980-3А85].

Описан простой эксперимент, позволяющий измерить скорость звука с точностью лучше 10 %. Основным элементом установки является резонатор Гельмгольца, представляющий собой частично заполненную водой стеклянную бутылку. Для проведения опыта требуется еще одна бутылка, набор из 4–5 камертонов для возбуждения колебаний в диапазоне 250–1000 Гц, прибор для точного измерения длины и резиновый шланг. Эксперимент выполняется студентами начального курса при изучении гармонических колебаний и звуковых волн.

43. **Волновое движение – эксперимент по курсу музыкальной акустики.** Wave motion – an experiment for in musical acoustics. Phelps F. M. III. ″Phys. Teach.″, **1979**, 17, № 5, 317. [РЖ 1981-2А87].

Ряд качественных экспериментов, проводимых при изучении колебательного движения, может быть проведен в количественном плане. Предложены три эксперимента по курсу музыкальной акустики, в которых измеряется фазовая скорость. 1) Длинная пружина вручную приводится в колебательное движение с частотой ≈1 Гц. Для реализации 1-й гармоники пружина должна растягиваться на длину 1,5 L, где L – первоначальная длина нерастянутой пружины. Время 100 колебаний измеряется секундомером. Вычисляется частота колебаний ν, и фазовая скорость находится по формуле $c=\lambda\nu$, где λ – длина волны. Аналогично реализуются 2, 3 и 4-я гармоники ($L=\lambda$, $L=3\lambda/2$, $L=2\lambda$). 2) Измеряется расстояние ΔX, пройденное вдоль пружины импульсом возмущения, и время Δt, за которое он проходит это расстояние. Фазовая скорость вычисляется по формуле $c=\sqrt{(F/\mu)}$, где F – сила, растягивающая пружину, μ – линейная плотность пружины, соответствующая растяжению.

44. **Отражение звуковых волн.** Reflexion von Schallimpulsen. Beutel Thomas, Lohken Rudolf. ″Prax. Naturwiss. Phys.″, **1979**, 28 № 9, 231-233. [РЖ 1980-2А88].

Предложен эксперимент по наблюдению распространения звуковых волн. Громкоговоритель возбуждает звуковой импульс в трубе, в середине которой помещен микрофон в виде зонда, соединенный с осциллографом. На экране осциллографа наблюдают первичный импульс и импульс, отраженный от конца трубы. Определяя время между первичным и отраженным импульсами и измеряя расстояние от микрофона до отражающего конца, можно найти скорость звука в воздухе.

45. **Измерение скорости звука.** The great beer bottle experiment. Smith Gary R., Loly P. D. ″Amer. J. Phys.″, **1979**, 47, № 6, 515-518. [РЖ 1980-3А85].

Описан простой эксперимент, позволяющий измерить скорость звука с точностью лучше 10 %. Основным элементом установки является резонатор Гельмгольца, представляющий собой частично заполненную водой стеклянную бутылку. Для проведения опыта требуется еще одна бутылка, набор из 4–5 камертонов для возбуждения колебаний в диапазоне 250–1000 Гц, прибор для точного измерения длины и резиновый шланг. Эксперимент выполняется студентами начального курса при изучении гармонических колебаний и звуковых волн.

46. **Непосредственное измерение скорости звука.** Direct measurement of the speed of sound. Girard John E. ″Phys. Teach.″, **1979**, 17, № 6, 393. [РЖ 1980 3А86].

Описывается простая установка, в которой задержка, связанная с с распространением акустического импульса от динамика к микрофону, визуализируется на экране осциллографа. Основу установки составляет конденсатор, замкнутый на источник постоянного напряжения 6 В. Конденсатор разряжается на динамик, посылающий в микрофон сигнал. Одновременно с этим импульс разряда запускает развертку осциллографа, на вертикальные пластины которого подается сигнал с микрофона, задержанный относительно начала развертки на время распространения звука. По известным значениям расстояния динамик – микрофон и длительности развертки определяется скорость звука.

47. **Измерение скорости звука в движущемся воздухе. Подведение к теории относительности.** Messung der Schallgeschwindigkeit in bewegter Luft, eine Hinfuhrung zur Relativitatstheorie. Schuldt Carsten. ″Prax. Naturwiss. Phys.″, **1981**, 30, № 8, 245-250. [РЖ 1982-2А91].

Описаны опыты по изучению распространения звука в движущейся относительно наблюдателя среде. Эксперименты проводятся с двумя микрофонами, помещенными в трубке, через которую с постоянной скоростью движется воздух. Микрофоны соединены с осциллографом, с помощью которого определяют время прохождения звукового импульса от одного микрофона до другого. По известному расстоянию между микрофонами определяется скорость звука в неподвижном воздухе, а также в воздушных потоках, движущихся от источника звука к микрофону или от микрофона к источнику. Небольшое видоизменение опыта позволяет измерять непосредственно разность скоростей звука в неподвижной и движущихся средах. Для распространения звука в среде справедливы галилеевские преобразования координат. Следовательно, зная скорость звука в неподвижной среде, можно найти относительную скорость движения наблюдателя относительно ″звуконосного эфира″. Сходные соображения привели в начале XX века к постановке эксперимента, призванного обнаружить движение на-

блюдателя, находящегося на Земле, относительно неподвижного ″светоносного эфира″, в котором распространяются световые волны (опыт Майкельсона). Как известно, этот опыт дал отрицательный результат, что привело к отказу от представления об эфире.

48. **Учебный лабораторный эксперимент по исследованию звукового поля маленького ультразвукового датчика.** Instructional laboratory experiment on the sound field of a small ultrasonic transducer. Kinyuy I., Stumpf F.B. "Amer. J. Phys.", **1983**, 51, № 8, 756-757. [РЖ 1984-2А86].

Предлагается лабораторная работа по исследованию профиля звукового давления и диаграммы направленности ультразвукового датчика Р1-8120 фирмы PASCO, работающего на частоте 22 кГц. При измерении звукового давления датчик и приемник монтировались на обычной оптической скамье. При этом изменению расстояния датчик-приемник в пределах от 10 до 100 см соответствовал перепад звукового давления от 99 до 79 дБ. Исследование диаграммы направленности производилось путем вращения датчика относительно неподвижного приемника в пределах азимутального угла 180°.

49. **Зависимость скорости звука в воздухе от температуры.** Variation of speed of sound in an air with temperature. Ouseph P.J., Link James J. ″Amer. J. Phys.″, **1984**, 52, № 7, 661. [РЖ 1984-12А108].

Для изучения в лабораторном практикуме зависимости скорости звука от температуры воздуха предлагается использовать импульсный метод измерения скорости звука. Измеряется временное расстояние между посылаемым импульсом ультразвуковой волны и сигналом эха. Ультразвуковой импульс частотой 60 кГц, 57 кГц, 53 кГц, 52 кГц направляется в объем, ограниченный алюминиевой ттрубой длиной 1,5 *м* и диаметром 0,2 м. На трубе монтируется нагреватель и две термопары для измерения температуры воздуха. Проведение эксперимента занимает два часа при изменении температуры воздуха от 2° С до 102° С. Полученное значение температурного коэффициента скорости звука в воздухе равно 0,62 м/(с·град), что хорошо совпадает с литературными данными.

50. **Сферические акустические резонаторы. Перспективные системы для термометрии и измерения газовой постоянной.** Spherica acoustic resonators: promising tools for thermometry and measurement of the gas constant. Moldover M. R., Mehl J. B. ″US Dep. Commer. Nat. Bur. Stand. Spec. Publ.″, **1984**, № 617: Precis. Meas. and Fund. Constants II. Proc. 2 Int. Conf., Gaithersburg, Md, June 8-12, 1981, 281-286. [РЖ 1985-7А83].

Описана конструкция и приведены результаты измерений с помощью сферического резонатора скорости звука в газах. Использовались два резонатора: из Al, диаметром 12,7 см, и Cu, диаметром 6,75 см. Резонаторы помещались в термостатируемый объем и заполнялись либо аргоном, либо пропаном при давлении от 0,1 до 0,5 Мпа. В сферическом резонаторе для радиальной моды колебаний движение молекул в волне – перпендикулярно стенкам (что уменьшает потери энергии на трение и увеличивает добротность). Отношение полуширины резонансной кривой к резонансной частоте при этом достигает $2 \cdot 10^{-4}$. Это позволяет также уменьшить размеры акустического передатчика (диаметр которого 0,35 см). Анализируется влияние на добротность системы следующих факторов:

Конечная теплоемкость и теплопроводность стенок резонатора, влияние несовершенства формы резонатора, неидеальная упругость стенок, наличие отверстий для ввода акустических головок. Резонатор может быть использован для определения термодинамической температуры с относительной погрешностью 10^{-5}, а также для измерения универсальной газовой постоянной.

51. **Определение скорости звука и наблюдение резонансного поглощения с помощью дешевого резонатора Гельмгольца.** Velocity of sound and resonance absjrption determination from a low-cost Helmholtz experiment. Tang S.H., Tan H.S., Tan K.L., Hsu T.S. ″Eur. J. Phys.″, **1985**, 6, № 3, 134-138. [РЖ 19862А-108].

Приведено описание экспериментальной установки, резонатора Гельмгольца, которая позволяет наблюдать форму линии поглощения и измерять скорость звука с точностью до 1 %. Такая установка полезна для учебной лаборатории при демонстрации акустических явлений. Приведены характерные размеры и параметры установки.

52. **Высшие гармоники в трубе Кундта.** Wyzsze harmoniczne w rurze Kundta. Lalek Hieronim. ″Fiz. szk.″, **1987**, 33, № 3, 179-180. [РЖ 1987-12А117].

Описывается лабораторная работа по определению скорости звука методом получения стоячих волн в трубе Кундта, которая представляет собой широкую стеклянную трубу, укрепленную горизонтально и закрытую с одного конца. У открытого конца трубы расположен поршень с длинным штоком, укрепленный на общей с трубой подставке. При натирании штока в направлении от середины куском бумаги в трубе возбуждается стоячая звуковая волна. При этом находящаяся в трубе пробковая пыль образует характерные фигуры, воспроизводящие пучности и узлы стоячей волны. Непосредственное измерение их положения позволяет рассчитать скорость звука и длину волны. Даны методические указания по постановке и проведению работы.

53. **Лабораторная установка для изучения отражения звука.** A sound reflection laboratory model. Young Charles T. ″Amer. J. Phys.″, **1987**, 55, № 11, 983-993. [РЖ 1988-7А71].

В нешироком канале длиной 1,7 м размещались излучатель звуковых импульсов, отражатель (на противоположной стороне канала) и несколько микрофонов. Прямой и отраженный импульсы принимались микрофонами и регистрировались на экране осциллографа. Установка используется при решении студентами экспериментальных задач по измерению скорости звука в воздухе.

54. **Снятие спектральной характеристики уха на пороге слышимости.** Лаб. работа 3. С. 44-52. Физический практикум для медиков. Часть I. Т.К. Мюйрисепп, Х.В. Тераль. Тарту. **1988**. 92 с.

55. **Определение порогов слышимости при помощи аудиометра АП-02.**Лаб. работа 4. С. 53-58. Физический практикум для медиков. Часть I. Т.К. Мюйрисепп, Х.В. Тераль. Тарту. **1988.** 92 стр.

56. **Измерение частоты колебаний камертона.** Pomiar czestosci drgan kamertonu Wieczorek Tadeusz**.** Fiz. Szk. **1989**. 35, № 4. С. 245. [РЖ 1990 4А155].

Предлагаемый метод определения частоты собственных колебаний камертона (или сходной механической сосредоточенной системы) основан на наблюдении явления резонанса в воздушном столбе. В эксперименте используется широкая труба из стекла или пластмассы, закрепляемая в штативе в вертикальном положении. Нижний конец трубы погружается в сосуд с водой, уровень которой образует нижнюю границу воздушного столба. Регулируя глубину погружения трубы, можно менять высоту воздушного столба. К верхней части трубы подносят звучащий камертон. В случае резонанса наблюдается усиление громкости звучания камертона. По измеренному значению длины воздушного столба определяется частота основной моды резонатора.

57. **Прямой метод измерения скорости звука.** Direct method for measuring the speed of sound. Karshner G.B. Amer. J. Phys. **1989**. 57, № 10. С. 920-922. [РЖ 1990-11А158].

Описана экспериментальная схема измерения скорости звука, пригодная как для лабораторных работ, так и для лекционных экспериментов. Наглядная времяпролетная методика, относительная простота электрической схемы на базе стандартных интегральных микросхем и осциллоскопическое представление результатов позволяет с высокой эффективностью проводить экспериментальное изучение распространения звукового сигнала в воздухе и различных газах. Точность метода ограничена параметрами используемого осциллографа.

58. **Простой опыт по обнаружению акустической волны при воспроизведении фотоакустического эффекта (лабораторный эксперимент для курса общей физики).** A simple demonstration of detecting an acoustic wave in a simulation of the photoacoustic effect: an experiment for the undergraduate laboratory, Mahmood W., Yunus Mat. Phys. Educ. **1990**. 25, № 1. С. 66-67. [РЖ 1990 11А159].

Под фотоакустическим эффектом подразумевается формирование акустических волн при помощи модулированного оптического излучения. Эффект имеет место, когда газ в закрытой ячейке облучается периодически прерываемым светом. В этом случае энергия, поглощаемая газом, превращается в кинетическую энергию его молекул, в результате чего возникают периодические флуктуации давления, приводящие к возникновению акустических волн. Эти акустические волны могут быть обнаружены при помощи микрофона, включенного в соответствующую радиотехническую схему, содержащую усилители и динамик или другое регистрирующее устройство. Предлагается схема установки для демонстрации эффекта.

59. **Измерение скорости звука импульсным методом: Учебное руководство.** Майер В.В., Майер Р.В. Глазов: **1991**. 53 с. [РЖ 92-7А75].

Изложена физическая сущность импульсного метода измерения скорости звука посредством одного и двух микрофонов. Подробно описаны генератор и счетчик импульсов, возбудитель звукового сигнала, ключевые устройства, полуавтоматический измеритель скорости звука. Даны принципиальные схемы приборов и чертежи печатных плат. Предложены лабораторные работы по измерению скорости звука в твердых телах и газах, изучению зависимости ее от температуры, по экспериментальной проверке справедливости принципа Ферми.

60. **Демонстрация принципа Ферма в акустическом диапазоне.** Майер В.В., Майер Р.В. Преподавание в высш. шк. **1996**. № 7. 50-58. [РЖ 1997.11А132].

Предложены экспериментальные установки и описаны учебные опыты, подтверждающие принцип Ферма для звуковых волн в воздухе.

61. **Экспериментальное изучение дисперсии звука.** Майер В.В., Майер Р.В. Преподавание в высш. шк. **1996**. № 7. 69-78. [РЖ 1997.11А133].

Предложена лабораторная работа физического практикума по экспериментальному изучению дисперсии звука. Диспергирующей средой является слой воздуха перед отверстиями установленных в плоскости акустических резонаторов. Учащиеся получают возможность на стандартном оборудовании исследовать дисперсию волн в искусственной среде.

62. **Модуляция амплитуды и модуляция частоты. Преимущества звуковой области.** Beaufils D. Bull. Union phys. **1997**. 91. № 793. 741-749. Фр. [РЖ 1997. 12А163].

Для ознакомления учащихся с основными понятиями физики волн в новые программы включена музыкальная акустика со спектральным анализом звука. Видимая и слышимая модуляция амплитуды и частоты используется для передачи и визуализации информации. Описана предлагаемая аппаратура.

63. **По поводу скорости распространения звука.** Pivot J.-C. Bull. Union phys. **2000**. 94. № 820. 61-65. Фр.

Описаны механические установки для измерения скорости звука v в газе от его природы и от температуры. Приведены результаты измерений. Скорость звука возрастает с возрастанием упругости пружины. В нейлоне $v = 1430$ м·с$^{-1}$.

64. **Демонстрация распространения звукового импульса с помощью ПК.** Майер Р.В., Веретенников Р.М. Науч.обозрение. **2006**. № 2. 111-112. [РЖ 18. Физика Ч. I. 2007. № 1. 18А.126].

Приведено описание установки и порядка проведения экспериментов. С помощью такой установки можно пронаблюдать интерференцию падающего и отраженного импульсов, продемонстрировать принцип эхолокации, а также измерить скорость распространения звука.

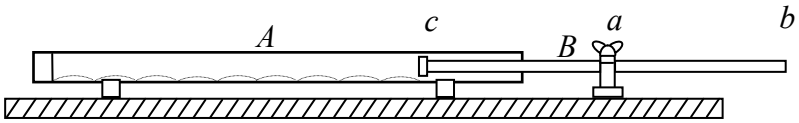
65. **Экспериментальное исследование упругой волны в воздухе.** Майер В.В., Вараксина Е.И. Учеб. Физ. **2007**. № 1. 52-62. [РЖ Физика.08.06-18А.138].

Рассмотрен учебный эксперимент, позволяющий доказать, что звук является волной, и упругая звуковая волна в воздухе может быть описана уравнением гармонической волны. В эксперименте используется метод осциллографирования звуковой волны, индикаторы интенсивности звука и фазы звуковой волны. Предлагаемые опыты позволяют сформировать у учащихся основные понятия, характеризующие упругую волну.

8.2. Упругие волны в твердом теле

1. **Определение скорости звука в твердых телах методом Кундта.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 15d. С.221-222.

Прибор Кундта для определения скорости звука в твердых телах состоит из широкой стеклянной трубы *A* длиной около одного метра, один конец которой закрыт пробкой. Труба свободно лежит на подставках в горизонтальном положении.



Стержень *B* длиной *L*, сделанный из исследуемого материала, входит своим концом, имеющим небольшую шайбу, внутрь трубы, как показано на рисунке, и прочно закрепляется при помощи зажима *a* в своей средней точке, так что *ca=ab*. В этом случае стержень при звучании издает свой основной тон, при котором в стержне образуется одна стоячая волна с узлом в точке закреплении и пучностями на концах. Одновременно в трубе *A* образуются стоячие волны в воздухе, длина которых зависит от частоты тона, издаваемого стержнем, и может быть измерена из наблюдений фигур Кундта. Величина скорости звука в исследуемом стержне вычисляется по формуле:

$$v_x = v_0 \frac{L}{\lambda}\sqrt{1+\alpha \cdot t}\,,$$

где v_0 – скорость звука в воздухе при 0° *C*, λ – длина стоячей волны в трубке Кундта, α – температурный коэффициент расширения воздуха, *t* – температура воздуха при проведении измерений.

2. **Определение скорости звука в твердых телах методом Кундта.** Физический практикум. Часть 1. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск. **1959**. Работа 19. С. 73-75.

3. **Простой ультразвуковой интерферометр для студентов.** Molyneux L. Simple ultrasonic **interferometer** for student use. “J. Scient. Instrum.” **1961**, **38**, № 1, 31-32. [РЖ 1961-8А67].

Описана наладка ультразвукового интерферометра для определения скорости ультразвука. Предлагается использовать имеющиеся в продаже в смонтированном виде кварцы в виде брусков с площадью торца 1 мм^2, продольно колеблющиеся на частоте 465 кГц. Отражатель ультразвука перемещают с помощью обычного микрометра. Возбуждающая кварц электрическая схема работает на транзисторе и питается от батарейки на 9 В. За величиной акустического затухания кварца, зависящей от расстояния до отражателя, следят по амплитуде наблюдаемых на осциллографе колебаний напряжения на коллекторе транзистора. Скорость ультразвука определяют по двум отсчетам на микрометре, соответствующим положениям отражателя, дающим два последовательных минимума этой амплитуды.

4. **Продольные колебания железного стержня в области звуковых частот.** Krumm Erich. Langsschwingungen von Eisenstaben im Horbereich. “Prax. Naturwiss.”, **1961**, F10, № 1, Physik, 1-10, [РЖ 1961-10А47].

Описывается ряд демонстрационных опытов, основанных на явлении магнитострикции. Опыты проводятся при помощи железного стержня с мембраной,

катушки самоиндукции, надетой на стержень микрофона, усилителя и генератора звуковой частоты. При пропускании переменного тока через катушку, вследствие изменения размеров стержня при намагничивании, в нем возникают продольные колебания, которые регистрируются микрофоном, установленным перед мембраной. При помощи описанной установки можно показать возникновение собственных или вынужденных продольных колебаний в стержне, явление акустической обратной связи, отражение волн, интерференцию волн, стоячие волны, измерить длину волны, определить скорость распространения звука в газах, изучить звуковое поле двух одинаковых источников колебаний и др.

5. **Определение скорости звука в твердых телах методом Кундта.** Физический практикум. Под ред. В.И. Ивероновой. М., **1962**. Задача 23. С. 136-138. **1967**. Задача 31. С. 176-178.

6. **Определение скорости звука и модуля Юнга в твердых телах.** Физический практикум Под ред. В.И.Ивероновой. М., **1962**. Задача 24. С. 138-141. **1967**. Задача 33. С. 178-181.

7. **Поперечные колебания в пластинках с двумя свободными концами.** Krumm Erich. Querschwingungen von Staben min zwei freien Enden. ″Prax. Naturwiss.″, **1968**, F17, № 10, Physik, 259-261. [РЖ 1969-4А23].

Описывается ряд опытов, демонстрирующих зависимость частоты колебаний в пластинке от ее размеров. Пластинку из металла кладут на два деревянных бруска и постукивают молотком по середине, при этом возникает звук, высота которого может быть определена при помощи камертона. Из результатов опыта следует. Что частота колебаний не зависит от ширины пластинки, произведение квадрата длины на частоту есть величина постоянная, частота прямо пропорциональна толщине. Приведена таблица с результатами измерений.

8. **Определение скорости звука в стержнях.** Ames Oakes. A direct measurement of the speed of sound in rods. ″Amer. J Phys.″, **1970**, 38, № 8, 1151-1152. [РЖ-71 1А62].

Описан метод определения скорости звука в стержнях, основанный на измерении времени прохождения звукового импульса от одного конца стержня к другому. Применение кристаллических преобразователей позволяет применить осциллографический метод измерения. Приводятся схема эксперимента и осциллограмма, полученная в процессе эксперимента.

9. **Измерение скорости звука в металлических стержнях.** Harles R. Measurement of the speed of sound in metal rods. ″Amer. J Phys.″, **1970**, 38, № 9, 1152-1153. [РЖ-71 1А63].

Рассматривается метод определения скорости звука, который, в отличие от метода Кундта, не предполагает знания скорости звука в воздухе. Идея метода состоит в том, что закрепленный в середине металлический стержень играет роль селективного фильтра в цепи обратной связи звукового усилителя. Из-за обратной связи на основной частоте колебаний металлического стержня возникают колебания, частота которых определяется с помощью осциллографа и опорного генератора звуковых частот по наблюдению фигур Лиссажу. Зная раз-

меры стержня и определив частоту колебаний, автор вычисляет скорость звука в стержне. Приводится схема эксперимента.

10. **Наблюдение продольных колебаний в металлических стержнях.** Naba Nobio. Observation of longitudinal vibration of metal rods. ″Amer. J Phys.″, **1972**, 40, № 9, 1339-1340. [РЖ-73 2А58].

Описан лабораторный эксперимент, в котором исследуется зависимость частоты *f* продольного колебания в металлическом стержне от его длины *l*, вычисляется скорость звука в различных металлах. С помощью громкоговорителя, соединенного через усилитель со звуковым генератором, в стержне возбуждается звуковая волна. Стержень через кристаллический датчик соединен с чувствительным вольтметром переменного тока. Приведены результаты эксперимента для медных, стальных и латунных стержней, которые показывают, что частота продольного колебания в стержне обратно пропорциональна его длине.

11. **О введении в лабораторный практикум по физике работы ”Измерение скорости ультразвука в ферромагнитных стержнях”.** Волков А.С., Чиненкова С.В. Сб. научно-методич. статей по физике. М. В. школа. Вып.2. **1972** г. С. 64-70.

12. **Экспериментальная акустика. Ч.I. Измерение скорости звука и оценка модуля упругости.** King I.J., Stefens R.W. Experimental acoustics. Part I. Measurement of velocity of sound in terms of elastic modulus. ″Phys. Educ.″, **1975**, 10, № 6, 420-423. [РЖ 1976-2А115].

В выражение для скорости звука входит модуль упругости. Для продольных волн – это объемный модуль, для поперечных – модуль сдвига, а для стержня (с малым диаметром по сравнению с длиной распространяющейся волны) это модуль Юнга. Измеряя скорость звука в соответствующих условиях, можно оценить тот или иной модуль. В жидкостях и газах по скорости продольных волн можно найти отношение удельных теплоемкостей. Рассмотрено несколько известных способов измерения скорости звука в газах и твердых телах. Подробно описан способ, предложенный авторами, в котором металлический стержень (диаметром 0,5–1,0 см) с плоскопараллельными гладкими торцами падает на жесткую и гладкую поверхность стального блока, при этом замыкается электрическая цепь и разряжается через известное сопротивление (*R*) образцовый конденсатор (*C*). Пришедшая от противоположного торца отраженная волна заставит стержень подпрыгнуть: в этот момент разряд конденсатора прекращается. Для определения времени распространения звука в блоке (*t*) проводят несколько опытов с разными *R* (или *C*) и строят график зависимости логарифма остаточного заряда *Q*, на конденсаторе ($Q=Q_0\exp(-t/RC)$, Q_0 – начальный заряд) от $1/RC$. *Q* определяется с помощью баллистического гальванометра. По углу наклона находят *t*. Зная плотность материала, находят модуль Юнга. Метод легко приспособить и для исследования изоляционных материалов. Описан метод обнаружения периодических вариаций температуры в стоячей волне с помощью термисторного зонда и метод обнаружения акустического резонанса в стержне.

13. **Изучение резонансных явлений (в металлическом ферромагнитном стержне).** Физический практикум для нефизических специальностей. Часть I. (Учебное пособие). Одесса. **1977**. Задача 8. С. 40-43.

14. **Устройство и конструкция простого лабораторного прибора для определения модуля Юнга.** Page K., Kallend J. S. The design and construction of a simple laboratory instrument to determine Young′s modulus. ″J. Phys. Sci. Instrum.″, **1977**, E10, № 10, 981-984. [РЖ 1978-5А70].

Действие прибора основано на зависимости резонансной частоты поперечных колебаний стержня от модуля упругости. Указанная частота определяется следующим соотношением: $f = At\left(E/\rho\right)^{1/2}/4\pi l^2\sqrt{3}$, где t – толщина и l – длина образца в метрах, ρ – плотность в *кг/м*^{3}, E – модуль Юнга в Н/м^2, A = 22,37; 61,67; 120,8; 200,0 для различных мод колебаний. Для основной частоты E=0,95ρ(l^2f/t)^2. Образец подвешивается на двух легких нитях вблизи узлов поперечных колебаний. Колебания стержня возбуждаются через одну нить с помощью обычного динамического громкоговорителя, а детектируются через другую нить с помощью пьезокерамического преобразователя. Приведены электрические и монтажные схемы перестраиваемого генератора и детектора сигналов с частотой от 500 Гц до 5 кГц. Приведены результаты измерений для образцов из металлов, дерева и пластмасс.

15. **Изучение резонансных явлений.** Физический практикум для нефизических специальностей. Часть I. (Учебное пособие). Полищук Д.И. и др. Одесса. **1977**. Задача 8. С. 40-43.

Изучаются колебания в металлическом ферромагнитном стержне.

16. **Ультразвуковые волны в стеклянном цилиндре.** Hilfe von Ultraschall. Seus Erwin. ″Prax. Naturwiss. Phys.″, **1981**, 30, № 5, 136-140. [РЖ 1981-12А210].

В твердом теле наряду с продольными волнами, обусловленными изменениями объема, могут распространяться также поперечные волны, связанные с изменением формы. Скорости их распространения определяются плотностью вещества, а также константами упругости тела. Описан эксперимент, в котором ультразвуковые волны возбуждались в стеклянном цилиндре. Длина волны выбирается много меньшей размеров цилиндра. При освещении цилиндра параллельным лазерным пучком на экране возникала дифракционная картина, вызванная рассеянием света на ультразвуковых волнах. На картине просматривались два четких интерференционных максимума в виде концентрических колец, один из которых обусловлен продольными колебаниями цилиндра, а другой – поперечными. Определяя радиусы колец, можно найти значения констант упругости тела.

17. **Об определении констант упругости стеклянного цилиндра с помощью ультразвука.** Uber die Bestimmung der elastischen Konstanten eines Glaszylinders mit Hilfe von Ultraschall. Seus Erwin. ″Prax. Naturwiss. Phys.″, **1981**, 30, № 5, 136-140. [РЖ 1981-12А210].

В твердом теле наряду с продольными волнами, обусловленными изменениями объема, могут распространяться также поперечные волны, связанные с изменением формы. Скорости их распространения определяются плотностью

вещества, а также константами упругости тела. Описан эксперимент, в котором ультразвуковые волны возбуждались в стеклянном цилиндре. Длина волны выбирается много меньшей размеров цилиндра. При освещении цилиндра параллельным лазерным пучком на экране возникала дифракционная картина, вызванная рассеянием света на ультразвуковых волнах. На картине просматривались два четких интерференционных максимума в виде концентрических колец, один из которых обусловлен продольными колебаниями цилиндра, а другой – поперечными. Определяя радиусы колец, можно найти значения констант упругости тела.

18. **Резонансные колебания стержня.** Rezonanz-Biegungsschwingungen eines Stabes. Hilscher H. ″Prax. Naturwiss. Phys.″, **1987**, 36, № 1, 26-28. [РЖ 1987-8А127].

Описывается опыт по наблюдению резонанса колеблющегося керамического стержня, являющегося пьезоэлементом. Экспериментальная установка состоит из звукового генератора, усилителя, громкоговорителя, пьезоэлемента, усилителя и осциллографа.

19. **Эксперименты по изучению распространения волн в кристаллической среде.** Proposition d′experiences pour l′etude de la propagation d′ondes dans un milieu cristallin. Brosseau Christian . Bull. Union phys. **1988**. 82, № 705. С. 741-748. [РЖ 1988-1А119].

Для наглядного представления о колебательноволновых движениях в дискретной среде предложены 2 простых устройства: система шариков на пружинках (одно-, двух- или трехмерная) так называемая ″лестница для попугая″ (ряд прутиков, закрепленных на веревке через равные промежутки и могущих совершать ограниченные вращательные движения). Изложены математические модели, описывающие динамику указанных систем. С помощью последних можно проиллюстрировать такие понятия, как колебательные моды, фазовая скорость, дисперсия и др.

20. **Метод и установка для изучения стоячих продольных волн в твердом теле.** Metoda si dispozitiv pentru studiul udelor stationare longitudinale in solide: Патю 98087 СРР, МКИ G 09 B 23/06 // G 09 B 23/14 /Cosma Ioan; Institutul Politehnic, Cluj-Napoca. № 127980; Заявл. 27.04.87; Опубл. **04.04.90**.

Установка для получения стоячих продольных волн (СПВ), зарегистрированная в качестве изобретения, включает в себя: генератор звуковой частоты; диффузор, к мембране которого с помощью стержня прикрепляется нижний конец располагаемой вертикально цилиндрической пружины; штатив, к которому прикрепляется верхний конец пружины. Установка позволяет наблюдать СПВ как для основной частоты, так и для первых десяти гармоник.

21. **Эксперименты по вибрации консоли и их применение к определению модуля Юнга для студентов старших курсов.** An undergraduate experiment on the vibration of a cantilever and its applicaton to the determination of Young′s modulus. Turvey Keith. Amer. J. Phys. **1990**. 58, № 5. С. 483-487. [РЖ 91-2А149].

Описан эксперимент по проверке теории частот боковых вибраций однородной консоли. Получено хорошее согласие эксперимента с теорией. Определен модуль Юнга материала консоли (сталь) по наблюдаемым частотам основной

моды для серии образцов различной длины. Имеется удовлетворительное совпадение между динамическим и статическим методами.

22. **Лабораторные наблюдения упругих волн в твердых телах.** Laboratory observation of elastic waves in solids. Rossing T.D., Russel D.A. Amer. J. Phys. **1990**. 58, № 12. С. 1153-1162. [РЖ 1991 10А156].

Цель статьи обратить внимание на интересные свойства механических волн в упругих твердых телах. Описаны три лабораторных эксперимента по распространению волн в брусках и пластинах, для проведения которых не требуется сложное оборудование. Могут быть изучены волны, возникающие при различных видах деформации (сжатие, кручение и изгиб). Хотя в первых двух случаях закон дисперсии выражен довольно слабо, зато в случае волн изгиба скорость распространения волны пропорциональна $f^{1/2}$. Отражения на границах приводят к возникновению стоячих волн, определяющих форму колебательных мод и нормальные частоты. Из возможных граничных условий могут быть реализованы свободные и закрепленные границы, а также промежуточные случаи. Подробно описаны эксперименты на прямоугольном бруске, круглой и квадратной пластинах.

23. **Определение скорости звука и модуля Юнга в твердых телах.** Общий физический практикум. Механика.” Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Изд. Моск. ун-та. **1991.** Лаб. работа 27. С. 264-266.

Цель работы – определение скорости звука и модуля Юнга путем измерения резонансных частот продольных звуковых колебаний в стержнях, изготовленных из слабопоглощающих звук материалов (металлов).

При распространении звука в изотропных твердых телах наблюдаются как продольные, так и поперечные волны, причем скорость их распространения различна и зависит от упругих свойств тел, через которые проходит волна. В случае продольных волн в стержне, длина которого велика по сравнению с линейными размерами его сечения, скорость звука u связана с модулем Юнга E материала, из которого сделан стержень, и его плотностью ρ следующим соотношением:

$$u = \sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

В лабораторной работе изучается распространение продольных звуковых волн в металлических стержнях. Для возбуждения продольных колебаний в стержне достаточно каким-либо образом вызвать в одном из его концов попеременное сжатие и растяжение в направлении длины. Благодаря очень малому затуханию упругой волны в стержне и ее почти полному отражению на границе раздела стержень-воздух при определенных частотах колебаний устанавливаются стоячие волны. исследуемый стержень закрепляется в середине, при возбуждении в нем стоячей волны ее узел приходится на место зажима, а пучность – на концах стержня. Условие образования стоячей волны для такого стержня будет

$$L = (2n+1)\lambda/2,$$

или

$$\nu = \frac{2n+1}{2L}u,$$

где ν_n – резонансные частоты, n – 1, 2, 3, ..., u – фазовая скорость.

Определив экспериментально резонансные частоты ν_n, определяют фазовую скорость u и затем, зная плотность материала стержня ρ, модуль Юнга.

24. **Определение модулей сдвига с помощью резонатора.** Lucklum R., Behling C., Cernosek R., Martin S. J. Phys. D. **1997**. 30. № 3. 346-356. [РЖ 1998. 03-18А.116].

Электрический отклик датчиков акустических волн, покрытых полимером, зависит от изменения нагружения поверхностной массы и изменения упругих свойств материала покрытия. Авторы рассматривают акустическое поведение и электрический отклик толщинно-ободранного модового резонатора на изменения в обдирочных параметрах материала покрытия на их фундаментальной частоте так же хорошо как на их третьей и пятой гармониках. Изменения свойств материала были индуцированы изменением температуры. Были исследованы гладкие и резиновые полимеры. Из измерений импеданса были рассчитаны комплексный параметр обдирания [shear] и температура стеклянногоо динамического перехода.

25. **О применении метода волнового поля при изучении и проведении лабораторных работ студентами по теме ”Ударные волны” в курсе общей физики.** Саченко А.И., Игропуло В.С. Проблемы физико-математических наук : Материалы 44-й Научно-методической конференции преподавателей и студентов ”Университетская наука – региону”, Ставрополь, **1999**. Ставрополь, 1999. 120-121. [РЖ 02.09-18А.129].

Разработана методика учебного физического эксперимента, показывающего реальность волновых процессов, возникающих при соударении ДТТ типа стержней и позволяющего, с определенной точностью, измерять длину уединенной волны при соударении.

26. **Звуковая карта компьютера для исследования продольных волн в курсе общей физики.** Моисеев А.И., Муркин Л.П. Физическое образование в ВУЗах. **2002**. Т. 8, № 2, с. 112-125.

27. **Звуковая карта компьютера для исследования изгибных и продольных колебаний в лаборатории общей физики.** Моисеев А.И., Муркин Л.П. СФП-**2002**, С.-П. Тез. докл. М.-2002. с. 151-152.

28. **Лабораторные эксперименты по интерференции изгибных волн.** Вараксина Е.И., Медведцев И.С. Проблемы учебного физического эксперимента : Материалы 10 Всероссийской научно-практической конференции “Учебный физический эксперимент: Актуальные проблемы. Современные решения”, Москва, **2005**: Сборник научных трудов. Вып. 21. М., 2005. 60-63. [РЖ 18. Физика Ч. I. 2007. № 2. 18А.133].

При наложении двух изгибных вол, падающей и отраженной краем тонкой упругой пластинки, возникает интерференционное распределение интенсивно-

сти, которое легко визуализируется порошком. Это явление можно использовать для экспериментального изучения интерференции волн от двух источников. Многовариантность учебных экспериментов достигается применением пластинок с прямыми, круглыми и вогнутыми краями разной кривизны. Для опытов необходим ультразвуковой генератор низкой частоты и магнитострикционный излучатель на частоту 16–19 кГц.

29. **Измерение скорости продольных волн в твердом теле: два метода и половина.** Measuring longitudinal wave speed in solids: Two methods and a half. Fazio C., Guastella I., Sperandeo-Mineo R. M., Tarantino G. Eur. J. Phys. **2006**. 27. № 4. 687–701. [РЖФиз. 2007. № 12. 18А.139].

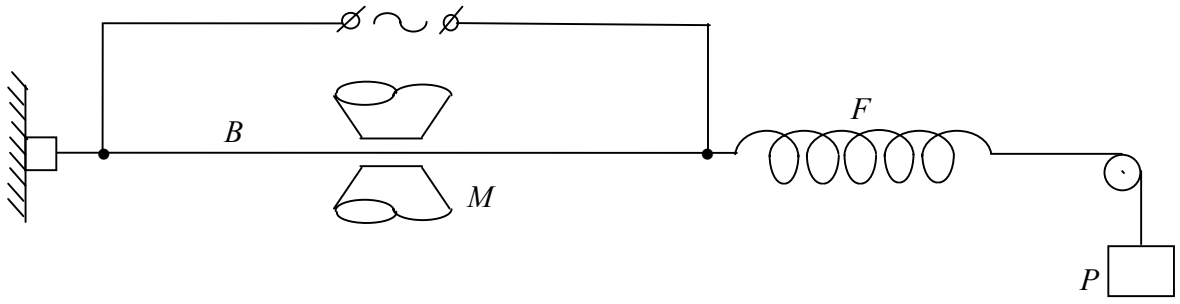
30. **Изгибные волны в лабораторных работах по дидактике физики.** Майер В.В., Вараксина Е.И. Физ. образ. в вузах. **2008**. 14, № 4. 68-76. [РЖФиз. 09.12-18А.109].

В качестве примера механических волн школьный учебник традиционно рассматривает волны на поверхности воды. Демонстрационный эксперимент с этими волнами детально разработан. Однако из-за отсутствия соответствующего оборудования он становится в школе редким. Для экспериментального изучения механических волн вместо волн на поверхности воды предлагается использовать изгибные волны в тонки упругих пластинках.

8.3. Упругие волны в проволоке (нити)

1. **Исследование колебаний струны методом резонанса.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. **1946**. Работа 17b. С. 225-227.

Непосредственное исследование собственных свободных колебаний струны представляет значительные трудности. Их, однако, можно устранить, если воспользоваться явлением резонанса, заставляя струну совершать вынужденные колебания. При наступлении резонанса амплитуда вынужденных колебаний резко возрастает, а их частота становится равной одной из собственных свободных колебаний струны. Таким образом, при резонансе вынужденные колебания струны по частоте и распределению амплитуд не отличаются от ее собственных колебаний, чем и можно воспользоваться для исследования последних. Прибор, который служит для этого, состоит из горизонтальной струны *B*, которая натягивается действием спиральной пружины *F*. Растяжение пружины можно изменять, отсчитывая его величину по расположенной рядом с ней шкале. В соответствии с этим изменяется сила натяжения струны, величина которой определяется при помощи набора грузов *P* определенного веса, которые служат для калибровки пружины *F*. Струна проходит между полюсами электромагнита *M*, питаемого постоянным током. Для измерения ам-



плитуды колебаний струны используется зеркальная шкала; при отсчете амплитуд колебаний приходится пользоваться лупой.

По струне пропускается переменный ток. В результате под действием постоянного поля электромагнита струна начинает совершать вынужденные колебания с частотой, равной частоте переменного тока, т. е. 50 герц. Таким образом, частота внешней силы, очевидно, все время при наблюдениях остается постоянной. Струну настраивают в резонанс, изменяя ее натяжение пружиной F. При ослаблении натяжения частота основного тона ν уменьшается (n=1):

$$\nu = \frac{n}{2L}\sqrt{\frac{P}{l}},$$

где L – длина струны, P – натяжение струны, l – линейная плотность струны. Таким образом, постоянная частота 50 герц переменного тока, протекающего по струне, по мере уменьшения натяжения струны оказывается резонансной для ее обертонов все более высокого порядка. Таким приемом можно дойти до третьего или четвертого обертона.

Дальнейшее ослабление натяжения пружины невозможно, так как струна начинает провисать, кроме того, начинает сказываться сопротивление струны на изгиб. Поэтому для более высоких обертонов применяются струны, обвитые тонкой проволокой. При этих условиях линейная плотность струны значительно возрастает, и ее частота при том же натяжении оказывается меньше. Такие струны, однако, имеют один недостаток, а именно, для получения их основного тона требуется сильное натяжение (порядка10 кг).

Для того, чтобы можно было непосредственно наблюдать форму колебаний струны, применяется неоновый стробоскоп. Он состоит из неоновой лампы, которая включается в цепь переменного тока. Вследствие униполярной проводимости такой лампы она действует как выпрямитель и дает в течение одной секунды не 100, а только 50 вспышек. Таким образом, при каждой вспышке струна оказывается освещенной в одной и той же фазе и кажется поэтому неподвижной. Это, однако, имеет место только при условии строгого резонанса. Последнее объясняется тем, что вспышка неоновой лампы происходит в момент максимума внешней силы. В этот момент скорость струны, при строгом резонансе, совпадает по фазе с внешней силой, и струна представляется неподвижной. Если же разность фаз между внешней силой и скоростью струны изменяется, то изменяется и положение струны, освещаемой неоновой лампой. Это нетрудно наблюдать, если постепенно изменять натяжение струны вблизи резонанса.

Этот прибор дает возможность наблюдать также собственные свободные колебания струны. Для этого следует, вызвав на резонансной частоте. Вынужденные колебания струны, выключить затем электромагнит. Струна продолжает совершать одно из собственных колебаний, которое, однако, быстро затухает.

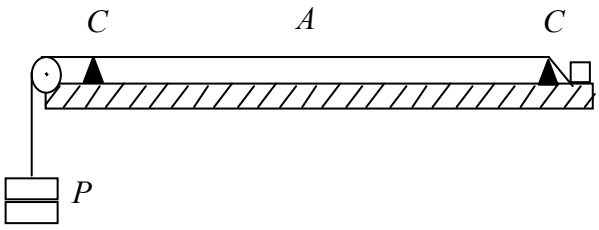
Содержание работы является определение частот собственных колебаний струны и исследование распределения амплитуд для каждого собственного колебания струны.

2. **Определение частоты колебаний при помощи монохорда.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 13b. С. 210-212.

Физический эффект: колебания струны при разном ее натяжении.

При определении высоты тона очень часто применяются эталоны с определенной шкалой частот. Настраивая их на частоту, одинаковую с исследуемым тоном, определяют отсюда его частоту. Настройка на равенство частот, что соответствует музыкальному термину унисон, может быть выполнена непосредственно на слух, так как музыкально развитое ухо способно очень точно улавливать звучание в унисон.

Принято считать, что в среднем интервале музыкальных частот порядка 300 Гц ошибка при настройке в унисон на слух не превышает приблизительно 0,2 % частоты. Простым и удобным эталоном переменной частоты является монохорд, который состоит из стальной струны *A*, натянутой горизонтально. Один конец струны закреплен неподвижно, а на другом конце, перекинутом через блок, находится груз *P*, который сообщает струне постоянное натяжение. Длина струны определяется расстоянием между ребрами двух трехгранных призм *CC*, одну из которых можно перемещать вдоль струны при помощи микрометрического винта. Наибольшая длина струны L_0 при крайнем положении призмы соответствует определенной частоте колебаний ν_0. Величины L_0 и ν_0 даются как некоторые постоянные прибора.



Измеряемая частота дается второй такой же струной, натянутой параллельно первой также при помощи груза. Длина второй струны остается постоянной, и частота ее колебаний изменяется при помощи дополнительных грузов, величина которых дается. Целью измерений является определение частот колебаний струны при различном ее натяжении. Величина натяжения определяется непосредственно весом груза на ее конце. Частота колебаний измеряется по частоте монохорда при помощи настройки обеих струн в унисон на слух.

Частота колебаний второй струны ν_2 при дополнительной нагрузке p может быть вычислена по формуле

$$\nu_2 = \nu_{20}\sqrt{\frac{P_0 + p}{P_0}},$$

где ν_{20} – частота колебаний второй струны при начальной нагрузке P_0.

3. **Исследование собственных колебаний струны методом резонанса.** Физический практикум. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. М., **1951.** Задача 15.С. 101-104. **1953, 1955**. Задача 15. С. 103-106. **1962**. Задача 22. С. 131-136. **1967**. Задача 31. С. 176-178.

Гибкая однородная нить (струна), натянутая между двумя точками и выведенная из положения равновесия, может совершать колебания различного вида. В струне могут установиться стоячие волны (на концах струны всегда будет узел смещения), при этом на длине струны l будет укладываться всегда целое число стоячих волн, а так как расстояние между соседними точками струны, колеблющимися с одинаковой амплитудой, равно половине длины бегущей волны, то можно написать

$$\frac{\lambda}{2}n = l, \qquad (1)$$

где n – целое число (1,2,3, и т. д.). так как длина волны связана со скоростью распространения импульса деформации вдоль струны c и частотой колебаний струны ν соотношением

$$\nu = \frac{n}{2l} c \,. \tag{2}$$

Струна, следовательно, может колебаться не с одной частотой, а с целым спектром частот, что соответствует тому факту, что струна может рассматриваться как система, состоящая из бесконечного числа материальных точек.

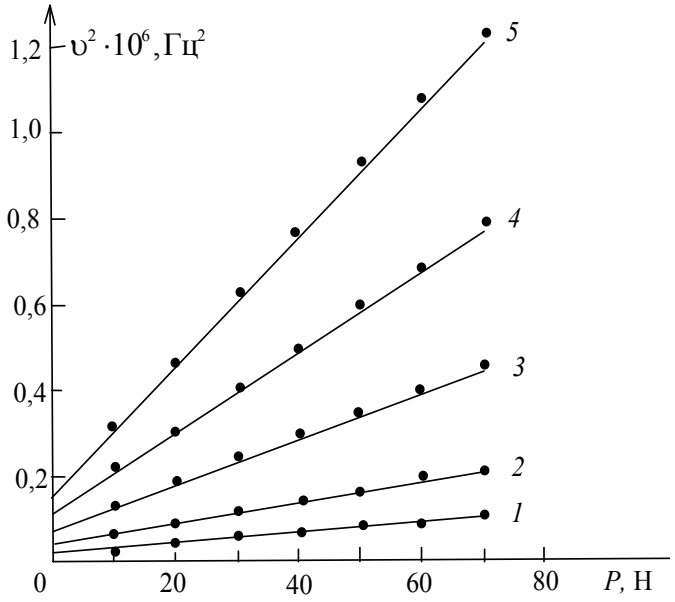
Скорость распространения импульса деформаций вдоль струны определяется величиной натяжения T струны и линейной плотностью ρ материала струны:

$$c = \sqrt{\frac{T}{\rho}} \,. \tag{3}$$

Частоты наиболее простых так называемых собственных или нормальных колебаний струны выражаются формулой

$$\nu = \frac{n}{2l}\sqrt{\frac{T}{\rho}} \,. \tag{4}$$

На рисунке представлена зависимость квадратов нормальных частот от силы натяжения струны (точки – эксперимент, сплошные линии теория).



4. **Определение частоты колебаний струны при помощи монохорда.** Физический практикум. Часть 1. Механика и молекулярная физика. Под ред. проф. М.А. Большаниной. Томск. **1959**. Работа 16. С. 65-68.

5. **Опыт Мельде [по изучению стоячих волн] в выпускных классах.** Gastaldello M. Exploitation de l′experience de Melde en classe terminale. ″Bull. Union phys.″, **1970**, 64, № 526, 935-938. [РЖ 1971-9А38].

Нейлоновая нить, расположенная горизонтально, одним концом прикреплена к якорю вибратора (частота 100 Гц), а другой конец нити с грузом 100-350 г переброшен через небольшой ролик. Нить проходит через щелевой экран, который может быть расположен в любой точке между вибратором и роликом. Перемещая экран, можно изменять параметры стоячей волны, которая остается при этом линейной. Характер возникающих колебаний (стоячая или бегущая волна), а также их параметры (амплитуда, скорость распространения), зависят от величины груза на свободном конце нити. Описана методика проведения опыта при визуальных наблюдениях и использовании стробоскопической съемки, получены формулы для расчета скорости распространения возникающих упругих волн.

6. **Fourier-Analyse mit dem Monochord (Фурье-анализ с помощью струны).** Geiger Roland.”Prax. Naturwiss. Phys.” **1976**, 25, № 12, 316-318 (нем.). [РЖ-77, 7А92].

7. **Изучение колебаний струны и градуировка шкалы частот звукового генератора.** Полищук Д.И. и др. Физический практикум для нефизических специальностей. Часть I. (Учебное пособие). Одесса. **1977**. Задача 11. С. 49-52.

8. **Измерение частоты колебаний натянутой проволоки с учетом ее жесткости.** Hornung H.G., Durie M.J. Stiffness corrections for the vibration frequency of a stretched wire. ″Amer. J. Phys.″, **1977**, 45, № 10, 991-993. [РЖ 1978-4А106].

Описана лабораторная работа для студентов первого курса, посвященная измерению частоты колебаний натянутой проволоки, возбуждаемых электромагнитом. Показано, что результаты измерений значительно отличаются от результатов, даваемых расчетной формулой для гибкой проволоки. Показано, что при введении в расчетах поправки на жесткость проволоки экспериментальные и расчетные данные совпадают. Предлагается новый метод расчета поправки на жесткость, который не требует дополнительных предположений о натяжениях на концах проволоки.

9. **Простой способ получения графиков зависимости смещения от времени для колеблющейся струны с помощью телевизора.** Easy displacement versus time graphs for a vibrating string. Tuning a guitar by television. Jones Gordon E., Ferguson Joe L. ″Amer. J. Phys.″, **1980**, 48, № 5, 362-364. [РЖ 1981-1А82].

Описан опыт, в котором демострируются колебания гитарной струны на фоне светящегося телевизионного экрана. При частотах, кратных 60 Гц (частоте сетевого напряжения в США), наблюдалась устойчивая картина стоячих волн.

10. **Лабораторный эксперимент по изучению собственных колебаний и дисперсионных соотношений.** Normal modes and dispersion relations in a beaded string. An experiment for an undergraduate laboratory. Shanker Gauri, Gupta V.K., Sharma N. K. ″Amer. J. Phys.″, **1985**, 53, № 5, 479-481. [РЖ 1986-2А110].

Колебания в виде стоячих волн наводятся в медной натянутой струне (с закрепленными на ней через определенные равные промежутки грузиками), моделирующей гранулярную структуру. Через нить пропускают синусоидалный ток с регулируемой от1 до 100 Гц частотой. Нить колеблется под воздействием внешнего магнитного поля. Один конец нити связан с вибрационным частотомером. Приво-

дятся теоретические соотношения, связывающие частоту возникающих в струне стоячих волн и волновое число с параметрами колебательной системы. Дано описание установки и методик эксперимента с различными параметрами системы, приведены типичные результаты. Проведен анализ отклонений экспериментальных результатов от теоретических из-за конечной массы струны. Простота установки и негромоздкие математические выкладки позволяют использовать этот эксперимент в качестве лабораторной работы для студентов старших курсов.

11. **Фурье-анализ формы колеблющейся струны с использованием оптического детектирования.** Fourier analysis for vibrating string′s profile using optical detection. Sandoval J.L., Porta A.V. ″Amer. J. Phys.″, **1985**, 53, № 12, 1195-1203. [РЖ 1986 7А-134].

Описан экспериментальный метод анализа колебаний струны, закрепленной на обоих концах, использующий симметрию между пространственной и временной зависимостью координат точек струны. Оптоэлектронный датчик определяет движение точек струны, непосредственно отображаемое на осциллографе. График этого движения в зависимости от времени связывается с пространственным поведением всей струны. Фурье-спектр этого графика используется для сравнения экспериментальных результатов с предсказаниями теории. Метод применим для анализа эффектов демпфирования. Эксперимент разработан как лабораторная работа для средних и старших курсов университетов и может быть использован как лекционная демонстрация для старшеклассников.

12. **Механические колебания и распространение сигналов в растянутых магнитоупругих датчиках.** Korperschalleinwirkung und Signalausbreitung bei eingespannten magnetoelastischen Sensoren. Muller W., Adolph N., Kohl D. Techn. Mess. **1990**. 57, № 5. С. 210-216. [РЖ 1989-11А160].

Описана экспериментальная установка для исследования упругих волн деформации в магнитных проволоках. Возбуждение механической волны производится с помощью электромагнитного привода. Разработана конструкция адаптера, фиксирующего передний торец проволоки и позволяющего измерять величину сжатия конца и приложенного к торцу усилия. Исследовано влияние адаптеров различных конфигураций на коэффициент затухания и отражения энергии упругих волн в никелевых проволоках в широком диапазоне частот возбуждаемых колебаний. Изучена интерференция сигнала, распространяющегося по проволоке, с паразитными механическими вибрациями адаптера. Разработана математическая модель распространения волн в рассматриваемой системе, создан соответствующий комплекс программ математического моделирования процесса. Продемонстрированы возможности магнитострикционных датчиков с подпаянными соединениями.

13. **Исследование поперечных колебаний струны.** Общий физический практикум. Механика. Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Изд. Моск. ун-та. **1991**. Лаб. работа 26.С. 261-264.

Исследуются колебания, которые возникают в гибкой однородной струне, натянутой между двумя неподвижными точками. Если в бесконечной натянутой струне, находящейся в состоянии равновесия, оттянуть маленький участок и затем отпустить его, то возникающее возмущение начнет передвигаться по струне

в двух противоположных направлениях, образуя две бегущие волны. Так как в этом случае смещение частиц струны происходит в направлении, перпендикулярном направлению движения волны (совпадающим с направлением струны), то такие волны называются поперечными. Движение таких бегущих волн описывается волновым уравнением

$$\frac{\partial^2 \Psi(z,t)}{\partial z^2} - \frac{\rho_0}{T_0}\frac{\partial^2 \Psi(z,t)}{\partial t^2} = 0,$$

где ψ – смещение частиц струны в точке с координатой z вдоль струны в момент времени t, ρ_0 – линейная плотность струны, T_0 – натяжение струны. При этом характеристики волны, такие как ее форма, частота ν, длина волны λ, фазовая скорость u, определяются начальными условиями и параметрами струны – ее плотностью ρ_0 и величиной натяжения T_0.

Если струна конечна, то бегущие волны будут отражаться от ее концов, причем фазы и амплитуды отраженных волн будут зависеть от положения и способа закрепления концов струны. Отраженные и бегущие волны будут интерферировать, образуя в общем случае сложную и нестационарную картину распределения смещений вдоль струны. В силу всегда имеющей место диссипации энергии указанная картина с течением времени будет затухать.

Чтобы наблюдать стационарную картину, в работе используются вынужденные колебания струны, когда возмущение в струне вызывается внешней периодической (в данном случае гармонической) силой. При определенных условиях в струне возникают стоячие волны – явление, которое называют резонансом струны.

Уравнение стоячей волны можно представить в виде:

$$\Psi(z,t) = -2A\sin k(L-z)\sin(\omega t + kL).$$

Равенство нулю амплитуды смещения стоячей волны $2A\sin k(L-z)$ соответствует узлам стоячей волны. Максимальное значение амплитуды соответствует пучностям. Условие образования стоячих волн в струне, закрепленной с двух сторон состоит в необходимости создания узлов стоячей волны на концах струны. При этом на длине струны должно укладываться целое число полуволн:

$$L = n\frac{\lambda}{2}.$$

Так как $\lambda = u/\nu$, то резонансными частотами являются

$$\nu_n = \frac{u}{2L}n, \qquad (1)$$

где n = 1, 2, 3, ...

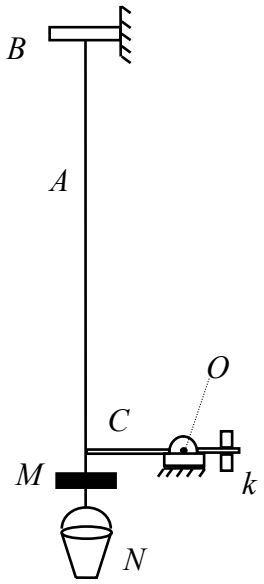
В отличие от стержней в струне фазовая скорость u зависит от натяжения струны T_0:

$$u = \sqrt{\frac{T_0}{\rho}},$$

где $\rho = M/L$ – линейная плотность, M – масса струны. Это обстоятельство позволяет проводить эксперимент по наблюдению стоячих волн в струне двумя

способами. Первый из них заключается в том, что при постоянном натяжении струны T_0 изменять частоту вынуждающей силы ν, наблюдая резонанс при условиях (1). Второй – при неизменной частоте вынуждающей силы ν изменять натяжение струны T_0; при этом резонанс будет наступать при условии (2):

$$T_0 = \frac{4L^2\nu^2\rho}{n^2}. \qquad (2)$$



Струна *A* (см. рис.) расположена вертикально в специальной установке. Внешнее периодическое воздействие на струну осуществляется в верхней ее точке, где конец струны прикреплен к железной пластине *B*, конец которой находится между полюсами электромагнита В, питаемого переменным током частотой 50 Гц. Сама пластинка является частью магнитной цепи другого электромагнита, питаемого постоянным током, изменение которого позволяет изменять амплитуду колебаний пластинки, а, следовательно, и струны.

Нижний конец струны прикреплен к концу рычага *C* с осью вращения в точке *O*. Ниже подвешена платформа *M* и ведерко *N*, на другом конце рычага *C* может перемещаться и закрепляться груз *k*. Вес платформы и ведерка может быть уравновешен этим грузом.

Натяжение струны определяется весом груза на платформе и весом песка в ведерке. Пользование песком позволяет незначительно изменять величину натяжения; вес песка определяется на весах.

Для наблюдения формы колебаний струны применяется стробоскопическое освещение. Для этого используется лампа дневного света, помещаемая за матовым стеклом, включенная в цепь переменного тока частотой 50 Гц. Струна, совершающая 50 полных колебаний в секунду и освещаемая лампой, дающей 100 вспышек в секунду, кажется неподвижной в своих двух крайних положениях.

Выполнение работы состоит в следующем. Уравновешивают рычаг *C*, включают цепи освещающей лампы и электромагнитов. На платформу постепенно накладывают гири, в ведерко насыпают песок, добиваясь того, чтобы струна давала устойчивую картину основного тона. Измеряют амплитуду колебаний в различных точках струны. По полученным данным строят график зависимости амплитуды колебаний от координаты точки струны.

Совершенно так же поступают для двух следующих обертонов струны. По формулам (5,6) при $n = 1$, зная ν (50 Гц), T_0 и L, определяют величину плотности струны ρ.

14. **Экспериментальное изучение динамики струны.** An experimental investigation into the dynamics ofa string. Molteno Timothy C., Tufullaro Nickolas B. Amer. J. Phys. **2004**. 72. № 9, 1157-1169. [РЖФиз. 06.10-18А.141].

15. **Колебания накаленной проволоки создают стоячие волны.** Hot-wire vibrations get waves standing. Gluck P. Phys. Educ. **2005**. 40 № 4. 315–316. [РЖ 18. Физика Ч. I. 2007. № 2. 18А.135].

В эксперименте используется нихромовая проволока (длина 1,1 м, диаметр 0,5 мм, сопротивление 6 Ом), один конец которой закреплен на лабораторном стенде, а другой на механическом вибраторе, соединенном с генератором сигналов. Ток проходит через вариак. На рисунках приведены фотографии двух- и трехпетлевых стоячих волн. Кратко обсуждаются условия эксперимента.

16. **Колебания струны с концентрированными массами.** Gomz B.J., Repetto C.R., Welti R. Eur. J. Phus. **2007**. 28, № 5. 961– 975. [РЖ Физика. 08.10-18А.111].

17. **Анализ нерезонансных стоячих волн и следов колебаний струн.** Fang T.-S. Eur. J. Phys. **2007**. 28, № 4. 665–672. [РЖ Физика.08.10-18А.112].

8.4. Упругие волны в жидкости

1. **О постановке лабораторной работы по определению скорости звука в жидкостях методом акустического интерферометрирования.** Соломкин В.И. ″Уч. Зап. Моск. обл. пед. ин-та″, **1964**, 147, 113-118. [РЖ 1966-1А56].

Рассматривается принцип измерения фазовой скорости при помощи акустического интерферометра; описывается устройство самодельного ультразвукового интерферометра, изготовленного на базе микрометра с пределами измерений 50–75 мм и ценой деления 0,01 мм. Микрометр укрепляется вертикально на стальном диске, служащем основанием прибора. Предметный столик насаживается на скобу. Рефлектор представляет собой латунный диск, припаянный к детали, надетой на стебель микрометра. В качестве измерительной кюветы используется укороченный химический стакан, который вместе с излучателем устанавливают на предметный столик. Для возбуждения пьезопластинки может быть использован ламповый генератор малой мощности. Приведена схема генератора, собранного автором, блок-схема установки и описана методика подготовки интерферометра к работе.

2. **Аномальная акустическая среда.** Shapiro William A. Anomalous acoustic medium. ″Amer. J Phys.″, **1965**, 33, № 12, 1083. [РЖ-66 7А33].

Рассмотрена легко создаваемая акустическая среда, в которой скорость звука значительно меньше, чем в воздухе, и которая позволяет просто продемонстрировать зависимость скорости звука от свойств среды. Скорость c продольных волн в среде с плотностью ρ определяется соотношением $c = (1/\rho k)^{1/2}$, где k – сжимаемость среды (обратная величина модуля Юнга для твердых тел и адиабатический массовый модуль для жидкостей). Среда, в которой скорость звука значительно меньше, чем в воздухе, должна обладать или большей плотностью и по крайней мере умеренной сжимаемостью, или большой сжимаемостью и по крайней мере умеренной плотностью. Из обычных материалов только резина обладает требуемыми свойствами, но акустический импеданс резины настолько больше, чем воздуха, что звук плохо передается и слышимость стоячих волн будет слабой. У резины есть и другие невыгодные свойства. Искомая среда должна не только обладать большим значением произведения сжимаемости и плотности, но, кроме того, отношение этих величин не должно резко отличаться от этого отношения для воздуха. Если составить таблицу плотностей и сжимаемостей воздуха, воды и резины, то легко видеть, что подходящий импеданс, соединенный с малой скоростью звука, можно получить у вещества, сжимаемость которого близка к сжимаемости воздуха, а

плотность близка к плотности воды. Такой средой может быть суспензия воздушных пузырей в воде. Но для того, чтобы суспензия сохранялась в течение достаточного времени, необходимо воспользоваться более вязкой жидкостью, чем вода. Для этой цели достаточно добавить к воде кукурузный крахмал и ″взбить″ (вспенить). Стеклянная трубка с такой суспензией издает низкий тон, т. к., хотя плотность среды уменьшилась вдвое, сжимаемость ее резко возросла за счет воздушных пузырьков. Эксперименты с такой суспензией проводились в пределах большей части акустического диапазона и частично за его пределами.

3. **Лабораторная работа с использованием ультразвуковых волн в нефти.** Reece B. L. A teaching experiment using ultrasonic waves in oil. ″Phys.Educ.″, **1970**, 5, № 6, 355-358. [РЖ 1971-3А57].

Описана лабораторная работа по определению скорости звука в нефти, определению глубины резервуара для нефти и местоположения погруженного объекта. Определение скорости звука в нефти предлагается проводить стандартным методом наблюдения стоячих волн в этой среде. Дается описание установки, приведены результаты измерения. Используя импульсное возбуждение ультразвуковых преобразователей и наблюдая отраженный сигнал от неоднородностей в акустической среде, можно, зная скорость звука в среде, определять или глубину резервуара или местоположение неоднородности. Приводится схема установки для определения глубины по отраженному эхо-сигналу, дана принципиальная схема генератора для возбуждения ультразвуковых преобразователей. Приводятся результаты эксперимента.

4. **Распределение температуры в волновой ванне. Dickie J. Kirk. Thermal differentiation in a ripple tank.** ″Phys. Teacher″, **1973**, 11, № 1, 39. [РЖ 1973-5А61].

Описан эксперимент, предложенный и выполненный студентом, в котором исследуется распределение температуры в интерференционной картине, созданной двумя точечными источниками в волновой ванне. Исследование основано на измерении температуры с помощью термистора в узлах и пучностях интерференционной картины. Все выполненные эксперименты показали, что температура среды (воды) в пучностях была несколько выше, чем в узлах. Проведенный эксперимент позволяет объяснить превращения энергии волн, полностью гасящих друг друга.

5. **Эксперимент по изучению распространения ультразвука в жидкостях для студентов старших курсов.** A final year physics undergraduate experiment on ultrasound propagation in liquids. Van der Sluijs M.J., Van der Sluijs J.C.A. ″Amer. J. Phys.″, **1980**, 48, № 4, 278-282. [РЖ 1981-1А87].

Описывается эксперимент, в котором непосредственно измеряются скорость и коэффициент поглощения ультразвука в жидкостях в диапазоне частот 10–30 МГц при температурах 25–60°С. Основой установки является ультразвуковая ячейка с кюветой для исследуемого материала, заключенной между датчиком и приемником ультразвуковых колебаний. С помощью электронной схемы проводится обработка принятой детектором информации, которая выводится на дисплейное устройство. Приводятся характерные значения измеренных параметров для некоторых материалов.

6. **Исследование солитонов в учебной лаборатории.** Solitons in undergraduate laboratory. Bettini Alessandro, Minelli TullioA., Pascoli Donatella. ″Amer. J. Phys.″, **1983**, 51, № 11, 977-984. [РЖ 1984-6А145].

Описывается простое изготовленное в лаборатории оборудование для экспериментального наблюдения и измерения характеристик уединенных волн в жидкости (солитонов). Приводится краткое изложение теории солитонов и методика проведения студентами самостоятельных экспериментов по проверке основных положений теории. Обсуждаются экспериментальные данные, полученные студентами университета в Падуе.

7. **Экспериментальная установка для демонстрации основных физических свойств ультразвуковых волн.** Майер В.В., Колупаев В.Ф. Пробл. учеб. физич. эксперим. **1995**. № 1. 68-70, 132. [РЖ 1997 12А167].

Экспериментальная установка собрана по следующей схеме. Импульсы напряжения, снимаемые с выхода генератора импульсов, возбуждают пьезоэлектрический излучатель, который преобразует электрическую энергию в энергию механических колебаний. Пьезоизлучатель и пьезоприемник располагаются в ванне с дистиллированной водой.

8. **Изучение стоячих волн в коллоидном растворе.** Денисова А.Г. Учебн. Физ. эксперимент и его соверш-е.: Научно-метод. конф., Пенза, 22-24 ноября, 2002. : Межвуз. сб-к научн. тр. Пенза, **2002**. 46. [РЖФиз. 03.10-18А.151].

Для демонстрации стоячих волн предлагается в сосуд правильной формы с коллоидным раствором поместить вибратор, подключенный к звуковому генератору, и подобрать частоту таким образом, чтобы при интерференции падающей и отраженной плоской волны в сосуде установилась стоячая волна, т. е. на длине сосуда должно укладываться целое число длин полуволн. При этом амплитуда колебаний точек среды будет зависеть от расстояния до источника волны. Таким образом, раствор, перераспределяясь, представляет собой чередование слоев с разными плотностями коллоидных частиц. Это объясняется тем, что система стремится принять состояние с наименьшей потенциальной энергией. Если затем пропустить свет в направлении, перпендикулярном вектору распространения плоской звуковой волны, то можно заметить просветление раствора в этом направлении. Это и является доказательством установления стоячей волны в сосуде. Аналогичное явление наблюдается при локализации охлажденных атомов в плоской стоячей световой волне индуцированного излучения, потенциальная энергия которых, как диполя, пропорциональна E^2, где E – напряженность электрического поля волны.

9. **Капля в чаше: волны из точечного источника в камере круглой формы.** The rop in the pot: waves from a point source in a circular enelosure. Kaplan Harvey. Amer. J. Phys. **2005**. 73. № 2, 154-159. [РЖФиз. 06.10-18А.132].

10. **Визуализация звуковых волн с помощью регулярно расположенных мыльных пленок.** Tlias F., Hutzler S., Ferreira M. S. Eur. J. Phus. **2007**. 28, № 4. 755–765. [РЖ Физика.08.10-18А.113].

8.5. Волны в пружине

1. **Волновое движение – эксперимент по курсу музыкальной акустики.** Wave motion – an experiment for in musical acoustics. Phelps F. M. III. ″Phys. Teach.″, **1979**, 17, № 5, 317. [РЖ 1981-2А87].

Ряд качественных экспериментов, проводимых при изучении колебательного движения, может быть проведен в количественном плане. Предложены три экс-

перимента по курсу музыкальной акустики, в которых измеряется фазовая скорость. 1) Длинная пружина вручную приводится в колебательное движение с частотой ≈1 Гц. Для реализации 1-й гармоники пружина должна растягиваться на длину 1,5 L, где L – первоначальная длина нерастянутой пружины. Время 100 колебаний измеряется секундомером. Вычисляется частота колебаний ν, и фазовая скорость находится по формуле $c=\lambda\nu$, где λ – длина волны. Аналогично реализуются 2, 3 и 4-я гармоники ($L=\lambda$, $L=3\lambda/2$, $L=2\lambda$). 2) Измеряется расстояние ΔX, пройденное вдоль пружины импульсом возмущения, и время Δt, за которое он проходит это расстояние. Фазовая скорость вычисляется по формуле $c=\sqrt{(F/\mu)}$, где F – сила, растягивающая пружину, μ – линейная плотность пружины, соответствующая растяжению.

2. **Изучение дисперсионных свойств изгибных волн в пружине.** Жданова Н.Г., Сергачев И.А., Сергеев А.С., Стрюнгис Р.Ф., Пятаков А.П. Физ. образ. в вузах. **2006**. 12. № 2. 109– 117. [РЖ 18. Физика Ч. I. 2007. № 5. 18А.130].

Предлагается простая методика изучения особенностей распространения изгибных волн в тонких пластинках и стержнях на примере металлической пружины из ленты прямоугольного сечения. Данный метод позволяет продемонстрировать три типа волн распространяющихся в пружине: “быстрой” и “медленной” волны взаимно перпендикулярных поляризаций и продольно-изгибной волны с частотой отсечки. Разработанный метод может быть использован в лекционных демонстрациях и в учебном эксперименте по основам теории колебаний и теории волн.

8.6. Эффект Доплера

1. **Измерения эффекта Допплера.** Groeneveld Jan. Messungen zum Dopplereffekt. “Prax. Naturwiss.”, **1963**, 12, № 8, Physik, 197-200. [РЖ 1964-2А66].

Описывается способ измерения эффекта Допплера при помощи пылевых фигур Греневельда (РЖФиз, 1963, 7А49, 11А104). К концу маятника длиной немного более 1 м прикрепляют наушник, соединенный с источником переменного напряжения. Под маятником на некотором расстоянии от положения равновесия устанавливают микрофон, соединенный с усилителем и измерительной пластиной. При колебаниях маятника наушник перемещается относительно микрофона, при этом на измерительной пластине отчетливо регистрируется изменение частоты. Приведены методические указания к проведению опыта и расчету величины эффекта.

2. **Эффект Допплера и метод определения скорости волн на поверхности воды.** Wolters Gunther. Der Doppler-Effekt und eine Methode zur Messung der Geschwindigkeit von Wasserwellen. “Prax. Naturwiss.”, **1965**, A 14, № 5, Physik, 138-140. [РЖ 1965-12А94].

Опыты проводятся в ванне со стеклянным дном, хорошо освещенным снизу. Волны возбуждаются при помощи генератора, состоящего из штырька, соединенного с электромагнитным датчиком. Генератор укреплен на прямоугольном штативе, который может скользить вдоль направляющей планки. На планке имеются две контактные пластинки K_1 и K_2, соединенные с электрическим се-

кундомером. Таким образом можно измерить время и рассчитать скорость перемещения генератора вдоль планки между K_1 и K_2. На ванну кладут масштабную линейку с двумя движками для отметки расстояний, приводят генератор в действие и определяют длину волны. Затем приводят генератор в движение вдоль планки с такой скоростью, чтобы штырек все время совпадал с распространяющимся волновым фронтом, при этом длина волны увеличивается вдвое. Скорость волн определяется стробоскопическим путем.

3. **Количественное исследование допплер-эффекта.** Kostler Artur. Doppler-effekt quantitative. ″Prax. Naturwiss.″, **1967**, A16, № 8, Physik, 201-204. [РЖ 1968-3A64].

Изменение частоты, регистрируемой микрофоном при движущемся репродукторе (или микрофоне), измеряется известным методом фигур Лиссажу. Обсуждается точность метода.

4. **Количественные исследования по эффекту Доплера.** Marianeschi M.M. Esperimento quantitative sull′effetto Doppler. ″G. fis. Soc. ital. fis.″, **1972**, 13, № 2, 111-122 (итал.). [РЖ 1973-2A74].

Описываются опыты по проверке эффекта Доплера для частоты в 400 Гц.

5. **Количественные измерения доплеровского сдвига на ультразвуковых частотах.** Nerbun R.C., Jr., Leskovec R.A. Quantitative measurement of the Doppler shift at an ultrasonic frequency. ″Amer. J. Phys.″, **1976**, 44, № 9, 879-891. [РЖ 1977-5A90].

Описана установка для измерения доплеровского сдвига частоты, предназначенная для лабораторной работы. Приемник сигнала – ультразвуковой преобразователь на частоту 40 кГц – стационарно фиксировался в конце воздушной акустической линии, а источник – аналогичный преобразователь – помещался на подвижной каретке, скорость перемещения которой по этой же линии строго регистрировалась. Излучаемый и принимаемый сигналы поступали на схему цифрового фазового детектора, вырабатывающего синусоидальный сигнал, пропорциональный разностной частоте. Эта частота, соответствующая доплеровскому сдвигу, измерялась, а затем сравнивалась с расчетными данными. Их расхождение не превышало 5%.

6. **Эффект Доплера: простая аналогия и демонстрация.** The Doppler effect. A simple analogy and demonstration. Shakarvarti S. K. ″Phys. Teach.″, **1981**, 19, № 5, 320. [РЖ 1981-11A137].

Тонкая струя воды, падающая с высоты 2 м, рассматривается как модель бегущей волны. Расход воды через любое сечение струи один и тот же. В опыте регистрируется скорость наполнения сосуда, если он неподвижен, движется равномерно вверх или равномерно вниз. Скорость наполнения сосуда водой в этих случаях оказывается различной, что позволяет разъяснить суть эффекта Доплера.

7. **Изучение явления Доплера.** Работа 11. С. 114-118. Физический практикум. Под ред. Г.С. Кембровского. Минск. **1986**. 352 с.

Определяется доплеровский сдвиг частоты при различных движениях источника и приемника звуковых колебаний.

8. **Модельный эффект Доплера в студенческом лабораторном практикуме.** Барсуков К.А., Кондрашкин И.А., Попов В.Н. Использ. науч.-техн. достиж. в учеб. физ. эксперим. Пенз. Гос. пед. ун-т. Пенза, **1997**. 19-22. [РЖ 01А124].

Предлагается лабораторная работа с элементами исследования, несколько расширяющими программные вопросы, в сравнительно простом инструментальном оформлении, моделирующая эффект Доплера в преломляющей среде.

9. **Установка для лабораторных работ и семинарских занятий по изучению эффекта Доплера.** Сирота А.И., Волобуев А.Н., Проскуряков В.П. Физ. образ. в вузах. **2000**. 6. № 4. 49-50, 91. [РЖ 01.12-18А.137].

В настоящее время в биологии и клинической медицине широко используются методы исследования, основанные на эффекте Доплера, к ним относятся доплеровское измерение скорости кровотока в магистральных сосудах, эхотахокардиография и т. д. В связи с этим возникла необходимость знакомить студентов медицинских вузов с физическими основами этих методов. Авторами (Самарский госуд. университет, кафедра медицинской и биологической физики) разработана установка для изучения эффекта Доплера на семинарских занятиях. Установку можно использовать для проведения лабораторной работы.

10. **Лабораторная работа по изучению эффекта Доплера в акустике.** Логинов В.А., Седых Н. К., Железный Н.В., Спичкин Ю.В., Седых Е.Н. Физ. образ. в вузах. **2001.** № 3. 73-76. [РЖ 02. 12-18А. 158].

В стандартных физических практикумах эффекту Доплера в акустике посвящено сравнительно небольшое количество работ. Как правило, реализуются три схемы проведения эксперимента. По одной из существующих схем источник и приемник звука расположены на движущихся платформах. В соответствии с другой схемой источник и приемник звука неподвижны, а звуковая волна в процессе своего распространения от источника к приемнику отражается от пластин, вращающихся на специальной платформе. По третьей схеме источник звука располагается на вращающейся платформе, а приемник – на неподвижной станине. Главный недостаток наиболее распространенных вариантов демонстрации эффекта Доплера заключается в их ”шумовом сопровождении”, так как используются звуковые волны с диапазоном частот 5–10 кГц. Особенностью описанной лабораторной работы по изучению эффекта Доплера в акустике является использование ультразвукового диапазона частот.

11. **Изучение эффекта Допплера в физическом практикуме.** Сухов Л.Т. Шестая межд. конф. ФССО-**2001**. Ярославль. Тез. докл. Т. 1, с. 49-50.

12. **Наблюдение обратного эффекта Доплера.** Observation of the inverse Doppler effect. Seddon N., Bearpark T. Science. **2003**. 302. № 5650. 1537-1540. [РЖ 04. 12-18А. 172].

Глава 9
ГИДРОДИНАМИКА

1. **Определение плотности газов эффузиометром Бунзена.** А.П. Соколов. Физический практикум. ОНТИ. **1937**. Задача 9. С.117-122.

Из теории истечения газа через малое отверстие следует, что время t истечения газа из сосуда пропорционально корню квадратному из плотности газа D: $t \sim \sqrt{D}$. Поэтому, измеряя время истечения одинаковых объемов различных газов при равных давлениях, можно определить их плотность по отношению к одному из них, например, к воздуху:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{t_1^2}{t_2^2}.$$

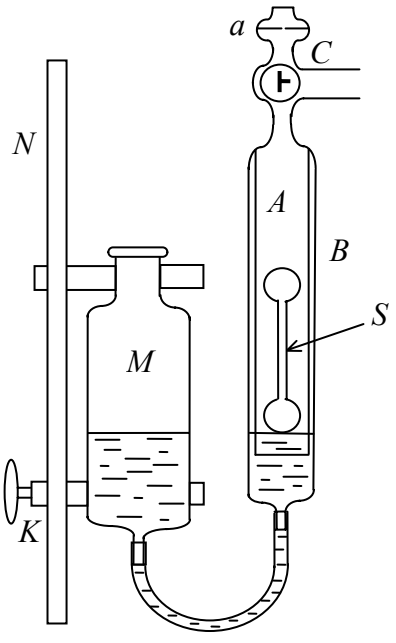
2. **Определение плотности газов методом Бунзена.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 9с. С.143-147.

Метод Бунзена определения плотности газов основан на измерении промежутков времени, в течение которых через маленькое отверстие вытекают равные объемы двух различных газов, которые находятся при одинаковых температуре и давлении. В предположении, что температура газов в этом процессе не меняется, справедливо простое соотношение между скоростью истечения газа v и его плотностью ρ:

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}},$$

где индексы 1 и 2 относятся к двум сравниваемым газам. Из этого соотношения следует соотношение:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{t_2^2}{t_1^2},$$



согласно которому плотности газов пропорциональны второй степени времени их истечения из малого отверстия. Эта формула дает возможность определять лишь относительную плотность газов.

Прибор Бунзена, часто называемый эффузиометром, состоит из стеклянной открытой снизу трубки A, в верхней части которой находится кран c тройным ходом. Его верхняя трубка оканчивается ампулкой a, в которую впаяна платиновая фольга с очень маленьким (микроскопическим) отверстием. Оно служит для сообщения внутренней части трубки A с наружным пространством, если поворотом крана c закрыть его боковой отросток. Нижний открытый конец

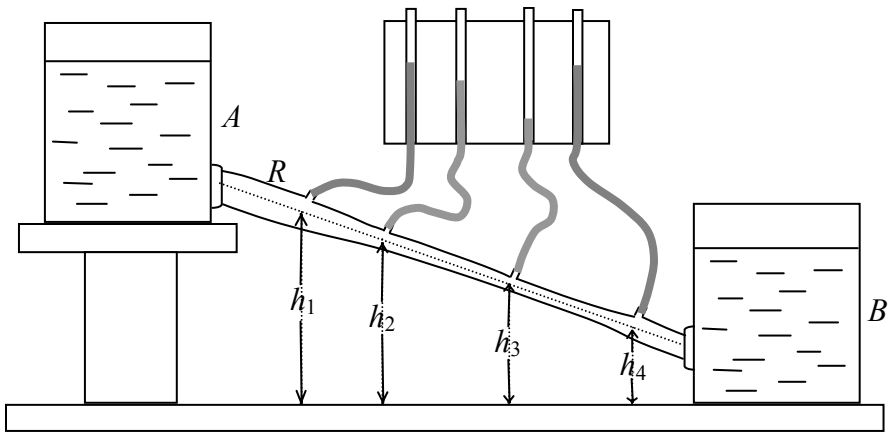
трубки *A* опущен в стеклянный цилиндр *B*, который резиновой трубкой соединяется с сосудом *M*, в котором находится ртуть. Сосуд *M* можно устанавливать на различной высоте при помощи его муфты *K*, которую можно закреплять на штанге *N* в любом положении. В соответствии с положением сосуда *M* изменяется высота уровня ртути в цилиндре B. Внутри трубки *A* находится стеклянный поплавок *S*, который свободно плавает на ртути.

Наблюдения с прибором Бунзена сводятся к тому, чтобы, наполняя трубку *A* различными газами, измерять те промежутки времени, в течение которых через отверстие в ампулке *a* вытекает всегда один и тот же объем газа.

3. **Изучение стационарного течения жидкости в трубе переменного сечения.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 12а. С.175-182.

В работе используется прибор Бернулли, состоящий из двух баков *A* и *B*, соединенных стеклянной трубкой *R* переменного сечения, по которой вода из первого бака перетекает во второй под действием силы тяжести.

Разность уровней воды в баках поддерживается постоянной при помощи специальных кранов и сливных отверстий. Предусмотрена возможность измерения расхода воды в ходе опыта.



Трубка *R* соединена с баками при помощи гибких шлангов, что позволяет изменять ее наклон относительно горизонтали. Для измерения давления в нескольких сечениях трубки *R* сделаны отверстия диаметром около 1 мм, которые при помощи резиновых шлангов соединены с манометрами, укрепленными на общей подставке.

Чтобы проверить приложимость уравнения Бернулли для случая течения воды в трубе переменного сечения, необходимо определить для различных сечений трубы среднюю скорость течения v, давление в потоке воды *p* и высоту положения оси трубки *h* в различных сечениях. Величина v вычисляется по расходу воды, т. е. по ее объему *V*, вытекающему из трубы в единицу времени, и площади поперечного сечения трубы $S = \pi r^2$, где *r* – радиус поперечного сечения трубы в рассматриваемом месте:

$$v = \frac{V}{St} = \frac{V}{\pi \cdot r^2 t}$$

Величина *p* определяется по показаниям манометров. Опыт выполняют при различных наклонах трубы *R*.

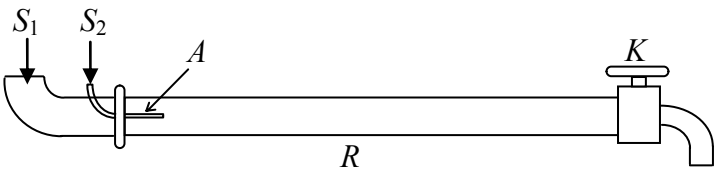
При течении реальной жидкости в трубе происходит некоторое уменьшение удельной энергии жидкости (энергии, отнесенной к единице веса):

$$\Delta W = \frac{1}{2g}\left(v_1^2 - v_2^2\right) + \frac{1}{\gamma}\left(p_1 - p_2\right) + \left(h_1 - h_2\right).$$

Из результатов всех измерений вычисляют, для каждого из положений трубы R, в том числе и горизонтального, величину потерь удельной энергии между соответственными сечениями, например, между первым и вторым, первым и третьим и т. д.

4. **Изучения формы течения жидкости в трубе и определение критического числа Рейнольдса визуальным методом.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 12b. С.182-184.

Работа выполняется на установке Рейнольдса, основным элементом которой является длинная стеклянная труба R, в которую вводится поток воды S_1. Специальные устройства, в частности, кран K, позволяют в широких пределах менять среднюю скорость течения воды в ней, определять при этом расход воды.



С помощью узкой трубки A в основную трубу R можно вводить струйку S_2 подкрашенной воды. Подбирая скорость этой струйки, можно установить ее одинаковой с общей скоростью течения воды в трубе R. Это будет заметно по виду подкрашенной струйки: ее границы, вообще размытые, при совпадении скоростей оказываются совершенно резкими. Исследование формы течения состоит в том, чтобы, наблюдая вид окрашенной струйки при различных скоростях течения воды в трубе, найти такую скорость течения, которая соответствует критическому числу Рейнольдса. При этом условии ламинарная форма течения переходит в турбулентную, и резкая граница подкрашенной струйки быстро исчезает. Число Рейнольдса вычисляется по формуле:

$$\mathrm{Re} = \frac{v r \rho}{\mu},$$

где v – средняя скорость движения воды в трубе, определяемая экспериментально по расходу воды за единицу времени, r – радиус трубы, ρ – плотность воды, μ – коэффициент вязкости воды при температуре наблюдения $t°$, вычисляемый по приближенной формуле Пуазейля:

$$\mu = \mu_0\left(1 + 0{,}0338 \cdot t°\right),$$

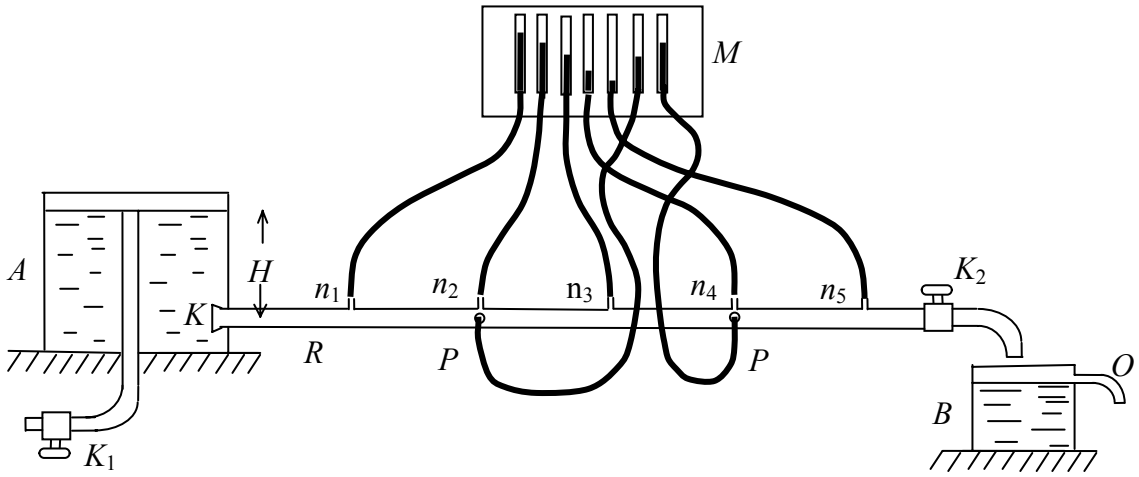
где μ_0 – коэффициент вязкости воды при температуре 0°С.

Определение критического числа Рейнольдса производится как при постепенном увеличении скорости течения воды, так и при постепенном уменьшении

ее. В этих случаях получаются различные значения *Re*, т. е. получаются верхнее и нижнее значения критического числа Рейнольдса.

5. **Определение давлений и профиля скоростей при ламинарном и турбулентном течении воды в цилиндрической трубе.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 12c. С.185-188.

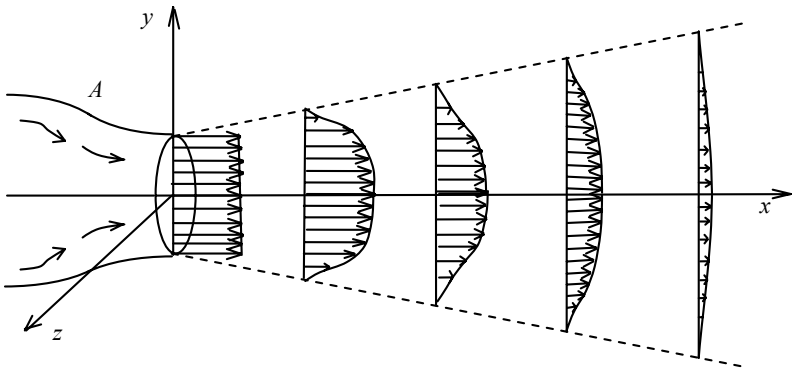
Основным элементом экспериментальной установки является длинная латунная труба *R* диаметром около 25 мм, по которой течет вода, поступающая через плавный вход *K* из водонапорного бака *A*. В бак вода поступает через кран K_1 из водопровода. Из трубы *R* через кран K_2 вода поступает во второй бак *B* со сливным отверстием *O*. Вытекающую из него воду можно принимать в большой измерительный сосуд, определяя таким образом



Расход воды, т. е. ее объем, вытекающий в единицу времени, что дает возможность определить среднюю скорость течения воды в трубе *R*. Регулируя краны K_1 и K_2, можно устанавливать в трубе *R* как ламинарный, так и турбулентный режим. По длине трубы *R* в нескольких местах, на равных расстояниях одно от другого, сделаны небольшие отверстия n_i, диаметром около 1 мм, которые при помощи трубочек и резиновых шлангов соединяются с батареей открытых манометров *M*. В двух сечениях трубы *R* против отверстий n_2 и n_4 сделаны еще два отверстия, в которые вставлены трубки Пито *PP*, соединенные резиновыми шлангами с двумя крайними правыми манометрами батареи. Микрометрические винты, соединенные с трубками Пито, дают возможность перемещать их в направлении, перпендикулярном к оси трубы *R*, т. е. вдоль ее радиуса, причем в каждом положении трубки Пито можно отсчитать расстояние оси ее головки от оси трубы *R*.

Таким образом, на этой установке можно исследовать, во-первых, падение давлений вдоль трубы *R* (манометры, соединенные с отверстиями в трубе) и, во-вторых, распределение скоростей, или их профиль, в двух сечениях трубы, в области ее средней части (манометры, соединенные с трубками Пито). При этом можно произвести сравнительное исследование этих величин, как при ламинарном, так и при турбулентном режиме течения.

6. **Изучение поля скоростей свободной воздушной струи при помощи термоанемометра.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 12d. С.189-192.



Небольшая аэродинамическая труба Экка круглого сечения посылает так называемую свободную струю воздуха, т. е. воздушный поток, который втекает с некоторой постоянной скоростью внутрь окружающих неподвижных масс воздуха.

Скорость вращения вентилятора, создающего первичный воздушный поток, можно изменять с помощью реостата в цепи его питания, получая таким образом воздушные струи с различными значениями начальной скорости. По выходе струи из трубы постоянство скорости быстро нарушается, так как вследствие трения слои воздуха, прилегающие к струе, получают сдвиги, что вызывает образование завихрений как во внешней части струи, так и в ближайших к ней слоях воздуха. В результате область струи, в которой скорость сохраняет свое начальное значение, сокращается, величина скоростей в направлении к внешней части струи уменьшается до нуля, а сечение струи постепенно расширяется. Таким образом, распределение скоростей в свободной воздушной струе, или, как принято говорить, ее поле скоростей, оказывается очень сложным. В лабораторной работе определяют составляющие скорости, параллельные и перпендикулярные оси воздушного потока. Величину скорости в отдельных точках воздушного потока определяют с помощью термоанемометра – прибора, действие которого основано на процессе охлаждения нагретого тела газовой струей. Если в струе газа нагревать электрическим током металлическую проволоку, то ее температура при стационарном состоянии будет определяться, во-первых, количеством теплоты, выделяемой в проволоке током, и, во-вторых, количеством теплоты, передаваемой струе газа. С изменением температуры проволоки будет изменяться ее электрическое сопротивление. Основным элементом термоанемометра является небольшой отрезок очень тонкой платиновой проволочки, включенной в цепь моста Уитстона. Компенсируя изменения сопротивления платиновой проволочки в воздушном потоке изменением силы тока в электрической схеме, добиваются возвращения моста Уитстона в скомпенсированное состояние. Скорость воздуха в месте расположения платиновой проволочки вычисляется по формуле:

$$v = \left(\frac{i^2 - i_0^2}{c} \right)^2 ,$$

где i_0 – сила тока через мост Уитстона в начальном сбалансированном состоянии, когда платиновая проволочка находится в покоящемся воздухе, i – сила тока через мост Уитстона в сбалансированном состоянии, когда платиновая проволочка находится в воздушном потоке, c – калибровочный коэффициент прибора. Результаты выполнения лабораторной работы представляются в виде графиков, изображающих поле скоростей свободной воздушной струи.

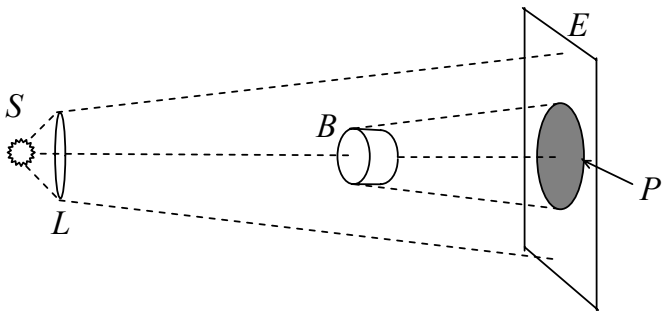
7. **Изучение воздушных потоков около цилиндра и крыла аэроплана оптическим методом.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 12e. С.192-194.

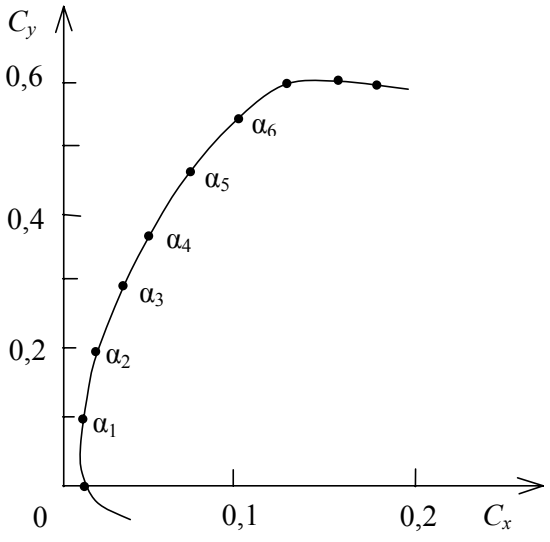
Цилиндр, вращающийся в потоке жидкости, испытывает одностороннее давление, направленное перпендикулярно к направлению движения жидкости – эффект Магнуса. При этом вблизи некоторых точек поверхности цилиндра, называемых точками схода потока, возникают завихрения

Для изучения описываемых явлений в данной работе применяется оптический теневой метод, который основании на следующем явлении: если в расходящемся пучке лучей, получаемых от точечного источника света, в некоторых местах возникают небольшие изменения плотности воздуха, то на экране это выявляется как отчетливо видимый теневой эффект. Небольшое местное изменение плотности воздуха вызывается его местным нагреванием при помощи небольшого электрического нагревателя, ток в котором регулируется.

Оптическая часть установки состоит из точечного источника света *S* и линзы *L*, которая делает пучок лучей слабо расходящимся. Лучи света падают на экран *E*, который должен иметь чисто белую матовую поверхность. Модели цилиндра (или крыла), освещаемые световым пучком, укрепляются на кронштейне аэродинамической трубы вблизи ее выходного конца, т. е. в равномерном поле скоростей. На экране получается резко видимое теневое изображение *P* сечения цилиндра, т. е. правильный темный круг. Затем включают мотор аэродинамической трубы, электрический нагреватель и при постоянной скорости потока, подбирая соответствующий ток нагревателя, наблюдают и зарисовывают общую картину обтекания воздухом неподвижного цилиндра, отмечая положение на его поверхности точки раздвоения потока и точек схода потока с поверхности цилиндра. Те же наблюдения повторяют последовательно с вращающимся цилиндром при различных скоростях его вращения и с моделью крыла при различных углах атаки.

8. **Изучение эффекта Магнуса и определение поляры крыла аэроплана.** К.П. Яковлев. Физический практикум. ОГИЗ. М.-Л. **1946.** Работа 12f. С.194-197.





Вблизи аэродинамической трубы Экка, несколько сбоку от нее, установлены аэродинамические весы, коромысло которых может двигаться в двух плоскостях, в вертикальной и в горизонтальной. При этом тело, укрепленное на концах коромысла весов, при движении в двух плоскостях остается параллельным самому себе.

Исследуются модели ротора Магнуса и крыла аэроплана. Ротор Магнуса представляет собой легкий цилиндр, который можно приводить во вращение при по-

мощи маленького электрического мотора. Измерения сводятся к тому, чтобы количественно определить величину эффекта Магнуса на модели ротора, подъемную силу модели крыла и лобовое сопротивление моделей. Экспериментально определяются подъемная сила F_y и сила лобового сопротивления F_x. Вычисляются коэффициенты подъемной силы и лобового сопротивления C_y и C_x соответственно:

$$C_y = \frac{2F_y}{\rho v^2 S}, \quad C_x = \frac{2F_x}{\rho v^2 S}.$$

Здесь ρ – плотность воздуха, v – скорость потока воздуха, S – площадь крыла.

Результаты исследования крыла представляются графически в виде зависимости между C_y и C_x, полученных для разных значений угла атаки крыла – график этой зависимости называется полярой крыла или полярой Лилиенталя.

9. **Определение плотности газов методом истечения.** Физический практикум. Руководство к практическим занятиям по физике. Под ред. проф. В.И. Ивероновой. Сост.: А.Г, Белянкиным, Е.С. Четвериковой, И.А. Яковлевым. Изд. 2-е. М., **1951**. Задача 8.С. 68-72. **1953, 1955**. Лаб. работа 7. С. 69-70.

10. **Несколько опытов по аэродинамике.** Glaser Manfred. Einige Versuche zur Stromungslehre mit einfachen Hilfsmitteln. “Math., Phys., Astron. Schule”, **1961**, **8**, № 12, 822-826, 831-832. [РЖ 1962-5А69].

Описываются опыты по аэродинамике, которые могут быть проведены при помощи простых приборов и самодельного оборудования: зависимость сопротивления от скорости потока, от формы и состояния поверхности; демонстрация динамической подъемной силы и др.

11. **Измерение периодов колебаний методом пылевых фигур.** Kroncke Helmut. Messung von Schwingungsdauern mit Staubfiguren. “Prax. Naturwiss.”, **1963**, **A12**, № 1, Physik, 4-8. [РЖ 1963-8А53].

Описывается несколько опытов по измерению периодов колебаний методом пылевых фигур Греневельда (см. РЖФиз, 1963, 7А49). Например, период колебания водяного столба в U-образной трубке можно измерить, если в одно колено трубки, наполненной водой, ввести два изолированных друг от друга провода, соединенные с электродами измерительной установки. Провода опускают в трубку так, что они почти касаются уровня воды в положении равновесия. При перемещении электродов по измерительной пластине остаются два следа: один дает отметки времени, а другой вследствие колебаний водяного столба в трубке прерывается в течение половины периода, т. к. при погружении проводов в воду между ними возникает ток короткого замыкания. Преимущество метода заключается в том, что период колебаний может быть измерен весьма точно для одного колебания, что особенно важно, если затухание сильное. Аналогичным образом (прерывание следа при токе короткого замыкания в параллельной цепи) можно измерить период или амплитуду колебаний маятника, колеблющейся пружины и т. п.

12. **Количественные измерения эффекта Магнуса.** Sudbeck Walter. Der Magnus-Effekt quan titativ. ″Prax. Naturwiss.″, **1965**, A14, № , Physik, 182-183. [РЖ 1966-3Ф73].

Картонный цилиндр диаметром 6 см и длиной 15 см (ротор) при помощи стержня, проходящего вдоль оси, укрепляют горизонтально на штативе, установленном на чашке настольных весов. На том же штативе устанавливают мотор, приводящий ротор во вращение. Если поместить ротор в горизонтальный воздушный поток, перпендикулярный оси вращения, возникает сила, направленная вертикально вверх, которую можно измерить при помощи разновесок. Приведены методические указания и результаты измерений, из которых следует хорошее совпадение экспериментальных данных с теоретическими расчетами.

13. **Течение вязких жидкостей по цилиндрическим трубам.** Под ред. В.И.Ивероновой. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. М., **1967**. Задача 25. С. 150-152.

14. **Движение тел при наличии аэродинамических сил сопротивления.** Под ред. В.И. Ивероновой. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. М., **1967**. Задача 26. С. 153-156.

15. **Сила на поверхности падающей воды.** Vermillion Robert Everett. The force on a surface by a stream of falling water. ″Phys. Teacher″, **1972**, 10, № 9, 528. [РЖ 1973-4А96].

Описан эксперимент по определению силы падающей воды. Поток воды выливается из сосуда с постоянной скоростью, падая с ускорением силы тяжести на измерительное устройство, находящееся на некотором расстоянии от сосуда (по вертикали). Показано, что сила воздействия такого потока на поверхность равна весу жидкости, заключенной в объеме падения. Подробно обсуждается динамика падающего потока.

16. **Проект бумеранга. King Allen L. Project boomerang.** ″Amer. J. Phys.″, **1975**. 43, № 9. С. 770-773. [РЖ 1976-2А108].

Описан проект бумеранга, который студенты могут изготовить сами. Бумеранг может иметь две или более лопастей, их делают различных размеров, веса и стилей. Возвращающийся бумеранг иллюстрирует многие положения динамики недерформируемого жесткого тела, а также некоторые принципы аэродинамики. В экспериментах с бумерангом изучаются форма и длина траектории, время и дальность полета. Можно измерять также скорость вращения из оценки скорости движения руки в момент бросания, длины руки, начальной скорости бумеранга и положения его центра массы. Приводится элементарный расчет движения бумеранга с двумя лопастями с учетом движения его центра массы, а также аэродинамической силы.

17. **Измерение реактивной силы.** Лаб. работа 23. В кн. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. Под ред. В.И. Ивероновой. М. **1977**. С. 141-144.

18. **Исследование обтекания тел потоком воздуха.** Задача 6. С. 31-36. Полищук Д.И. и др. Физический практикум для нефизических специальностей. Часть I. (Учебное пособие). Одесса. **1977**. 76 стр.

19. **Изучение реактивной силы.** Лаб. работа 12. ”Общий физический практикум. Механика.” Под ред. А.Н. Матвеева и Д.Ф. Киселева. Изд. Моск. ун-та. **1991**. С. 146-149.

20. **Что такое неустойчивость Релея□0Тейлора.** Саранин В.А. Учеб. физ. **1998**. № 2. 10-13, 77. [РЖ 1999.08-18А.91].

Предлагается серия простых опытов, иллюстрирующих неустойчивость равновесия жидкостей. В них функцию нижней жидкости выполняет воздух, поскольку в условиях опыта его можно считать несжимаемым. Изложение носит исследовательский характер: описаны явления, сформулированы задания и даны ответы. Предполагается, что читатель проявит инициативу и самостоятельно проведет исследование.

21. **Экспериментальные задачи на истечение жидкости из сосуда.** Василевская Л.И., Василевский А.С. Пробл. учеб. физ. эксперим. **1998**. № 5. 37-39, 80. [РЖ 01А111].

Предлагается серия из четырех экспериментальных заданий по истечению жидкости из отверстия в сосуде: исследование дальности полета струи, определение высоты уровня жидкости, оценка силы давления на поршень медицинского шприца и определение диаметра иглы шприца.

22. **Исследование истечения жидкости.** Голобоков С.В., Чермошенцев А.В. Учебный физический эксперимент и его совершенствование: Научно-методическая конференция, Пенза, 22-24 ноября, **2000**: Межвузовский сборник научных трудов. Пенза, 2002. 181-183. [РЖ 03.08-18А.156].

Предложена лабораторная работа по исследованию истечения жидкости. Приведена схема установки и принцип ее работы, а также методы расчета скорости истечения в т. ч. по формуле Торичелли с использованием уравнения Бернулли. Методика исследований заключается в одновременном измерении высоты жидкости в сосуде и скорости истечения из жиклера. Представлены графики зависимостей скорости и квадрата скорости от высоты. Работа рекомендуется как дополнительная к школьному курсу физики в специализированных классах физико-математического профиля.

23. **Проверка уравнения Бернулли.** Голобоков С.В., Копанев В.П. Учеб. физ. эксперимент и его соверш-е : Научно-метод. конф., Пенза, 22-24 ноября, 2000: Межвуз. сб-к научн. тр. Пенза. **2002**. 197-200. [РЖФиз. 03.11-18А.154].

Разработана установка, позволяющая наглядно продемонстрировать действие закона Бернулли для потока воды, четко различить понятия динамического напора и статического давления внутри жидкости, а также дать количественную оценку закона. Представлена схема установки. Методика выполнения измерений заключается в одновременном определении давлений и скоростей потока воды в измерительных каналах. В качестве датчика используются автомобильные датчики топлива, разработанные в НИИЭМП. Проверка уравнения Бернулли проводится путем экспериментального доказательства зависимости разницы давлений в измерительных каналах от разницы квадратов скоростей потоков в тех же сечениях. Приведен примерный вид данной зависимости, ее линейный характер является подтверждением выполнения закона Бернулли.

24. **Лабораторные моделирования течений идеальной и вязкой жидкости: лабораторные работы для студентов.** Генин Л.Г., Свиридов В.Г., Тонконогов В.Б. М.: Изд-во МЭИ. **2003**. 63 с. [РЖФиз. 04.11-18А.132К].

Методическое пособие содержит описание четырех лабораторных работ, посвященных изучению : потенциальных потоков жидкости методом электрогидродинамической аналогии : обтеканию крылового профиля воздухом в аэродинамической трубе; исследованию коэффициентов гидравлического сопротивления при ламинарном и турбулентном течении жидкости в трубе ; исследованию с помощью термоанемометра гидродинамики ламинарного, переходного и турбулентного режимов течения. Продолжительность одного лабораторного занятия – 2 часа. Авторами использованы описания лабораторных работ предыдущих изданий, написанные преподавателями кафедры инженерной теплофизики. Издание предназначено для студентов 3-го курса Института теплоэнергетики и технической физики Московского энергетического института (ТУ).

25.**Описание экспериментальной установки, моделирующей механизм взаимодействия вихря с водной поверхностью.** Бубнов В.А. Физ. образ. в вузах. **2006**. 12. № 3. 85–98, 134. [РЖ 18. Физика Ч. I. 2007. № 7. 18А.135].

Рассказывается о различных видах атмосферных вихрей (циклонах, антициклонах, ураганах, смерчах и др.). Описана конструкция экспериментальной установки, которая раскрывает механизм взаимодействия изолированного вихря с нагретой водной поверхностью. Показано, что вихрь возбуждает на водной поверхности цилиндрические волны, которые интенсифицируют процесс испарения жидкости.

26. **Образование капель в падающем потоке жидкости.** [РЖ 18. Физика Ч. I. **2007**. № 1. 18А.59]. [РЖ 18. Физика Ч. I. 2007. № 1. 18А.87].

28. **Практический пример, помогающий пониманию импульса в одном измерении: эксперимент с водяной пушкой.** A practical example aiding understanding momentum in 1D: The water gun experiment. MacLeod K. Phys. Educ. **2007**. 42. № 5. 492-495. [РЖФиз. 09.06-18А.89].

В.И. Козлов

АНТОЛОГИЯ
ОБЩЕГО ФИЗИЧЕСКОГО ПРАКТИКУМА
Часть 1
(Механика)

Подписано в печать _____
Обьем 15,5 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ _____

Физический факультет Московского государственного
Университета имени М.В. Ломоносова

Отпечатано в отделе оперативной печати
Физического факультета МГУ