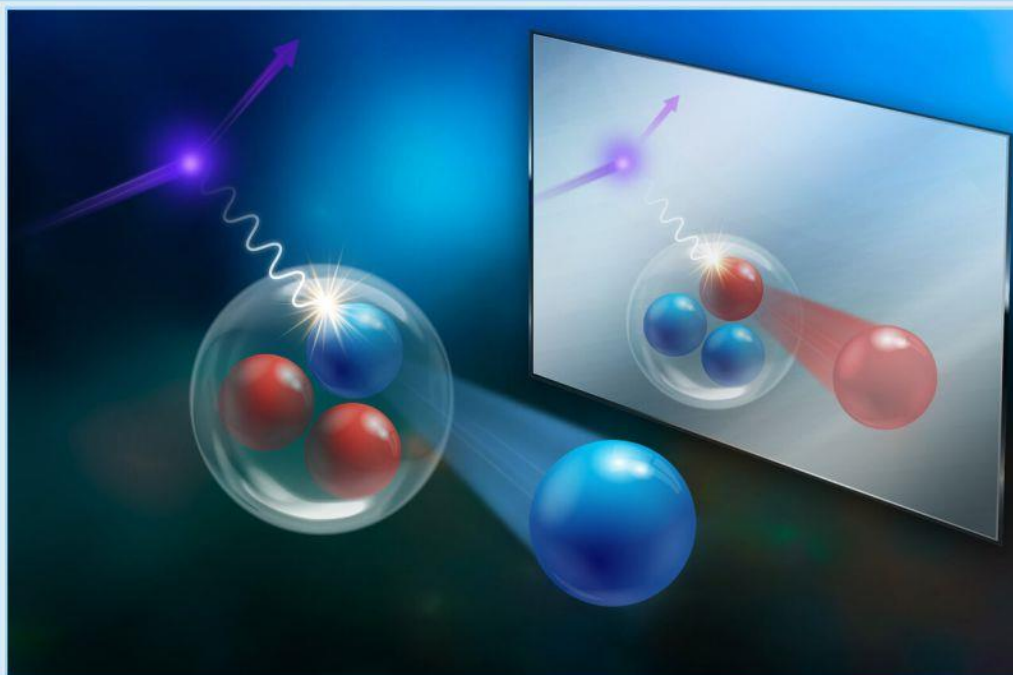


16+



МЕХАНИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА



Лабораторный практикум
по курсу физики

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Нижевартовский государственный университет»

МЕХАНИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Лабораторный практикум по курсу физики

Составители: А.А. Клочков, Н.И. Юмагулов

**Нижевартовск
НВГУ
2022**

Печатается по решению
Ученого совета ФГБОУ ВО «Нижевартовский государственный университет»
протокол № 1 от 26 января 2021

Рецензенты: д-р тех. наук *Галиев А.Л.*,
д-р физ.-мат. наук *Ельников А.В.*

Составители: канд. физ.-мат. наук, доцент А.А. Клочков,
канд. тех. наук, доцент Н.И. Юмагулов

М 55 Механика и молекулярная физика: Лабораторный практикум по курсу физики
/ Сост.: А.А. Клочков, Н.И. Юмагулов. Нижневартовск: изд-во НВГУ, 2022. 113 с.

ISBN 978-5-00047-627-7

Лабораторный практикум содержит описания лабораторных работ по физике для студентов инженерно-технических направлений подготовки по разделам механика, молекулярная физика и термодинамика. Современные информационные технологии не могут заменить практических навыков, приобретаемых в результате выполнения лабораторных работ. Лабораторный практикум важное звено в обучении студентов практическим компетенциям, а именно приобретению уверенности в своих действиях по выполнению измерений физических параметров технических систем и технологических процессов, проведению анализа достоверности полученных результатов и их интерпретации, умению грамотно излагать свои мысли, составлять и оформлять отчетную документацию. Лабораторный практикум подготовлен для методического обеспечения курса физики.

ББК 22.3я73



Тип лицензии CC, поддерживаемый журналом: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

ISBN 978-5-00047-627-7



9 785000 476277

© Клочков А.А., Юмагулов Н.И., 2022

© Издательство НВГУ, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
ПАМЯТКА СТУДЕНТУ	6
Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ по общему курсу физики	6
Основные правила безопасной эксплуатации электрических установок	6
Требования к оформлению отчета	18
Методические рекомендации	18
Физические величины	19
Основные правила приближенных вычислений	21
Вычисление погрешностей измерений	22
Определение погрешностей при прямых измерениях	25
Расчет погрешностей прямых измерений при выполнении серии опытов	28
Определение погрешностей при косвенных измерениях	29
МЕХАНИКА	33
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. Применение закона прямолинейного равноускоренного движения для определения ускорения свободного падения	33
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. Изучение колебательного движения на примере математического маятника	38
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. Исследование периодического движения физического маятника	44
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. Определение коэффициента полезного действия на примере механической (пружинной) пушки	52
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. Изучение динамики поступательного движения	59
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6. Определение момента инерции твердого тела	64
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7. Опытная проверка закона сохранения энергии и импульса ..	70
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА	75
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8. Определение коэффициента вязкости воздуха капиллярным методом	75
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9. Определение отношения теплоемкостей воздуха	82
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10. Определение теплоемкости твердых тел	88
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11. Определение энтропии при плавлении олова	94
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12. Изучение зависимости скорости звука от температуры	99
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13. Определение поверхностного натяжения воды, загрязненной нефтепродуктами (керосином)	104
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	111
ПРИЛОЖЕНИЕ	112

ПРЕДИСЛОВИЕ

Представлены методические указания студентам по выполнению лабораторных работ.

Выполнение обучающимися лабораторных работ составляет неотъемлемую часть процесса закрепления практических компетенций, а именно владением навыками проведения измерения физических параметров (величин) для дальнейшего их применения при выполнении лабораторных и расчетно-графических работ по дисциплинам профессиональной подготовки.

В данное издание входят лабораторные работы, охватывающие основные понятия и законы механики, молекулярной физики и термодинамики. В описание лабораторной работы включены цель и задачи, краткие теоретические сведения, инструкция-алгоритм выполнения требуемых измерений, примерные рекомендации по статистической обработке полученных результатов и определению погрешностей, измеряемых или рассчитываемых величин.

Предназначено для студентов, обучающихся на инженерно-технических направлениях.

ПАМЯТКА СТУДЕНТУ

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ОБЩЕМУ КУРСУ ФИЗИКИ

До начала работ каждый студент ДОЛЖЕН внимательно ознакомиться с настоящими правилами и расписаться в журнале учета инструктажа по технике безопасности.

Студент ОБЯЗАН выполнять следующие правила:

– перед включением лабораторного комплекса в сеть 220 В проверить, чтобы тумблер включения был в положении ВЫКЛ;

– запрещается касаться токоведущих частей схемы металлическими предметами, работать мокрыми руками;

– запрещается без разрешения преподавателя включать лабораторные стенды в сеть 220В и подавать напряжение на схему;

– запрещается перемещать лабораторные стенды с одного стола на другой или вскрывать их;

– необходимо отключать питание по завершению измерений.

По всем вопросам обращайтесь к преподавателю или лаборанту. За порчу оборудования студенты несут материальную ответственность.

ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

При выполнении лабораторных работ по физике может возникнуть опасность поражения работающего электрическим током, поэтому каждый студент должен знать, чем опасен электрический ток, и какие меры безопасности необходимо соблюдать при работе с электрооборудованием. Кроме этого, необходимо знать правила оказания первой доврачебной помощи пострадавшим от действия электрического тока [5; 9].

Прежде всего, надо помнить, что действующими считаются электроустановки, содержащие в себе источники электроэнергии, которые находятся под напряжением полностью или частично, а также те, на которые в любой момент может быть подано напряжение. По условиям электробезопасности электроустановки разделяются на электроустановки напряжением до 1000 В включительно и электроустановки напряжением выше 1000 В. Для работы на электроустановках напряжением свыше 1000 В необходим специальный допуск.

В лабораторном физическом практикуме используются, как правило, электроустановки напряжением до 1000 В. Допуск студентов к работе с этими установками проводит

преподаватель, ведущий занятия. В каждой учебной лаборатории обязательно проводится инструктаж по технике безопасности.

Приступать к выполнению лабораторной работы, подавать напряжение на приборы, разрешается только после проверки схемы преподавателем.

ОПАСНОСТЬ ПОРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

Опасность поражения человека электрическим током может возникнуть:

- а) при нарушении правил эксплуатации электроприборов;
- б) при случайном прикосновении к токоведущим частям или металлическим нетокведущим частям, оказавшимся под напряжением из-за неисправности изоляции или по другим причинам.

Опасность электрического тока состоит в том, что электричество не воздействует на органы чувств человека до момента соприкосновения с объектами, находящимися под напряжением. Поэтому человек не может почувствовать наличие напряжения и предвидеть грозящую ему опасность.

ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

Электрический ток, проходя через тело человека, производит термическое, химическое и биологическое воздействие.

Факторы, влияющие на исход поражения электрическим током.

1. Термическое действие тока проявляется в ожогах отдельных участков тела, нагреве до высокой температуры кровеносных сосудов, нервов, сердца, мозга и других органов, находящихся на пути тока, что вызывает в них серьезные функциональные расстройства.

2. Электрические ожоги могут быть вызваны действием электрической дуги, когда её пламя непосредственно воздействует на наружные ткани тела. Могут быть ожоги, вызванные непосредственным протеканием электрического тока, особенно в месте контакта кожи с токоведущими частями.

3. Металлизация кожи может возникнуть в результате проникновения частичек металла в её верхние слои, например, при горении электрической дуги.

4. Химическое действие тока ведет к электролизу крови и других, содержащихся в организме, растворов, что приводит к изменению их химического состава и, следовательно, к нарушению их функций.

5. Биологическое действие тока проявляется в опасном возбуждении живых клеток организма, в частности, нервных клеток и всей нервной системы. Такое возбуждение может сопровождаться судорогами, явлениями паралича. В ряде случаев возможен паралич дыхательного аппарата (паралич мышц грудной клетки) и паралич сердца, что может привести к смертельному исходу.

По результатам действия электрического тока на человека выделяют два основных вида поражения:

- электрическая травма;
- электрический удар.

Характерными признаками электрических травм являются:

- электрические ожоги;
- электрические знаки (пятна серого или бледно-жёлтого цвета на коже);
- воспаление наружных оболочек глаз в результате воздействия электрической дуги;
- металлизация кожи;
- механические повреждения вследствие резких непроизвольных судорожных сокращений мышц под действием тока, проходящего через тело человека.

Электрические удары в зависимости от исхода поражения разделяют условно на пять степеней:

- I – судорожное, едва ощутимое сокращение мышц;
- II – судорожное сокращение мышц без потери сознания;
- III – судорожное сокращение мышц с потерей сознания, но с сохранением дыхания и работой сердца;
- IV – потеря сознания и нарушение сердечной деятельности или дыхания;
- V – клиническая смерть, т. е. отсутствие дыхания и кровообращения (продолжительность – 4-6 мин).

Основными факторами, влияющими на исход поражения электрическим током, являются: величина тока, длительность прохождения тока, путь тока через тело человека, а также индивидуальные свойства человека.

Если человек находится в состоянии опьянения, нервного возбуждения, имеет нарушение кожных покровов, поражение током будет более тяжёлым.

Действие электрического тока на организм оценивают следующим образом:

- 0,5-1,5 мА – ощутимый ток;
- 10-15 мА – неотпускающий ток;
- 20-70 мА – поражает органы дыхания и сердечнососудистую систему;
- более 100 мА – ток, приводящий к смерти, в результате действия которого наступает фибрилляция сердца, заключающаяся в беспорядочном хаотическом сокращении и расслаблении мышечных волокон сердца.

МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИБОРОВ И АППАРАТОВ

Правильное пользование электроэнергией в сухих помещениях с деревянными или другими, не проводящими электрический ток, полами практически исключает случаи поражения электрическим током [5; 9]. При этом следует соблюдать одно основное условие: все электроприборы должны быть удалены от труб отопления, водопровода и других металлических коммуникаций настолько, чтобы исключалось одновременное прикосновение

к этим коммуникациям и к прибору, шнуру или розетке (отдаленность розетки – 0,5 м, электроприборов – 1,5 м от металлических коммуникаций).

Одним из основных условий электробезопасности является сохранение исправного состояния изоляции электропроводки, электроприборов и аппаратов, выключателей, штепсельных разъёмов (розетка и вилка), ламповых патронов, светильников, а также шнуров, с помощью которых включается в сеть электроприборы. Категорически запрещается пользоваться неисправными приборами и аппаратами.

Внешним признаком неисправности электрической проводки или электроприбора является искрение, перегрев деталей штепсельного разъёма, запах подгоревшей изоляции (пластмасса, резина).

Если при прикосновении к корпусу электроприбора «бьет током», то это значит, что данный предмет находится под напряжением. В этом случае следует немедленно отключить прибор от сети, обязательно предупредить окружающих об опасности, сообщить об этом преподавателю или лаборанту.

Во избежание порчи изоляции проводов, подводящих электроэнергию к электрическим приборам, следует тщательно оберегать электропроводку от повреждений:

- вынимать вилку из розетки удерживая ее только за корпус;
- не подвешивать провод на гвоздях и других предметах;
- не завязывать или перекручивать провода;
- не закладывать провода на газовые и водопроводные трубы, за батареи отопления;
- не вешать что-либо на провода;
- не допускать защемления проводов дверями, форточками и т. п., что может привести к повреждению изоляции.

Электронагревательные приборы следует заполнять водой только отключенными от сети.

Если электрический прибор или аппарат имеет шнур с двумя разъёмами, подключать шнур необходимо сначала к прибору, затем к сети. Выключение производится в обратной последовательности – из сети, а затем от электроприборов.

Категорически запрещается включать в сеть электроприборы без штепсельных вилок.

Необходимо обращать внимание на состояние изоляции гибких проводов и шнуров, питающих электроприборы и аппараты. На сгибах у вилок и в местах, где шнур входит в электроприбор, наиболее вероятны повреждения изоляции. Прикосновение к оголенному проводу в этих местах приводит к поражению электрическим током.

Вне помещения опасность поражения электрическим током может возникнуть при перемещении по земле вблизи замыкания токоведущих частей на землю.

К любым проводам, лежащим на земле, нельзя подходить ближе, чем на 5-8 м, поскольку в этом случае можно попасть под «шаговое напряжение». В случае попадания в эту зону, из нее нужно выходить прыжками на одной ноге.

При коротком замыкании (иногда по другим причинам) провода, подводящие электрическую энергию к приборам, к лабораторной установке в целом, могут загореться. В этом случае категорически запрещается применять воду для тушения. Необходимо пользоваться порошковыми огнетушителями.

ПЕРВАЯ ДОВРАЧЕБНАЯ ПОМОЩЬ ПОСТРАДАВШИМ ОТ ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Первая доврачебная помощь – это комплекс мероприятий, направленных на восстановление или сохранение жизни и здоровья пострадавшего, осуществляемых не медицинскими работниками. Одним из важнейших положений оказания первой помощи является её срочность – чем быстрее она оказана, тем больше надежды на благоприятный исход.

Оказывать помощь необходимо в следующей последовательности:

- a) устранить воздействие на организм электрического тока;
- b) определить характер и тяжесть травмы;
- c) восстановить проходимость дыхательных путей;
- d) поддерживать основные жизненные функции пострадавшего до прибытия медицинского работника;
- e) вызвать скорую медицинскую помощь или врача.

Спасение пострадавшего в большинстве случаев зависит от быстроты освобождения его от действия электрического тока. Прикосновение к токоведущим частям, находящимся под напряжением, вызывает в большинстве случаев непроизвольное судорожное сокращение мышц. Если пострадавший держит провод руками, его пальцы так сильно сжимаются, что высвободить провод из его рук становится невозможным. Поэтому, прежде всего, необходимо немедленно отключить ту часть электроустановки, которой касается пострадавший.

Отключение производится с помощью выключателя, разъёма штепсельного соединения, автоматического выключателя в распределительном щите.

После освобождения человека от действия электрического тока при необходимости выполняют искусственное дыхание и непрямой массаж сердца.

Существует два способа искусственного дыхания «рот в рот» и «рот в нос». Для выполнения искусственного дыхания необходимо очистить полость рта пострадавшего и запрокинуть его голову. На нижнюю часть грудины наложить основание ладони и, усиливая давление второй руки, произвести 4-6 надавливаний, после чего сделать 2-3 глубоких вдыхания воздуха в рот или в нос. Надавливание следует производить рывком. Искусственное дыхание выполняют до приезда врача. Заключение о целесообразности или бесполезности мероприятий по оживлению пострадавшего имеет право дать только врач.

НЕКОТОРЫЕ СОВЕТЫ И УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

При выполнении лабораторных работ рекомендуется выполнять некоторые советы и указания [3; 5; 9]:

1. Извлечь из экспериментальной работы максимальную пользу можно, только относясь к каждой задаче как к небольшой самостоятельной научной работе. Объем навыков и сведений, которые будут получены студентом при выполнении работы, определяется главным образом не описанием, а подходом студента к выполнению работы. В результате выполнения лабораторных работ, студент должен овладеть умением применять теоретические знания для описания работы экспериментальной установки, правильно выполнить эксперимент и избегать ошибок при измерении физических величин.

2. Приступая к выполнению лабораторной работы, прежде всего, необходимо внимательно изучить общие положения, приведённые в инструкции. Если после этого теория и сущность изучаемого явления остаются недостаточно ясными, то надо обратиться к конспекту лекций или учебнику. Затем необходимо не менее внимательно ознакомиться с приборами, используемыми в работе, т. е. с их устройством, принципом действия, а также с планом проведения измерений, которые предстоит сделать.

3. Не следует приступать к работе, если в ней что-либо остается неясным. Успешное выполнение лабораторной работы всегда требует значительной доли навыка и умения обращаться с приборами. При отсутствии навыков, очень часто работа кажется очень трудной, отнимает много времени, а результаты измерений часто бывают совершенно ошибочными. Этим обстоятельством не следует бояться, так как умение производить точные и правильные измерения приходит не сразу и требует значительной работы.

4. Для получения верных результатов, необходимо обращать внимание на правильную установку и расположение приборов, в соответствии с их инструкцией по эксплуатации. Эту часть работы надо делать особенно тщательно, так как можно получить ошибочные результаты измерений, если установка прибора была сделана неправильно. Пример: для того, чтобы получить правильное значение массы тела при взвешивании, необходимо предварительно уравновесить весы.

5. Работу с незнакомыми приборами можно начинать, лишь прочтя до конца инструкцию по эксплуатации, обратив внимание на все необходимые предосторожности. Не следует вскрывать приборы, прикасаться пальцами к оптическим поверхностям и тонким деталям, переносить с места на место гальванометры и весы в неарретированном состоянии. С оборудованием необходимо обращаться – БЕРЕЖНО.

6. Измерения должны выполняться с максимальной точностью. В точности измерений большую роль играет внимание и сосредоточенность экспериментатора, умение выбрать разумный план измерений и спокойно, удобно организовать измерение.

7. Записи, выполняемые в лаборатории, требуют аккуратности и полноты. Записи результатов измерений выполняются на отдельном листе, который называется протоколом измерений. В протоколе указывается название работы, дата выполнения работы. Записи

измерений лучше всего вести в виде таблиц с указанием единиц измерения величин. Из записей должно быть совершенно ясно, в какой последовательности производились измерения. В протоколе необходимо указывать цену деления используемых приборов.

8. При обработке результатов измерений следует тщательно обдумывать возможные источники ошибок. Промежуточные вычисления должны делаться с точностью, несколько превосходящей точность измерений, чтобы избежать внесения неоправданных ошибок, связанных с вычислениями. При вычислениях обычно сохраняют на один знак больше, чем будет оставлено в окончательном ответе.

9. Сравнивая результаты с данными таблиц, не следует при несовпадении значений сразу считать свои данные ошибочными. Нужно тщательно продумать методику измерений, стараясь найти причины расхождения. При сдаче работы с «плохими» результатами студент, после обсуждения с преподавателем, часто получает значительно больше пользы, чем при наличии «хороших» результатов.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты измерений физических величин необходимо записывать и обрабатывать определённым образом. Разумная схема записи предупреждает грубые ошибки при выполнении измерений, экономит время, позволяет по записи быстро понять смысл работы. Также существенным является умение оценивать погрешность измерений [1; 2; 9; 17].

СОСТАВЛЕНИЕ ТАБЛИЦ, РАСЧЁТЫ

Результаты измерений рекомендуется записывать в таблицы, которые оформляются заранее, накануне выполнения работы. Оформление таблиц выполняется следующим образом:

1. Над таблицей записывается её номер и название.

2. Каждый столбец (или строка) таблицы должны включать обозначение физической величины и единицу её измерения. Значения физических величин записывают в тех единицах, в которых производятся измерения.

3. Обычно в первых столбцах записывают величины, играющие роль аргумента (температура, время и т. д.), а в следующих столбцах – величины, играющие роль функции (сопротивление, ускорение и т. д.).

После завершения измерений выполняются расчёты. Для каждой рассчитываемой величины сначала записывается расчётная формула, затем переписывается та же формула с подставленными числовыми значениями измеренных и известных физических величин, и, наконец, приводится результат вычислений. Таким образом, рекомендуется придерживаться схемы: расчётная формула – арифметическое выражение – результат расчёта. Данные в расчётные формулы необходимо подставлять в СИ. Сами расчёты выполняются с помощью калькулятора или на компьютере. Окончательный ответ следует записывать как произведение десятичной дроби с одной значащей цифрой перед запятой на соответствующую степень десяти. Например, вместо 3520 надо записать $3,52 \cdot 10^3$, а вместо 0,0000129 записать $1,29 \cdot 10^{-5}$.

ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ

Очень важным методом обработки результатов опыта является представление их в виде графика [10; 14; 15]. Графики дают менее точное, но более наглядное представление о результатах измерений и функциональному виду физических параметров процесса или явления. Если известна теоретическая функциональная зависимость измеряемой физической величины от задаваемой в эксперименте, то по строящемуся графику непосредственно во время эксперимента удобно следить за его ходом и выявлять промахи.

Графическое представление результатов эксперимента полезно, когда устанавливают вид функциональной связи между величинами; определяют среднее значение при известной функциональной связи; изучают связь между величинами, которую трудно представить в виде формулы (аналитически); наконец, когда сравнивают теорию с экспериментом.

Графики строят обычно в прямоугольной (декартовой) системе координат. Координатные оси заканчиваются стрелками, показывающими направления возрастания отложенных по осям величин. У концов осей пишутся условные обозначения этих величин с указанием единиц измерения. По горизонтальной оси (абсцисс) принято откладывать независимую переменную x , т. е. аргумент, в произвольно выбранном масштабе, а по вертикальной оси (ординат) – также в произвольном масштабе – определяемую в опыте величину y . Полученные на плоскости точки соединяют между собой плавной кривой. Надо иметь в виду, что в результате измерений величин x и y мы получаем не точку, а область со сторонами $2\Delta x$ и $2\Delta y$. Поэтому проводить линию графика надо через эти области, при этом сами точки необязательно точно ложатся на плавную кривую (рис. 1).

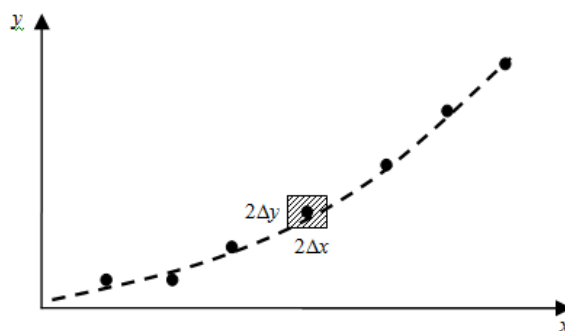


Рис. 1. Графическое представление результатов эксперимента

При построении графиков необходимо придерживаться следующих правил:

1. Графики выполняют на миллиметровой бумаге (бумаге, имеющей координатную сетку), размером не более тетрадного листа.

2. На бумагу, прежде всего, наносятся координатные оси. Затем выбирают масштаб для координатных осей (отдельно для каждой оси). Масштаб выбирают таким образом, чтобы график не был сжат или растянут вдоль одной из осей. Он должен занимать все поле чертежа. За единицу масштаба разумно принимать числа, соответствующие 1, 2, 5 единицам откладываемой величины, или кратным и дольным им. Если необходимо отложить по оси

«длинные», многозначные числа, то множитель, указывающий порядок числа, лучше вынести в запись обозначения величины.

При этом не обязательно начало координат должно совпадать с нулевым значением величины. Масштаб по осям чаще всего разный, т. к. откладываются разные величины. Чтобы определить масштаб, обычно берут разность между округленными значениями максимальной и минимальной величин и делят на число клеток. График строят так, чтобы он занимал все представленную ему площадь.

3. По оси ординат (оси y) откладывают значение функции, по оси абсцисс (оси x) значение аргумента. Начало отсчёта не обязательно совмещать с нулем. На осях координат наносят метки (в виде чёрточек) через равные промежутки (как правило, через один сантиметр). Внизу под каждой меткой в соответствии с выбранным масштабом пишут соответствующее ей числовое значение. Полученные в эксперименте числовые значения величин на осях координат откладывать нельзя! Около осей координат (вверху слева – для оси y , внизу справа – для оси x) необходимо написать обозначения величин и единицы их измерения. Экспериментальные точки наносятся на чертеже в виде условных знаков (точки, кружочки, квадратики, крестики и т. д.).

4. После нанесения экспериментальных точек проводится предсказанная теорией плавная кривая или прямая. Экспериментальные точки вследствие погрешностей измерений не ложатся на гладкие кривые или прямые линии зависимостей одних физических величин от других, а группируются вокруг них случайным образом. Поэтому не следует соединять соседние экспериментальные точки на графике отрезками прямой и получать, таким образом, некоторую ломаную линию. Гладкие кривые или прямые линии через соответствующие экспериментальные точки проводят с помощью линейки или лекала. Линию на графике проводят так, чтобы она лежала как можно ближе к экспериментальным точкам, и чтобы по обе её стороны оказывалось приблизительно одинаковое количество точек.

5. Если имеется несколько кривых, то каждой кривой присваивается номер, а на свободном поле чертежа указывают название, обозначение, соответствующее этому номеру. Каждый график должен иметь номер и наименование, которое отражает основное содержание графика. представления результатов эксперимента:

– график строится для того, чтобы сравнить предсказанную теорию с результатами эксперимента;

– график строится для того, чтобы из эксперимента определить неизвестный параметр (тангенс угла наклона прямой, показатель экспоненты и т. д.);

– график представляет собой градуировочную кривую.

Рассмотрим случай сравнения предсказанной теории с экспериментом на примере исследования зависимости сопротивления металлов от температуры (рис. 2).

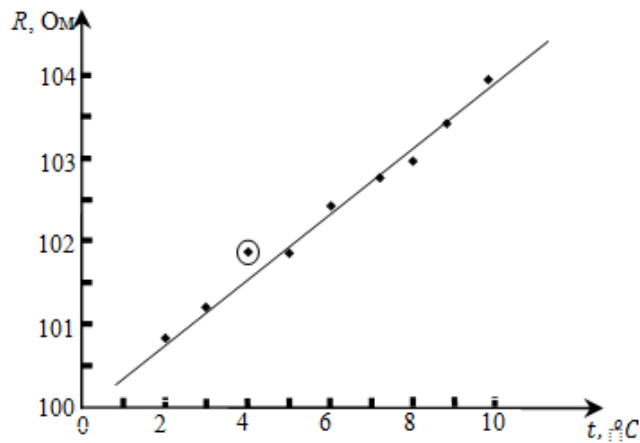


Рис. 2. Пример графического представления результатов эксперимента

Результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты измерений

$t, ^\circ\text{C}$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R, \text{Ом}$	100,82	101,10	101,86	101,84	102,42	102,75	102,96	103,43	103,84

Масштаб графика выбран так, чтобы получить примерно равные размеры по длине и высоте. Экспериментальные точки отмечены ромбиками (\diamond). Теоретическая зависимость сопротивления металлов от температуры описывается уравнением:

$$R = R_0(1 + \alpha t).$$

Это означает, что график должен иметь вид прямой линии.

Рассмотрение результатов показывает, что при температуре 4°C величина сопротивления, по-видимому, измерена неверно. Эту точку следует измерить заново или не включать в обработку результатов. Остальные точки достаточно хорошо ложатся на прямую, изображённую на рисунке 1. Прямая проведена так, что она лежит как можно ближе к точкам, и по обе её стороны оказалось приблизительно равное их количество. Теория совпала с экспериментом.

Рассмотрим случай построения графика для определения неизвестного параметра. Определим ускорение тела, которое движется равноускоренно. Результаты измерений представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты измерений и вычислений

$S, \text{см}$	20	25	30	35	40	45
$t, \text{с}$	2,02	2,20	2,45	2,70	2,87	2,97
$t^2/2, \text{с}^2$	2,04	2,43	3,00	3,65	4,12	4,41

Теоретическая зависимость не является прямой линией, так как зависимость пути S тела от времени t (при условии, что начальная скорость тела $v_0 = 0$) описывается уравнением:

$$S = \frac{at^2}{2}$$

Если изобразить результаты опыта на графике, по осям которого отложены S и t , то точки расположатся вокруг параболы, провести которую на глаз очень трудно. Поэтому лучше по оси абсцисс (оси x) отложить не время t , а $t^2/2$; а по оси ординат (оси y) – путь S . При этом точки расположатся около прямой линии, которую нетрудно провести на глаз с достаточной точностью (рис. 3).

Определим ускорение a , с которым двигалось тело. Если исходить из формулы

$$a = \frac{S}{t^2/2}$$

то достаточно взять из таблицы любую пару значений S и t . Однако каждое измерение проводилось с какой-то погрешностью, поэтому искомое значение ускорения a должно учитывать не какое-то одно измерение, а всю совокупность данных. Это можно сделать с помощью графика. Как следует из формулы, ускорение численно равно тангенсу угла наклона прямой. Выберем произвольно на графике значение $t_1^2/2$ и найдем соответствующее ему значение S_1 .

Затем также произвольно выбираем $t_2^2/2$ и находим S_2 . Из полученного прямоугольного треугольника следует, что

$$a = \operatorname{tg} \alpha = \frac{S_2 - S_1}{\frac{t_2^2}{2} - \frac{t_1^2}{2}}$$

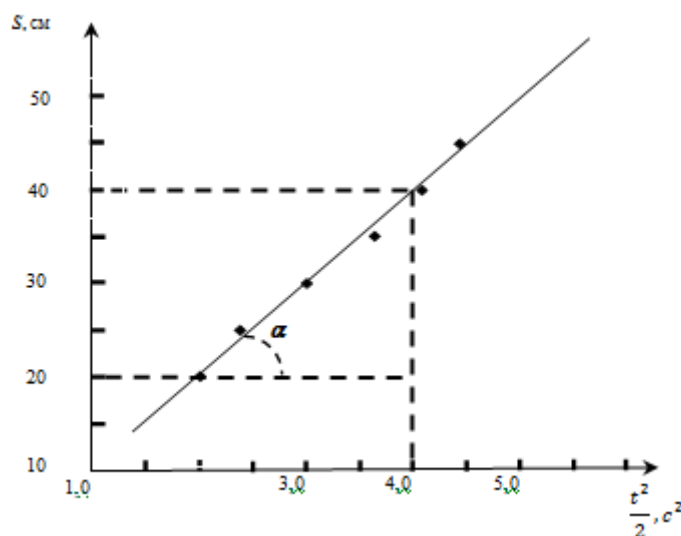


Рис. 3. Пример графического представления результатов эксперимента

Для графика, изображенного на рисунке 2,

$$\frac{t_1^2}{2} = 2 \text{ с}^2, S_1 = 19 \text{ см}, \frac{t_2^2}{2} = 4 \text{ с}^2, S_2 = 40 \text{ см}, a = \frac{40-19}{4-2} = 10,5 \frac{\text{см}}{\text{с}^2}.$$

Метод определения физических величин по тангенсу угла наклона прямой очень часто используют при проведении экспериментов. Обратим внимание на то, что нельзя измерять угол транспортиром, а затем определять тангенс угла, так как в этом случае значение величины будет зависеть от выбранного масштаба.

Дополнительно приведем несколько графиков, которые построены «неправильно» (рис. 4) и «правильно» (рис. 5), с учетом следующих требований:

– экспериментальные точки не должны сливаться друг с другом (пример неправильного графика показан на рис. 4, а);

– нельзя также соседние точки графика соединять отрезками прямой, образующими ломаную линию (рис. 4, б); это может означать, что одна величина относительно другой изменяется скачкообразно, что маловероятно.

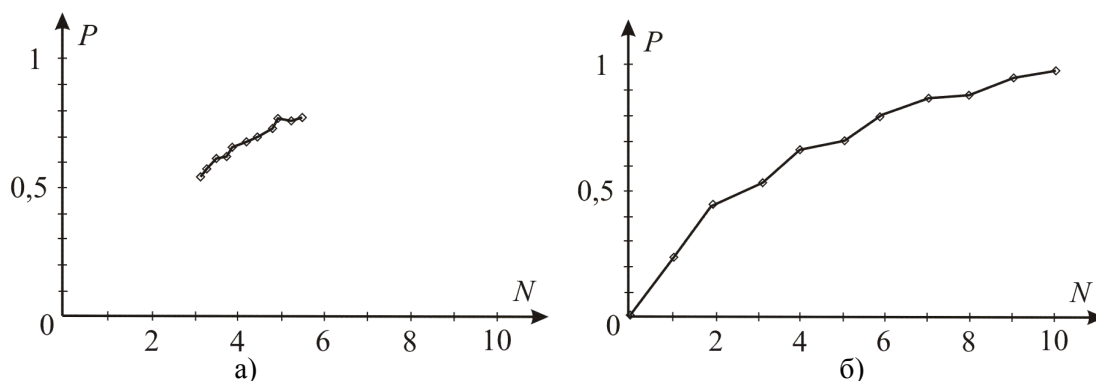


Рис. 4. Неправильное построение графика по экспериментальным точкам

Если наименьшие значения величин, откладываемых по осям, лежат далеко от нуля, то соответствующие им деления на осях откладываются вблизи точки пересечения осей координат, которая в этом случае не совпадает с нулевым значением измеренной величины. Начало координат не обозначается.

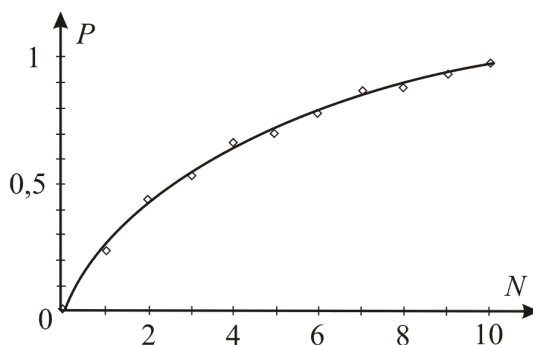


Рис. 5. Правильное построение графика по экспериментальным точкам

Как уже отмечалось, не все точки графика ложатся на изображаемую кривую. Поэтому следует проводить плавную кривую так, чтобы по обе стороны от нее располагалось примерно одинаковое число точек, как это показано на рисунке 5.

ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТОВ

Правильно оформленная лабораторная работа – это отчёт, основу которого составляют три части: конспект, основная и итоговая. В конспект входят:

1. Титульный лист, на котором указывается название лабораторной работы, фамилия и группа студента и т. д.

2. Текст инструкции к лабораторной работе.

3. Ответы на контрольные вопросы и задания подготовки к работе, приведённые в инструкции. Ответы представляются в письменном виде.

В основной части должны содержаться результаты всех прямых измерений в виде таблиц (протокол измерений) и расчёты. Протокол измерений подписывается преподавателем.

Оформление расчётов физических величин рекомендуется по схеме: алгебраическая формула – арифметическое выражение – результат расчёта. В случае необходимости результаты представляют в графическом виде на миллиметровой бумаге (бумаге с координатной сеткой).

Затем, если это возможно, рассчитывается среднеарифметическое значение определяемой величины, оценивается полная ошибка проведённого измерения.

В итоговой части приводятся:

1. Запись окончательного результата в стандартной форме.

Пример: $E = (2,10 \pm 0,12) \cdot 10^{11} \text{Н/м}^2$.

2. Ответы на контрольные вопросы и задания по защите работы, приведённые в инструкции. Ответы представляются в письменном виде

3. Вывод по результатам работы, в котором оценивается достоверность полученного результата, т. е. полученные значения сравниваются с табличными, проверяется их физическая разумность. В случае недостоверности полученного результата объясняются причины. Если результаты эксперимента оформлены в виде графика, то необходимо проверить, соответствует ли полученный график теоретической зависимости.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет должен выполняться на бумаге стандартного размера (формат А4). Поля оставлять по обеим сторонам текста. Форма титульного листа приведена ниже. Весь материал отчета должен иметь четкую рубрикацию. Каждый раздел снабжается заголовком. Пример титульного листа в Приложении.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. К очередному занятию студент обязан подготовиться дома: необходимо прочитать описание работы, изучить теоретический материал по рекомендуемой литературе. Краткий конспект лабораторной работы должен содержать:

а) название работы;

б) цель работы;

в) задачи;

г) перечень применяемых для проведения измерений приборов и оборудования, их назначение и основные характеристики;

д) формулы для вычисления значений расчетных физических величин (с обязательным указанием (расшифровкой) буквенных обозначений);

е) определения физических величин, подлежащих измерению, и единицы их измерения;

ж) краткий ход выполнения работы;

з) примерное описание статистической обработки полученных результатов и определения их достоверности.

2. Перед выполнением лабораторной работы студент обязан получить допуск у преподавателя для проведения измерений на оборудовании.

3. Для закрепления навыков проведения измерений в ходе выполнения работы необходимо делать заметки и записывать возникшие вопросы для дальнейшего обсуждения с преподавателем.

4. По завершению выполнения лабораторной работы студент не покидает лабораторию, пока данные его эксперимента не будут одобрены преподавателем, а конспект с данными измерений и обработанными результатами не будет подписан преподавателем.

5. Выполненные лабораторные работы защищаются студентом, в виде представления оформленного отчета, у преподавателя. Отчет по выполненной лабораторной работе должен содержать таблицы с занесенными в них измеренными значениями величин, статистическую обработку результатов серии измерений, расчет погрешности определения значения физической величины (параметра), краткие ответы на контрольные вопросы. При защите лабораторной работы студент должен легко отвечать на контрольные вопросы, демонстрировать глубокое знание материала, делать выводы по результатам выполненной работы, справляться с вопросами и задачами по данной теме.

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Наука, по словам Д.И. Менделеева, начинается с тех пор, как начинают измерять. Изучение окружающего мира обязательно связано с измерениями. Большинство физических законов представляются в виде формул, связывающих физические величины [3; 4; 12]. Физические величины – это характеристики процессов или свойств тел, которые могут быть измерены тем или иным методом. Измерить физическую величину – это значит сравнить её с другой однородной величиной, принятой за единицу измерения. К выбору единиц измерения физических величин можно подойти двумя способами:

1) для каждой физической величины выбирать единицу измерения произвольно, независимо от других величин;

2) произвольно выбрать единицы измерения лишь для некоторых (основных) величин. Для всех остальных (производных) величин установить их через основные единицы с помощью физических законов (формул).

Именно второй путь оказался приемлем как для науки, так и для практики. Совокупность всех основных и производных единиц измерения физических величин образует систему единиц. В России принята Международная система единиц – СИ (система интернациональная). Основными в этой системе являются семь следующих физических величин и единиц их измерения (табл. 3).

В качестве дополнительных в СИ взяты две единицы: радиан (рад); – единица измерения плоского угла φ ; стерадиан (ср) – единица измерения телесного угла Ω . В Международной системе единиц используются множители и приставки для образования кратных и дольных единиц (табл. 4).

Пользуясь формулами, можно любую производную физическую величину выразить через основные величины, а единицу её измерения – через основные единицы измерения.

Таблица 3

Основные единицы измерений

Наименование физической величины	Условное обозначение	Наименование единицы измерения	Сокращенное обозначение
Длина	l	метр	м
Масса	m	килограмм	кг
Время	t	секунда	с
Термодинамическая температура	T	кельвин	К
Сила электрического тока	I	ампер	А
Сила света	J	кандела	кд
Количество вещества	ν	моль	моль

Выражение, устанавливающее связь единицы измерения данной физической величины с основными единицами системы, называется размерностью этой величины.

Таблица 4

Множители и приставки для образования кратных и дольных единиц

Множитель	Обозначение	Наименование	Множитель	Обозначение	Наименование
10^{-1}	д	деци	10^1	да	дека
10^{-2}	с	санти	10^2	г	гекто
10^{-3}	м	милли	10^3	к	кило
10^{-6}	мк	микро	10^6	М	мега
10^{-9}	н	нано	10^9	Г	гига
10^{-12}	п	пико	10^{12}	Т	тера
10^{-15}	ф	фемто	10^{15}	П	пета
10^{-18}	а	атто	10^{18}	Э	экса

Например, установим размерность силы, пользуясь основными единицами. По второму закону Ньютона сила определяется следующим выражением:

$$F = ma,$$

где m – масса тела, a – ускорение.

Единицы измерения данных величин:

$$[m] = \text{кг}; [a] = \text{м/с}^2.$$

Следовательно,

$$[F] = [m] \cdot [a] = \text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2.$$

Это выражение представляет размерность силы, а единица измерения силы получила название «ньютон», т. е. $[F] = 1\text{Н}$.

Равносильным является выражение

$$[F] = \frac{ml}{t^2} = mlt^{-2},$$

в котором m, l и t обозначения принятые для основных физических величин.

Или, $A = F \cdot S$. Тогда $[A] = [F] \cdot [S] = 1\text{Н} \cdot 1\text{м} = \text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2 \cdot \text{м}$ размерность работы. Единица измерения работы получила название «джоуль», т. е. $[A] = 1\text{Дж}$.

При написании любых физических равенств необходимо, чтобы размерности левой и правой частей равенства были одинаковыми. Это даёт возможность устанавливать правильность написания различных соотношений методом размерностей и даже выводить формулы с точностью до безразмерного коэффициента.

ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА ПРИБЛИЖЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

1. Число называется точным или приближенным в зависимости от того, точное или приближенное значение величины оно выражает. Числа, полученные в результате измерения величин, как правило, приближенные.

2. По правилу, предложенному академиком А.Н. Крыловым, приближенный результат следует записывать так, чтобы последняя его цифра указывала на точность; все цифры, кроме последней, должны быть верными, и лишь в последней (сомнительной) допустима ошибка не более, чем на одну единицу. Например, если длина отрезка $l \approx 10,35$ м, то это означает, что она измерена с точностью до 0,01 м (или 1 см). Если $a \approx 3,1542$, то это означает, что число a задано с точностью до 0,0001. (На практике, нередко, при записи приближенных чисел вместо знака « \approx » пишут знак « $=$ »).

3. Значащими цифрами приближенного числа, записанного в десятичной форме, называются все его цифры, начиная с первой слева, отличной от нуля.

Например, приближенное число 3,402 имеет четыре значащие цифры; число 0,034 – две значащие цифры.

4. В случае чисел с нулями на конце, например 125 000, возникает вопрос о том, для чего служат нули - для обозначения значащих цифр или для определения разряда остальных цифр. Чтобы избежать путаницы, договоримся о следующем:

– если в числе 125 000 шесть значащих цифр, то его надо записывать именно так, т. е. запись означает, что оно задано с точностью до 1;

– запись $1,25 \cdot 10^5$ означает, что в данном числе три значащих цифры, т. е. оно задано с точностью до 1000;

– если в числе 125 000 четыре значащих цифры, то запись будет такой: $1,250 \cdot 10^5$, т. е. число задано с точностью до 100.

5. При округлении данного числа с точностью до n-го разряда последняя сохраняемая цифра (цифра n-го разряда) не меняется, если цифра, следующая за ней, меньше 5, и увеличивается на 1, если цифра, следующая за ней, не меньше 5.

6. При сложении и вычитании приближенных чисел следует сохранять столько десятичных знаков, сколько их в приближенном числе, имеющем наименьшее число десятичных знаков (т. е. в числе с наибольшей абсолютной погрешностью). Именно этой наибольшей погрешностью и определяется погрешность суммы или разности.

Пример.

Найти сумму приближенных чисел 2,38035; 0,0342; 51,247018 и 5,3

$$\begin{array}{r} 2,380350 \\ + 0,034200 \\ + 5,300000 \\ + 51,247018 \\ \hline 58,961568 \approx 59,0 \end{array}$$

7. Более рационально поступать так: все приближенные числа округляют с точностью на 1 десятичный знак больше, чем в слагаемом с наименьшим числом десятичных знаков, складывают их и результат округляют в соответствии с правилом 5, т. е.

$$\begin{array}{r} 2,38 \\ + 0,03 \\ + 51,25 \\ + 5,30 \\ \hline 58,96 \approx 59,0 \end{array}$$

8. При умножении и делении приближенных чисел в результате следует сохранить столько значащих цифр, сколько их содержит приближенное число, имеющее наименьшее количество значащих цифр. На практике, чтобы не делать лишней работы, поступают так: данные числа округляют с точностью на один порядок выше, чем требует правило 5. Производят с ними действия умножения или деления и результат округляют в соответствии с правилом 5.

9. При возведении приближенных чисел в степень в результате следует сохранить столько значащих цифр, сколько их имеет основание степени.

10. При извлечении корней в результате следует оставить столько значащих цифр, сколько их содержится в подкоренном выражении.

11. Если следует выполнить различные действия над приближенными числами, заданными с разной степенью точности, то предварительно их все округляют, сохраняя лишь одну запасную цифру по сравнению с тем числом, которое задано с наименьшей точностью. Аналогично округляются результаты всех промежуточных действий. В конечном результате запасная цифра отбрасывается по правилам округления.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ

Выполнение лабораторных работ связано с измерением различных величин и последующей обработкой полученных результатов [3; 5; 9; 11]. В состав средств измерений в общем случае входят:

- а) измерительные приборы (инструменты);
- б) измерительные преобразователи;
- в) меры измеряемых величин;
- г) стандартные образцы и др.

Измерительный преобразователь – это техническое средство, служащее для преобразования одной измеряемой величины в другую, более удобную в процессе обработки, передачи и хранения информации. Обычно преобразователь преобразует неэлектрическую измеряемую величину в электрическую, поскольку основу современной измерительной техники составляют электронные устройства. Частным случаем измерительного преобразователя является датчик, который производит преобразование непосредственно на объекте измерений.

Процесс любого измерения только тогда считается полностью завершенным, когда указаны абсолютная и относительная погрешности результата измерений.

Измерить физическую величину – значит определить, во сколько раз она отличается от соответствующей величины, принятой за единицу. Измерения делят на:

- прямые;
- косвенные.

Прямые измерения – измерения, при которых измеряемая величина определяется непосредственно при помощи измерительного прибора.

Пример:

- 1) линейный размер тела измеряют при помощи линейки, штангенциркуля или микрометра;
- 2) напряжение измеряют вольтметром, силу тока – амперметром.

Косвенные измерения – измерения, при которых измеряемая величина определяется (рассчитывается) по результатам прямых измерений.

Примеры:

- 1) плотность твердого тела вычисляют по измеренной массе и геометрическим размерам;
- 2) сопротивление проводника вычисляют по измеренным силе тока и напряжению.

Никакие измерения нельзя выполнить абсолютно точно. Любое измерение всегда содержит ошибку (погрешность). Это обусловлено отсутствием идеально точных приборов, несовершенством наших органов чувств, несовершенством методики измерений и т. д.

Ошибки, возникающие при измерениях, условно делят на следующие типы:

1. Грубые ошибки (промахи). Они обусловлены недостатком внимания экспериментатора, неправильной записью результата и т. д. В случае обнаружения грубой

ошибки результат измерения отбрасывают. Чтобы избежать промахи, измерения повторяют несколько раз.

2. Систематические ошибки. Математических формул, позволяющих определить систематические ошибки, не существует. Пределы, в которых может быть заключена систематическая ошибка, иногда указываются на приборах.

Пример:

1) на микрометре указана точность измерения – 0,01 мм;

2) для электроизмерительных приборов приборная погрешность определяется классом точности (класс точности 0,5 означает, что показания правильны с точностью 0,5% от полной величины шкалы прибора).

3. Случайные ошибки обусловлены большим числом случайных факторов. Это может быть влияние температуры, неидеальная обработка поверхности, влияние внешних электрических или магнитных полей при измерении силы тока и т. д. Влияние случайных ошибок на результат измерений может быть существенно уменьшено при многократном повторении опыта.

Оценивают величину случайных ошибок методами математической статистики, которая основана на понятиях и законах теории вероятности.

При выполнении лабораторных работ по физике мы, как правило, будем выполнять небольшое количество измерений. Для небольшого количества измерений применяют метод расчёта ошибки, разработанный английским математиком В. Гассетом (свои работы он опубликовал под псевдонимом Стьюдент). В соответствии с этим методом за наиболее вероятное значение измеряемой величины принимается её среднее арифметическое значение, которое можно обозначать любым из следующих способов: $x_{\text{сред}}$, \bar{x} , $\langle x \rangle$.

Введем два понятия из теории вероятности.

Доверительная вероятность (α) – количественная оценка возможности появления того или иного события. Доверительная вероятность может принимать значения от нуля до единицы $0 \leq \alpha \leq 1$. Если $\alpha = 0$, то событие не наступает никогда (недостоверно). Если $\alpha = 1$, то событие наступает всегда (достоверно). С точки зрения теории вероятности правильное измерение – это тоже событие. Если Δx – это величина абсолютной ошибки измерений, то α покажет вероятность того, что результат измерений отличается от истинного значения на величину не большую, чем Δx . Для технических измерений обычно принимают $\alpha = 0,95$. Доверительную вероятность, выраженную в процентах, называют надёжностью и обозначают p , т. е. для технических измерений $p = 95\%$.

Доверительный интервал – интервал значений измеряемой величины, в котором с доверительной вероятностью α находится её истинное значение (рис. 6).

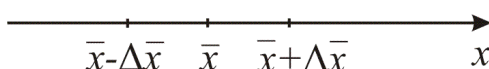


Рис. 6. Доверительный интервал

Так как за наиболее вероятное значение принимается её среднее арифметическое значение, то

$$\bar{x} - \Delta x \leq x_{\text{ист}} \leq \bar{x} + \Delta x$$

$$x_{\text{ист}} = \bar{x} \pm \Delta x.$$

Истинное значение измеряемой величины принципиально недостижимо. Модуль абсолютной погрешности измерения $|\Delta x|$ позволяет указать интервал, внутри которого находится истинное значение измеряемой величины. Длина этого интервала равна $2 \cdot |\Delta x|$

Другими словами, абсолютная погрешность показывает, насколько истинное числовое значение измеряемой величины может отличаться от результата измерения.

Качество измерения характеризует относительная погрешность

$$\varepsilon = \frac{|\Delta|}{x_{\text{изм}}},$$

которая показывает, во сколько раз модуль абсолютной погрешности $|\Delta|$ меньше измеряемой величины $x_{\text{изм}}$.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Наиболее просто найти результат и погрешность при проведении прямых измерений [2; 10]. В этом случае за результат измерений принимают показания приборов, а погрешность считают равной сумме погрешностей прибора $\Delta_{\text{приб}}$ и отсчета $\Delta_{\text{отсч}}$, т. е.

$$\Delta = \Delta_{\text{приб}} + \Delta_{\text{отсч}}.$$

Если указатель прибора совпадает со штрихом шкалы (рис. 7 а), то значение, соответствующее этому штриху, принимается за результат измерения, а погрешность прибора $\Delta_{\text{приб}}$ – за абсолютную погрешность измерения Δ .

Если же указатель прибора не совпадает со штрихом шкалы (рис. 7 б), то за результат измерения принимается числовое значение, соответствующее ближайшему штриху прибора.

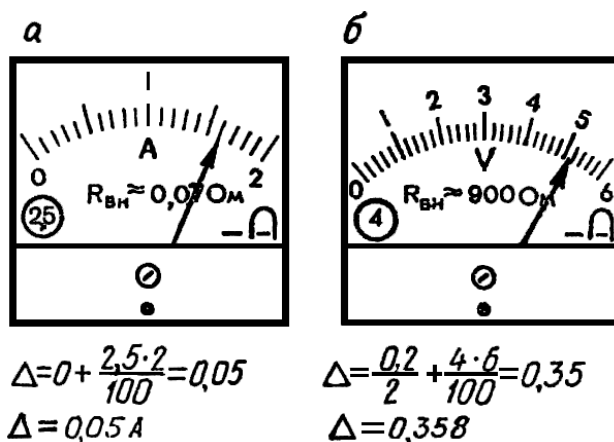


Рис. 7. Определение абсолютной погрешности измерений

Абсолютная погрешность при этом определяется суммой погрешности прибора и погрешности отсчета, которая не превосходит половины цены деления шкалы прибора:

$$\Delta = \Delta_{\text{приб}} + \frac{c}{2}.$$

Для величин, численное значение которых приводится без указания значения погрешности, ошибка принимается равной половине единицы наименьшего значащего разряда. Например, $m = 1,62$ кг, тогда погрешность берется равной $\Delta m = 0,005$ кг и окончательный результат запишется в виде:

$$m = (1,62 \pm 0,005) \text{ кг.}$$

Элементарная теория погрешностей к систематическим ошибкам относит и результат округления чисел. Например, полагая π равным $\approx 3,0$, или $3,10$, или $3,14$ мы получаем относительную ошибку $\frac{\Delta\pi}{\pi}$, соответственно равную 17% , $1,7\%$ и $0,17\%$. Поэтому величины типа π или g нужно брать в расчетах с точностью до сотых.

На практике часто одно из этих слагаемых существенно меньше другого (в 4-5 и более раз), тогда меньшим слагаемым можно пренебречь. Это возможно потому, что сложение погрешностей аналогично геометрическому сложению векторов, т. е. их сумма равна квадратному корню из суммы квадратов слагаемых. Это означает, что на самом деле формулы (1) и (2) следует представить в виде

$$\Delta = \sqrt{\Delta_{\text{приб}}^2 + \Delta_{\text{отсч}}^2} \quad \text{или} \quad \Delta = \sqrt{\Delta_{\text{приб}}^2 + \frac{c^2}{4}}.$$

С учетом случайных погрешностей измерения следует повторять несколько раз. Измеряя n раз некоторую физическую величину A , получим n приближенных значений: A_1, A_2, \dots, A_n . Среднее арифметическое значение из этих результатов

$$A_{\text{ср}} = \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i$$

принимают за наиболее достоверное («истинное») значение измеряемой величины.

Абсолютную разность между средним значением и значением отдельного измерения назовем абсолютной погрешностью этого измерения:

$$\Delta A_i = A_{\text{ср}} - A_i.$$

Величины $\Delta A_i = A_{\text{ср}} - A_i$ могут быть и положительными, и отрицательными.

Для определения средней абсолютной погрешности берут среднее арифметическое абсолютных значений (модулей) отдельных ошибок, т.е.

$$\Delta A_{\text{ср}} = \frac{|\Delta A_1| + |\Delta A_2| + \dots + |\Delta A_n|}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta A_i|.$$

Отношение усредненной абсолютной погрешности к истинному значению физической величины называется относительной погрешностью

$$\varepsilon = \frac{\Delta A_{\text{ср}}}{A_{\text{ср}}}.$$

Отношения $\frac{\Delta A_{\text{ср}}}{\Delta A_i}$ называются относительными ошибками отдельных измерений.

Относительную ошибку принято выражать в процентах:

$$\varepsilon = \frac{\Delta A_{\text{ср}}}{A} \cdot 100\%.$$

Истинное значение измеряемой величины можно записать так:

$$A_{\text{ист}} = A_{\text{ср}} \pm \Delta A_{\text{ср}}$$

$A_{\text{ист}}$ имеет только одно значение, а знак «+» (или «-») показывает, что истинное значение измеряемой величины находится в интервале

$$A_{\text{ср}} - \Delta A_{\text{ср}} \leq A_{\text{ист}} \leq A_{\text{ср}} + \Delta A_{\text{ср}}.$$

Так как измерения проводят приборами, имеющими погрешность, то погрешность измерения будет складываться следующим образом:

$$\Delta = \Delta_{\text{случ}} + \Delta_{\text{приб}}.$$

Уменьшение случайной погрешности с ростом числа измерений позволяет считать, что при достаточно большом числе измерений погрешность стремится к погрешности прибора $\Delta_{\text{приб}}$.

Как уже упоминалось, для электроизмерительных приборов мы вводим приведенную относительную погрешность (класс точности):

$$\varepsilon_{\text{приб}} = \frac{\Delta_{\text{приб}}}{A_{\text{пред}}} \cdot 100\%$$

где $A_{\text{пред}}$ – предельное значение измеряемой величины для данного прибора.

По величине вносимой погрешности электроизмерительные приборы делят по классам точности.

Государственным стандартом установлено восемь классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Приборы, для которых $\varepsilon_{\text{приб}} > 4\%$, не классифицируются (внеклассные приборы) и обычно используются как простые индикаторы тока или напряжения. По классу точности легко подсчитывается абсолютная погрешность, допускаемая в любом месте шкалы данного электроизмерительного прибора:

$$\Delta_{\text{приб}} = \frac{\varepsilon_{\text{приб}} \cdot A_{\text{пред}}}{100\%}.$$

Зная абсолютную погрешность, можно вычислить относительную погрешность отдельного измерения

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{A} \cdot 100\%.$$

где A – отдельное конкретное измерение физической величины.

В итоге, погрешности измерений могут иметь различную природу, поэтому различны и методы их исключения или учета. При этом строгими формулами обработки случайных погрешностей являются формулы, полученные в математической статистике и теории вероятностей. Мерой точности результатов измерений является относительная погрешность:

$$\varepsilon = \frac{\Delta A_{\text{ср}}}{A} \cdot 100\%.$$

Наличие ошибки ΔA определяет точность, с которой имеет смысл производить вычисление A . Легко заметить, например, что запись $A = 3,86768 \pm 0,070$ бессмысленна.

Вычисление A в этом случае следует производить с точностью до второго знака после запятой или максимум до третьего. При ошибке 0,070 последние две цифры в A не означают ровно ничего, поэтому их не следовало ни писать, ни вычислять. Грамотной была бы такая запись результата: $A = 3,86 \pm 0,07$.

РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ СЕРИИ ОПЫТОВ

Для серии опытов случайные погрешности оценивают по методу «средних» либо методом, связанным с функцией распределения случайных величин, за которые принимаются ошибки отдельных измерений (метод Стьюдента) [3; 5; 9; 12].

В методе «средних» случайная погрешность находится как среднее арифметическое абсолютных погрешностей отдельных измерений:

$$\Delta A_{\text{сл}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta A_i|.$$

При этом абсолютная погрешность находится как сумма случайной и систематической погрешностей:

$$\Delta A = A_{\text{сл}} + A_{\text{сист.}}$$

В методе Стьюдента для оценки случайной погрешности используется формула:

$$\Delta A_{\text{сл}} = t_{p,n} \cdot \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_{\text{ср}} - \Delta A_i)^2}{n(n-1)}},$$

где $t_{p,n}$ – коэффициент Стьюдента, который указывает, что истинное значение A лежит с заданной вероятностью P в интервале от $[A_{\text{ср}} - \Delta A; A_{\text{ср}} + \Delta A]$, называемом доверительным интервалом. В физическом эксперименте обычно берется вероятность $P = 0,95$. Приведем для этого значения вероятности коэффициенты Стьюдента (табл. 5), где n – число проведенных измерений физической величины.

Таблица 5

Коэффициенты Стьюдента

n	2	3	4	5	6	7	8	20	∞
$t_{P=0,95;n}$	12,7	4,3	3,2	2,8	2,7	2,5	2,4	2,1	2,0

Полная абсолютная погрешность определяется по формуле:

$$A = \sqrt{\Delta A_{\text{сл}}^2 + \Delta A_{\text{сист.}}^2}.$$

Точность измерений оценивается отношением:

$$\frac{\Delta A}{A_{\text{ср}}} = \delta A,$$

которое называется относительной погрешностью. Чем меньше δA , тем точнее результат. Относительная погрешность безразмерна и ее часто выражают в процентах.

Результат измерений записывается в окончательном виде, как

$$A = A_{\text{ср}} \pm \Delta A; \quad \delta A = \frac{\Delta A}{A_{\text{ср}}} \cdot 100\%.$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Пусть некоторая физическая величина y является функцией нескольких переменных

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k)$$

где k – число переменных. Расчёт погрешности можно выполнить двумя способами.

Способ 1 (не воспроизводимые условия).

1. При определенном значении переменной измеряем физическую величину y несколько n раз. Рассчитываем $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$.

2. Находим среднее арифметическое значение y :

$$y_{\text{ср}} = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

Далее рассчитываем Δy как случайную составляющую ошибки прямых измерений. Приборная погрешность при этом не учитывается, так как при косвенных измерениях переменные измеряются разными приборами! Далее находим относительную погрешность измерений, записываем результат измерений в стандартном виде.

Способ 2 (воспроизводимые условия).

Абсолютная погрешность Δy вычисляется по формуле

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_k} \Delta x_k\right)^2}$$

где $\frac{\partial y}{\partial x_k}$ – частные производные функции $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k)$ вычисленные по средним значениям \bar{x}_k определяется методом расчёта ошибок прямых измерений.

Пример: плотность материала цилиндра рассчитывается по формуле:

$$\rho = \frac{4m}{\pi d^2 h}$$

Если взять частные производные плотности по массе, диаметру и высоте, то можно получить следующую формулу для расчёта абсолютной погрешности:

$$\Delta \rho = \bar{\rho} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m_{\text{ср}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h_{\text{ср}}}\right)^2 + 4 \left(\frac{\Delta d}{d_{\text{ср}}}\right)^2}.$$

Относительная ошибка косвенных измерений:

$$\varepsilon = \frac{\Delta y}{y_{\text{ср}}} \cdot 100\%$$

Окончательный результат записываем в виде

$$y = y_{\text{ср}} \pm \Delta y$$

Примеры:

$$\rho = (2700 \pm 100) \text{ кг/м}^3$$

$$E = (2,16 \pm 0,12) \text{ Н/м}^2.$$

Приведем простой алгоритм расчета ошибок косвенных измерений.

В случае косвенных измерений, когда $A = f(B, C, K, Q)$, среднее значение $A_{\text{ср}}$ определяется из средних значений аргументов:

$$A_{\text{ср}} = f(B_{\text{ср}}, C_{\text{ср}}, K_{\text{ср}}, Q_{\text{ср}})$$

Отметим, что для косвенных измерений удобно найти сначала относительную погрешность $\delta A = \frac{\Delta A}{A_{\text{ср}}}$, а затем абсолютную. Это связано, в частности, со свойством дифференциала логарифма:

$$d(\ln f) = \frac{df}{f} \approx \frac{\Delta f}{f}.$$

Отсюда вытекает алгоритм получения формулы для подсчета относительной ошибки косвенных измерений: «»

1. Логарифмируется исходная формула.
2. Полученное выражение дифференцируется.
3. Заменяется знак дифференциала d на знак приращения Δ и меняются знаки « $-$ » на « $+$ », т. к. ошибки измерений накапливаются по мере увеличения числа измеряемых величин.

По найденной относительной погрешности находится абсолютная:

$$\Delta A = \delta A \cdot A_{\text{ср}}.$$

В качестве примера выведем формулу для расчета относительной ошибки δV косвенно измеряемой величины V (объем цилиндра), вычисляемой по формуле:

$$V = \frac{\pi D^2}{4} h,$$

где D и h – результаты прямых измерений диаметра и высоты цилиндра.

1. Прологарифмируем формулу для объема:

$$\ln V = \ln \pi + 2 \ln D + \ln h - \ln 4.$$

2. Продифференцируем полученное выражение:

$$\frac{dV}{V} = \frac{d\pi}{\pi} + \frac{2dD}{D} + \frac{dh}{h}.$$

3. Заменяем знаки дифференциала d на знаки приращения Δ :

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta \pi}{\pi} + 2 \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta h}{h}$$

И тогда значение V возможно заменить на определяемое по результатам измерений значение $V_{\text{ср}}$. Если при вычислении среднего значения объема $\langle V \rangle$ принять $\pi = 3,14$, то ошибкой $\frac{\Delta \pi}{\pi}$ равной 0,17% можно пренебречь (см. выше). В итоге получим:

$$\frac{\Delta V}{V_{\text{ср}}} = \frac{2\Delta D}{D} + \frac{\Delta h}{h}.$$

выражение для определения ΔV будет следующего вида

$$\Delta V = V_{\text{ср}} \cdot \left(2 \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta h}{h} \right).$$

Приведем некоторые формулы для подсчета абсолютной и относительной погрешности косвенных измерений (табл. 6).

По окончательной записи результатов измерений производится их округление, которое начинается с абсолютной погрешности. При этом, если первая значащая цифра не является единицей, то округление производят до одной значащей цифры.

Например, если $\Delta A = 0,0345$, то округленное значение будет $\Delta A \approx 0,03$ и округление среднего значения измеряемой величины $A_{\text{ср}}$ следует проводить до сотых. Если первая значащая цифра равна 1, то округление $A_{\text{ср}}$ следует проводить до двух значащих цифр. Например, $A_{\text{ср}} = 1,287$, тогда округленное значение $A_{\text{ср}} \approx 1,3$ и округление $A_{\text{ср}}$ проводится до десятых.

Таблица 6

Абсолютные и относительные погрешности

Математическая операция	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
$X = A + B + C$	$\Delta X = \Delta A + \Delta B + \Delta C$	$\delta X = \frac{\Delta A + \Delta B + \Delta C}{A + B + C}$
$X = A - B$	$\Delta X = \Delta A + \Delta B$	$\delta X = \frac{\Delta A + \Delta B}{A - B}$
$X = ABC$	$\Delta X = BC \cdot \Delta A + AC \cdot \Delta B + AB \cdot \Delta C$	$\delta X = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta C}{C}$
$X = \frac{A}{B}$	$\Delta X = \frac{B \cdot \Delta A + A \cdot \Delta B}{B^2}$	$\delta X = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$
$X = A^n$	$\Delta X = nA^{n-1} \Delta A$	$\delta X = \frac{\Delta A}{A} n$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется измерением? Что такое мера, измерительный прибор?
2. Какие измерения являются прямыми, а какие – косвенными?
3. Что называется абсолютной и относительной погрешностями? Чем вызвано появление погрешностей измерения?
4. Как найти случайную погрешность при статистической обработке результатов измерений? Формула Стьюдента.
5. Как найти случайную погрешность при обработке результатов измерений методом «средних»?
6. Что такое систематическая погрешность?
7. Что такое приборная погрешность? Как она учитывается?
8. Как находится погрешность однократного измерения?
9. Как записать полную погрешность при обработке результатов измерений статистическим методом и методом «средних»?

10. Как найти формулу для определения относительной и абсолютной погрешности при косвенных измерениях?

11. Что такое доверительный интервал и доверительная вероятность?

12. Сформулировать правило округления абсолютной погрешности в окончательном результате. Как округляется результат измерения?

13. Как записать окончательный результат?

14. Сформулировать правила построения графиков.

МЕХАНИКА

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Применение закона прямолинейного равноускоренного движения для определения ускорения свободного падения

Цель работы: определить величину ускорения свободного падения, применяя закон прямолинейного равноускоренного движения падающего тела.

Приборы, дополнительное оборудование и исследуемые объекты (образцы): лабораторный комплекс ЛМК-2, в состав которого входит универсальная конструкция (стойка) с направляющим стержнем со шкалой и спусковым устройством, измерительная система ИМС-4; линейка; набор объектов (тел) разной массы (тела изготовлены из алюминия, стали или меди), электронные весы.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Работа выполняется с помощью лабораторного комплекса ЛМК-2 (рис. 8). На платформу ЛМК-2 вертикально крепится универсальная конструкция с направляющим стержнем.

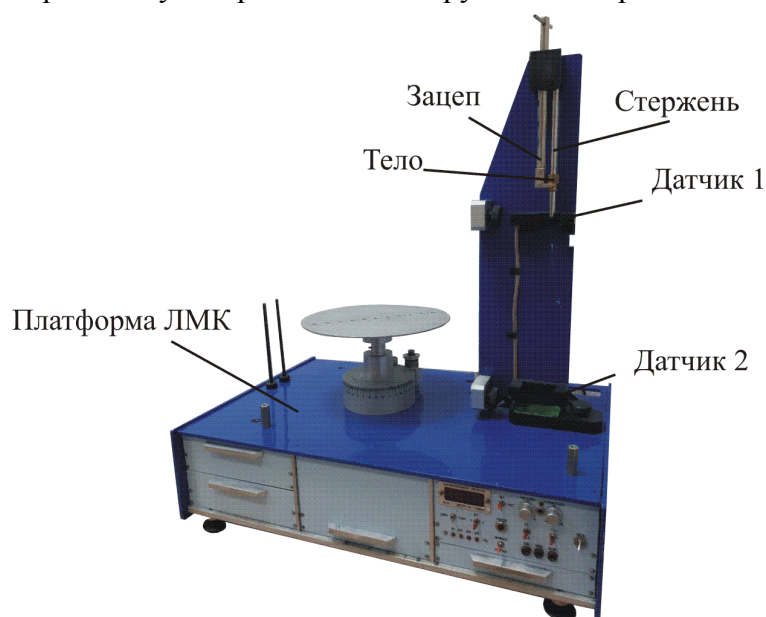


Рис. 8. Лабораторный комплекс ЛМК-2
для исследования закона прямолинейного равноускоренного движения

На стержне стойки закрепляется с помощью зацепа объект (тело). При этом тело оказывается на некотором расстоянии x_1 до первого датчика, который дает старт таймеру для отсчета времени. После прохождения второго датчика на стойке отсчет времени прекращается. Полученное значение это время прохождения телом расстояния между датчиками. Расстояние между датчиками составляет

$$h = 250 \text{ мм} = 25 \text{ см} = 0,250 \text{ м.}$$

Измерение времени выполняет измерительная система ИМС-4 комплекса ЛМК (рис. 9). Подготовка ИМС-4 для измерения времени следующая:

- включают питание электронного блока с помощью тумблера «СЕТЬ»;
- тумблер выбора числа измерений «ЦИКЛ/ОДНОКР», переводят в режим однократного измерения;

–диапазон измерения времени выбирается «0,1» мс (миллисекунды), при этом на дисплее время отображается в мс. Например, «245,1», что соответствует 0,2451 с. Требуемое разрешение времени (0,1 мс или 1 мс) устанавливается тумблером «0,1/1 мс».

Замечание. Перед освобождением тела необходимо показания таймера сбросить нажатием кнопки «ГОТОВ».



Рис. 9. Измерительная система ИМС-4

Остальные тумблеры и ручки управления измерительной системы не используются.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Уравнение (закон) прямолинейного равноускоренного движения вдоль прямой, определяется выражением [1; 3]:

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{a}{2} t^2, \quad (1)$$

где a – ускорение тела в м/с²; t – время движения тела между датчиками в секундах; $v_0 = 0$ – начальная скорость тела в м/с; $x_0 = 0$ – начальная координата тела в метрах (рис. 10).

Применим этот закон для падающего с некоторой высоты тела. Ускорение свободного падения можно определить опираясь на схему падения тела под действием силы тяжести, показанной на рисунке 10. Точка «0» – координата начального положения тела, x_1 – координата точки срабатывания первого датчика (расстояние от начального положения до первого датчика), x_2 – координата точки срабатывания второго датчика (расстояние от начального положения до второго датчика).

Так как, в начальный момент времени (координата «0»), $x_0 = 0$, $v_0 = 0$, то закон (1) примет следующий вид

$$x = \frac{a}{2} t^2 \quad \text{или} \quad x = \frac{g}{2} t^2 \quad (2),$$

где a – ускорение свободного падения тела, находящегося под действием силы тяжести вблизи поверхности Земли ($g = 9.81$ м/с²); t – время движения тела необходимое для достижения точки с координатой « x_i » (рис. 10).

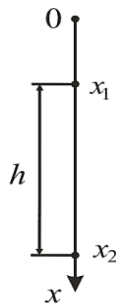


Рис. 10. Схема движения падающего тела

При движении тело пройдет расстояние $h = x_2 - x_1$, затратив время:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \sqrt{\frac{2x_2}{g}} - \sqrt{\frac{2x_1}{g}} = \sqrt{\frac{2}{g}} (\sqrt{x_2} - \sqrt{x_1})$$

где x_1 – расстояние от начального положения тела до первого фотодатчика,

$x_2 = x_1 + h$ – расстояние от начального положения тела до второго фотодатчика.

В итоге получим расчетную формулу для определения ускорения свободного падения:

$$g = \frac{2(\sqrt{x_1 + h} - \sqrt{x_1})^2}{\Delta t^2}$$

Время движения тела между датчиками можно измерить с помощью миллисекундомера.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. С помощью электронных весов определяется масса тел.
2. Объект (тело) закрепляется с помощью зацепа на стержне пушки (рис. 11).



Рис. 11. Фиксирование груза с помощью зацепа

3. Производится измерение (замер) расстояния от начального положения тела до точки срабатывания первого фотодатчика x_1 по линейке, закрепленной на стойке. К этому значению добавляется дополнительно расстояние от датчика до нулевого значения, которое составляет 45 миллиметров.

4. Проводим эксперимент (опыт). Освобождаем тело от зацепа. Тело, под действием силы тяжести, перейдет в состояние свободного падения и будет лететь с ускорением

свободного падения. Фиксируем время пролета между датчиками таймера. Для этого предварительно включают измерительный комплекс в электрическую сеть и подготавливают измерительную систему ИМС-4 для измерения времени движения тела. Перед измерением времени показания таймера необходимо сбросить.

5. Для повышения точности определения времени опыт повторяют несколько раз.

6. Результаты измерения времени движения тела, заносятся в таблицу 7.

7. Выполнение пунктов 2, 3, 4, 5 повторяются для других положений (значений расстояния x_1). Для этого зацеп вместе грузом поднимают на новую высоту от 40 до 100 мм (до щелчка фиксатора) и измеряют линейкой расстояние x_1 от начального положения тела.

8. Опыт проводится для тел разной массы (выполненных из алюминия, меди или стали).

Таблица 7

Для внесения результатов измерений к расчету ускорения свободного падения

Материал объекта (тела)		Масса объекта m, гр		
Дата проведения эксперимента				
№	Расстояние от начального положения тела до 1-го датчика	Время пролета телом расстояния между датчиками	Среднее время пролета	Расчетное значение ускорения свободного падения
	$x_1, \text{мм}$	$t_1, \text{с}$		
1.				
2.				
3.				
1.				
2.				
3.				
1.				
2.				
3.				

9. По полученным данным производят расчет ускорения свободного падения. Результаты расчетов записываются в таблицу.

10. Для полученных результатов выполняются статистические расчеты, а именно:

а) Вычислить среднюю величину ускорения свободного падения:

$$g_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n g_i}{n},$$

где n – количество рассчитанных значений ускорения свободного падения полученных из проведенных опытов для разных начальных положений тела.

б) Определить среднеарифметическую погрешность определения ускорения свободного падения по следующей формуле

$$\Delta g_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n |g_{\text{ср}} - g_i|}{n}.$$

в) Вычислить относительную погрешности измерения:

$$\varepsilon_g = \frac{\Delta g}{g_{\text{ср}}} \cdot 100\%.$$

г) Записать результат определения ускорения свободного падения в виде

$$g = g_{\text{ср}} \pm \Delta g_{\text{ср}}.$$

11. По полученным результатам:

– провести анализ полученного значения ускорения свободного падения из экспериментальных (опытных) данных для разных тел, сравнив его с табличным значением (общепринятым в науке и технике) $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

– сформулировать предположения по их не совпадению и предложить действия по повышению точности определения ускорения свободного падения, при проведении эксперимента выполняемого в данной лабораторной работе.

12. Ответить на контрольные вопросы (письменно в тетради).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определения физических понятий: система отсчета, радиус-вектор, скорость, ускорение.

2. Какое движение называется равноускоренным?

3. Запишите уравнения, описывающие прямолинейное равноускоренное движение.

4. Объясните принцип действия установки, выведите формулу расчета ускорения свободного падения.

5. Какие погрешности влияют на результат измерения ускорения свободного падения?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Изучение колебательного движения на примере математического маятника

Цель работы: приобретение практических навыков при работе с измерительными приборами, измерение периода колебаний математического маятника, изучение метода измерений времени и периода колебаний маятника, выявление зависимости периода колебаний от длины нити, определение ускорение свободного падения.

Приборы, дополнительное оборудование и исследуемые объекты (образцы): лабораторный комплекс ЛКМ-2, секундомер (или таймер), модель математического маятника.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для проведения опытов с моделью математического маятника применяется лабораторный комплекс ЛКМ-2 (рис. 12), а именно его измерительная система временных интервалов ИМС-4 и стойка с укрепленным на ней шкивом, который может совершать вращательное движение.

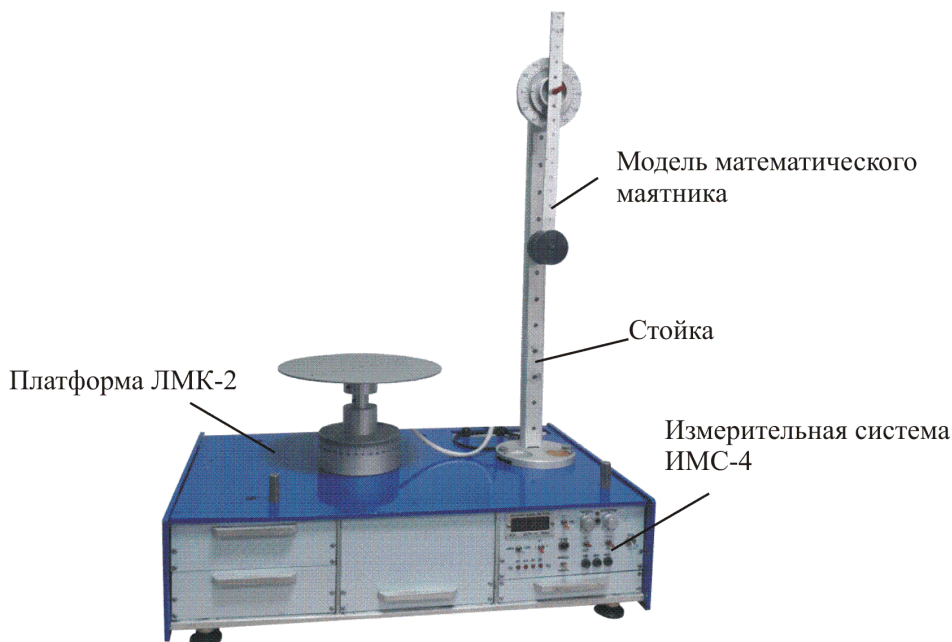


Рис. 12. Лабораторный комплекс ЛКМ-2 для исследования математического маятника

Соединенная со шкивом круглая пластина с радиальной щелью, через которую может проходить световой сигнал от фотодиода датчика таймера ИМС-4, позволяет определять временные интервалы вращательного или колебательного движения шкива. Модель математического маятника конструктивно выполнена из тонкой алюминиевой планки, размеры которой составляют 360x20x2 мм. В планке имеются отверстия, нанесенные через каждые 20 мм. На одном из крайних отверстий закреплено тело из стали, имеющего форму цилиндра. Масса тела более чем в 30 раз превышает массу планки, то есть используемую конструкцию условно можно считать моделью математического маятника. Схема ЛКМ-2 со стойкой и моделью математического маятника приведена на ниже представленном рисунке.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В физике под маятником понимают твёрдое тело, совершающее под действием силы тяжести колебания вокруг неподвижной точки оси. Колебательные процессы распространены в природе и технике, например качание маятника. Физика природы колебаний может быть различной. Поэтому различают механические, электромагнитные колебания и другие. Несмотря на это различные колебательные процессы описываются одинаковыми характеристиками и уравнениями [6; 13].

Колебания – это движения или процессы, обладающие той или иной степенью повторяемости во времени.

Колебания называются свободными (или собственными), если они совершаются за счет первоначальной сообщенной энергии при последующем отсутствии внешних воздействий на колебательную систему.

Простейшим типом колебаний являются гармонические колебания – колебания (рис. 13), при которых колеблющаяся величина изменяется по закону синуса (или косинуса).

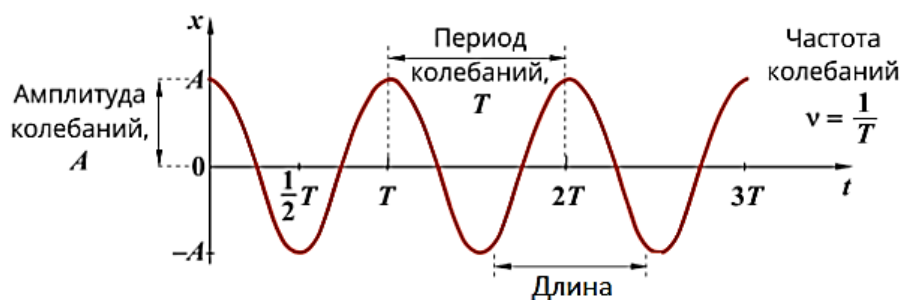


Рис. 13. Гармоническое колебание физической величины

Колебания называют периодическими, если значения физических величин, изменяющихся в процессе колебания, повторяются через равные промежутки времени.

Колебания, встречающиеся в природе и технике, близки к гармоническим. Остальные периодические процессы можно представить как наложение гармонических колебаний.

Гармонические колебания описываются выражением:

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0),$$

где A – амплитуда, ω – циклическая (или круговая) частота, $\varphi = \omega t + \varphi_0$ – фаза колебания, φ_0 – начальная фаза колебания.

Амплитуда колебаний A – это максимальное значение отклонения тела от положения равновесия (рис. 3).

Период $T = \frac{t}{N}$ – время одного полного колебания (или оборота). Единица измерения $[T] = \text{с}$.

Частота $\nu = \frac{N}{t}$ – число полных колебаний (или оборотов), выполненных телом за единицу времени. Единица измерения частоты $[\nu] = \text{Гц}$.

Циклическая частота $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$ – число колебаний (или оборотов), выполненных

телом за 2π единицы времени.

Фаза колебаний φ – периодически изменяющийся аргумент функции, описывающий колебательный или волновой процесс. Фаза характеризует состояние этого процесса в данный момент времени.

Начальная фаза φ_0 – значение фазы в начальный момент времени ($t = 0$), показывает смещение колеблющейся величины от положения равновесия в начальный момент времени.

Математический маятник – это система, состоящая из материальной точки массой m , подвешенный на нерастяжимой и невесомой нити, и колеблющейся под действием силы тяжести.

Математический маятник является идеализированной физической моделью колебательной системы, совершающий при малых углах отклонения гармонические колебания. Модель математического маятника не учитывает потери энергии на трение о воздух и потери при деформации нити. Свободные колебания реальных колебательных систем всегда являются затухающими. Затухающие колебания – собственные колебания, амплитуда которых уменьшается с течением времени.

Рассмотрим движение маятника при малом угле отклонения от положения равновесия (рис. 14).

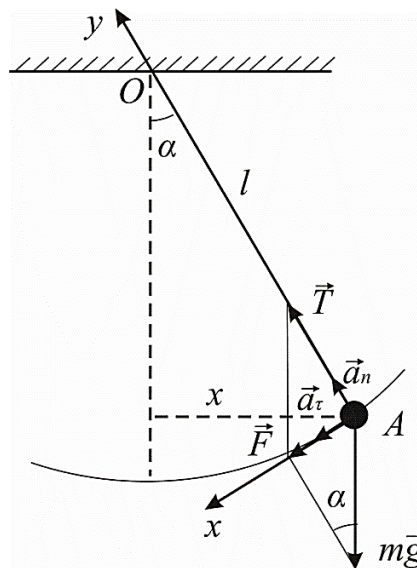


Рис. 14. Математический маятник

На маятник действуют сила тяжести mg и сила натяжения нити T . Равнодействующая сила F согласно второму закону Ньютона определяется выражением:

$$m\vec{g} + T\vec{F} = m\vec{a}.$$

Тангенциальную составляющую равнодействующей силы, направленную по касательной к траектории, можно определить выражением:

$$-mg \sin \alpha = ma_{\tau}.$$

Знак минус показывает, что тангенциальная составляющая силы тяжести направлена к положению равновесия, а смещение отсчитывают от положения равновесия.

Отклонение маятника можно определить выражением:

$$\sin \alpha = \frac{x}{l}.$$

Тогда выражение можно переписать в виде:

$$a_{\tau} + \frac{g}{l}x = 0.$$

При малых углах отклонения маятник совершает гармонические колебания, которые можно описать выражением:

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0 \text{ или } a + \omega^2 x = 0.$$

Сопоставляя два последних выражения, можно выразить циклическую частоту:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}.$$

Тогда период малых колебаний математического маятника можно определить выражением:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

где l – длина нити; g – ускорение свободного падения.

В данной лабораторной работе используется модель математического маятника – диск на легкой планке [6; 12]. Планка имитирует нерастяжимую нить, диск значительно тяжелее планки, что имитирует сосредоточение массы в одной точке.

На основании графической зависимости (рис. 15) квадрата периода колебаний от длины подвеса определяют область, в которой маятник можно считать математическим – в этой области график линеен.

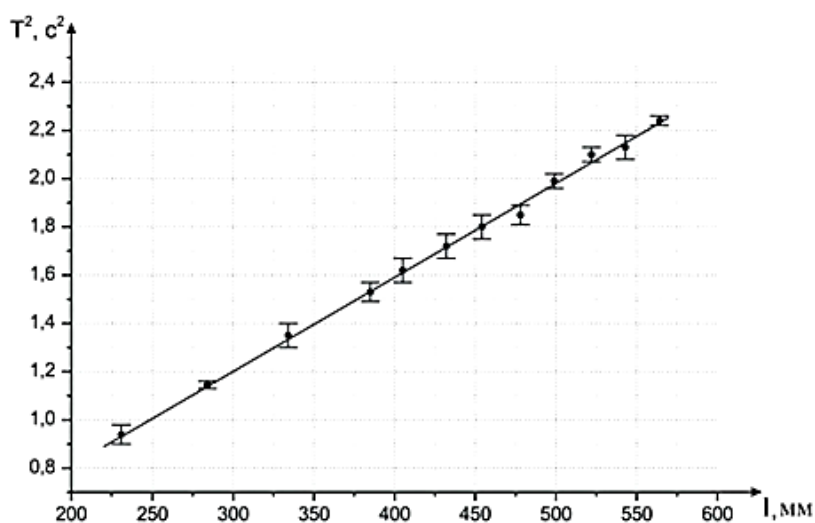


Рис. 15. График зависимости квадрата периода колебаний математического маятника от его длины нити

Зная зависимость квадрата периода математического маятника от его длины нити маятника, можно определить ускорение свободного падения тела:

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}.$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Установить на лабораторный комплекс ЛКМ-2 модель математического маятника. Планку математического маятника закрепить на штыре шкива стойки (использовать наиболее удаленное отверстие от груза). Для устранения паразитных колебаний на ось шкива надеть пластмассовую втулку-фиксатор, прижимающую планку к шкиву.

2. Включить электропитание установки. Переключатель «Период» выставить в положение «ΔT» – измерение периода одного колебания, переключатель «Измерения» в положение «Циклические» – для измерения повторяющихся колебаний.

3. Нажать кнопку «Готов», для обнуления таймера.

4. Отвести маятник на угол не более чем 10° и отпустить.

5. Зафиксировать значение периода колебаний на цифровом табло ИМС-4 лабораторного комплекса и занести в отчет (табл. 8).

Таблица 8

Таблица записи результатов измерений и вычислений

№ опыта	Длина математического маятника, l_i , м	Период колебаний, T_i , с	T_i^2 , с ²

6. Изменить точку подвеса маятника (отверстия в планке следуют с шагом 20,0 мм) и повторить операции с пункта 3.

7. Определить циклическую частоту колебаний маятника и квадрат периода колебаний маятника при разных точках подвеса.

8. Построить график зависимости квадрата периода колебаний маятника от его длины на основании данных таблицы (выполняется или на миллиметровой бумаге или в таблицах Excel и распечатывается).

9. Определить область на графике, в которой маятник можно считать математическим.

10. Провести математическую обработку результатов проведенных измерений по предложенным выше алгоритмам.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение понятию колебание, свободное колебание, периодическое колебание, гармоническое колебание, математический маятник.

2. Перечислите основные параметры гармонического колебания: амплитуда, период, частота, циклическая частота, фаза колебания, начальная фаза.

3. Выведите расчетную формулу ускорения свободного падения.

4. Перечислите простейшие колебательные системы. Чему равны периоды их колебаний?

5. Чему равны кинетическая и потенциальная энергии колебательной системы? Как они изменяются во времени? Чему равна полная энергия колебательной системы? В каких случаях она остается постоянной?

6. Какие колебания называются затухающими? Чему равны амплитуда и период затухающих колебаний?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Исследование периодического движения физического маятника

Цель работы: изучение периодического движения (колебаний) физического маятника, определение ускорения свободного падения.

Приборы, дополнительное оборудование и исследуемые объекты (образцы): лабораторный комплекс ЛКМ-2, секундомер (или таймер), физический маятник.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для проведения опытов с физическим маятником применяется лабораторный комплекс ЛКМ-2 (рис. 16), а именно его измерительная система временных интервалов ИМС-4 и стойка с укрепленным на ней шкивом, который может совершать вращательное движение. Соединенная со шкивом круглая пластина с радиальной щелью, через которую может проходить световой сигнал от фотодиода датчика таймера ИМС-4, позволяет определять временные интервалы вращательного или колебательного движения шкива.



Рис. 16. Лабораторный комплекс ЛМК-2 для исследования физического маятника

На оси шкива стойки устанавливается стержень с отверстиями, который представляет физический маятник. Отверстия, служащие точками подвеса, располагаются на расстоянии 20,0 мм друг от друга. Центр масс стержня расположен на расстоянии 160 мм от крайнего отверстия. Для устранения паразитных колебаний на ось шкива надевают пластмассовую втулку, прижимающую стержень к шкиву. При проведении лабораторной работы шкив стойки устанавливают в нулевое положение. При переходе точки подвеса через центр масс маятник переворачивается, при этом шкив устанавливают в нулевое положение.

Измерительная система ИМС-4 (рис. 17) вставлена в каркас комплекса ЛМК. Для измерения периода колебаний включают питание электронного блока с помощью тумблера «СЕТЬ».

При положении «1» тумблера «1/ΔТ/2» измеряется время одного оборота шкива ($\varphi = 2\pi$), в положении «2» – время двух полных оборотов шкива ($\varphi = 4\pi$). При проведении эксперимента рекомендуется использовать тумблер в положении 2.

Тумблер выбора числа измерений «ЦИКЛ/ОДНОКР» позволяет проводить измерения в циклическом (положение «ЦИКЛ») или однократном режиме (положение «ОДНОКР»). Рекомендуется использовать режим однократного измерения.



Рис. 17. Измерительная система ИМС-4

На дисплее таймера отображаются интервалы времени в миллисекундах. Требуемое разрешение времени (0,1 мс или 1 мс) устанавливается тумблером «0,1/1 мс». Перед отпуском груза необходимо показания таймера сбросить путем нажатия кнопки «ГОТОВ».

Остальные тумблеры и ручки управления измерительной системы не используются.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Гармоническим колебанием физической величины x называется процесс изменения ее со временем по закону синуса или косинуса [7; 16]:

$$x = A \sin(\omega t + \varphi),$$

где A – максимальное значение колеблющейся величины от положения равновесия (нуля), называемое амплитудой колебания, ω – круговая (циклическая) частота, φ_0 – начальная фаза колебания в момент времени $t = 0$, $\varphi = \omega t + \varphi_0$ – фаза колебания в момент времени t .

Фаза колебания – это аргумент, определяющий значение колеблющейся величины в данный момент времени. Колеблющаяся величина x может принимать значения от $+A$ до $-A$. График такого колебания представлен на рисунке 18.

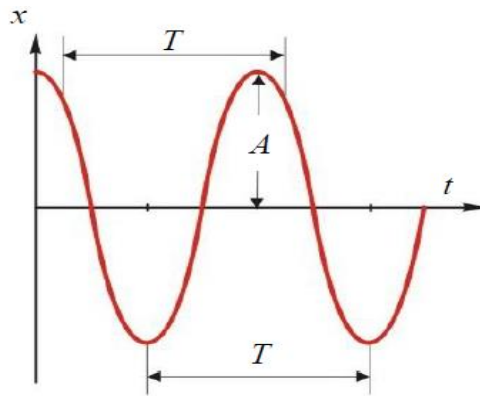


Рис. 18. Гармоническое колебание физической величины x

Определенные состояния системы, совершающей гармонические колебания, повторяются через промежуток времени. Время одного полного колебания T называется периодом. За время равное периоду фаза колебания получает приращение 2π , т. е.

$$\omega(t + T) + \varphi = (\omega t + 2\varphi) + 2\pi,$$

откуда

$$T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

Величина, обратная периоду колебаний T , т. е. число полных колебаний, совершаемых в единицу времени, называется частотой колебаний

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}.$$

Единица частоты – герц (Гц): 1 Гц – частота периодического процесса, при котором за 1с совершается один цикл процесса.

Физический маятник – это твёрдое тело, способное совершать под действием силы тяжести свободные колебания вокруг неподвижной оси, не проходящей через центр масс тела (рис. 19).

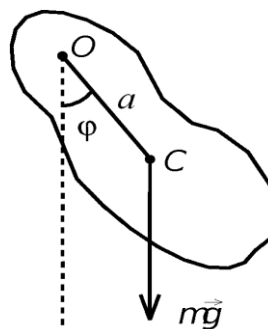


Рис. 19. Физический маятник

Составляющая силы тяжести, возвращающая маятник в положение равновесия,

$$F = -mg \sin \varphi.$$

Так как $\sin \varphi = x/l_c$, то

$$F = -mg \frac{x}{l_c}.$$

Таким образом, возвращающая сила пропорциональна смещению, значит колебания маятника будут гармоническими. Момент возвращающей силы

$$M = Fl_c = -mgx.$$

С другой стороны, по основному закону динамики вращательного движения,

$$M = J_0 \varepsilon,$$

где J_0 – момент инерции тела относительно оси 0, ε – угловое ускорение.

Учитывая, что $\varepsilon = \frac{a}{l_c}$ и $a = -\omega^2 x$, получим

$$M = J_0 \frac{\omega^2}{l_c}.$$

Приравнивая выражения, находим

$$\omega^2 = \frac{mgl_c}{J_0}.$$

Следовательно,

$$\omega^2 = \sqrt{\frac{mgl_c}{J_0}}.$$

Тогда период колебаний физического маятника определится выражением

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{J_0}{mgl_c}}.$$

Из этой формулы легко получить формулу для периода колебаний математического маятника. Для математического маятника

$$J_0 = ml_c^2 = ml^2 \rightarrow T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Приведённой длиной физического маятника называется длина такого математического маятника, который имеет с данным физическим одинаковый период колебания.

На основании этого определения можно найти l_{Π} . Действительно, так как

$$T_{\text{м}} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad \text{и} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{J_0}{mgl_c}},$$

То приравнивая их, получим

$$l = l_{\Pi} = \frac{J_0}{mgl_c}.$$

Т. к. $J_0 = J_c + ml_c^2$, то

$$l_{\Pi} = \frac{J_c + ml_c^2}{mgl_c} = \frac{J_c}{mgl_c} + l_c \rightarrow l_{\Pi} > l_c.$$

Точка O' , лежащая на прямой ОС на расстоянии l_{Π} от оси 0, называется центром качаний физического маятника. Значит, центр качаний физического маятника всегда расположен дальше от оси вращения, чем центр масс.

Точка подвеса O и центр качаний O' физического маятника обратимы. Это означает, что период колебаний физического маятника не изменится, если точку подвеса перенести в центр качаний.

В настоящей лабораторной работе будем пользоваться следующими рассуждениями для вывода выражения позволяющего определить ускорение свободного падения из измеренного периода колебаний физического маятника в зависимости от расстояния между точкой подвеса и центром масс.

На рисунке 20 представлена теоретическая зависимость периода колебаний от параметра x , которая зеркально симметрична относительно линии, в которой период колебаний маятника стремится к бесконечности.

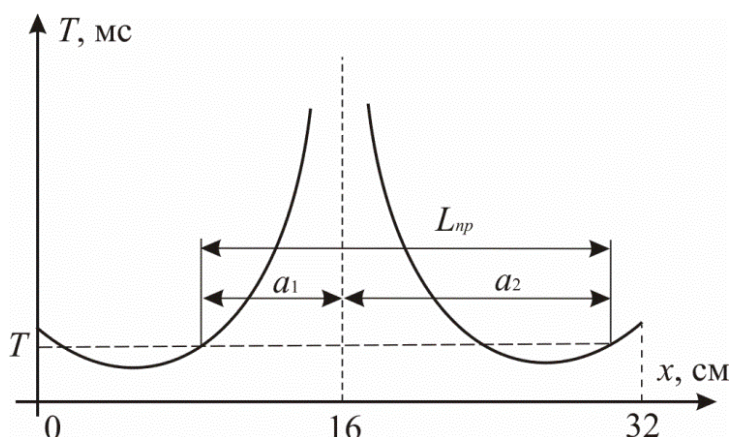


Рис. 20. Зависимость периода колебаний маятника от параметра x

Период малых колебаний можно определить выражением:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mga}},$$

где a – расстояние между осью вращения физического маятника и осью, проходящей через центр массы тела.

Получим зависимость периода малых колебаний от расстояния. Момент инерции, согласно теореме Штейнера, равен

$$I = I_c + ma^2,$$

где I_c – момент инерции маятника относительно оси, проходящей через центр масс.

Подставляя последнее выражение в предыдущее, получим

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mga} + \frac{a}{g}}.$$

Период колебаний T (рис. 20) одинаков при двух различных значениях a , т. е.

$$T_1 = T_2,$$

$$\frac{I_c}{ma_1} + a_1 = \frac{I_c}{ma_2} + a_2,$$

откуда

$$I_c = ma_1a_2.$$

Тогда период колебания маятника можно записать в виде

$$T_1 = T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{ma_1a_2}{mga_1} + \frac{a_1}{g}} = 2\pi \sqrt{\frac{a_1 + a_2}{g}}.$$

Величина

$$L_{\text{пр}} = a_1 + a_2$$

будет приведенной длиной физического маятника.

Точку, удаленную от точки подвеса на расстоянии $L_{\text{пр}}$, называют центром качаний. Центр качаний и точка подвеса обладают свойством взаимозаменяемости, т. е. если точку подвеса перенести на точку качаний, то точка подвеса станет новым центром качаний, при этом период колебаний физического маятника не изменится.

Сравнивая формулы периода малых колебаний маятника получим

$$L_{\text{пр}} = \frac{I}{ma}.$$

Тогда формула для периода малых колебаний маятника будет иметь следующий вид:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mga}} = 2\pi \sqrt{\frac{L_{\text{пр}}}{g}}.$$

В данной работе с помощью физического маятника находится ускорение свободного падения g , которое исходя из уравнения (11),

$$g = \frac{4\pi^2 L_{\text{пр}}}{T^2}.$$

Приведенная длина $L_{\text{пр}}$ находится из формулы, в которой a_1 и a_2 определяются из графика зависимости T от x , построенного на основе результатов эксперимента (рис. 20).

Для уменьшения погрешности измерения в эксперименте измеряют период колебаний маятника относительно осей, находящихся по обе стороны от центра тяжести. На рисунке 20 приведенная длина маятника $L_{\text{пр}} = a_1 + a_2$ равна расстоянию между точками А'В или В'А.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Перерисуйте в тетрадь таблицы 9 и 10 для записи результатов измерений и вычислений.
2. Закрепите стержень на оси блока за крайнее отверстие так, чтобы прорезь в блоке находилась вблизи нулевого деления шкалы. Примите это положение маятника за начальное $x = 0$.
3. Для измерения периода предварительно включают измерительный комплекс в электрическую сеть и подготавливают измерительную систему ИМС-4 для измерения времени движения тела. Перед измерением времени показания таймера необходимо сбросить.
4. Приведите маятник в колебательное движение с амплитудой $5 \div 10^\circ$ и измерьте период колебаний.

5. Переместите маятник на одно отверстие ($\Delta a = 20$ мм) и проведите аналогичные измерения периода колебаний для всех отверстий стержня. Результаты измерений записать в таблицу.

Таблица 9

Таблица записи результатов измерений

x , см	0	2	4	6	8	10	12	14	16
a , см	16	14	12	10	8	6	4	2	0
T , мс									

Таблица 10

Таблица записи результатов измерений

x , см	18	20	22	24	26	28	30	32
a , см	2	4	6	8	10	12	14	16
T , мс								

6. Постройте на миллиметровой бумаге или в таблицах Excel график зависимости периода колебаний физического маятника T от координаты точки подвеса x (рис. 20).

7. На графике (рис. 20) найдите расстояние между точками маятника a_1 и a_2 , соответствующие одинаковому периоду колебаний в трех пяти местах графика. Результаты запишите в таблицу 11.

Таблица 11

Таблица записи результатов измерений и вычислений

T , мс					
a_1 , см					
a_2 , см					
L_{np} , см					
g , м/с ²					

8. Рассчитайте ускорение свободного падения по формуле.

9. Для полученных результатов выполняются статистические расчеты, а именно:

а) вычислить среднюю величину ускорения свободного падения:

$$g_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n g_i}{n},$$

где n – количество рассчитанных значений ускорения свободного падения полученных из проведенных опытов для разных начальных положений тела;

б) определить среднеарифметическую погрешность определения ускорения свободного падения по следующей формуле

$$\Delta g_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n |g_{\text{cp}} - g_i|}{n},$$

в) вычислить относительную погрешности измерения:

$$\varepsilon_g = \frac{\Delta g}{g_{\text{cp}}} \cdot 100\%;$$

г) записать результат определения ускорения свободного падения в виде

$$g = g_{\text{cp}} \pm \Delta g_{\text{cp}}.$$

10. По полученным результатам формулируется вывод.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется гармоническим колебанием?
2. Дайте определение амплитуды, фазы, начальной фазы, частоты, периода, циклической частоты колебания.
3. Что такое физический и математический маятники?
4. Запишите основное уравнение динамики вращательного движения для физического маятника.
5. Что такое приведенная длина и центр качаний физического маятника? В чем заключается свойство взаимозаменяемости точки подвеса и центра качаний.
6. Как определяется период физического и математического маятника?
7. Выведите расчетную формулу для расчета ускорения свободного падения для физического маятника.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Определение коэффициента полезного действия на примере механической (пружинной) пушки

Цель работы: изучить и проверить закон сохранения механической энергии, определить коэффициент полезного действия пушки.

Приборы, дополнительное оборудование и исследуемые объекты (образцы): лабораторный комплекс ЛМК-2, конструкция «механическая пушка», набор снарядов и грузов, весы.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Работа выполняется с помощью лабораторного комплекса ЛМК-2 (рис. 21, а). Механическая пушка (рис. 21, б) вмонтирована на платформе ЛМК-2.

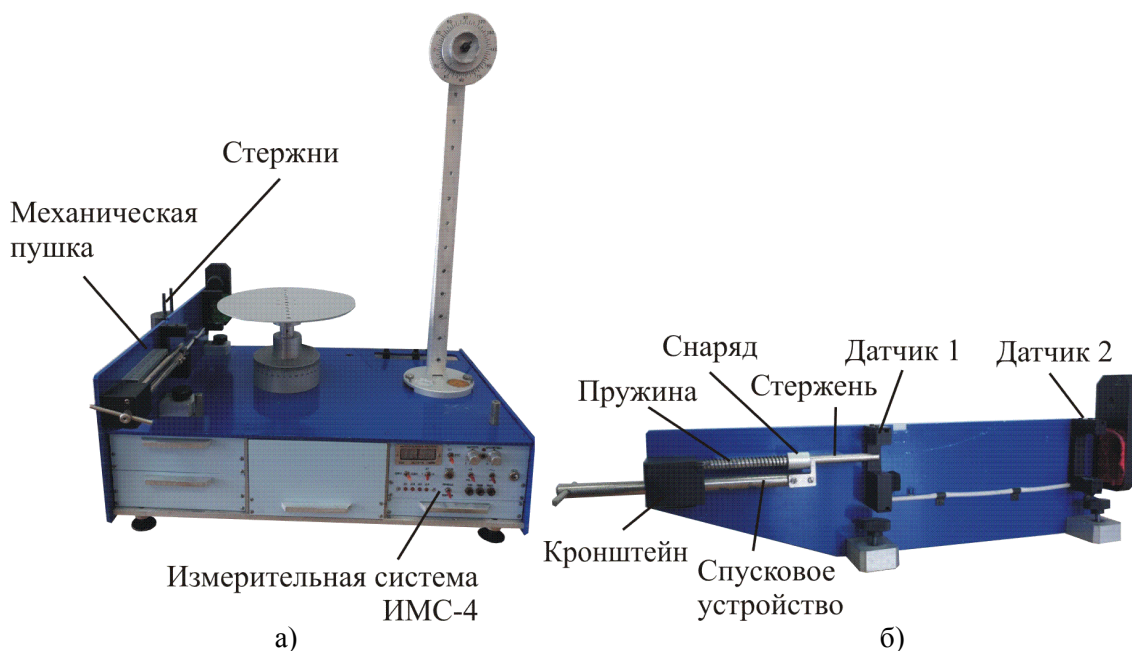


Рис. 21. Лабораторный комплекс ЛМК-2 (а)
для определения коэффициента полезного действия механической пушки (б)

На стержень, укрепленный в кронштейне механической пушки, надевается пружина, затем снаряд. Координата торца снаряда, обращенного к кронштейну, отмечается на шкале, размещенной рядом со стержнем и заносится в таблицу 12 как значение x_1 . Спусковое устройство содержит рейку с фиксирующими вырезами, зацеп и рукоятку, закрепленную на рейке. В кронштейне установлен фиксатор, задающий четыре положения рейки с шагом 25 мм.

При работе с пушкой для перемещения рейки необходимо ее поворачивать за рукоятку. При горизонтальном положении рукоятка может передвигаться вперед по направлению выстрела. Для фиксирования снаряда на рейке рукоятка поворачивается до упора против часовой стрелки. Двигая рейку назад, отмечается координата положения торца снаряда до которого была сжата пружина и ее значение заносится в таблицу 12 как значение x_2 . После

срабатывания фиксатора рейка остается зафиксированной. Для совершения выстрела необходимо повернуть рукоятку по часовой стрелке, пока зацеп не освободит снаряд.

Измерение времени полета снаряда осуществляют с помощью измерительной системы ИМС-4 (рис. 22), вставленного в каркас комплекса ЛМК. Для этого включают питание электронного блока с помощью тумблера «СЕТЬ». Совершают выстрел из пушки и фиксируют первое после начала движения показание таймера.



Рис. 22. Измерительная система ИМС-4

Тумблер выбора числа измерений «ЦИКЛ/ОДНОКР» позволяет проводить измерения в циклическом (положение «ЦИКЛ») или однократном режиме (положение «ОДНОКР»). Рекомендуется использовать режим однократного измерения.

На дисплее таймера отображаются интервалы времени в миллисекундах. Требуемое разрешение времени (0,1 мс 1 мс) устанавливается тумблером «0,1/1 мс». Перед отпуском груза необходимо показания таймера сбросить путем нажатия кнопки «ГОТОВ».

Остальные тумблеры и ручки управления измерительной системы не используются.

Для смены пружины нужно вывести из паза кронштейна конец пружины, снабженный петлей, после чего пружина снимается со стержня.

Определение коэффициента жесткости пружины

Для определения коэффициента жесткости пружины используются вертикальные стержни расположенные на платформе установки. Стержни используются в качестве направляющих.

Измерение жесткости пружины осуществляется следующим образом. На вертикальный стержень, установленный на основании платформы ЛМК-2, надевается пружина (рис. 23). Сверху пружина нагружается небольшим грузом для предварительного сжатия пружины и определения ее начального размера (длины), значение которого заносится в таблицу 1 как X_0 . Значение определяется по одной из граней груза. Далее пружина нагружается дополнительным грузом известной массы и фиксируется ее размер (длина) в сжатом состоянии и заносится в таблицу 1 как значение X_1 .



Рис. 23. Измерение длины нагруженной пружины

Сжатие (деформация) пружины вычисляется по измеренным длинам ненагруженной и нагруженной грузами пружины. Измерение деформации производится линейкой или штангенциркулем.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Различают кинетическую, потенциальную и полную механические энергии [10; 16].

Потенциальной энергией называется механическая энергия системы тел, определяемая их взаимным расположением и характером сил взаимодействия между ними.

Тело, находясь в потенциальном поле (например, поля упругих сил, поля гравитационных сил), обладает потенциальной энергией $E_{\text{пот}}$.

Потенциальную энергию тела можно определить работой, которую надо совершить действующими на тело внешними силами, преодолевающими консервативные силы взаимодействия, перемещая его из конечного состояния, где потенциальная энергия равна нулю, в данное положение.

Работа консервативных сил, приложенных к телу равна уменьшению потенциальной энергии:

$$dA = -dE.$$

Рассмотрим потенциальную энергии упругодеформированного тела (пружины). Сила упругости пропорциональна деформации (сжатию или удлинению) и определяется по закону Гука:

$$F_{\text{упр}} = -k\Delta x,$$

где k – коэффициент упругости (или жесткости) пружины, Δx – деформация пружины.

Тогда по третьему закону Ньютона, для преодоления силы упругости надо приложить силу

$$F = -F_{\text{упр}} = k\Delta x,$$

Элементарная работа dA , совершаемая силой F при малом перемещении (деформации) dx , равна

$$dA = Fdx = kx dx.$$

Полная работа будет равна сумме элементарных работ:

$$A = \int_0^x kx dx = \frac{kx^2}{2}.$$

Для непрерывных величин сумма заменяется интегралом. Тогда потенциальная энергия будет равна:

$$E_{\text{пот}} = \frac{k\Delta x^2}{2}.$$

Потенциальная энергия, определяемая силой тяжести, возникающей в поле тяготения Земли, равна

$$E_{\text{пот}} = A = \int_0^h F dx = \int_0^h mg dx = mgh.$$

Согласно выражению работа, совершаемая силами тяготения, определяется начальным и конечным положением и не зависит от формы траектории пути.

Поле тяготения, в котором работа, совершаемая силами при перемещении тела, определяется начальным и конечным положением и не зависит от формы траектории пути, называется потенциальным, а силы – консервативными.

Кинетическая энергия – это мера (или энергия) механического движения системы.

Сила F , действующая на покоящееся тело и вызывающая его движение со скоростью v , совершает работу. При этом энергия движущегося тела возрастает на величину затраченной работы:

$$dA = dE_{\text{к}}.$$

Используя второй закон Ньютона, можно записать:

$$dE_{\text{к}} = dA = F ds = m \frac{dv}{dt} ds = mv dv.$$

Тогда кинетическая энергия будет равна:

$$E_{\text{к}} = \int_0^v mv dv = \frac{mv^2}{2}.$$

Таким образом, для тела массой m , движущегося со скоростью v , кинетическая энергия равна:

$$E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}.$$

Кинетическая энергия тела есть функция состояния движения системы. В разных инерциальных системах отсчета скорости тела будут разными, т. е. кинетическая энергия зависит от выбора системы отсчета.

Полной механической энергией называется величина равная сумме кинетической и потенциальной энергии.

В системе, в которой действуют консервативные силы, выполняется закон сохранения полной механической энергии, который гласит, что в поле консервативных сил полная механическая энергия остается постоянной:

$$E_{\text{полная}} = E_{\text{пот}} + E_{\text{кин}} = \text{const}.$$

При полном переходе потенциальной энергии покоящегося тела в кинетическую энергию согласно закону сохранения:

$$E_{\text{пот.макс}} = E_{\text{кин.макс}}$$

В работе потенциальная энергия пружины расходуется на совершение работы по перемещению снаряда. В результате взаимодействия с пружиной снаряд приобретает кинетическую энергию. Так как в работе присутствуют не консервативные силы (силы трения), то не вся потенциальная энергия пружины передается снаряду. Для определения части полной энергии, расходуемой на выполнение полезной работы, применяется понятие коэффициента полезного действия (КПД).

КПД – это физическая величина, показывающая какая часть затрачиваемой энергии, расходуется на выполнение полезной работы:

$$\eta = \frac{A_{\text{полезная}}}{A_{\text{затраченная}}} \cdot 100\% = \frac{E_{\text{кин}}}{E_{\text{пот}}} \cdot 100\%.$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подготовить лабораторный комплекс ЛМК и измерительную систему ИМС-4 для опытной проверки законов сохранения энергии и измерения коэффициента полезного действия пушки.

2. Измерить сжатие пружины. Для этого пружина устанавливается на вертикальном стержне платформы ЛМК-2. Сжатие (деформация) пружины Δx вычисляется по измеренным длинам ненагруженной пружины x_0 и нагруженной грузами пружины x_1 :

$$\Delta x = x_0 - x_1.$$

3. Опыт проводится с двумя пружинами несколько раз, используя разные наборы грузов.

4. Занести в таблицу 12 результаты измерений жесткости пружины.

5. Вычислить жесткость пружин:

$$k = \frac{gm}{\Delta x},$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ускорение свободного падения, m – масса наборов грузов.

1. Переписать таблицу 13 для записи расчетов потенциальной энергии сжатой пружины и кинетической энергии снаряда. Измерения проводятся несколько раз с помощью механической пушки.

2. Для проведения опыта по определению КПД механической пружинной пушки необходимо закрепить пружину на стержне. Далее, надев снаряд на стержень, определяется начальное значение длины несжатой пружины по основанию снаряда прижатого к пружине. С помощью зацепа, сжимаем пружину и фиксируем ее положение. Определяем новое значение длины сжатой пружины и по разности значений вычисляем деформацию пружины Δx . В механической пушке используются пружины, применяемые в первом опыте. Значения коэффициентов жесткости пружин берутся из таблицы 1.

3. По полученным значениям деформации и жесткости сжатой пружины рассчитываем ее потенциальную энергию:

$$E_{\text{пот}} = \frac{k\Delta x^2}{2}.$$

4. Освобождая систему «снаряд-пружина» от зацепа, произведем выстрел, при этом измерительная система зафиксирует время пролета снаряда между датчиками таймера. По полученному значению времени вычисляется скорость наряда:

$$v = \frac{L}{t},$$

где $L = 250$ мм – расстояние между датчиками; t – время пролета снаряда между датчиками.

5. Рассчитывается кинетическая энергия снаряда

$$E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}.$$

6. По полученным результатам определится коэффициент полезного действия пушки при каждом выстреле:

$$\eta = \frac{E_{\text{кин}}}{E_{\text{пот}}} = \frac{mv^2}{k\Delta x^2} \cdot 100\%$$

7. Результаты расчетов занести в таблицу 13.

8. По полученным результатам:

Проведите анализ полученного значения КПД пружинной пушки.

Объясните полученные значения КПД для разных опытов и отличие для разных пружин и грузов.

Сформулируйте выводы.

Таблица 12

Результаты определения жесткости пружин

№	m , г	x_0 , см	x_1 , см	Δx , см	k , Н/м	$k_{\text{ср}}$, Н/м
1						
2						

Таблица 13

Результаты проверки законов сохранения энергии

№	k , Н/м	x_1 , см	x_2 , см	Δx , см	$E_{\text{п}}$, Дж	m , г	t , с	V , м/с	$E_{\text{к}}$, Дж	η
1										
2										
3										
4										
5										
6										

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение КПД. Выведите расчетную формулу вычисления КПД механической пушки.
2. Дайте определение кинетической, потенциальной и полной механической энергии.
3. Выведите расчетные формулы для вычисления определения кинетической, потенциальной и полной механической энергии.
4. Какие силы называются консервативными? Назовите примеры консервативных и неконсервативных сил.
5. Дайте определение элементарной и полной работы.
6. Сформулируйте закон сохранения механической энергии.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Изучение динамики поступательного движения

Цель работы: определить величину ускорения свободного падения с помощью машины Атвуда.

Приборы, дополнительное оборудование и исследуемые объекты (образцы): лабораторный комплекс ЛМК-2, в состав которого входит машина Атвуда, измерительная система ИМС-4; набор грузов; нить с крючками, весы.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Работа выполняется с помощью лабораторного комплекса ЛМК-2 (рис. 24). Машина Атвуда представляет стойку, которая располагается на краю платформы ЛМК-2, в верхней части которой располагается шкив. Диаметры канавок шкива – 40 и 60 мм. Шкив позволяет отсчитывать угловую координату. Цена деления шкалы 5° . С обратной стороны на оси шкива закреплен диск с прорезью. При прохождении прорези диска через фотодатчик срабатывает таймер измерительной системы ИМС-4, что позволяет измерить время поворота шкива на угол 360° или 720° (задается положением переключателя ДТ. Положение «1» соответствует 1-му обороту или углу в 360° , положение «2» соответствует 2-м оборотам или углу в 720°).

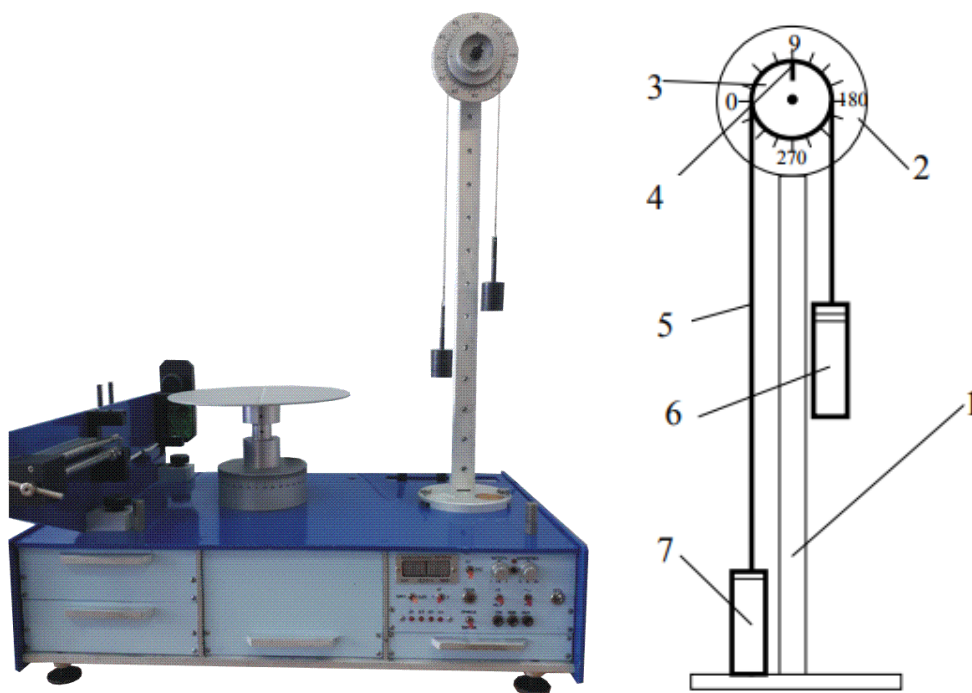


Рис. 24. Лабораторный комплекс ЛМК-2 с машиной Атвуда: 1 – стойка, 2 – лимб, 3 – шкив, 4 – прорезь, 5 – нить, 6 – тяжелый груз, 7 – легкий груз

На перекинутую через шкив нить подвешивают два наборных груза, масса которых отличается не более чем на 10%. Измерение времени движения грузов осуществляют с помощью измерительной системы ИМС-4 (рис. 25), вставленного в каркас комплекса ЛМК.



Рис. 25. Измерительная система ИМС-4

Для этого включают питание электронного блока с помощью тумблера «СЕТЬ». Легкий груз отпускают и удерживают у основания установки. Поворачивая шкив, устанавливают его на нулевое (горизонтальное) положение. При этом щель установится в зазоре фотодатчика. Отпускают груз и фиксируют первое после начала движения показание таймера.

При положении «1» тумблера «1/ΔТ/2» измеряется время одного оборота шкива ($\varphi = 2\pi$), в положении «2» – время двух полных оборотов шкива ($\varphi = 4\pi$). При проведении эксперимента использовать тумблер в положении 1.

Тумблер выбора числа измерений «ЦИКЛ/ОДНОКР» позволяет проводить измерения в циклическом (положение «ЦИКЛ») или однократном режиме (положение «ОДНОКР»). Рекомендуется использовать режим однократного измерения.

На дисплее таймера отображается интервал времени в миллисекундах. Требуемое разрешение времени (0,1 мс или 1 мс) устанавливается тумблером «0,1/1 мс». Перед освобождением груза необходимо показания таймера сбросить путем нажать кнопки «ГОТОВ».

Остальные переключатели и ручки управления измерительной системы не используются.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В динамике основной физической величиной является сила, которая определяется через ускорение тела по второму закону Ньютона. В данной установке линейное ускорение грузов a можно определить через угловое ускорение шкива β [9, 14]:

$$a = \beta R,$$

где R – радиус шкива стойки.

При равноускоренном вращении угол поворота блока φ при начальной угловой скорости $\omega_0 = 0$ и при нулевом положении шкива $\varphi_0 = 0$ определяется выражением:

$$\varphi = \frac{\beta t^2}{2}.$$

Тогда ускорение груза можно определить как:

$$a = \frac{2\varphi R}{t^2},$$

где выражение $2\varphi R$ определяет длину дуги окружности шкива.

Так как устройство установки позволяет определять время одного или двух оборотов шкива, то φ будет равно 2π радиан для одного оборота (360°) и 4π радиан для двух оборотов (720°), и пройденный путь грузами будет равен одной или двум длинам окружностей канавок шкива для нити.

Распределение сил, действующих на грузы, представлено на рисунке 26.

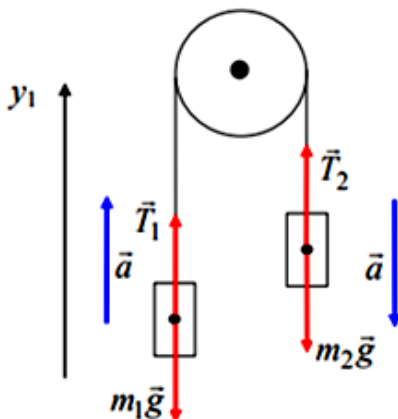


Рис. 26. Распределение сил при движении грузов машину Атвуда

Нить и блок считаются невесомыми, поскольку их массы значительно меньше совокупной массы грузов. И если бы не сила трения в оси блока, можно было бы считать, что силы натяжения нити, действующие на грузы, равны друг другу. Трением в оси блока пренебречь нельзя.

Запишем второй закон Ньютона в векторной форме для обоих грузов:

$$m_1\vec{g} + \vec{T}_1 = m_1\vec{a},$$

$$m_2\vec{g} + \vec{T}_2 = m_2\vec{a}.$$

При проецировании на вертикальную координатную ось получим:

$$m_1g + T_1 = m_1a,$$

$$m_2g + T_2 = m_2a.$$

Вычитая из первого выражения второе, получим:

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

Разность сил натяжения нити определяется только силой трения в оси блока, а сила трения определяется только совокупной массой грузов. Поэтому при проведении измерения с разной разностью грузов, но одинаковой их суммой второе слагаемое $\frac{T_2 - T_1}{m_2 + m_1}$ в полученном выражении модуля ускорения в обоих измерениях будет постоянным. Для этого с легкого наборного груза после первого измерения снимается один диск и перекладывается на более тяжёлый груз.

Обозначая разность грузов в первом во втором измерениях через

$$\Delta m_1 = m'_2 - m'_1,$$

$$\Delta m_1 = m''_2 - m''_1.$$

Тогда ускорения грузов при первом и втором измерении будут определяться следующими выражениями

$$a = \frac{\Delta m_1}{m_2 + m_1} g - \frac{T_2 - T_1}{m_2 + m_1},$$
$$a = \frac{\Delta m_2}{m_2 + m_1} g - \frac{T_2 - T_1}{m_2 + m_1}.$$

От неизвестной величины, определяемой силами трения, можно избавиться, найдя разность ускорений:

$$a_2 - a_1 = g \frac{\Delta m_2 - \Delta m_1}{m_2 + m_1}.$$

Тогда для определения ускорения свободного падения получим следующее выражение:

$$g = (m_2 + m_1) \frac{a_2 - a_1}{\Delta m_2 - \Delta m_1}.$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подготовить лабораторный комплекс ЛМК и измерительную систему ИМС-4 для измерения. Подготовить нить с крючками и наборы грузов массами примерно 170 и 160 г.

2. Измерить 5 раз время движения грузов. Перед измерением времени показания таймера необходимо сбросить. Результаты занести в таблицу 14.

3. С легкого наборного груза после первого измерения снять один диск и переложить на тяжёлый груз. Произвести измерения времени движения грузов повторно. Результаты занести в таблицу 14.

4. Производится расчет среднего движения с первым и вторым наборов грузов.

5. Рассчитывается ускорение свободного падения.

6. Определяется погрешность измерения.

7. Для полученных результатов выполняются статистические расчеты.

7.1. Вычислить среднюю величину ускорения свободного падения:

$$g_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n g_i}{n},$$

где n – количество рассчитанных значений ускорения свободного падения полученных из проведенных опытов для разных начальных положений тела.

7.2. Определить среднеарифметическую погрешность определения ускорения свободного падения по следующей формуле

$$\Delta g_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n |g_{\text{ср}} - g_i|}{n}$$

7.3. Вычислить относительную погрешности измерения:

$$\varepsilon_g = \frac{\Delta g}{g_{\text{ср}}} \cdot 100\%.$$

7.4. Записать результат определения ускорения свободного падения в виде

$$g = g_{\text{ср}} \pm \Delta g_{\text{ср}}.$$

8. По полученным результатам формулируется вывод.

9. Записывается результат измерения в виде

$$g = g \pm \Delta g .$$

10. По полученным результатам формулируется вывод.

Таблица 14

Измерение ускорения свободного падения с помощью машины Атвуда

Измеряемые величины и вычисления	Первое измерение			Второе измерение		
Радиус шкива R , м						
Масса груза m_1 , кг						
Масса груза m_2 , кг						
Разность груза Δm , кг						
Время движения грузов τ , с						
Среднее время движения грузов $t_{\text{ср}}$, с						
Ускорения грузов a , м/с ²						
Ускорение свободного падения g , м/с ²						

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение поступательного и вращательного движения твердого тела.
2. Дайте определения физических понятий скорости, ускорения, угловой скорости, углового ускорения, периода, частоты и циклической частоты.
3. Сформулируйте законы Ньютона.
4. Дайте определения массы, силы, равнодействующей силы, силы трения, силы тяготения, сила тяжести, вес, ускорение свободного падения.
5. Дать определение сил упругости. Что такое упругая деформация.
6. Выведите расчетную формулу в данной лабораторной работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

Определение момента инерции твердого тела

Цель работы: изучение и определение момента инерции твердых тел.

Приборы, дополнительное оборудование и исследуемые объекты (образцы): лабораторный комплекс ЛМК-2, в состав которого входит измерительная система ИМС-4; поворотный стол, набор грузов; весы.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Работа выполняется с помощью лабораторного комплекса ЛМК-2 (рис. 27), в состав которого входит поворотный стол.

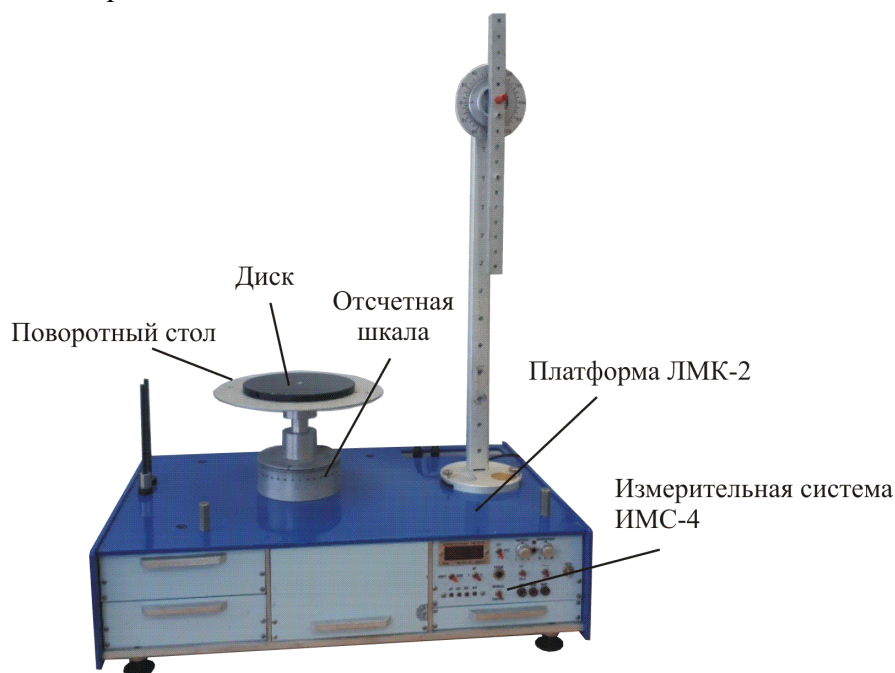


Рис. 27. Лабораторный комплекс ЛМК-2

Поворотный стол содержит платформу с отверстиями для фиксации изучаемых объектов. Расстояние между отверстиями 20 мм. Поворотный стол закреплен на стойке с двухступенчатым шкивом (диаметры 25 и 50 мм). Стойка вращается в основании со шкалой. Указатель перемещается вдоль шкалы, по которой отсчитывается угловая координата стола с разрешением 2.

Для получения колебательной системы через большой шкив поворотного стола перекидывается нить, концы которой посредством двух пружин прикрепляются к штырям на оси нижнего ролика стойки или к зацепу для пружин. Придерживая нить, поворачивают стол так, чтобы в равновесном положении риска указателя показывала нулевое положение. Угол отклонения поворотного стола выбираем в пределах $40\text{--}60^\circ$.

На вертикальной оси закреплен диск с прорезью, который позволяет фиксировать с помощью измерительной системы ИМС время поворота стола на один или два оборота. Измерительная система ИМС-4 (рис. 28) вставлена в каркас комплекса ЛМК.



Рис. 28. Измерительная система ИМС-4

Для измерения периода вращения или колебания стола включают питание электронного блока с помощью тумблера «СЕТЬ».

При положении «1» тумблера « $1/\Delta T/2$ » измеряется время одного колебание (или оборота) поворотного стола ($\varphi = 2\pi$), в положении «2» – время двух полных колебаний (или оборотов) поворотного стола ($\varphi = 4\pi$). При проведении эксперимента рекомендуется использовать тумблер в положении «2».

Тумблер выбора числа измерений «ЦИКЛ/ОДНОКР» позволяет проводить измерения в циклическом (положение «ЦИКЛ») или однократном режиме (положение «ОДНОКР»). Рекомендуется использовать режим однократного измерения.

На дисплее таймера отображаются интервалы времени в миллисекундах. Требуемое разрешение времени (0,1 мс или 1 мс) устанавливается тумблером «0,1/1 мс». Перед отпусканьем груза необходимо показания таймера сбросить путем нажатия кнопки «ГОТОВ».

Остальные тумблеры и ручки управления измерительной системы не используются.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Основной закон динамики вращательного движения твердого тела относительно неподвижной оси связывает кинематическую характеристику $\vec{\beta}$ движения с динамическими характеристиками \vec{M} и I [5; 8; 17]:

$$I\vec{\beta} = \vec{M}.$$

где $\vec{\beta}$ – угловое ускорение, \vec{M} – моментом силы и I – моментом инерции (рис. 29).

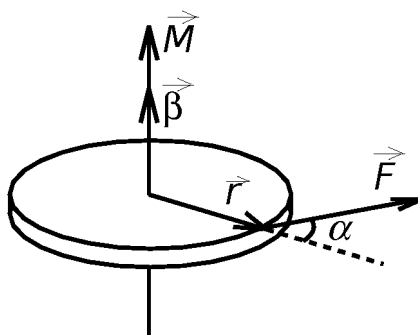


Рис. 29. Момент M силы F

Угловое ускорение характеризует изменение угловой скорости во времени и направлено, как и момент силы, вдоль оси вращения:

$$\vec{\beta} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}.$$

Угловое ускорение связано с тангенциальной (касательной) составляющей линейного ускорения a_τ точки вращающегося тела соотношением

$$a_\tau = \beta \cdot r,$$

где r – кратчайшее расстояние от этой точки до оси вращения.

Моментом силы в общем случае называют векторную величину

$$\vec{M} = [\vec{r} \cdot \vec{F}],$$

где \vec{F} – сила, лежащая в плоскости, перпендикулярной оси вращения; \vec{r} – вектор, соединяющий точку на оси с точкой приложения силы, \vec{M} – сумма составляющих моментов сил вдоль направления оси вращения.

Момент инерции I характеризует распределение массы в твердом теле относительно оси вращения и является мерой инертности вращающегося тела. Момент инерции равен сумме произведений элементарных масс Δm_i , на которые мысленно разбито тело, на квадрат их расстояний до оси вращения

$$I = \sum \Delta m_i r_i^2.$$

Выражая Δm_i через плотность тела: $\Delta m_i = \rho \Delta V_i$, где ΔV_i – элементарный объем тела, и переходя к пределу при $\Delta V_i \rightarrow 0$, получим

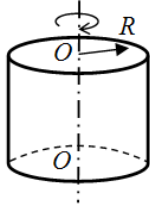
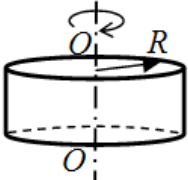
$$I = \int \rho r^2 dV.$$

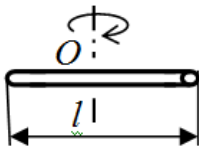
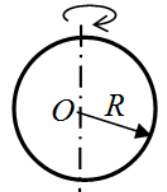
Последняя формула позволяет теоретически найти момент инерции любого тела.

В таблице 15 представлены формулы вычисления момента инерции для некоторых правильных тел.

Таблица 15

Моменты инерции для некоторых тел

Тело	Положение оси вращения	Момент инерции $I_{рас}, \text{кг} \cdot \text{м}^2$
Полый тонкостенный цилиндр или кольцо радиуса R		$I = mR^2$
Сплошной цилиндр или диск радиуса R		$I = \frac{1}{2} mR^2$

Тело	Положение оси вращения	Момент инерции $I_{рас}, \text{кг} \cdot \text{м}^2$
Прямой тонкий стержень длиной l		$I = \frac{1}{12} ml^2$
Шар радиуса R		$I = \frac{2}{5} mR^2$

Теорема Штейнера устанавливает связь между моментом инерции I_C твердого тела относительно оси, проходящей через центр инерции, и моментом инерции относительно другой оси, параллельной первой

$$I = I_C + ma^2,$$

где a – расстояние между осями, m – масса тела.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Упражнение 1. Измерение момента инерции ненагруженного стола

Измерение момента инерции I_0 ненагруженного стола производится методом «эталонного» тела. В качестве «эталонного» тела используются два цилиндра, для которых необходимо измерить массу m и радиус цилиндра R_0 .

1. Вычислить момент инерции грузов (расчетный):

$$I_1 = 2m \left(r^2 + \frac{R_0^2}{2} \right).$$

2. Измерить период колебаний поворотного стола без грузов T_0 . Для измерения периода предварительно включают измерительный комплекс в электрическую сеть и подготавливают измерительную систему ИМС-4 для измерения времени движения тела. Перед измерением времени необходимо проверить, чтобы поворотный стол был установлен на нулевое деление, и сбросить показания таймера.

3. Установив симметрично на расстоянии $r = 100$ мм от оси два цилиндра измерить период колебания поворотного стола с цилиндрами T .

4. Вычислить момент инерции стола вместе с грузами:

$$I = \frac{I_1 T^2}{T^2 - T_0^2}.$$

5. Вычислить момент инерции ненагруженного стола:

$$I_0 = \frac{I_1 T^2}{T^2 - T_0^2}.$$

6. Используя формулу

$$I = I_1 + I_0.$$

проверьте результаты вычисления момента инерции ненагруженного стола.

7. Результаты расчетов и измерений записать в тетрадь.

Упражнение 2. Измерение момента инерции тел

1. Зарисуйте в тетрадь таблицу 16 для записи измерений и результатов расчета.

Таблица 16

Моменты инерции тел

Тело	m , кг	$l(R)$, м	$I_{рас}$, кг · м ²	T , мс	$I_{экс}$, кг · м ²

2. По указанию преподавателя измерьте массу m и линейные размеры тела l (или R) для стержня, цилиндра, диска или полушаров. Вычислите момент инерции тел $I_{рас}$ относительно оси вращения, проходящей через центр тяжести. Результаты измерений T и вычислений запишите в таблицу 16.

3. Измерьте период колебаний стола нагруженного выбранным телом.

4. Вычислите момент инерции тела $I_{экс}$:

$$I_{экс} = I_0 \left(\frac{T^2}{T_0^2} - 1 \right),$$

где T_0, I_0 – период колебаний и момент инерции ненагруженного стола.

5. Результаты расчетов и измерений записать в тетрадь.

Упражнение 3. Проверка теоремы Штейнера

1. Зарисуйте в тетрадь таблицу 17 для записи измерений и результатов расчета.

Таблица 17

Проверка теоремы Штейнера

a , м	0	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
ma^2 , кг · м ²						
I_c , кг · м ²						
T , мс						
$I_{экс}$, кг · м ²						
I , кг · м ²						

2. Для тела, указанного преподавателем, измерить массу и линейные размеры.

3. Вычислить произведение ma^2 и момент инерции тела I_c относительно оси проходящей через центр его тяжести.

4. Результаты измерений и расчетов записать в тетрадь.

5. Устанавливая тело относительно центра стола на расстояние a , измерить период колебаний T .

6. Вычислите момент инерции тел $I_{экс}$:

$$I_{экс} = I_0 \left(\frac{T^2}{T_0^2} - 1 \right)$$

где T_0, I_0 – период колебаний и момент инерции ненагруженного стола.

7. Используя теорему Штейнера, вычислить момент инерции тела I относительно оси, расположенной от центра тела на расстоянии a .

8. Результаты расчетов и измерений записать в тетрадь.

9. По полученным результатам формулируются выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Запишите основное уравнение динамики вращательного движения.

2. Что такое момент инерции твердого тела?

3. Запишите выражения вычисления момента инерции для правильных тел?

4. Дайте определение момента силы. Как определяется направление вектора момента силы.

5. Дайте определение вектора углового ускорения

6. Сформулируйте теорему Штейнера.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

Опытная проверка закона сохранения энергии и импульса

Цель работы: изучить и проверить законы сохранения энергии и импульса.

Приборы, дополнительное оборудование и исследуемые объекты (образцы): лабораторный комплекс ЛКМ-2, в состав которого входит установка механическая пушка, измерительная система ИМС-4; набор снарядов и грузов.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Работа выполняется с помощью лабораторного комплекса ЛКМ-2 (рис. 30). Механическая пушка с баллистическим маятником вмонтирована на основание платформы ЛКМ-2.

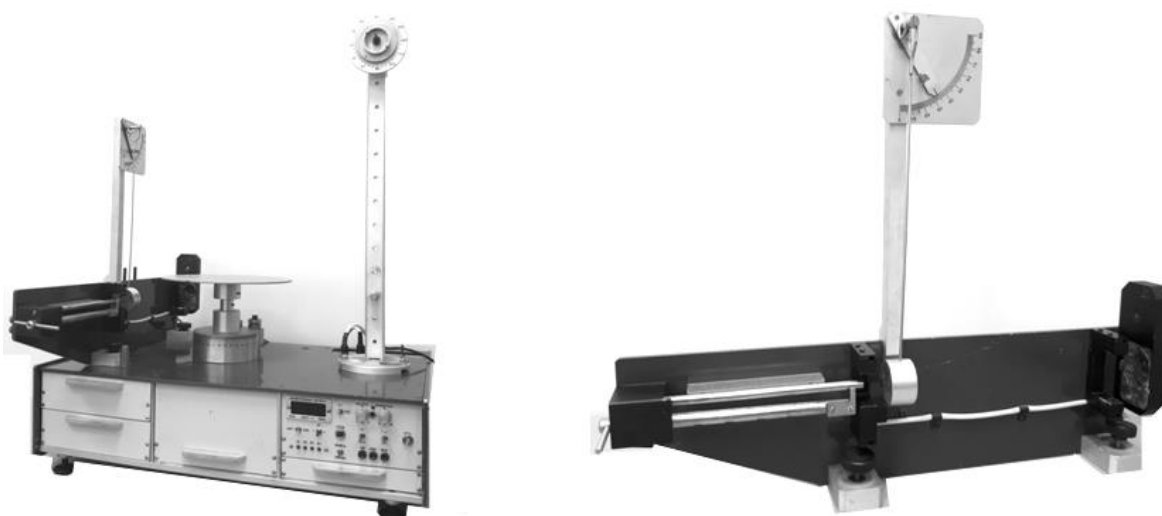


Рис. 30. Лабораторный комплекс ЛКМ для опытной проверки выполнения законов сохранения

На стержень, укрепленный в кронштейне, надевается пружина (отогнутый конец пружины закладывается в прорезь на кронштейне), затем снаряд. Спусковое устройство содержит рейку с фиксирующими вырезами, зацеп и рукоятку, закрепленную на рейке. В кронштейне установлен фиксатор, задающий четыре положения рейки с шагом 25 мм.

При работе с пушкой для перемещения рейки необходимо ее поворачивать за рукоятку. При горизонтальном положении рукоятка может передвигаться вперед по направлению выстрела. Для фиксации снаряда на рейке рукоятка поворачивается против часовой стрелки. Передвигают рейку назад. Сжатие (деформацию) пружину пушки определяют по шкале расположенной на кронштейне. Для совершения выстрела необходимо повернуть рукоятку по часовой стрелке, пока зацеп не освободит снаряд.

Для смены пружины нужно вывести из паза кронштейна конец пружины, снабженный петлей, после чего пружина снимается со стержня.

Подвес баллистического маятника содержит стойку с зацепом, ось, шкалу и датчик максимального отклонения. Стойка устанавливается вертикально на основании пушки. Маятник подвешивается на оси с помощью имеющегося на нем крючка, при этом центр

мишени оказывается на линии выстрела. Расстояние от оси маятника до линии выстрела (длина маятника) равно 300 мм.

Для определения угла отклонения маятника делают два отсчета по датчику угла отклонения: при начальном (равновесном) положении маятника, когда датчик слегка касается стержня маятника, и после выстрела, когда датчик отклонен стержнем на некоторый угол. Угол отклонения маятника равен разности этих отсчетов.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Первый закон Ньютона: всякое материальная точка (тело) сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока силы, действующие на тело, будут скомпенсированы или равны нулю [10;13; 18].

Свойство тела сохранять состояние покоя или прямолинейного равномерного движения при отсутствии воздействия на него других тел называется инерцией. Системы отсчета, в которых выполняется первый закон Ньютона, называются инерциальными системами отсчета.

Второй закон Ньютона: ускорение, приобретаемое материальной точкой (телом), прямо пропорционально и совпадает по направлению с действующей на него силой F и обратно пропорционально массе материальной точки (тела) m :

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}.$$

Масса тела m – это скалярная физическая величина, являющаяся мерой инертности тела. Сила F – это векторная величина, являющаяся мерой воздействия на тело со стороны других тел.

Второй закон Ньютона можно переписать в виде:

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d}{dt}(m\vec{v}) = \frac{d\vec{p}}{dt}.$$

Физическая величина, равная произведению массы на скорость тела называется импульсом тела:

$$\vec{p} = m\vec{v}.$$

Третий закон Ньютона: силы, с которыми действуют друг на друга, равны по модулю, противоположно направлены и действуют вдоль прямой соединяющие эти точки:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}.$$

Закон сохранения импульса. Силы, действующие в системе тел, подразделяются на внутренние силы, т. е. силы взаимодействия тел системы между собой, и внешние силы, т. е. силы, действующие на систему со стороны тел, не входящих в систему.

Поскольку по третьему закону Ньютона сумма всех внутренних сил равна нулю, то можно записать:

$$d(\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n) = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i dt,$$

где $\sum \vec{F}_i dt$ – сумма всех внешних сил, действующих на систему.

Для замкнутой системы

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i dt = 0.$$

Тогда

$$d(\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n) = 0 \text{ и } \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n = \text{const.}$$

Импульс замкнутой системы не изменится по величине и по направлению. При этом импульс каждого тела системы может изменяться.

Кинетическая энергия – это мера (или энергия) механического движения системы.

Сила F , действующая на покоящееся тело и вызывающая его движение со скоростью v , совершает работу. Кинетическая энергия тела массой m , движущегося со скоростью v , равна:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}.$$

Кинетическая энергия тела есть функция состояния движения системы. В разных инерциальных системах отсчета скорости тела будут разными, т. е. кинетическая энергия зависит от выбора системы отсчета.

Потенциальной энергией называется механическая энергия системы тел, определяемая их взаимным расположением и характером сил взаимодействия между ними.

Тело, находясь в потенциальном поле (например, поля упругих сил, поля гравитационных сил), обладает потенциальной энергией E_p .

Потенциальную энергию тела можно определить работой, которую надо совершить действующими на тело внешними силами, преодолевающими консервативные силы взаимодействия, перемещая его из конечного состояния, где потенциальная равна нулю, в данное положение.

Потенциальная энергия сжатой пружины будет равна:

$$E_p = \frac{k\Delta x^2}{2}.$$

Потенциальная энергия, определяемая силой тяжести, возникающей в поле тяготения Земли, равна

$$E_p = mgh.$$

Полной механической энергией называется величина равная сумме кинетической и потенциальной энергии. В системе, в которой действуют консервативные силы, выполняется закон сохранения полной механической энергии, которая гласит, что в поле консервативных сил полная механическая энергия остается постоянной:

$$E_{\text{пол}} = E_p + E_k.$$

При полном переходе потенциальной энергии покоящегося тела в кинетическую энергию согласно закону сохранения:

$$E_{p\text{max}} = E_{k\text{max}}.$$

Рассмотрим баллистический маятник. Потенциальная энергия сжатой пружины равна:

$$E_p = \frac{k\Delta x^2}{2}.$$

При выстреле из пружинной пушки потенциальная энергия пружины переходит в кинетическую энергию снаряда:

$$E_k = \frac{mv^2}{2},$$

где v – скорость снаряда до попадания в мишень.

Согласно закону сохранения импульса импульс снаряда p_1 и мишени p_2 до взаимодействия равен импульсу системы p' после их взаимодействия:

$$p_1 + p_2 = p' \quad \text{или} \quad mv + M0 = (m + M)v',$$

где $M = m_1 + \frac{1}{3}m_2$ – приведенная масса маятника, m_1 – масса мишени, m_2 – масса стержня.

Скорость снаряда и мишени после их взаимодействия можно определить из закона сохранения энергии:

$$\frac{(m + M)v'^2}{2} = (m + M)gh,$$

где $h = l(1 - \cos\varphi)$ – высота подъема мишени с грузом (рис. 31).

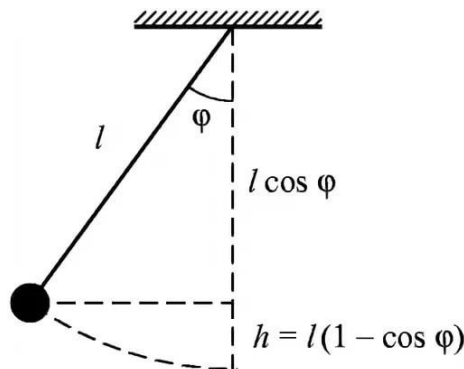


Рис. 31. Определение высоты подъема маятника

Откуда скорость снаряда и мишени после их взаимодействия будет определяться выражением:

$$v' = \sqrt{2gl(1 - \cos\varphi)}.$$

Тогда скорость снаряда до взаимодействия будет равна

$$v = \frac{m + M}{m} \sqrt{2gl(1 - \cos\varphi)}.$$

Так как в работе присутствуют не консервативные силы (силы трения, силы упругости), то не вся кинетическая энергия снаряда передается мишени. Для определения энергии, расходуемой на выполнение полезной работы, используется понятие коэффициента полезного действия (КПД). КПД – это физическая величина, показывающая какая часть затрачиваемой энергии, расходуется на выполнение полезной работы:

$$\eta = \frac{A_{\text{полез}}}{A_{\text{затр}}} 100\%.$$

Часть энергии расходуется на преодоление сил трения и деформацию пластилина мишени.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подготовить лабораторный комплекс ЛКМ-2 для опытной проверки закона сохранения импульса.
2. Переписать в тетрадь таблицу 18 для проверки закона сохранения импульса.

Таблица 18

Результаты измерений и расчетов

Пружина	m , г	$\Delta\varphi$, °	v , м/с	p_1 , кг·м/с	$M+m$, г	v' , м/с	p' , кг·м/с	η
1								
2								

3. Проверить условие выполнения «математичности» маятника для мишени. Момент инерции стержня $I_2 = \frac{1}{3}m_2l_2$ должен незначительный в сравнении с моментом инерции мишени $I_1 = m_1l_1$.

4. Параметры маятника, используемого в установке:

– расстояние от оси до линии выстрела $l = 300$ мм

– масса мишени с пластилином $m_1 = 67$ г

– масса стержня $m_2 = 11$ г

Результаты проверки записать в тетрадь.

5. Измерить с помощью весов массу снаряда. Определите приведенную массу маятника.

6. Используя баллистический маятник, определите угол отклонения маятника.

7. Вычислить скорость и импульс снаряда до взаимодействия с мишенью маятника.

8. Определите скорость и импульс снаряда и мишени после их взаимодействия.

9. Вследствие конечной массы пружины и наличия сил трения определите коэффициент полезного действия пушки:

$$\eta = \frac{p}{p'}$$

10. Проведите эксперимент для двух пружин по несколько раз.

11. Результаты измерений и расчетов записать в таблицу 18. По полученным результатам формулируется вывод.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется импульсом? Что называется замкнутой системой тел?
2. Какие силы называются внутренними, внешними. Привести примеры.
3. Выведите закон сохранения импульса.
4. Сформулируйте законы Ньютона.
5. Дайте определение кинетической, потенциальной и полной механической энергии.
6. Сформулируйте законы сохранения механической энергии и импульса.
7. Выведите расчетную формулу определения скорости снаряда баллистического маятника.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

Определение коэффициента вязкости воздуха капиллярным методом

Цель: определение коэффициента вязкости воздуха и исследование зависимости объёма воздуха, протекающего через капилляр, от его размеров.

Приборы, дополнительное оборудование и исследуемые объекты (образцы): набор капилляров, стеклянный баллон, компрессор, водяной манометр, секундомер.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка (рис. 32) состоит из баллона Б, жидкостного манометра М и набора капилляров (1–5), соединенных с баллоном кранами (K_1 – K_5). Давление воздуха в баллоне до необходимого можно повысить с помощью компрессора (Н) при открытом кране К и закрытых кранах (K_1 – K_5) и K_0 . Кран K_0 используется для практически мгновенного выпуска воздуха из баллона.

В установке капилляры соединены последовательно (рис. 32) одинакового сечения. Если при закрытых кранах К и K_0 открыть кран K_1 (при закрытых кранах K_2 – K_5), то воздух из баллона будет вытекать через первый капилляр.

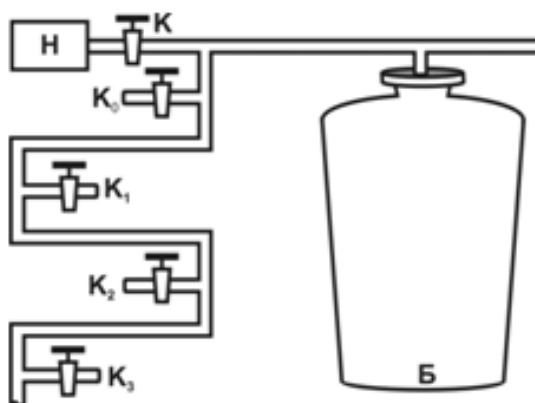


Рис. 32. Установка для определения коэффициента вязкости воздуха капиллярным методом

При открытом кране K_2 (остальные закрыты) воздух вытекает через два последовательно соединенных капилляра 1 и 2, что эквивалентно вытеканию воздуха через капилляр длиной, равной сумме длин двух капилляров; $l_1 + l_2$.

А если открыть кран K_5 (остальные краны закрыты), то воздух будет вытекать через последовательно соединенные 5 капилляров или капилляр, имеющий длину

$$l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5.$$

Примечание: сечение соединительных трубок много больше сечения капилляра и их сопротивление практически равно нулю, т. к. сопротивление пропорционально r^4 (формула Пуазейля б).

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Явления переноса – это процессы установления равновесия в системе путём переноса массы (диффузия), энергии (теплопроводность) и импульса молекул (внутреннее трение или динамическая вязкость) [13; 18].

Эти явления происходят в неравновесном состоянии, т.е. при наличии в системе градиентов плотности $\frac{d\rho}{dx}$, температуры $\frac{dT}{dx}$ и скорости частиц $\frac{du}{dx}$, и обусловлены тепловым движением молекул.

В явлении вязкости наблюдается перенос импульса от более быстрых участков потока к менее быстрым. При течении газа или жидкости, например внутри трубы, скорости слоев различны: их распределение при ламинарном течении показано на рисунке 33 (длина стрелки показывает скорость данного слоя).

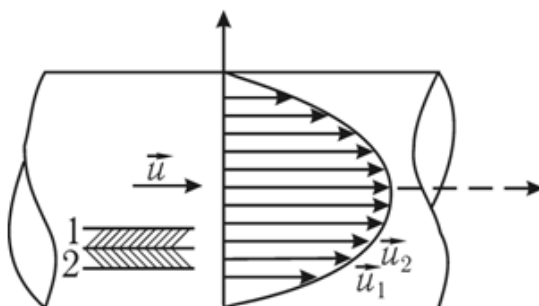


Рис. 33. Ламинарное течение внутри трубы

Причиной этого является хаотическое тепловое движение молекул, при котором они непрерывно переходят из слоя в слой и в соударениях с другими молекулами обмениваются импульсами. Так, молекулы второго слоя, попадая в слой 1, переносят свой импульс направленного движения $m_0\bar{u}_2$, а в слой 2 приходят молекулы с меньшим импульсом $m_0\bar{u}_1$. В результате второй слой тормозится, а первый – ускоряется. Опыт показывает, что импульс dp , передаваемый от слоя к слою через поверхность S , пропорционален градиенту скорости $\frac{du}{dx}$, площади S и времени переноса dt :

$$dp = -\eta \frac{du}{dx} S dt.$$

В результате между слоями возникает сила внутреннего трения (закон Ньютона)

$$F = \left| \frac{d\vec{p}}{dt} \right| = \eta \frac{du}{dx} S,$$

где η – коэффициент вязкости среды.

Для идеального газа коэффициент вязкости

$$\eta = \frac{1}{3} \lambda \nu \rho.$$

Средняя длина свободного пробега молекул

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 P},$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ – постоянная Больцмана, в d – эффективный диаметр молекул (по Ван-дер-Ваальсу для воздуха $d = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$), T , P – температура и давление газа.

Средняя скорость теплового движения молекул

$$v = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}},$$

где $R = 8,31 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$ – универсальная газовая постоянная, M – масса одного моля газа (для воздуха $M = 28,9 \text{ г/моль}$).

Плотность газа согласно уравнению состояния идеального газа

$$\rho = \frac{PM}{RT}.$$

При ламинарном течении через трубу круглого сечения радиусом r (капилляр) и длиной L за время t протекает газ или жидкость, объём V которых определяется по формуле Пуазейля:

$$V = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\pi r^4}{8L} \Delta P t,$$

где ΔP – разность давлений на концах капилляра.

Поток тепла $\frac{dQ}{dT}$, переносимый через поверхность S , нормальную потоку, зависит от градиента температуры $\frac{dT}{dx}$ в направлении переноса (закон Фурье):

$$q = \frac{dQ}{dT} = -\lambda S \frac{dT}{dx},$$

где λ – коэффициент теплопроводности, для идеального газа

$$\lambda = \frac{1}{3} \rho \lambda v c_v.$$

Здесь $c_v = iR/2M$ – удельная теплоёмкость газа при постоянном давлении, i – число степеней свободы молекулы газа.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ

Если в баллоне создать избыточное над атмосферным P_0 давление

$$\Delta P = P - P_0 = \rho_{\text{ж}} g h,$$

($\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости в манометре, h – разность уровней жидкости) и соединить капилляр с атмосферой, то за время dt через капилляр вытечет некоторое количество воздуха, масса которого

$$dm = \rho_{\text{воз}} dV,$$

где $\rho_{\text{воз}}$ – плотность воздуха в капилляре, зависящая от давления воздуха, dV – объём вышедшего воздуха.

Давление воздуха в капилляре изменяется от P_0 до $P_0 + \rho g h$, но так, как $\rho g h \ll P_0$, то с достаточной точностью можно принять давление воздуха в капилляре равным атмосферному P_0 . Тогда плотность воздуха (из уравнения Менделеева–Клапейрона)

$$\rho = \frac{P_0 M}{RT}.$$

Объём воздуха dV , прошедшего через капилляр за время dt , описывается формулой Пуазейля (6):

$$dV = \frac{\pi r^4}{8\eta L} \Delta P t = \frac{\pi r^4}{8\eta L} \rho_{\text{ж}} g h dt,$$

а масса воздуха, вытекающего из баллона, с учётом формул (15) и (16)

$$dm = \rho dV = \frac{P_0 M \pi r^4}{8RT\eta L} \rho_{\text{ж}} g h dt$$

Из уравнения состояния идеального газа выразим изменение массы газа dm в баллоне через уменьшение давления в нём.

Так как $dP = \rho_{\text{ж}} g h dt$, то

$$dm = \frac{MV_6}{RT} dP = \frac{MV_6}{RT} \rho_{\text{ж}} g h dh.$$

Исключая dm из уравнений, получаем

$$-\frac{dh}{h} = \frac{P_0 \pi r^4}{V_6 8L\eta} dt$$

Решая это дифференциальное уравнение при условии, что за время опыта давление в баллоне уменьшится от $\rho_{\text{ж}} g h_0$ до $\rho_{\text{ж}} g h$, получаем

$$\ln h = \ln h_0 = -\frac{P_0 \pi r^4}{V_6 8L\eta} t$$

Таким образом, получена формула, которая связывает разность давлений h на концах капилляра с временем t истечения воздуха, его вязкостью η и размерами капилляра r и L .

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задание № 1. Экспериментальная проверка расчётной формулы

1. Запишите в таблице 19 величину атмосферного давления P_0 . и параметры установки: радиус r и длину L одного из капилляров, объём баллона V_6 .

2. При всех закрытых кранах (рис. 33), открыв кран К, накачайте в баллон воздух до избыточного давления 210...220 мм водяного столба. Закройте кран К. (Компрессор работает, когда нажата и удерживается кнопка).

3. Выждав около 1 мин, пока не установится постоянное давление в баллоне, откройте кран К₅ (или тот, который сообщает выбранную вами группу капилляров с атмосферой) и одновременно включите секундомер.

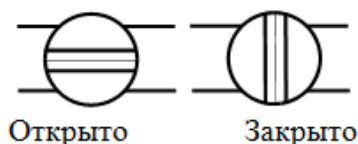


Рис. 33. Положение открытого и закрытого крана

4. После того, как давление уменьшится на $\Delta h = 20$ мм водяного столба, закройте кран К₅ и одновременно выключите секундомер. Запишите в таблице 19 остаточное значение η и время t .

5. Повторите измерения ещё несколько раз, увеличивая значение Δh на 20...30 мм по сравнению с предыдущим. Начальное давление h_0 каждый раз задавайте одно и то же.

6. Результаты внесите в таблицу 19.

7. Рассчитайте $\ln \frac{h_0}{h}$ и постройте график (см. рекомендации) зависимости в координатах $\ln \frac{h_0}{h} - t$ по полученному графику сделайте вывод о справедливости расчётной формулы.

8. Вычислите значение углового коэффициента k полученной на графике прямой.

Таблица 19

Экспериментальная проверка расчётной формулы

$h, \text{мм}$	$t, \text{с}$	$\ln \frac{h_0}{h}$	$V_6 = 0,21 \text{ м}^3$ $P_0 = \text{Па}$ $r = \text{мм}$ $L = \text{мм}$ $h_0 = \text{мм}$

9. Используя найденное значение углового коэффициента

$$k = \frac{P_0 \pi r^4}{V_6 8 L \eta'}$$

рассчитайте коэффициент вязкости воздуха η для условий эксперимента. Оцените абсолютную и относительную погрешности измерений η , запишите результат в виде доверительного интервала.

10. Сравните его с табличным и сделайте вывод.

Задание № 2. Определение коэффициента вязкости воздуха

1. Запишите в таблицу 20 величину атмосферного давления P_0 и параметры установки: объём баллона V_6 , радиус r и суммарную длину L капилляра.

2. При всех закрытых кранах K_0-K_5 откройте кран K и накачайте в баллон воздух до избыточного давления 220...240 мм водяного столба. Закройте кран K (Компрессор работает, когда нажата и удерживается кнопка).

3. Выждите около 1 минуты, пока установится постоянное давление в баллоне, и откройте кран (K_0-K_5) (именно тот, который сообщает выбранную вами группу капилляр с атмосферой). Воздух начнёт вытекать из баллона через капилляр.

4. Когда разность уровней воды в манометре снизится до выбранного начального h_0 , включите секундомер.

5. После того, как давление в баллоне уменьшится в 3-5 раза, закройте кран и одновременно выключите секундомер. Запишите в таблицу 20 время опыта t и остаточное давление h в баллоне.

Определение коэффициента вязкости воздуха

№ п.п.	t, c	$h, мм$	$\frac{h_0}{h}$	$\ln \frac{h_0}{h}$	$V_6 = 0,21 м^3$ $P_0 = Па$ $r = мм$ $L = мм$ $h_0 = мм$
1					
2					
3					
4					
5					
Средн.					

6. Повторите опыт ещё несколько раз, произвольно задавая время опыта.

7. Рассчитайте: h_0/h , $\ln h_0/h$ средние значения времени опыта, $\overline{\ln h_0/h}$ и найдите величину η .

8. Оцените погрешность определения коэффициента вязкости, сравнив его с табличным значением. Сделайте вывод.

Задание № 3. Исследование зависимости расхода воздуха через капилляр от длины капилляра

1. Опыт выполняется на установке, в которой капилляры соединены последовательно.

2. Внесите в таблицу 21 параметры установки: объем V_6 , радиус капилляров r , длину L (одного, двух и т. д.) последовательно соединенных капилляров и атмосферное давление P_0 .

3. Закройте краны (K_1-K_5) и K_0 . Откройте кран K , включите компрессор. Когда давление водяного баллона достигнет 200 мм водяного столба выключите насос и закройте кран K . (Компрессор работает, когда нажата и удерживается кнопка).

4. Откройте кран K_1 и включите секундомер. Когда давление в баллоне уменьшится в 2 раза (станет 100 мм водяного столба) выключите секундомер и одновременно закройте кран. В таблицу 21 запишите показания секундомера и остаточное давление h в баллоне. Кроме того, занесите в таблицу начальное давление h_0 .

Примечание: Во всех последующих опытах начальные h_0 и конечные h давления должны быть точно такими же (их разброс будет определять систематическую ошибку опыта).

5. Повторите этот опыт еще дважды и найдите среднее значение t , за которое давление в баллоне меняется от h_0 до h .

6. Проведите аналогичные измерения (пп. 2-5) с двумя, тремя и т. п. последовательно соединенными капиллярами и занесите результаты в таблицу 21.

7. Постройте график зависимости времени t , соответствующего одинаковому расходу газа $\frac{h_0}{h} = 2$, от суммарной длины капилляров L (длина одного капилляра 175 мм). По полученному графику сделайте вывод.

8. Вычислите угловой коэффициент K линии, проведенной на графике.

Исследование зависимости расхода воздуха через капилляр от длины капилляра

№	$L, м$	$t, с$	$t_{cp}, с$	$V_6 = 0,21 м^3$ $P_0 = 10^5 Па$ $r = 0,78 мм$ $h = 100 мм$ $h_0 = 200 мм$
1				
2				
3				
4				
5				

9. Используя полученное значение углового коэффициента K :

$$K = \frac{8\eta V_6}{\pi r^4 P_0} \ln \frac{h_0}{h},$$

рассчитайте коэффициент вязкости воздуха η для условий эксперимента.

10. Оцените погрешность опыта, сравнив полученный результат с табличным

$$\eta = 1,82 \cdot 10^{-5} Па \cdot с \text{ (при } t = 20^\circ C \text{).}$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем обусловлено появление сил вязкости в идеальном газе?
2. Почему внутреннее трение называют явлением переноса?
3. Какая величина переносится при вязком течении газа?
4. Градиент какой величины определяет силу вязкости в газе? Что называют градиентом скорости?
5. По какой формуле можно рассчитать: а) импульс направленного движения, передаваемого от слоя к слою; б) силу вязкости в газе?
6. Какую силу называют силой вязкости? Чем определяется её величина?
7. От каких параметров газа зависит его коэффициент вязкости?
8. От каких величин зависит средняя длина свободного пробега молекул воздуха?
9. Как изменяются средняя длина свободного пробега молекул и коэффициент вязкости воздуха при его переходе из баллона в атмосферу в условиях опыта?
10. От каких параметров газа зависит средняя скорость хаотического теплового движения его молекул? По какой формуле её рассчитывают?
11. Какую разность давлений измеряют в работе жидкостным манометром?
12. Какова примерная величина давления воздуха в капилляре в течение опыта? Измерения каких величин в данной работе являются: а) прямыми; б) косвенными?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

Определение отношения теплоёмкостей воздуха

Цель: изучить процессы, протекающие в газе при определении отношения теплоёмкостей методом Клемана–Дезорма, и измерить отношение $\frac{c_p}{c_v}$ для воздуха.

Приборы, дополнительное оборудование и исследуемые объекты (образцы): установка, состоящая из стеклянного баллона, водяного манометра, компрессора, секундомера.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Измерения выполняют на установке (рис. 34), состоящей из большого стеклянного баллона Б, компрессора Н и водяного манометра 1. Баллон соединяют краном К с компрессором, а краном K_0 – с атмосферой. Метод, предложенный Клеманом и Дезормом (1819 г.), основан на изучении параметров некоторой массы газа, переходящей из одного состояния в другое двумя последовательными процессами: адиабатическим и изохорическим.

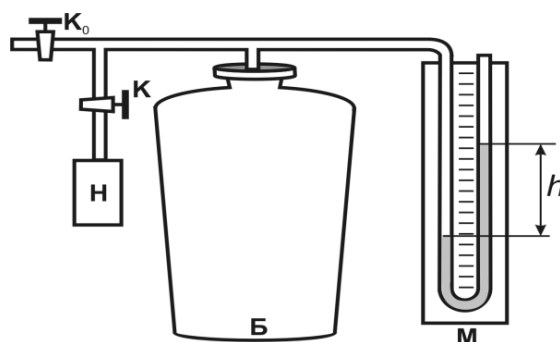


Рис. 34. Установка определения отношения теплоемкостей воздуха

Эти процессы на диаграмме $P - V$ (рис. 35) представлены кривыми 1-2 и 2-3 соответственно. Если накачать воздух в баллон и выдержать до установления теплового равновесия с окружающей средой, то в этом начальном состоянии 1 газ имеет параметры P_1, V_1, T_1 , причём температура газа в баллоне равна температуре окружающей среды, а давление $P_1 = P_0 + P'$, немного больше атмосферного P_0 .

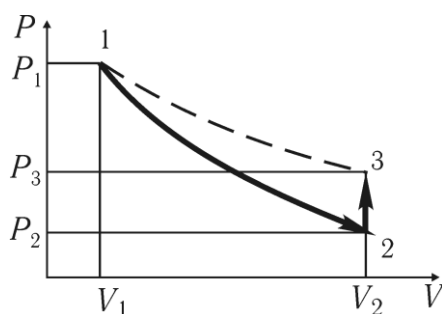


Рис. 35. P - V диаграмма

При открывании крана K_0 воздух в баллоне перейдёт в состояние 2. Его давление снизится до атмосферного $P_2 = P_0$. Оставшаяся масса воздуха, которая занимала в состоянии

1 часть объёма баллона, расширяясь, займёт весь объём V_2 . При этом температура воздуха, оставшегося в баллоне, уменьшится. При быстром расширении газа можно пренебречь его теплообменом с окружающей средой через стенки баллона и считать процесс 1-2 адиабатическим:

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma = P_0 V_2^\gamma,$$

После закрытия крана K_0 охлаждённый адиабатическим расширением воздух в баллоне будет нагреваться (процесс 2-3) до температуры окружающей среды $T_3 = T_1$ при постоянном объёме $V_2 = V_3$. При этом давление в баллоне возрастёт до

$$P_3 = P_2 + P''.$$

Избыточное давление воздуха P' и P'' измеряют с помощью образного манометра по разности уровней жидкости с плотностью ρ :

$$P' = \rho g h, \quad P'' = \rho g h,$$

где H и h – показания манометра в состояниях 1 и 3 соответственно.

Тогда

$$P_1 = P_0 + \rho g H, \quad P_0 = P_3 + \rho g h.$$

Состояния воздуха 1 и 3 принадлежат изотерме, поэтому

$$P_1 V_1 = P_3 V_3.$$

Исключив отношение объёмов, найдём связь давлений газа:

$$\frac{P_1}{P_0} = \left(\frac{P_1}{P_3}\right)^\gamma = \left(\frac{P_1/P_0}{P_3/P_0}\right)^\gamma.$$

Выразим давления P_1 и P_2 через P_0 и прологарифмируем:

$$\ln\left(1 + \frac{\rho g h}{P_0}\right) = \gamma \left(n \left(1 + \frac{\rho g h}{P_0}\right) - \ln\left(1 + \frac{\rho g h}{P_0}\right) \right).$$

С учётом того, что если $x \ll 1$ то $\ln(1 - x) = -x$, получим расчётную формулу в следующем виде:

$$\gamma = \frac{H}{H - h}.$$

Таким образом, для определения отношения теплоёмкостей воздуха достаточно осуществить процессы (1-2-3) и измерить показания манометра H и h в состояниях газа 1 и 3 соответственно.

Но осуществить равновесный адиабатический процесс сложно: если проводить расширение газа быстро, то процесс не будет равновесным, так как температура и давление газа не успевают выравниваться по объёму. Для проведения медленного адиабатического процесса нужна тепловая изоляция баллона. В данной установке за время t расширения газа подводится тепло. Поэтому при последующем изохорическом нагревании давление поднимается меньше, т.е. измеряемое $h' \ll h$, необходимого для расчёта γ . По мере увеличения времени расширения газа значение h' снижается, приближаясь к нулю при $t \rightarrow \infty$ (изотермическое расширение 1–3). Опытным путём установлено, что

$$h' = h e^{-at}.$$

Логарифмируя эту функцию, получаем зависимость

$$\ln h' = \ln h - at,$$

где a – постоянная установки, t – время протекания процесса, в течение которого баллон сообщается с атмосферой.

График зависимости конечного избыточного давления воздуха в баллоне от времени контакта его с атмосферой показан на рисунке 36.

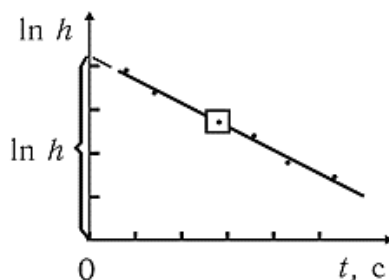


Рис. 36. График зависимости конечного избыточного давления воздуха в баллоне от времени контакта его с атмосферой

Построив по данным эксперимента такой график, можно путём экстраполяции опытной прямой до $t = 0$ определить значение $\ln(h)$, а по нему значение h , необходимое для расчёта γ .

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Приращение внутренней энергии идеального газа [1; 15] при изменении его температуры на dT

$$dU = \frac{i}{2} \nu R dT.$$

Число степеней свободы i молекулы – это число независимых координат, определяющих положение молекулы в пространстве: $i = 3$ для одноатомной, $i = 5$ для двухатомной, $i = 6$ для трёх- и многоатомной; $\nu = \frac{m}{M}$ – количество вещества (число молей).

Молярная теплоёмкость C – величина, равная количеству тепла, которое нужно сообщить молю вещества, чтобы увеличить его температуру на один кельвин:

$$C = \frac{dQ}{\nu dT}.$$

Если газ нагревать при постоянном объёме, то подводимое тепло расходуется только на увеличение его внутренней энергии $dQ = dU$ и поэтому теплоёмкость газа при постоянном объёме

$$C_V = \frac{i}{2} R.$$

При нагревании газа в условиях свободного расширения при постоянном давлении $P = const$ подводимое тепло расходуется как на приращение внутренней энергии, так и на совершение работы. Работа расширения одного моля газа в этих условиях при нагревании его

на $1 K$ равна R . Таким образом, теплоёмкость газа при постоянном давлении определяется соотношением

$$C_p = C_v + R = \frac{i + 2}{2} R.$$

Отношение теплоёмкостей

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i + 2}{2}.$$

Адиабатическим называют процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой: $dQ = 0$. Из первого начала термодинамики для адиабатического процесса

$$\frac{m}{M} \frac{i}{2} R dT = -P dV,$$

следует, что адиабатическое расширение ($dV > 0$) сопровождается охлаждением ($dT < 0$) газа, а сжатие ($dV < 0$) – его нагреванием ($dT > 0$).

Уравнение адиабатического процесса (уравнение Пуассона)

$$P dV^\gamma = const.$$

Уравнение изотермического процесса

$$P dV = const.$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Упражнение 1. Изучение изопроцессов в газе.

1. Прежде чем приступить к измерениям, изучите газовые процессы, необходимые для определения отношения теплоёмкостей γ , и дайте их описание в таблице 22.

2. Закройте кран K_0 , откройте кран K , включите компрессор и накачайте воздух в баллон до избыточного давления в колбе 210...220 мм водяного столба (это разница уровней между правым и левым плечами водяного манометра). Компрессор работает, когда нажата и удерживается кнопка.

3. При закрытых кранах K_0 и K выждите 2-3 мин, пока установится постоянное давление в баллоне (отсчёт H), это состояние воздуха 1 (рис. 35).

4. Открыв кран K_0 , соедините баллон с атмосферой и после выравнивания давлений закройте кран K_0 , состояние газа в этот момент обозначено 2.

5. Выждите 2-3 мин до достижения состояния 3, при котором установится постоянное давление в баллоне (отсчёт h').

6. Поставьте знаки $>$, $<$, $=$ в таблице 22. Запишите название процесса и направление процесса.

Таблица 22

Процесс	Название процесса	Направление процесса (сжатие или расширение, нагревание, охлаждение)	Соотношения параметров воздуха в баллоне P_i, T_i , и в лаборатории P_l, T_l			
			Начальные		конечные	
1-2			$P_1 > P_l$	$T_1 = T_l$	$P_2 ? P_l$	$T_2 \quad T_l$
2-3			$P_1 ? P_l$	$T_2 \quad T_l$	$P_3 ? P_l$	$T_3 \quad T_l$

Упражнение 2. Определение отношения теплоёмкостей $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$.

1. Создайте в баллоне постоянное избыточное давление $H \sim 180$ мм, как описано в задании 1, п.п. 1, 2.

2. Открывая кран K_0 , соедините баллон с атмосферой и одновременно включите секундомер. Оставьте кран K_0 , открытым в $t = 5$ с и затем быстро закройте его.

3. Выждите 1-2 мин, пока в баллоне установится постоянное давление, и сделайте отсчёт по манометру h' (разница уровней между правым и левым плечами водяного манометра).

4. Проведите аналогичные измерения с различным временем сообщения баллона с атмосферой ($t = 10, 15, 20$ и 25 с), но при одинаковом начальном значении H . Для его получения воздух накачайте медленно, приближаясь к нужной величине со стороны меньших значений давления. Результаты всех измерений H и h записывайте в таблицу 23.

Таблица 23

Определение отношения теплоёмкостей

$H = \text{---}$ мм	t, c	5	10	15	20	25	0	Координаты средней точки
	$h', \text{мм}$						$h =$	$\bar{t} =$
	$\ln h'$						$\ln h =$	$\overline{\ln h'} =$

5. Найдите значения $\ln(h')$ и нанесите опытные точки на поле графика в координатах $\ln(h') = t$.

6. Проведите прямую через экспериментальные точки, продолжая прямую до пересечения с осью ординат ($t = 0$), определите величину $\ln h$ (рис. 36).

7. По найденному значению $\ln h$ вычислите h и рассчитайте величину γ .

8. Вычислите теоретическое значение величины отношения теплоёмкостей γ , считая, что воздух состоит, в основном, из двухатомных молекул.

9. Сравните экспериментальное значение γ с теоретическим и сделайте вывод по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называют: а) теплоёмкостью тела; б) удельной теплоёмкостью газа; в) молярной теплоёмкостью газа? В каких единицах их измеряют?

2. От чего зависят эти теплоёмкости?

3. Каковы величины молярных теплоёмкостей C_p и C_v для воздуха? Чем объясняется, что $C_p > C_v$?

4. Для каких теплоёмкостей справедливы соотношения

$$C_p = C_v + R = \frac{i+2}{2} R = \frac{i+2}{2} R \text{ и } C_p = C_v + R?$$

5. Что называют числом степеней свободы молекулы?

6. Каковы значения показателя адиабаты γ : а) для двухатомного; б) для трехатомного и многоатомного идеального газа?

7. Для какого газа: одноатомного или двухатомного – график адиабаты более крутой?

8. Запишите первое начало термодинамики для адиабатического процесса.

9. Какие процессы описываются уравнениями: $PV = const$; $PV^\gamma = const$?

10. Как изменяется температура и давление газа: а) при адиабатическом расширении; б) при адиабатическом сжатии?

11. В каких состояниях из указанных на диаграмме (рис. 35) воздух в баллоне: а) имеет комнатную температуру; б) находится при атмосферном давлении?

12. Какой процесс совершается при открывании крана K_2 , если в баллоне было избыточное давление воздуха?

13. Какой процесс происходит после адиабатического расширения газа при проведении опыта?

14. Какие величины измеряют в работе для расчёта показателя адиабаты γ ?

15. По какой формуле определяют значение отношения теплоёмкостей γ : а) опытное; б) теоретическое?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

Определение теплоемкости твердых тел

Цели работы: изучить содержание первого начала термодинамики, смысл понятия теплоемкости, устройство и принцип действия установки ФПТ1-8, опытным путем определить удельную теплоемкость твердых тел.

Приборы, дополнительное оборудование и исследуемые объекты (образцы): установка ФПТ1-8.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ: К работе с установкой допускаются лица, ознакомленные с ее устройством и принципом действия.

Установка ФПТ1-8 представляет собой конструкцию настольного типа, состоящую из трех основных блоков (рис. 37).

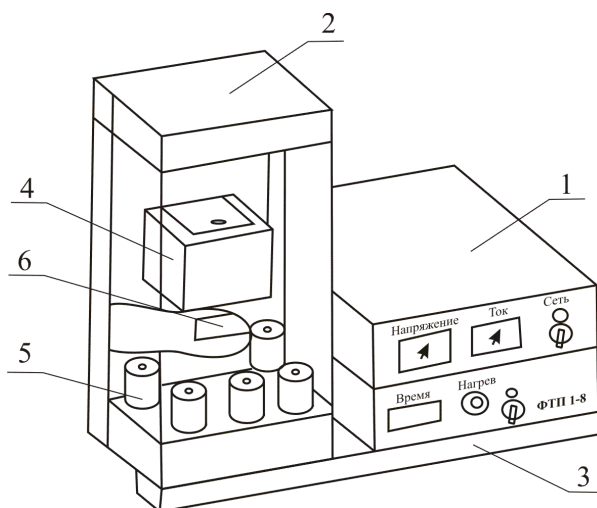


Рис. 37. Установка ФПТ1-8, в состав которого входит:
1 – приборный блок БП-8; 2 – блок РЭ-8; 3 – стойка; 4 – нагреватель; 5 – образцы;
6 – цифровой контроллер для измерения температуры

Приборный блок представляет собой единую конструкцию со съемной крышкой, съемными лицевыми панелями. Внутри блока размещены печатная плата с радиоэлементами, органы подключения регулирования, трансформаторы.

На лицевой панели блока приборного БП-8 находятся органы управления и регулирования установки, цифровой контроллер для измерения времени, амперметр, вольтметр. Лицевая панель условно разделена на три функциональных узла:

1) узел ИЗМЕРЕНИЕ; 2) узел НАГРЕВ; 3) узел СЕТЬ.

Узел ИЗМЕРЕНИЕ состоит из цифрового контроллера для измерения времени, амперметра, вольтметра и осуществляет замер величины тока, напряжения, времени проведения опыта.

Узел НАГРЕВ осуществляет включение и регулирование нагрева нагревателя.

Узел СЕТЬ осуществляет подключение установки к сети питающего напряжения.

На задней панели приборного блока БП-8 установлены: 1) разъем для подключения кабеля от РЭ-8; 2) сетевой предохранитель; 3) сетевой шнур.

Несущими узлами блока РЭ-8 являются панель и кронштейн, скрепленные между собой винтами.

Спереди блок РЭ-8 закрыт съемным экраном из оргстекла. При выполнении работы экран навешивается на заднюю стенку блока РЭ-8. На панели расположен цифровой контроллер для измерения температуры (поз. 6). Внизу на выступающей панели размещены образцы из различных материалов (поз. 5) и рукоятка для установки образцов в нагреватель.

Нагреватель состоит из металлического кожуха, теплоизолирующего материала, калориметра с намотанной на нем спиралью ручки для выталкивания образца из калориметра. В калориметр вмонтирован датчик контроллера для измерения температуры.

Стойка (поз. 3) представляет собой настольную конструкцию с горизонтальным основанием для установки приборного блока БП-8 и блока рабочего элемента РЭ-8.

Технические характеристики ФТП 1-8 приведены в таблице 24.

Таблица 24

Технические характеристики ФТП1-8

Характеристика	Параметр
Нагрев калориметра	Постоянный ток
Максимальная температура нагрева	+44 °С
Погрешность измерения температуры	0,5 °С
Диапазон регулирования напряжения на нагревателе	2-20 В
Номинальное напряжение на нагревателе	18 В
Погрешность измерения напряжения и силы тока на нагревателе	5%
Диапазон измерения цифрового контроллера для измерения времени	1-1999 с
Погрешность измерения времени контроллера	2%
Питание установки	от сети переменного тока напряжением 220 В частотой 50 ± 1 Гц
Потребляемая мощность	не более 130 Вт
Габаритные размеры	не более 400 * 200 * 480 мм
Масса установки	не более 7 кг

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Определение переданного телу количества теплоты основано на измерении температуры, при этом

$$Q = cm\Delta T,$$

где c – удельная теплоемкость вещества (она зависит от свойств данного вещества, а также от условий процесса). На основании формулы (1) можно записать:

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}.$$

Для идеального газа различают удельную теплоемкость при постоянном объеме и удельную теплоемкость при постоянном давлении:

$$c_V = \frac{Q_V}{m\Delta T} = \frac{\Delta U}{m\Delta T} = \frac{i R}{2 M},$$

$$c_p = \frac{Q_p}{m\Delta T} = \frac{\Delta U + P\Delta V}{m\Delta T} = c_v + \frac{R}{M} = \frac{i + 2}{2} \frac{R}{M}$$

где $i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вращ}} + 2i_{\text{колеб}}$ – сумма числа поступательных, вращательных и удвоенного числа колебательных степеней свободы молекулы, при этом, согласно Больцману, на одну степень свободы движения молекул приходится энергия, равная $\frac{1}{2} kT$.

Оказалось, что классическая теория теплоемкостей газов приводит к серьезным расхождениям с опытными данными [1; 15]. Прежде всего теория приводит к выводу о независимости теплоемкости от температуры, в то время как данные экспериментов показывают, что для всех веществ, в том числе и для газов, теплоемкость растет с увеличением температуры, а при достаточно низких термодинамических температурах быстро убывает с понижением температуры и стремится к нулю при $T \rightarrow 0 \text{ K}$.

Дело происходит так, как будто благодаря изменению температуры включаются (или выключаются) различные степени свободы: при малой температуре включены лишь поступательные степени свободы молекулы, при повышении температуры возбуждаются вращательные, а затем и колебательные степени свободы (рис. 38) [16; 17]. Это объясняется тем, что при вычислении теплоемкости, надо учитывать квантование энергии вращения и колебаний молекул (возможны не любые вращательные и колебательные энергии, а лишь определенный дискретный ряд значений энергий). Если энергии теплового движения недостаточно, например, для возбуждения колебаний, то эти колебания не вносят своего вклада в теплоемкость (соответствующая степень свободы «замораживается» – к ней неприменим закон равного распределения энергии).

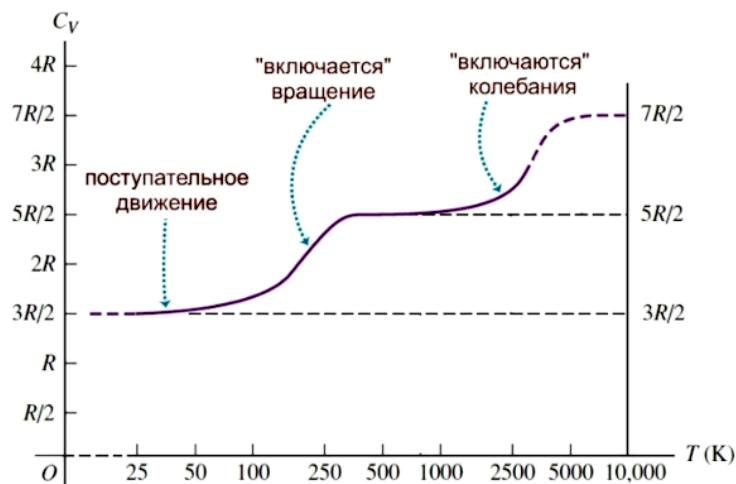


Рис. 38. Экспериментальная зависимость C_V молекулярного водорода от T

В твердом теле в отличие от газов велика потенциальная энергия взаимодействия атомов и молекул. Как и у тела, совершающего гармонические колебания под действием сил упругости, среднее значение изменений кинетической и потенциальной энергий частицы в твердом теле одинаковы; на одну степень свободы колебательного движения с учетом кинетической и потенциальной энергий будет приходиться энергия, равная kT , а полная средняя энергия колебательного движения одного атома будет равна $\overline{W}_{\text{кол}} = 3kT$.

Следовательно, изменение внутренней энергии одноатомного твердого тела при изменении его температуры равно:

$$\Delta U = 3NkT,$$

где N – число атомов.

Для твердых тел не различаются теплоемкости c_V и c_P , поскольку при нагревании (охлаждении) твердых тел не происходит заметного расширения (сжатия) этих тел. Можно считать, что удельная теплоемкость вещества в твердом состоянии равна:

$$c_V = \frac{Q_V}{m\Delta T} = \frac{\Delta U}{m\Delta T} = \frac{3Nk\Delta TR}{m\Delta T} = \frac{3kN}{m} = \frac{3R}{M},$$

Молярная теплоемкость вещества в твердом состоянии равна:

$$C = cM = 3R.$$

Формула показывает, что молярная теплоемкость у разных твердых тел одинакова. Это формулировка известного закона Дюлонга и Пти.

Однако классическая теория теплоемкости столкнулась с серьезными затруднениями при интерпретации последней формулы [18]. Твердые тела по их электрическим свойствам делятся на металлы, полупроводники и диэлектрики. В диэлектриках нет свободных электронов. В металлах имеются свободные электроны (электронный газ), участвующие в переносе тепла. Именно благодаря электронному газу теплопроводность металлов в тысячи раз больше теплопроводности диэлектриков. Но тогда электронный газ должен влиять и на теплоемкость металлов. Согласно закону равнораспределения энергии по степеням свободы внутренняя энергия металлического твердого тела должна складываться из энергии тепловых колебаний ионов кристаллической решетки и энергии теплового движения свободных электронов. Отсюда теплоемкость металлов должна быть больше теплоемкости диэлектриков на величину теплоемкости электронного газа. В действительности же теплоемкость металлов не отличается от теплоемкости диэлектриков, и молярная теплоемкость металлов также равна $3R$.

Из сказанного следует, что рассмотренная нами классическая теория теплоемкости твердых тел является достаточно грубым приближением к действительности. Основные особенности поведения твердых тел в процессах теплопередачи объясняет современная квантовая теория строения вещества. Квантовая теория теплоемкости была впервые разработана А.Эйнштейном и усовершенствована в трудах П.Дебая.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подайте на установку питание, включив тумблер в модуле СЕТЬ.
2. Убедитесь, что в калориметре отсутствует образец. Плотнo закройте крышку калориметра.
3. Включите модуль НАГРЕВ тумблером ВКЛ. Регулятором НАГРЕВ модуля установите заданную мощность нагрева.
4. Контролируйте температуру нагрева по цифровому контроллеру для измерения температуры. Временные интервалы отсчитывайте по цифровому контроллеру для измерения времени.

5. Для быстрого охлаждения калориметра выключите нагрев, откройте крышку, опустите в калориметр один из образцов. Температура начнет понижаться. Когда темп охлаждения снизится, нагретый образец выньте и вложите следующий (холодный).

Для вынимания образца поверните по часовой стрелке винт в нижней части калориметра, после чего вытащите образец рукояткой.

6. Нагрев калориметра с исследуемым образцом рекомендуется производить через 2-3 минуты после помещения образца в калориметр и закрытия крышки.

7. Удельную теплоемкость определите по формуле:

$$c_V = \frac{Q_V}{m\Delta T},$$

где Q – количество теплоты, поглощенное образцом при нагревании; m – масса образца; $\Delta T = \Delta t$ – разность конечной и начальной температур при нагревании.

Если для нагрева пустого калориметра на ΔT требуется Q_1 джоулей тепла, а для нагрева калориметра с исследуемым образцом – Q_2 джоулей тепла, то на нагрев самого образца идет

$$Q_{\text{обр}} = Q_2 - Q_1.$$

В установке ФПТ1-8 нагрев производится пропусканием тока через нагреватель.

Количество теплоты, выделяемое нагревателем, согласно закону Джоуля-Ленца, равно:

$$Q = IU \tau,$$

где I – ток через нагреватель; U – напряжение на нагревателе; τ – время нагрева.

Если мощность нагрева остается постоянной в течение всего эксперимента, то после подстановки выражения для количества теплоты из формулы (9) в формулу (8) получим:

$$Q_{\text{обр}} = IU (\tau_2 - \tau_1),$$

где τ_1 – время нагрева пустого калориметра на ΔT ; τ_2 – время нагрева калориметра с образцом на ΔT .

Отсюда

$$c_V = \frac{IU (\tau_2 - \tau_1)}{m\Delta T}.$$

8. Все полученные опытом и вычисленные результаты внесите в таблицу 25.

Таблица 25

Определение теплоемкости твердых тел

Образец	Время, τ , с	Сила тока, I , А	Напряжение, U , В	$Q_{\text{обр}}$, Дж	Температура, T , К	Теплоемкость, c , Дж/К
Сталь						
Алюминий						
Латунь						

9. Вычислите относительную погрешность измерения удельной теплоемкости $\Delta c/c$ указанных образцов. Характеристики исследуемых образцов представлены в таблице 26.

Характеристики исследуемых образцов

Материал	Габаритные размеры, мм	Кол-во
Сталь 12×18Н10Т	40*100	1
Алюминий Д16	40*100	1
Латунь А63	40*100	4

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение термодинамической системы. Из чего складывается внутренняя энергия термодинамической системы?
2. Чему равна внутренняя энергия идеального газа? Сформулируйте первый закон термодинамики.
3. Какой процесс называется изотермическим? Адиабатным? Приведите графики изотермы и адиабаты.
4. Что называется удельной теплоемкостью вещества? В чем она измеряется? Чему равны удельная и молярная теплоемкости идеального газа?
5. Сформулируйте закон Дюлонга и Пти. В чем суть затруднений классической теории теплоемкости твердых тел?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

Определение энтропии при плавлении олова

Цель работы: изучить формулировки второго начала термодинамики, физический смысл энтропии.

Приборы, дополнительное оборудование и исследуемые объекты (образцы): установка ФПТ1-11.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ. К работе с установкой допускаются лица, ознакомленные с ее устройством, принципом действия.

Установка ФПТ1-11 представляет собой конструкцию настольного типа, состоящую из трех основных блоков (см. рис. 39): приборного блока, блока рабочего элемента, стойки.

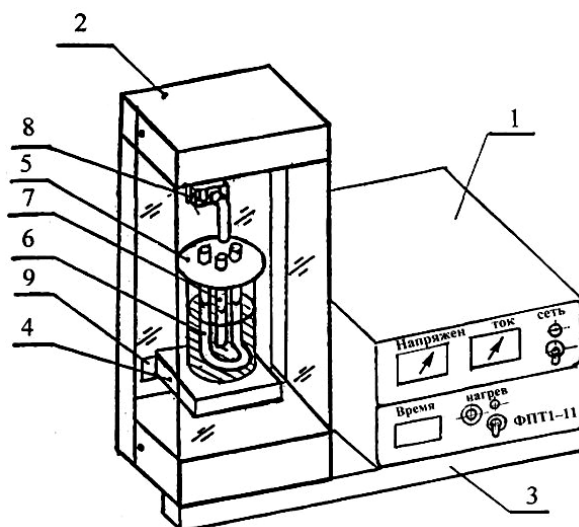


Рис. 39. Установка ФПТ1-11: 1 – приборный блок БП-11; 2 – блок рабочего элемента РЭ-11; 3 – стойка; 4 – кронштейн; 5 – стакан с исследуемым материалом; 6 – нагреватель; 7 – датчик температуры; 8 – разъем; 9 – цифровой контроллер для измерения температуры

В установке ФПТ1-11 нагрев олова производится пропусканием тока через нагреватель.

Приборный блок представляет собой единую конструкцию со съемной крышкой, съемными лицевыми панелями. Внутри блока размещены печатная плата с радиоэлементами, органы подключения регулирования, трансформаторы.

На лицевой панели блока приборного БП-11 находятся органы управления и регулирования установки, цифровые контроллеры для измерения времени, амперметр, вольтметр, элементы световой индикации.

Лицевая панель условно разделена на три функциональных узла: узла измерений, узла нагрева, узла сети. Узел измерения осуществляет замер величины тока, напряжения и времени проведения опыта. Узел нагрев осуществляет включение и регулирование нагрева калориметра. Узел сеть осуществляет подключение установки к сети питающего напряжения.

Сзади приборного блока БП-11 установлены разъем для подключения кабеля от РЭ-11, сетевой предохранитель, сетевой шнур.

Несущими узлами блока РЭ-11 являются панель и кронштейн, скрепленные между собой винтами.

Спереди блок РЭ-11 закрыт экраном из оргстекла. На передней панели закреплен кронштейн, на котором установлен стакан с исследуемым материалом – оловом. В стакане размещены нагреватель и датчик температуры. Нагреватель выполнен из нихромовой спирали, заключенной в кожух из кварцевого стекла.

Измерение температуры производится цифровым контроллером для измерения температуры.

Стойка представляет собой настольную конструкцию с горизонтальным основанием для установки приборного блока БП-11 и блока рабочего элемента РЭ-11. Технические характеристики установки представлены в таблице 27.

Таблица 27

Технические характеристики ФПТ1-11

Характеристика	Параметр
Исследуемый материал	олово
Масса олова	150 г
Диапазон измерения температуры нагрева олова	0 -300 °С
Погрешность измерения температуры..	2 °С
Диапазон регулирования напряжения на нагревателе	5-36 В
Номинальное напряжение на нагревателе	30 В
Погрешность измерения напряжения и силы тока на нагревателе	5%
Диапазон измерения цифрового контроллера для измерения времени	1-1999 с
Погрешность измерения времени контроллера	5%
Время разогрева олова до температуры плавления	20 мин
Потребляемая мощность	не более 130 Вт
Габаритные размеры	не более 770*525*200 мм
Масса установки	не более 7 кг

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Исследования, проведенные Р. Клаузиусом, убедительно показали, что не все процессы, при которых энергия сохраняется, реально возможны [15; 17; 18]. Самопроизвольно происходящие процессы теплообмена между телами всегда происходят так, что горячее тело охлаждается, передавая энергию холодному телу, температура которого повышается. Обратный этому процесс самопроизвольно никогда не происходит. Процессы, которые происходят без воздействия внешних сил, называются *самопроизвольными*. Процессы перехода системы из одного состояния в другое, которое можно провести в обратном направлении, через ту же последовательность промежуточных равновесных состояний называются *обратимыми*. Обратимыми процессами являются механические процессы в консервативных системах.

Реальные процессы в природе, протекающие с трением, необратимы. Переход теплоты от горячего тела к холодному и механической энергии во внутреннюю – это примеры наиболее типичных необратимых процессов. Приведенные примеры говорят о том, что процессы в природе имеют определенную направленность, которая не отражена в первом законе термодинамики.

Р. Клаузиус ввел особую термодинамическую величину – энтропию (от греч. entropie – превращение, изменение, поворот), имеющую фундаментальное значение в физике. Величина

$$dS = \frac{\delta Q}{dT},$$

представляющая собой полный дифференциал, определяет бесконечно малое изменение энтропии.

Изменение энтропии для макроскопического процесса равно:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{dT},$$

Для обратимых процессов энтропия системы не изменяется:

$$\Delta S = \oint \frac{\delta Q}{T} = 0,$$

следовательно

$$S = const,$$

где кружком обозначен интеграл по замкнутому контуру (т. е. мы имеем дело с замкнутым процессом).

Для необратимых процессов энтропия системы не может убывать, она только возрастает:

$$\Delta S \geq 0.$$

На основании первого закона термодинамики можно записать:

$$TdS = dU + pdV.$$

Уравнение называется основным уравнением термодинамики, оно объединяет формулы первого и второго начал термодинамики.

При адиабатном процессе $\Delta Q = 0$, следовательно, и $\Delta S = 0$. Иными словами, адиабатный процесс можно назвать также *изоэнтропическим* процессом ($S = const$). При изохорном процессе $\Delta V = 0$, тогда (для идеальных газов) получим:

$$\Delta S = \frac{imR}{2M} \ln \frac{T_2}{T_1},$$

где i – число степеней свободы молекул газа, m – масса газа, M – его молярная масса, R – универсальная газовая постоянная, T_1 и T_2 – начальная и конечная температуры при изохорном процессе.

Для превращения жидкости в пар при температуре кипения ей необходимо передать количество теплоты $\Delta Q = rm$; соответственно, $\Delta S = \frac{rm}{T_{кип}}$, где r – удельная теплота парообразования, $T_{кип}$ – температура кипения. При конденсации пара происходит выделение такого же количества теплоты:

$$\Delta Q = -rm \text{ и } \Delta S = -\frac{rm}{T_{пл}}$$

Для того чтобы расплавить кристаллическое тело массой m , необходимо количество теплоты, равное $\Delta Q = \lambda m$, соответствующее изменение энтропии $\Delta S = -\frac{\lambda m}{T_{пл}}$, где λ – удельная теплота плавления, $T_{пл}$ – температура плавления. Количество теплоты, выделяемое при кристаллизации тела, равно:

$$\Delta Q = -\lambda m \text{ и } \Delta S = -\frac{\lambda m}{T_{\text{пл}}}$$

Итак, энтропия – это некоторая универсальная функция, характеризующая процессы, происходящие в макроскопических системах: в природе самопроизвольно процессы так протекают, что энтропия системы возрастает.

Затем Л. Больцманом была установлена связь энтропии с вероятностью: второй закон термодинамики, по Больцману, имеет вероятностный характер. Тепло, как отмечалось, является хаотическим движением атомов и молекул, составляющих макроскопическую систему. Поэтому переход энергии механического движения отдельных частей системы в тепло означает переход организованного движения в хаотическое, увеличение беспорядка в системе. Именно в таком направлении самопроизвольно протекают процессы в природе.

Таким образом, энтропия является мерой упорядоченности системы: чем более упорядочена система, тем меньше ее энтропия, и, наоборот, чем выше мера беспорядка в системе, тем выше ее энтропия.

Больцман установил, что энтропия пропорциональна натуральному логарифму термодинамической вероятности состояния.

$$S = k \ln W_t,$$

где k – постоянная Больцмана, W_t – термодинамическая вероятность, при этом состояние равновесия характеризуется максимальной термодинамической вероятностью.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подайте на установку питание, включив тумблер в модуле СЕТЬ.
2. Включите модуль НАГРЕВ тумблером ВКЛ. Регулятором НАГРЕВ модуля установите заданную мощность нагрева.
3. Контролируйте температуру нагрева олова, ток и напряжение по приборам. Временные интервалы отсчитывайте по цифровому контроллеру для измерения времени.
4. Изменение энтропии при нагревании и плавлении олова определяется как сумма изменения энтропии при нагревании до температуры плавления олова и изменения энтропии при его плавлении:

$$\Delta S = cm \ln \frac{T_{\text{плав}}}{T_{\text{ком}}} + \frac{\lambda m}{T_{\text{плав}}},$$

где c – удельная теплоемкость олова; $T_{\text{ком}}$ – комнатная температура; $T_{\text{плав}}$ – температура плавления олова; m – масса олова; λ – удельная теплота плавления олова.

5. Заполните таблицу 28 и постройте график зависимости температуры олова T от количества теплоты Q , сообщаемого олову: $T = f(Q)$. Вычислите изменение энтропии олова при его нагревании и плавлении.

Определение энтропии при плавлении олова

№ п/п	$t, \text{с}$	$I, \text{А}$	$U, \text{В}$	$Q, \text{Дж}$	Температура	
					$t, ^\circ\text{C}$	$T, \text{К}$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какая термодинамическая система называется закрытой, открытой, изолированной?
2. Какие процессы называются обратимыми, необратимыми? Сформулируйте второй закон термодинамики для обратимых и необратимых процессов.
3. Что характеризует энтропия? Приведите различные формулировки второго закона термодинамики. Напишите обобщенный закон термодинамики.
4. Чему равно изменение энтропии при изохорном, изотермическом процессах для идеального газа?
5. Чему равно изменение энтропии при переходах из одного агрегатного состояния в другое?
6. Поясните принцип действия установки ФПТ1-11.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

Изучение зависимости скорости звука от температуры

Цели работы: изучить основные динамические характеристики механических волн, свойства звука, явление резонанса, устройство и принцип действия установки ФПТ1-7, исследовать зависимость скорости звука от температуры.

Приборы, дополнительное оборудование и исследуемые объекты (образцы): установка ФПТ1-7.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ. К работе с установкой допускаются лица, ознакомленные с ее устройством и принципом действия.

Установка ФПТ1-7 представляет собой конструкцию настольного типа, состоящую из трех основных блоков: приборного блока БП-7, блока рабочего элемента РЭ-7, стойки.

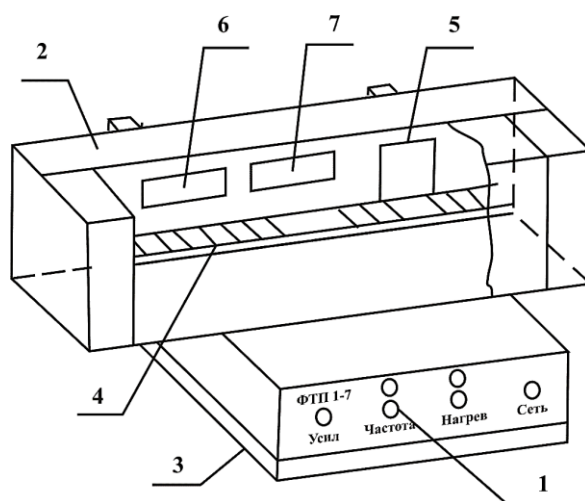


Рис. 40. Установка ФПТ1-7: 1 – приборный блок БП-7; 2 – блок рабочего элемента РЭ-7; 3 – стойка; 4 – стойка с нагревателем; 5 – цифровой контроллер для измерения температуры ART 02184; 6 – цифровой контроллер для измерения частоты V890G; 7 – микроамперметр

Приборный блок представляет собой единую конструкцию со съемной крышкой, съемными лицевыми панелями. Внутри блока размещены печатная плата с радиоэлементами, органы подключения регулирования, трансформаторы.

На лицевой панели блока приборного БП-7 находятся органы управления и регулирования установки, лицевая панель условно разделена на три функциональных узла: 1) узел НАГРЕВ; 2) узел ГЕНЕРАТОР; 3) узел СЕТЬ.

Узел НАГРЕВ осуществляет включение и регулирование нагрева трубки.

Узел ГЕНЕРАТОР осуществляет включение звуковых колебаний, настройку частоты при помощи резисторов «ГРУБО» и «ТОЧНО».

Узел СЕТЬ осуществляет подключение установки к сети питающего напряжения.

С задней стороны приборного блока установлены: 1) разъем для подключения кабеля от РЭ-7; 2) сетевой предохранитель; 3) сетевой шнур.

Блок РЭ-7 представляет собой укрепленную на стойке коробчатую конструкцию. Несущими узлами блока РЭ-7 являются панель и кронштейн, скрепленные между собой винтами.

Между выступающими частями панели в текстолитовых фланцах зажата стеклянная трубка. На трубке навит медный провод, который выполняет роль нагревателя. На панели установлены цифровой контроллер для измерения температуры (поз. 5) и цифровой контроллер для измерения частоты (поз. 6), микроамперметр.

Спереди блок РЭ-7 защищен прозрачным экраном из оргстекла.

Стойка (поз.3) представляет собой настольную конструкцию с горизонтальным основанием для установки приборного блока БП-7 и вертикальной опоры для крепления блока рабочего элемента РЭ-7.

Действие установки основано на использовании явления звукового резонанса (стоячей волны) в трубке с закрытыми торцами. Резонанс – это явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний в колебательной системе при приближении частоты внешней силы (вызывающей вынужденные колебания) к частоте какой-либо из собственных колебаний данной колебательной системы. В данном случае будем иметь акустический резонанс, при котором колебания столба воздуха в трубке достигают максимальной амплитуды. В одном торце трубки располагается источник колебаний звуковой частоты (телефон), с другого торца расположен приемник (микрофон).

Стоячая волна возникает при выполнении условия

$$L = \frac{n\lambda}{2},$$

где L – длина трубки, λ – длина звуковой волны, n – положительное целое число, номер резонанса.

При этом резко возрастает амплитуда звуковых колебаний, воспринимаемых микрофоном в противоположном от телефона торце трубки.

Скорость звука связана с длиной волны и частотой по формуле

$$c_{зв} = \lambda\nu,$$

где $c_{зв}$ – скорость звука, λ – длина звуковой волны, ν – частота звуковых колебаний. Подставляя формулу (3) в формулу (2), получаем:

$$c_{зв} = \frac{2L\nu}{n}.$$

Следовательно, измеряя частоту, соответствующую резонансу, можно определить скорость звука.

Скорость звука в воздухе зависит от температуры воздуха по следующей формуле:

$$c_{зв} = 331,6 + 0,6t$$

Установка позволяет повышать температуру воздуха от комнатной до 70 °С и проводить измерения в этом диапазоне при различных температурах.

Технические характеристики установки ФТП 1-7 представлены в таблице 29.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1. Колебания, возникнув в одном месте упругой среды, передаются соседним частицам (за счет взаимодействия с ними) и распространяются с некоторой скоростью \vec{v} .

Процесс распространения колебаний в среде называется *волной* [16].

Линия, указывающая направление распространения волны, называется *лучом* (или ходом луча). Если колебания частиц среды происходят перпендикулярно лучу, то волна является *поперечной*. Если же частицы колеблются вдоль луча, то волна является *продольной*.

Таблица 29

Технические характеристики установки ФПТ1-7

Характеристика	Параметр
Расстояние между отражающими торцами	0,51 м
Диапазон задаваемых частот	280-2200 Гц
Погрешность измерения частот не более	2%
Диапазон измерения температуры воздуха в рабочем элементе	от комнатной до 70 °С
Погрешность измерения температуры воздуха не более	0,3 °С
Потребляемая мощность не более	100 Вт
Габаритные размеры	не более 350*520*640 мм
Масса установки не более	7 кг

Волновое возмущение, распространяясь, охватывает все новые и новые области среды. Геометрическое место точек пространства, до которых дошел волновой процесс к данному моменту времени, называется *фронтом волны*. При этом *волновой поверхностью* называется геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковой фазе. В то время как волновых поверхностей для данной волны можно привести сколько угодно, волновой фронт (самая удаленная от вибратора волновая поверхность) один. Волновые поверхности, как и фронт волны, перемещаются вперед со скоростью волны \vec{v} . В однородной среде луч – прямая, перпендикулярная фронту волны. Волна называется *плоской*, если волновые поверхности – плоскости, и *сферической*, если они являются сферами.

Длиной волны λ называется расстояние между точками, колеблющимися с разностью фаз 2π . За время, равное периоду T колебаний, фронт волны перемещается в однородной среде на расстояние, равное

$$\lambda = v \cdot T \text{ или } \lambda = \frac{v}{\nu},$$

где $\nu = \frac{1}{T}$ – частота колебаний частиц в волне.

Уравнение плоской волны, имеющей частоту колебаний $\omega = 2\pi\nu$ и скорость распространения $v = \lambda \cdot \nu$ можно записать в виде

$$x = x_0 \cos \omega \left(t - \frac{r}{v} \right),$$

где $\omega \left(t - \frac{r}{v} \right)$ является фазой колебаний среды в бегущей волне. Зависимость аргумента $\left(t - \frac{r}{v} \right)$ от координаты и времени – признак волнового процесса.

В волновом процессе частицы среды не перемещаются в направлении распространения волны, они только колеблются около положения равновесия; со скоростью волны

распространяются лишь колебания, переносящие энергию. Вместе с тем можно проследить за перемещением от частицы к частице данной фазы колебаний. Так, в поперечной волне синусоида, показывающая положение частиц в момент времени t , через малое время Δt сместится (рис. 41) на расстояние Δr (стрелочками показаны направления скоростей частиц). Скорость распространения фазы (например, гребня B) определится по формуле $v = \frac{\Delta r}{\Delta t}$.

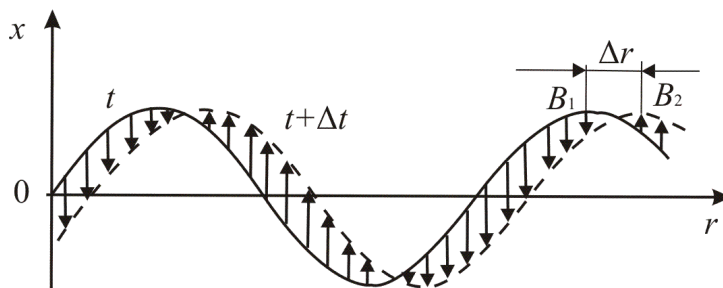


Рис. 41. Перемещение частиц в поперечной волне за малое время Δt

2. Звуком мы называем упругие механические волны в среде, воспринимаемые человеческим ухом: это частоты от 16 до 20 000 Гц. В акустике также рассматриваются и пограничные со звуком области: ниже 16 Гц – *инфразвук* и выше 20 кГц – *ультразвук*.

В жидкостях и газах звуковые волны могут быть только *продольными*, в твердых кристаллических телах звук имеет *поперечный* характер [18].

И. Ньютон первым вычислил скорость звука, предположив, что температура при сжатии и разрежении воздуха в звуковой волне не меняется, т. е. процессы в звуковой волне носят *изотермический* характер. Но это оказалось неверным. Правильное вычисление скорости звука в газе было сделано позже Лапласом, считавшим, что давление и температура в звуковой волне меняются *адиабатически*. Иными словами, в местах сгущения молекул среды в звуковой волне температура повысится, а в местах разрежения – понизится. Для адиабатического процесса распространения звуковых волн формула, полученная Лапласом, имеет вид:

$$v_{зв} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}},$$

где $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ – показатель адиабаты. Таким образом, видно, что скорость звука в газе зависит от температуры.

Метод определения скорости звука основан на свойствах звуковой стоячей волны. Стоячие волны являются частным случаем интерференции волн. Стоячие волны характеризуются точками, колебания в которых отсутствуют (эти точки называются *узлами*) и точками, амплитуда колебаний в которых максимальная (эти точки называются *пучностями*).

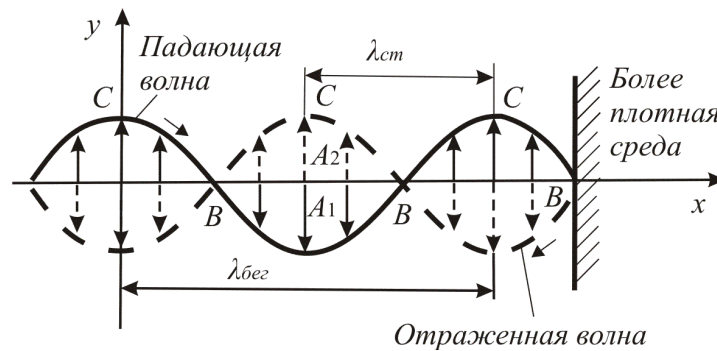


Рис. 42. Стоячая волна

Колебания во всех точках стоячей волны, лежащих между двумя соседними узлами, происходят с различными амплитудами, но одинаковыми фазами. Расстояние между соседними узлами или пучностями называется длиной стоячей волны – $\lambda_{ст}$. Длина звуковой (бегущей) волны $\lambda = 2 \lambda_{ст}$.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подайте на установку питание, включив тумблер в модуле СЕТЬ.
2. Включите генератор и рукоятками ГРУБО и ТОЧНО по индикатору найдите первый резонанс и соответствующую ему частоту.
3. Определите скорость звука.
4. Определите второй, третий, четвертый резонансы и соответствующие скорости звука.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется механической волной? Что такое бегущая волна, стоячая волна? Что такое луч, фронт волны, волновая поверхность? Как взаимосвязаны частота, длина и скорость волны?
2. Какие волны называются продольными, поперечными? Какие волны называются плоскими, сферическими?
3. Какую энергию несет волна? Что называется потоком энергии? Что называется плотностью потока энергии?
4. Что такое звук? Назовите основные динамические характеристики (параметры) звуковых волн. Что такое ультразвук, инфразвук?
5. В чем заключается явление резонанса? Приведите примеры резонанса.
6. Расскажите об устройстве и принципе действия установки ФПТ1-7.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13

Определение поверхностного натяжения воды, загрязненной нефтепродуктами (керосином)

Цели работы: изучение поверхностного натяжения жидкостей как экологического фактора, зависимости коэффициента поверхностного натяжения воды от загрязнений.

Приборы, дополнительное оборудование и исследуемые объекты (образцы): технические весы с разновесом, штангенциркуль, металлическое кольцо, сосуд с испытуемой жидкостью.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ. К работе с установкой допускаются лица, ознакомленные с ее устройством и принципом действия.

Существует несколько методов определения коэффициента поверхностного натяжения. Наиболее точным является метод определения поверхностного натяжения по высоте поднятия жидкости в капиллярной трубке. Зная радиус r капилляра, плотность ρ жидкости и высоту h ее подъема, можно найти поверхностное натяжение испытуемой жидкости по формуле.

В другом методе – методе отрывающейся капли (рис. 43) – предполагается, что в момент отрыва капли от вертикальной круглой трубки радиусом R сила поверхностного натяжения равна силе тяжести, т.е.

$$2\pi R\sigma = \rho Vg,$$

где ρ – плотность жидкости, V – объем капли.

Отсюда поверхностное натяжение $\sigma = \frac{\rho Vg}{2\pi R}$.

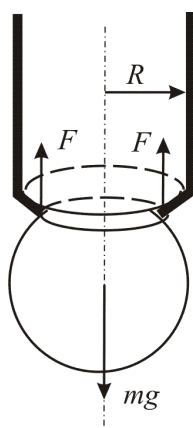


Рис. 43. Экспериментальная установка
определения поверхностного натяжения воды методом отрывающейся капли

Этот метод обычно используют для сравнительных измерений. Если известны поверхностное натяжение σ_0 и плотность ρ_0 эталонной жидкости (например, воды), а также плотность ρ исследуемой жидкости, то, наливая в трубку одинаковые объемы $V_0 = V$ эталонной и исследуемой жидкости и подсчитывая число капель n_0 и n , на которые распадается в капельнице заданный объем вытекающих жидкостей, можно записать:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{\rho n_0}{\rho_0 n'}$$

откуда

$$\sigma = \sigma_0 \frac{\rho n_0}{\rho_0 n'}$$

Методом отрыва капле определяют в диагностических целях поверхностное натяжение биологических жидкостей.

Сущность метода, используемого в данной практической работе, состоит в том, что измеряются силы, которые необходимо приложить, чтобы оторвать тонкое металлическое кольцо от поверхности жидкости.

Экспериментальная установка представляет собой технические весы *A*, у которых на одно коромысло, кроме чашки, горизонтально подвешено тонкое алюминиевое кольцо *B* (рис. 44).

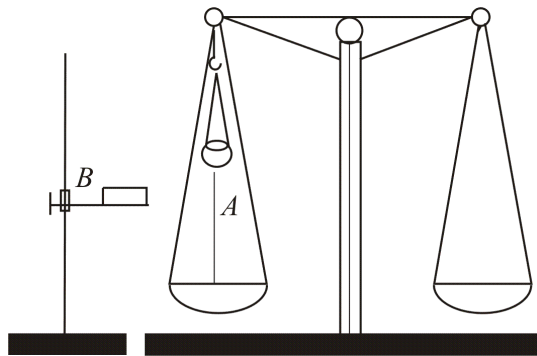


Рис. 44. Экспериментальная установка определения поверхностного натяжения воды с применением технических часов

Под кольцо на штативе со столиком помещается сосуд с испытуемой жидкостью.

Если подвести сосуд под кольцо так, чтобы оно нижним основанием касалось поверхности жидкости, то кольцо как бы прилипнет. Для отрыва кольца от поверхности надо приложить силу *F*. Отрыв (а точнее, разрыв поверхности) происходит по двум окружностям, диаметры которых d_2 и d_1 равны внешнему и внутреннему диаметрам кольца (рис. 44).

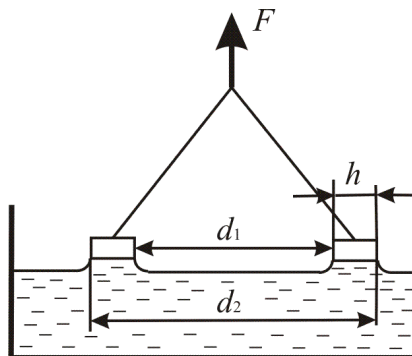


Рис. 45. Экспериментальная установка определения поверхностного натяжения воды

Общая длина линий разрыва $\Delta = \pi d_1 + \pi d_2$.

Обозначая толщину стенок кольца через *h*, имеем: $d_1 = d_2 - 2h$. Подставив d_1 в предыдущее выражение, находим: $\Delta = 2\pi(d_2 - h)$.

Тогда коэффициент поверхностного натяжения σ можно определить выражением:

$$\sigma = \frac{F}{l} = \frac{F}{2\pi(d_2 - h)},$$

где $l = \Delta = 2\pi(d_2 - h)$ – длина линии разрыва, на которую действует сила F .

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Способность любого вещества превращаться из газа в жидкость, из жидкости в газ (явления конденсации и испарения, аналогичные явления плавления и кристаллизации) доказывает, что между частицами вещества (атомами, молекулами) действуют как силы притяжения, так и силы отталкивания [12; 15; 18].

Напомним, что силы взаимодействия между молекулами имеют электромагнитную природу. При этом установлено, что силы молекулярного притяжения обратно пропорциональны седьмой степени расстояния между молекулами, а силы отталкивания (здесь существенную роль начинают играть силы отталкивания между положительно заряженными ядрами) обратно пропорциональны тринадцатой степени расстояния. Равнодействующая этих сил (силы притяжения имеют отрицательный знак) будет равна

$$F_{\text{мол}} = -\frac{a}{r^7} + \frac{b}{r^{13}},$$

где a и b – размерные величины; r – расстояние между молекулами.

Знак этой силы зависит [17] от расстояния r между молекулами (рис. 46). Существует некоторое расстояние $r = d$, при котором силы отталкивания уравнивают силы притяжения: $F_{\text{мол}} = 0$. При $r < d$ равнодействующая сила положительна (преобладает отталкивание); при $r > d$ имеем обратную картину: притяжение оказывается сильнее отталкивания. Из графика видно, что при $r = 1,134 d$ молекулы притягиваются с максимальной силой.

Таким образом, молекулярные силы являются *короткодействующими* – молекулы взаимодействуют только со своими ближайшими соседями. Этим, в первую очередь, объясняются все особенности молекулярных сил.

Частицы вещества в жидкости плотно упакованы, т. е. находятся друг от друга в среднем на таких расстояниях, при которых энергия взаимодействия минимальна; периодически смещаясь от положений равновесия, частицы совершают тепловые колебания. В жидкости упорядоченное расположение молекул сохраняется лишь среди ближайших соседей, т. е. на расстояниях порядка нескольких молекулярных диаметров. Такое расположение частиц вещества называется *ближним порядком*. Молекулы жидкости, совершая тепловые колебания около положений равновесия, при столкновениях друг с другом могут приобрести энергию, достаточную для того чтобы «перекочевать» в новое положение равновесия. В результате этого ближний порядок постоянно разрушается тепловым движением и вновь создается силами межмолекулярного взаимодействия.

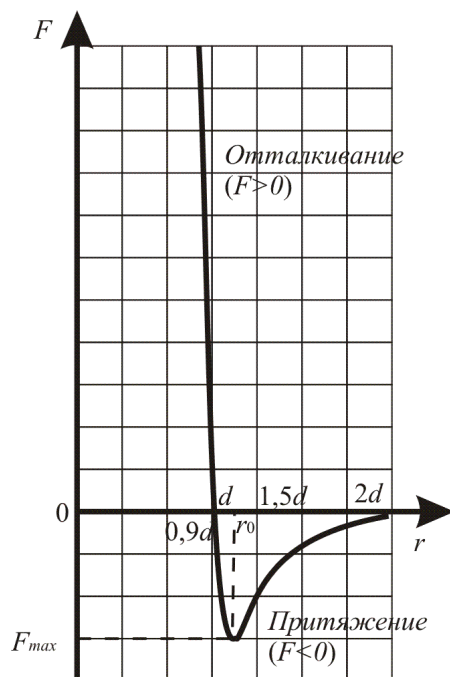


Рис. 46. Зависимость силы взаимодействия между молекулами F от расстояния r .
Источник [17]

Известно, что малый пузырь имеет почти правильную сферическую форму. Маленькие капельки росы на листьях растений также принимают форму почти правильных шариков. Такую же форму имеют капли воды на парафине. Но из геометрии известно, что из всех тел, одинаковых по объему, именно шар имеет наименьшую площадь поверхности. Следовательно, в наших примерах жидкость принимала такую форму, при которой площадь ее поверхности оказывалась минимальной.

На молекулу, находящуюся в глубине жидкости, действуют силы со стороны всех молекул этой жидкости, результирующая этих сил равна нулю. Но на молекулу, находящуюся в тонком слое вблизи поверхности жидкости, действуют силы как со стороны других молекул жидкости, так и со стороны молекул газа над поверхностью жидкости (эти силы значительно меньше), поэтому равнодействующая всех сил не равна нулю, она направлена внутрь жидкости (рис. 47).

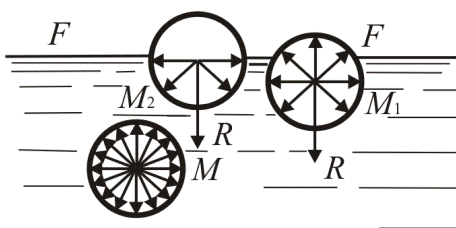


Рис. 47. Силы, действующие на молекулу в жидкости

Отсюда следует, что на все молекулы, расположенные в тонком поверхностном слое, действуют силы, стремящиеся втянуть их внутрь жидкости. Благодаря этому поверхностный слой давит с большой силой на жидкость, создавая в ней так называемое *внутреннее* или

молекулярное давление. Это давление очень велико (для воды, например, оно составляет около $1,1 \text{ ГН/м}^2$).

Если молекула из глубины всплывает на поверхность, то совершается работа против равнодействующей межмолекулярных сил; эта затраченная работа будет численно равна избыточной потенциальной энергии молекул поверхностного слоя $W_{\text{пов}}$. Избыточную потенциальную энергию, которой обладают молекулы на поверхности жидкости, называют *поверхностной энергией*.

Отношение поверхностной энергии к площади поверхности называется *удельной поверхностной энергией* (эту величину обозначают греческой буквой сигма):

$$\sigma = \frac{W_{\text{пов}}}{S}.$$

В СИ единицей удельной поверхностной энергии является 1 Дж/м^2 .

Известно, что для системы в состоянии устойчивого равновесия потенциальная энергия минимальна. Это относится и к поверхностной энергии. Таким образом, устойчивое равновесие жидкости наступает при минимуме поверхностной энергии. Значит, сокращение поверхности жидкости, при котором уменьшается поверхностная энергия, – это самопроизвольный процесс, ведущий к состоянию устойчивого равновесия. Стремление жидкости сократить свою свободную поверхность называется *поверхностным натяжением*.

Для количественной характеристики сил поверхностного натяжения жидкости вводят *коэффициент поверхностного натяжения* σ , который численно равен силе F , действующей на единицу длины произвольной линии l , мысленно проведенной на поверхности жидкости:

$$\sigma = \frac{F}{l}.$$

В этом случае коэффициент поверхностного натяжения измеряется в ньютонах на метр (Н/м). Сопоставляя формулы, можно показать, что коэффициент поверхностного натяжения численно равен удельной свободной поверхностной энергии.

Коэффициент поверхностного натяжения различен для разных жидкостей. Он зависит от рода жидкости, температуры (уменьшается с повышением температуры) и от степени чистоты поверхности (изменяется от малейшего загрязнения). Таким образом, коэффициент поверхностного натяжения можно рассматривать как абиотический фактор среды. Именно благодаря силам поверхностного натяжения различные виды членистоногих удерживаются на поверхности воды. Членистоногие на поверхности моря встречаются редко, но зато они обильно представлены в пресных водах.

Одним из основных источников влаги для растений и организмов в почве является почвенная вода. Благодаря капиллярам (тончайшим промежуткам между частицами почвы) эта вода поднимается кверху, образуя восходящий ток; она хорошо усваивается растениями и живыми организмами.

Растворение в жидкости различных веществ (поверхностно-активных) изменяет коэффициент поверхностного натяжения. Эти вещества адсорбируются на поверхности раздела и уменьшают свободную поверхностную энергию. Такими веществами являются жирные кислоты, их соли, спирты, эфиры и др.

КАПИЛЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

В узких стеклянных трубках, капиллярах, опущенных в жидкость, хорошо заметно поднятие или опускание жидкости (рис. 48). Поверхностная пленка жидкости в трубке под действием молекулярных сил жидкости и стекла принимает вогнутую форму (вогнутый мениск) [16; 17].

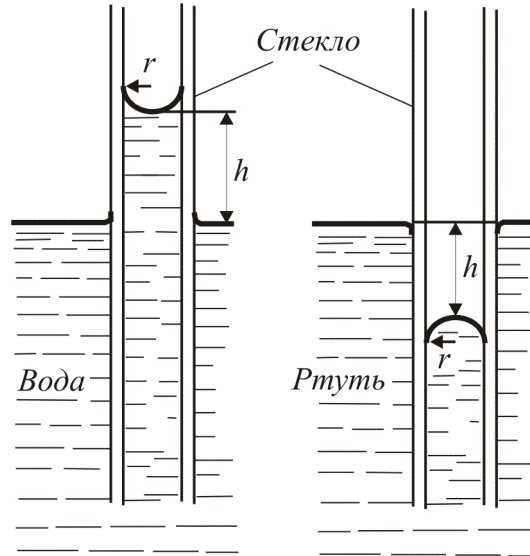


Рис. 48. Капиллярные явления

Силы поверхностного натяжения вызывают *добавочным давлением* Δp . Оно обусловлено кривизной поверхности и направлено всегда в сторону вогнутой поверхности.

Величина добавочного давления над произвольной поверхностью вычисляется по формуле Лапласа

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

где R_1 и R_2 – радиусы кривизны поверхностного слоя. Если поверхность сферическая, то

$$R_1 = R_2 \text{ и } \Delta p = \frac{2\sigma}{R},$$

где R – радиус кривизны поверхности.

Этим добавочным давлением вызываются явления поднятия (а в случае несмачивающей жидкости – опускания) жидкости в капиллярах. Жидкость поднимается или опускается в капилляре до тех пор, пока добавочное давление не сравняется с гидростатическим давлением поднявшегося или опустившегося столба жидкости (рис. 48).

Если считать, что жидкость полностью смачивает поверхность трубки, то радиус кривизны мениска R совпадает с внутренним радиусом трубки r . Из равенства добавочного и гидростатического давлений можно записать:

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r} = \rho gh,$$

где ρ – плотность жидкости, g – ускорение силы тяжести, h – высота ее поднятия.

Тогда коэффициент поверхностного натяжения будет определен выражением:

$$\sigma = \frac{r\rho gh}{2}.$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Штангенциркулем измерьте внешний диаметр и определите толщину стенок кольца h .
2. Кольцо подвесьте на левое коромысло и уравновесьте весы разновесками.
3. Поместите под кольцо сосуд с испытуемой жидкостью (дистиллированной водой).

Подводите постепенно жидкость к кольцу до тех пор, пока кольцо не коснется своим основанием поверхности жидкости.

4. Правую чашку весов *осторожно* нагрузите разновесками до тех пор, пока кольцо не оторвется от поверхности воды. Рекомендуется класть разновески на предварительно арретированные весы. Опыт проведите 3-5 раз.

5. Добавьте в чистую воду немного керосина и произведите измерения коэффициента поверхностного натяжения загрязненной воды.

6. Все полученные опытом (и вычислением) результаты сведите в таблицы (одна таблица – для чистой воды, вторая – для загрязненной). Примерное расположение записей в таблице 30.

Таблица 30

Коэффициент поверхностного натяжения

№ опыта	d_2 , м	h , м	F , н	σ , н/м	$\Delta\sigma$, н/м	$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} \cdot 100\%$
1						
2						
2						
Средние значения						

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков характер сил межмолекулярного взаимодействия? Какова природа этих сил?
2. Почему молекулы поверхностного слоя обладают большей потенциальной энергией, чем молекулы внутри жидкости?
3. Что такое поверхностное натяжение? Как его можно измерить?
4. От чего зависит коэффициент поверхностного натяжения для данной жидкости?
5. Чем объясняются явления смачивания и несмачивания? Чему равен краевой угол для смачивающей и несмачивающей поверхности?
6. В чем заключаются капиллярные явления? Какую роль они играют в природе?
7. Почему коэффициент поверхностного натяжения можно рассматривать как абиотический экологический фактор среды?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Былев А.Б. Физика. Механика. Термодинамика и молекулярная физика: методические указания. СПб.: СПбГЛТУ, 2021. 92 с.
2. Грабовский Р.И. Курс физики: учебное пособие для вузов. СПб.: Лань, 2022. 608 с.
3. Зайдель А.Н. Ошибки измерений физических величин: учебное пособие. СПб.: Лань, 2021. 112 с.
4. Ивлиев А.Д. Физика: учебное пособие. СПб.: Лань, 2022. 672 с.
5. Коровина В.М. Сборник методических рекомендаций к лабораторным работам по физике. 1. Механика: учеб. пособие. Пермь, 1997. 87 с.
6. Летута С.Н., Чакак А.А. Физика: учебное пособие. Оренбург: ОГУ, 2016. 306 с.
7. Ливенцев Н.М. Курс физики: учебник. СПб.: Лань, 2021. 672 с.
8. Лозовский В.Н. Курс физики: учебник: в 2 т. СПб.: Лань, 2021. Т. 1. 576 с.
9. Осинцев А.М., Бахтин Н.А., Лапшакова О.Ю. Физика: учебное пособие. Кемерово: КемГУ, 2020. 182 с.
10. Панкратов Е.Л., Булаева Е.А. Физика: учебное пособие. Нижний Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2016. 225 с.
11. Першин В.К., Житенев В.И., Зольников П.П. Физика. Механика: учебно-методическое пособие. Екатеринбург: УрГУПС, 2019. 422 с.
12. Першин В.К., Зольников П.П., Фишбейн Л.А., Хан Е.Б., Чернобородова С.В. Физика: методические указания и комментарии к лабораторным работам по механике. Екатеринбург: УрГУПС, 2009. 36 с.
13. Рогачев Н.М. Курс физики: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. 480 с.
14. Савельев И.В. Курс общей физики: учебное пособие для вузов: в 5 т. СПб.: Лань, 2022. Т. 1: Механика. 340 с.
15. Савельев И.В. Курс общей физики: учебное пособие для вузов: в 5 т. СПб.: Лань, 2022. Т. 3: Молекулярная физика и термодинамика. 212 с.
16. Савельев И.В. Курс физики: учебное пособие для вузов: в 3 т. СПб.: Лань, 2021. Т. 1: Механика. Молекулярная физика. 356 с.
17. Титов Ф.В., Дягилев Д.В. Физика: учебное пособие. Кемерово: КемГУ, 2021. 96 с.
18. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. М.: Академия, 2006. 560 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Нижевартовский государственный университет»
Кафедра физико-математического образования

Отчет
по лабораторной работе № _____
По курсу «Механика и Молекулярная физика»

тема работы

Выполнил студент _____
Группа _____

Проверил _____

Нижевартовск
2022

Учебное издание

МЕХАНИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Лабораторный практикум по курсу физики

Составители: А.А. Клочков, Н.И. Юмагулов

ISBN 978-5-00047-627-7



Технический редактор: Д.В. Вилявин

Обложка: Д.В. Вилявин

Дата выхода: 18.02.2022

Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. листов 4,5

Электронное издание. Объем 3,49 МБ. Заказ 2222

Издательство НВГУ

628615, Тюменская область, г. Нижневартовск, ул. Маршала Жукова, 4

Тел./факс: (3466) 24-50-51, E-mail: izdatelstvo@nggu.ru