Министерство образования Российской Федерации
Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

М.В. Кириков, В.П. Алексеев

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ ДЛЯ БИОЛОГОВ

Учебное пособие

Ярославль 2001

2005

ББК В3с.я73
К 43
УДК 531 (076)

Кириков М.В., Алексеев В.П. Лабораторный практикум по физике для биологов: Учебное пособие / М.В. Кириков, В.П. Алексеев; Яросл. гос. ун-т. Ярославль, 2001. 99 с.
ISBN 5-8397-0146-7

Данное пособие является руководством к выполнению лабораторных работ по курсу «Физика». Приведены основные положения теории измерения физических величин, необходимые теоретические сведения по курсу общей физики, основные формулы, функциональная схема лабораторной установки. Объем сведений по теории вопроса не освобождает студентов от необходимости проработки соответствующих разделов учебной литературы. Для самостоятельной подготовки к выполнению работ в пособие включены контрольные вопросы.

Предназначено для студентов факультета биологии и экологии ЯрГУ.

Табл. 18. Ил. 38. Библиогр.: 10 назв.

Рецензенты: кафедра общей физики Ярославского государственного технического университета; канд. физ.- мат. наук А.П. Глушаков.

ВВЕДЕНИЕ

Познание биологических явлений в настоящее время представляет собой очень сложный процесс, впитавший лучшие достижения многих научных дисциплин, особенно в условиях научно-технической революции. Это познание изменяется и эволюционирует по мере развития биологической науки.

Применение простейшего «инструмента» – ножа – позволило значительно продвинуться в характеристике живого и перейти к изучению анатомического строения объектов. Развитие микроскопической техники и усовершенствование микроскопа дало возможность перейти к биологическим исследованиям на уровне клетки. Внедрение химических и физических методов исследования позволило еще глубже проникнуть в тайны клетки.

Использование разнообразных тонких физико-химических методов привело к переходу исследований на молекулярный уровень.

Наблюдение оставалось основным методом в биологии очень долгое время. Только с начала XX века стал распространятся эксперимент. Его применение резко расширило границы биологического познания. Экспериментальный метод современного биологического исследования имеет сложную структуру: он подразделяется на несколько тесно связанных между собой типов.

Развитие физико-химического эксперимента в биологии имеет тенденцию к органическому синтезу физических и химических подходов в едином комплексе. Эта тенденция уже привела к ликвидации барьера между биохимией и биофизикой, которые рано развивались в некотором отрыве друг от друга.

Изучение субмикроскопических структур и процессов внутри клетки существенно продвинулось вперед с помощью экспериментов, связанных с разрушением целого и последующим его восстановлением, исходя из свойств выделенных фракций. Это стало возможным в результате бурного развития техники дифференцированного центрифугирования, электронной микроскопии, хроматографии, спектроскопии.

Исследование структуры и функций субклеточных образований (их прижизненное изучение) тесно связано с успехами ядерной физики, давшей в руки биологов-экспериментаторов метод изотопных индикаторов. В этом же направлении идет разработка и других способов прижизненного изучения (парамагнитный резонанс, молекулярная спектроскопия и т.д.).

Биологический эксперимент в общем почти не отличается от схемы физико-химического эксперимента. Основное отличие биологического эксперимента от физического заключается в сложности исследуемой системы, ее податливости относительно преград.

Большое практическое значение для биологии имеет прикладная биофизика, которая охватывает широкий круг вопросов, связанных с физическими явлениями, лежащими в основе устройства ряда органов и систем организма, например органов зрения и слуха. Сюда же относятся вопросы строения и механических свойств опорных элементов организма, кинематика и динамика двигательного аппарата, гидродинамика кровообращения, энергетический баланс и терморегуляция, биоэлектрические явления в тканях и органах.

Задачи физического практикума

Физика – наука экспериментальная. Это означает, что физические законы устанавливаются и проверяются путем накопления и сопоставления экспериментальных данных. Результаты физических экспериментов представляются чаще всего набором некоторых чисел. Выведенные в результате исследований физические законы формулируются в виде математических формул, связывающих между собой числовые значения физических величин.

Цель физического практикума – научить студента измерять числовые значения физических величин и правильно сопоставлять их с формулами.

Для большинства лабораторных работ объем информации, снимаемой с установки, невелик и, как правило, не превышает нескольких десятков чисел. Физические выводы из проделанного эксперимента – результат соответствующей математической обработки этой информации, которая специфична для каждой лабораторной работы.

Главная задача общего физического практикума – научить студентов получать из результатов лабораторного эксперимента необходимую информацию.

Работа в лаборатории, анализ теоретического материала и лекционных экспериментов, изучение литературы, понимание роли эксперимента в физике, изучение физики явления, таким образом, составляют некоторую модель процесса научного познания.

Цель работающего в физическом практикуме заключается в том, чтобы на опыте изучить основные физические явления, воспроизвести их самому и научиться правильно анализировать.

Необходимым условием успешного проведения физического опыта является сознательное его выполнение, включающее в себя внимательность, сосредоточенность на процессе измерений, бережное отношение к приборам.

Физический практикум призван помочь студентам глубже понять основные физические закономерности и приобрести элементарные навыки в проведении физических опытов и измерений. При выполнении работ практикума предполагается использовать современную физическую аппаратуру, что будет способствовать лучшей подготовке студентов.

Обработка результатов эксперимента и проведение необходимых расчетов осуществляются с применением вычислительной техники. В лаборатории «Механика» используются программируемые микрокалькуляторы (ПМК) и «АОС-механика» на базе ЭВМ.

Между сроками выполнения работ и прослушиванием соответствующего раздела лекционного курса имеется разрыв, что вызывает у студентов определенные трудности. Чтобы помочь преодолению их, перед работой дается небольшое теоретическое введение. Оно является своеобразной канвой, позволяющей студентам лучше ориентироваться в учебной литературе. Однако подготовка к каждому лабораторному заданию требует от них большой самостоятельной работы. Для обеспечения самоконтроля студентов за подготовкой к выполнению работы и проведения расчетов, а также для более глубокого усвоения материала предлагаются контрольные вопросы.

Советы по подготовке к выполнению работ в практикуме

Перед выполнением работы студент должен получить допуск к ней у преподавателя, ведущего занятия в лаборатории.

При подготовке к проведению физического эксперимента студент должен написать в отчете номер и название работы, дату ее выполнения, привести основные теоретические сведения и формулы, изобразить принципиальную схему лабораторной установки, указать перечень использованного оборудования, составить таблицы с данными измеренных величин и результатами их обработки.

Не следует начинать выполнение опыта, пока не будут уяснены полностью его цель, метод и не составлен план проведения опыта.

Порядок подготовки к опыту:

1. Прочитайте руководство к работе, выясните, какие физические законы используются при решении экспериментальной задачи и какие закономерности лежат в основе расчетных формул. Определите, каково значение и размерность исследуемых физических величин. Ознакомьтесь со списком рекомендованной литературы.

2. Проработайте рекомендованную литературу, конспекты лекций. При этом обратите внимание на формулировки условий, в которых применены физические законы и расчетные формулы, лежащие в основе решения опытной задачи.

3. Самостоятельно или с помощью учебных пособий выведите формулы, которые используются для расчетов в работе.

4. Ознакомьтесь с принципом действия лабораторного макета и тех условий, при которых справедливы законы и формулы, используемые в задаче. Разберитесь с принципом действия работы измерительных приборов. Еще раз прочитайте руководство к работе.

5. Составьте план опыта и согласуйте его с преподавателем.

6. До проведения лабораторной работы подготовьте в рабочей тетради таблицы наблюдений и расчетные формулы, миллиметровку для построения графиков.

7. После окончания опыта рабочее место в лаборатории приведите в порядок.

8. Отчет по каждой работе должен содержать основные выводы.

9. Обработка результатов должна быть закончена до начала следующей работы.

Следует иметь в виду, что вычисления необходимо проводить только в международной системе единиц (СИ).

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ПРИБОРАМ

Работа № 1. Обработка результатов прямых измерений длины тела

Цель работы:

1. Изучение теории статической обработки результатов прямых измерений и представление экспериментальных данных.

2. Определение доверительного интервала методом среднего арифметического и статистическим способом.

Оборудование: измеряемое тело, масштабная линейка.

Содержание и метод выполнения работы

Физические величины и их измерения.

Физика – экспериментальная наука. В основе эксперимента лежат физические методы измерений. Целью эксперимента является поиск таких параметров *физических явлений, которые можно измерить, получив численные значения.*

Свойства физических объектов и процессов, которые можно прямо или косвенно измерить, называют физическими величинами. Физические величины можно разделить на две категории: величины, характеризующие свойства и состояние тел (масса, объем, плотность, электрическое сопротивление, давление и д.р.), и величины, характеризующие явления и процессы, протекающие во времени (линейная скорость, сила тока, работа и т.д.). Чтобы иметь представление о физической величине с количественной точки зрения, необходимо выразить ее числом, т.е. измерить.

Измерить физическую величину – это значит найти опытным путем значение физической величины, используя специальные технические средства.

Измерением какой-либо физической величины называется нахождение физической величены с помощью специальных технических средств, в результате чего определяется, во сколько раз измеряемая величина больше (меньше) соответствующей величины, принятой за эталон.

При измерении физической величины ее значение сравнивают с единицей измерения. Число, которое получается при измерениях, называют числовым значением физической величины. Таким образом, любая физическая величина равна произведению численного значения и единицы измерения.

Физическая величина и ее размерность – это не одно и то же. Одинаковую размерность могут иметь совершенно разные по своей природе физические величины, например работа и вращающий момент. Размерность не содержит информации о том, является ли данная физическая величина скаляром, вектором или тензором. Однако величина размерности важна для проверки правильности соотношений между физическими величинами.

Необходимо научиться не только измерять различные физические величины, но и проверять и находить связь между ними, сопоставлять результаты эксперимента с выводами теории. Результаты любого физического эксперимента необходимо уметь проанализировать.

Измерения основаны на сравнении одинаковых свойств материальных объектов. Мерой для количественного сравнения одинаковых свойств объектов служит единица физической величины.

Значения физических величин находят опытным путем, поэтому они содержат погрешность измерений. В связи с этим различают истинное и действительное значение физических величин.

Истинное значение физической величины X_0 идеальным образом отражает в количественном и качественном отношениях соответствующее свойство объекта. Оно является пределом, к которому приближается значение физической величины с повышением точности измерения.

Действительное значение – значение X_i физической величины, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному значению, что может быть использовано вместо него. Никакие измерения не могут быть выполнены абсолютно точно. Их результаты всегда содержат некоторую ошибку ΔX, поэтому в задачу измерений входит не только нахождение точной величины, но также и оценка допущенной при этом погрешности.

Погрешность измерения есть отклонение результата измерения от принимаемого (оцениваемого) истинного значения измеряемой величины. Качество результатов измерений характеризуют абсолютной погрешностью измерения ΔX, выраженной в единицах измеряемой величины, и для одного измерения она равна:

$$\Delta X = X_{из} - X_o \text{ т.к. } \bar{X} \to X_0, \text{ то } \Delta X = \bar{X} - X_i, \tag{1}$$

где X_o – истинное значение измеряемой величины.

Относительная погрешность – отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению физической величины:

$$E = \Delta X / X_o . \tag{2}$$

Относительная погрешность может быть выражена в процентах, она является мерой совершенства метода измерения.

Погрешности измерений и их оценка

Систематическая погрешность остается постоянной или закономерно изменяется при повторных измерениях одной и той же величины.

Систематическая погрешность измерения возникает в результате наложения элементарных погрешностей, вызываемых разными причинами.

Виды погрешностей измерения:

а) *инструментальная погрешность* определяется погрешностью применяемых средств измерения – измерительных приборов и мер;

б) *погрешность отсчитывания* возникает ввиду недостаточно точного отсчитывания показаний прибора;

в) *погрешность интерполяции* при отсчитывании связана с недостаточно точной оценкой на глаз доли деления шкалы, соответствующей положению указателя;

г) *погрешность от параллакса* возникает вследствие визирования стрелки, расположенной на некотором расстоянии от шкалы;

д) *погрешность от перекоса* вызвана тем, что линия измерения должна являться продолжением линии шкалы;

е) *погрешность внешняя* возникает вследствие отклонения от нормальных условий измерений.

Случайная погрешность – составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины. Случайные погрешности нельзя исключить из результатов измерений, но их влияние можно уменьшить путем многократных повторных измерений одной величины и обработки опытных данных.

Промахи – грубая погрешность измерения, существенно превышающая при данных условиях погрешность. Результаты измерений, содержащие грубые погрешности, исключают как недостоверные. Для устранения промахов нужно соблюдать аккуратность и тщательность в работе и записях результатов в черновики.

Определение абсолютной величины случайной ошибки и доверительного интервала

Для оценки возможной погрешности измерений необходимо знать закономерности появления случайных погрешностей. При наличии случайных погрешностей появление того или иного значения X_i в процессе измерения – это случайное событие. Существует некоторая вероятность возникновения этого значения X_i в интервале $\left(\overline{X}-\Delta X\right)< X_i <\left(\overline{X}+\Delta X\right)$. Оно часто, как показано в теории вероятностей, определяется законом нормального распределения Гаусса:

$$Y(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\left(\frac{(x_i-\overline{x})^2}{2\sigma^2}\right)}, \qquad (3)$$

где σ – дисперсия распределения.

В подавляющем большинстве простых измерений случайные ошибки подчиняются следующим закономерностям:

1. Ошибки измерений ΔX_i могут принимать непрерывный ряд значений.

2. При большом числе наблюдений ошибки одинаковой величины, но разного знака встречаются одинаково часто.

3. *Частота появления ошибок уменьшается с увеличением величины* ошибки. Иначе говоря, большие ошибки наблюдаются реже, чем малые.

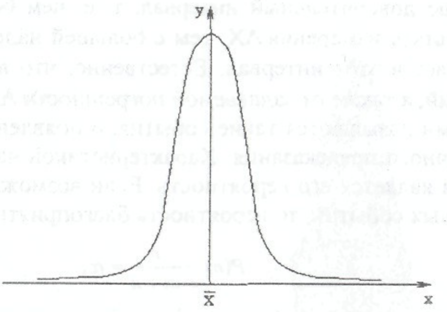


Рис. 1

Нормальное распределение характеризуется двумя параметрами: средним значением случайной величины $\overline{X}$, которое при большом числе измерений ($n \to \infty$) совпадает с ее истинным значением и дисперсией σ

$$\overline{X} = \frac{1}{n}(X_1 + X_2 + ... + X_n), \quad \overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \,. \tag{4}$$

В случае большого числа измерений дисперсия σ, входящая в закон (3), оказывается равной среднеквадратичной погрешности, т.е. $S_n \to \sigma$.

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta x_i)^2}{n-1}}.$$

Величина σ характеризует степень влияния случайных погрешностей на результаты измерения: чем меньше σ, тем точнее проведено измерение (см. рис. 2).

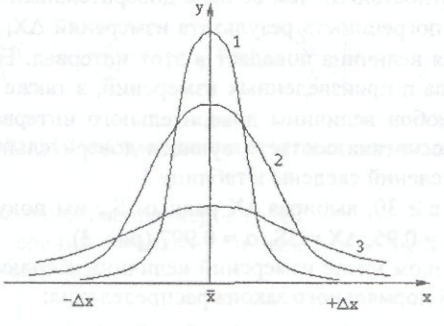


Рис. 2

Чем больше доверительный интервал, т. е. чем больше задаваемая погрешность результата измерения ΔX, тем с большей надежностью искомая величина X попадает в этот интервал. Естественно, что величина α зависит от *числа n измерений, а также от задаваемой погрешности* ΔX.

Случайными называются такие события, о появлении которых не может быть сделано точного предсказания. Характеристикой частоты появления случайного события является его вероятность. Если возможно n благоприятных и m неблагоприятных событий, то вероятность благоприятного события равна

$$P(n) = \frac{n}{m+n} = \alpha, \tag{a}$$

а неблагоприятного

$$P(m) = 1 - P(n) = \frac{m}{m+n}. \tag{b}$$

Обработка результатов серии измерений сводится к возможно более точному нахождению $\bar{X}$ и S_n. Если при измерении абсолютная погрешность $\Delta X_{кр} > 3S_n$, то это измерение следует отнести к грубым погрешностям, или промахам. Величину $\Delta X_{кр} = 3S_n$ обычно принимают за предельную абсолютную погрешность отдельного измерения.

Предположим, что истинное значение измеряемой величины X_o. Ее среднеарифметическое значение, полученное в результате измерений, равно $\bar{X}$, а погрешность измерения этой величины – ΔX_i. Пусть α означает вероятность того, что результат измерений отличается от истинного значения на величину, не большую, чем ΔX_i. Это записывается в виде

$$P[(\bar{x} - \Delta x) < x < (\bar{x} + \Delta x)] = \alpha. \tag{5}$$

Вероятность α носит название доверительной вероятности. Интервал значений от ($\bar{x} - \Delta x$) до ($\bar{x} + \Delta x$) называется *доверительным интервалом,* в который по определению попадает истинное значение X_o измеряемой величины с заданной вероятностью α. Чем больше доверительный интервал, т.е. чем больше задаваемая погрешность результата измерений ΔX_i, тем с большей надежностью искомая величина попадает в этот интервал. Естественно, величина α зависит от числа n произведенных измерений, а также от заданной погрешности ΔX. Для любой величины доверительного интервала по формуле Гаусса может быть рассчитана соответствующая доверительная вероятность. Результаты этих вычислений сведены в таблицу 1.

Так, при $n \geq 30$, выбирая ΔX равным S_n, мы получим значение $\alpha = 0.68$, при $\Delta X = 2S_n$ $\alpha = 0.95$, $\Delta X = 3S_n$ $\alpha = 0.997$ (рис. 3).

При большом числе измерений величина абсолютной ошибки определяется из условий нормального закона распределения:

$$\Delta x = \frac{t_{\alpha,n} S_n}{\sqrt{n}}. \tag{6}$$

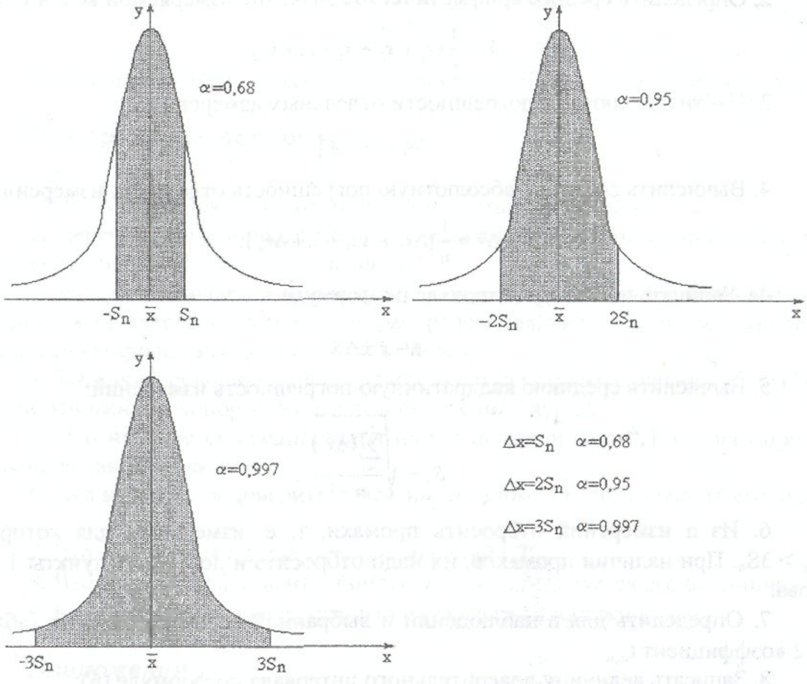


Рис. 3

Величина $t_{\alpha,n}$, носящая название коэффициента Стьюдента, вычислена для различных значений n и α, которые приведены в таблице 2, где n – число измерений, α – доверительная вероятность.

Используя коэффициент Стьюдента $t_{\alpha,n}$, равенство (5) можно записать в виде

$$P\left[\left(\bar{x}-t_{\alpha,n}\frac{S_n}{\sqrt{n}}\right)<x<\left(\bar{x}+t_{n,\alpha}\frac{S_n}{\sqrt{n}}\right)\right]=\alpha . \qquad (7)$$

Порядок обработки результатов прямых измерений

Задание. Измерение линейных размеров тела.

1. Выполнить n измерений длины тела и записать их результат в таблицу 1. (n должно быть не менее 20!).

Таблица 1

x_i													
Δx_i													
$\bar{x}=$					$\Delta\bar{x}=$					$x=\bar{x}\pm\Delta\bar{x}$			

2. Определить среднее арифметическое значение измеряемой величины:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\left(x_1 + x_2 + x_3 + \ldots + x_n\right).$$

3. Найти абсолютные погрешности отдельных измерений:

$$\Delta x_i = \left|\bar{x} - x_i\right|.$$

4. Вычислить среднюю абсолютную погрешность отдельных измерений:

$$\Delta\bar{x} = \frac{1}{n}\left(\Delta x_1 + \Delta x_2 + \ldots + \Delta x_n\right).$$

4а. Записать величину интервала по формуле

$$x = \bar{x} \pm \Delta\bar{x}.$$

5. Вычислить среднюю квадратичную погрешность измерений:

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum\limits_{i=1}^{n}\left(\Delta x_i\right)}{n-1}}.$$

6. Из n измерений отбросить промахи, т. е. измерения, для которых $\Delta x_i > 3S_n$. При наличии промахов, их надо отбросить и повторить пункты 1 - 6 снова.

7. Определить для n наблюдений и выбранной вероятности α по таблице 2 коэффициент $t_{\alpha,n}$.

8. Записать величину доверительного интервала по формуле (6):

$$\Delta x = \frac{t_{\alpha,n} S_n}{\sqrt{n}}.$$

9. Результат n измерений записать в виде

$$x = \bar{x} \pm \frac{t_{\alpha,n} S_n}{\sqrt{n}}.$$

Это означает, что истинное значение измеряемой величины находится в интервале

$$\left[\left(\bar{x} - \frac{t_{\alpha,n}}{\sqrt{n}}\right) < x < \left(\bar{x} + \frac{t_{\alpha,n}}{\sqrt{n}}\right)\right] \tag{8}$$

с надежностью α.

Мерой точности результатов измерений является относительная погрешность E, выраженная в процентах:

$$E = (\Delta x/x)100\%.$$

Используя таблицу коэффициентов Стьюдента, часто решают и обратную задачу: по известной величине абсолютной погрешности измерительного прибора и заданной величине надежности определяют необходимое число измерений

$$t_{\alpha,n} = \frac{\Delta x \sqrt{n}}{S_n}.$$

Необходимое число измерений находят по таблице 3 (см. Приложение).

Контрольные вопросы

1. Что называется абсолютной погрешностью измерения?
2. Перечислите основные типы погрешностей, укажите их причины и характер влияния на результаты измерений.
3. В чем заключается нормальный закон распределения случайных погрешностей? Начертите график этого распределения, выразите его математически, поясните смысл входящих в него величин.
4. На каких основных предположениях о свойствах случайных погрешностей основан закон нормального распределения Гаусса?
5. Что называется среднеквадратичной погрешностью? Как она определяется для данного массива?
6. Что называется доверительным интервалом? От чего зависит его величина?
7. Что называется надежностью измерений α?
8. Что такое коэффициент Стьюдента, чем определяется его величина?
9. Как определить доверительный интервал при надежности α?

Приложения

Таблица 1

Доверительная вероятность

ε	α	ε	α	ε	α
0	0	1.2	0.77	2.6	0.990
0.05	0.04	1.3	0.80	2.7	0.993
0.1	0.08	1.4	0.84	2.8	0.995
0.15	0.12	1.5	0.87	2.9	0.996
0.2	0.16	1.6	0.89	3.0	0.997
0.3	0.24	1.7	0.91	3.1	0.9981
0.4	0.31	1.8	0.93	3.2	0.9986
0.5	0.38	1.9	0.94	3.3	0.9990
0.6	0.45	2.0	0.95	3.4	0.9993
0.7	0.51	2.1	0.964	3.5	0.9995
0.8	0.57	2.2	0.972	3.6	0.9997
0.9	0.63	2.3	0.978	3.7	0.9998
1.0	0.68	2.4	0.984	3.8	0.99986
1.1	0.73	2.5	0.988	3.9	0.99990
				4.0	0.99993

Доверительные вероятности α для доверительного интервала, выраженного в долях средней квадратичной ошибки $\varepsilon = \frac{\Delta x}{S_n}$.

Функция Лапласа $2\Theta(\varepsilon) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\varepsilon} e^{\tau^2/2} d\tau = \alpha$.

Таблица 2

Коэффициенты Стьюдента $t_{\alpha,n}$

n	α					
	0.2	0.4	0.6	0.8	0.95	0.99
2	0.33	0.73	1.38	3.1	12.71	63.7
3	0.29	0.63	1.06	1.9	4.3	9.9
4	0.28	0.58	0.98	1.6	3.18	5.8
5	0.27	0.57	0.94	1.5	2.77	4.6
6	0.27	0.56	0.92	1.5	2.57	4.0
7	0.27	0.55	0.90	1.4	2.45	3.7
8	0.26	0.55	0.90	1.4	2.36	3.5
9	0.26	0.54	0.90	1.4	2.31	3.4
10	0.26	0.54	0.88	1.4	2.26	3.3
11	0.26	0.54	0.88	1.4	2.23	3.2
12	0.26	0.54	0.87	1.4	2.20	3.1
13	0.26	0.54	0.87	1.4	2.18	3.1
14	0.26	0.54	0.87	1.4	2.16	3.0
15	0.26	0.54	0.87	1.3	2.14	3.0
16	0.26	0.54	0.87	1.3	2.13	2.9
17	0.26	0.54	0.86	1.3	2.12	2.9
18	0.26	0.53	0.86	1.3	2.11	2.9
19	0.26	0.53	0.86	1.3	2.10	2.9
20	0.26	0.53	0.86	1.3	2.09	2.9
22	0.26	0.53	0.86	1.3	2.1	2.8
24	0.26	0.53	0.86	1.3	2.1	2.8
26	0.26	0.53	0.86	1.3	2.1	2.8
28	0.26	0.53	0.86	1.3	2.0	2.8
30	0.26	0.53	0.85	1.3	2.0	2.8
40	0.26	0.53	0.85	1.3	2.0	2.7
60	0.25	0.53	0.85	1.3	2.0	2.7
120	0.25	0.53	0.85	1.3	2.0	2.6
∞	0.25	0.52	0.84	1.3	1.960	2.6

Таблица 3

Необходимое число измерений для получения случайной ошибки ε надежностью α

$\varepsilon = \dfrac{\Delta x}{\delta}$	α					
	0.5	0.7	0.9	0.95	0.99	0.999
1.0	2	3	5	7	11	17
0.5	3	6	13	18	31	50
0.4	4	8	19	27	46	74
0.3	6	13	32	46	78	127
0.2	13	29	70	99	171	277
0.1	47	169	273	387	668	1089
0.05	183	431	1084	1540	2659	4338
0.01	4543	10732	27161	38416	66358	108307

Работа № 2. Оценка точности косвенных измерений удельного сопротивления проводника

Цель работы:

1. Ознакомление с методами оценки точности результатов косвенных измерений и расчета погрешностей.
2. Определение удельного сопротивления проводника и построение графика зависимости ρ от L.

Оборудование: установка для определения удельного сопротивления проволоки, штангенциркуль, микрометр, проволока.

Содержание и метод выполнения работы

Погрешности косвенных измерений.

В большинстве случаев некоторая физическая величина x измеряется не прямым измерением, а косвенным, по результатам измерения других величин y и z, т.е. $x = f(y, z)$.

Пусть необходимо определить плотность вещества $\rho = m/V$.

Здесь точность определения ρ зависит от погрешности определения массы m и объема тела V, т.е. от их погрешностей Δm и ΔV.

В этом случае абсолютную погрешность $\Delta\rho$ косвенного измерения находят через ошибки прямых измерений по правилу дифференцирования функции. Часто этой оценки оказывается достаточно.

Пусть x является некоторой функцией y и z, т.е. $x = f(y,z)$.

Тогда наилучшее значение при оценке $\bar{x}$ равно $\bar{x} = f(\bar{y},\bar{z})$.

Первый способ.

Погрешности косвенных измерений Δx определяют как приращение функции $f(y,z)$:

$$\Delta x = \frac{\partial f}{\partial y}\Delta y + \frac{\partial f}{\partial x}\Delta z\,. \tag{1}$$

Более точным является выражение:

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \Delta y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \Delta z^2}\,.$$

Второй способ.

На практике при вычислении погрешностей косвенных измерений удобнее сразу вычислить относительную погрешность по правилу дифференцирования натурального логарифма функции:

$$\text{если } g = \frac{4\pi L}{\tau^2},\ E = \frac{\Delta g}{g} = (\ln g)' = \frac{\Delta L}{L} + \frac{2\Delta\tau}{\tau}\,. \tag{2}$$

Следовательно, $\Delta g = gE$.

Вычисление погрешности при косвенных измерениях удельного сопротивления проводника

Пусть электрическое сопротивление участка однородного линейного проводника

$$R = \rho\frac{L}{S}, \tag{3}$$

где R – сопротивление отрезка проводника, L – его длина, S – площадь поперечного сечения, ρ – удельное сопротивление проволоки. Отсюда

$$\rho = R\frac{S}{L}. \tag{4}$$

Для измерения сопротивления с использованием закона Ома собирают электрическую цепь (см. рис. 1). Участок цепи AB – отрезок проволоки, E – источник тока, A – амперметр, V – вольтметр.

Чтобы определить ρ, необходимо измерить электрическое сопротивление R отрезка проволоки AB, длину этого отрезка и определить площадь сечения S.

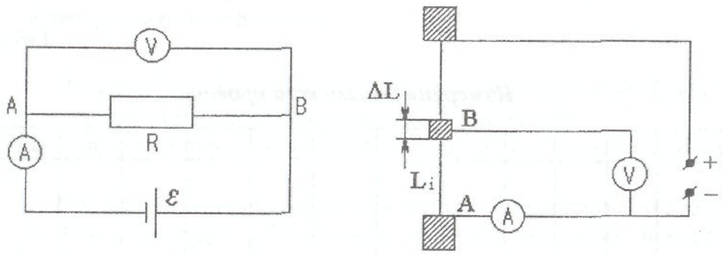


Рис. 1

Напряжение U, силу тока I, длину проволоки L и ее диаметр d измеряют соответствующими приборами с определенной точностью

$$\rho = \frac{U}{I}\frac{\pi d^2}{4L}\ . \qquad (5)$$

Порядок выполнения работы

1. Определить с помощью микрометра диаметр d_i проволоки по всей ее длине в 5-6 точках. Рассчитать диаметр проволоки по формуле:

$$d = \overline{d} \pm \Delta\ \overline{d}$$

и определить относительную погрешность $E_1 = \Delta\ \overline{d}\ /\ \overline{d}$.

2. Выбрать значение участка AB 5 раз L_i порядка (0.9 ÷ 0.2) L_0 и определить ΔL , т.е.

$$L = \overline{L} \pm \Delta L \text{ и } E_i = \Delta L / L_i\ .$$

3. Для участка L_i произвести 5 измерений U и I. Определить погрешность ΔU и ΔI по классу точности вольтметра и амперметра. Результат измерений записать в таблицы 1 и 2.

4. Вычислить среднее значение удельного сопротивления по формуле (4)

$$\overline{\rho} = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4 + \rho_5}{5} \text{ при данной } L_i\ .$$

5. Относительная погрешность определяется как

$$\Delta(\ln \rho) = E = \frac{\Delta\rho}{\overline{\rho}} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta L}{L_i} + 2\frac{\Delta d}{\overline{d}} + \frac{\Delta I}{I_i}\ . \qquad (5)$$

Результат измерения записывается в виде

$$\rho = \overline{\rho} \pm \Delta\overline{\rho} = \overline{\rho}\left(1 \pm \frac{\Delta\rho}{\overline{\rho}}\right). \qquad (6)$$

6. Построить график зависимости ρ_i от L_i с указанием абсолютной погрешности.

Таблица 1

Измерение диаметра провода

d_i											$\overline{d}$	$\Delta\overline{d}$	E%
штан-генцир-куль													
микро-метр													

Таблица 2

Измерение напряжения и тока для различных L_1

L(м)	U(B)	I(A)	R(Ом)	ρ(Ом*м)	$\rho_{ср}$(Ом*м)	Δρ
0.15						
0.2						
0.3						
0.4						
0.5						

Контрольные вопросы

1. На каких главных предположениях о свойствах случайных погрешностей основан закон нормального распределения Гаусса?
2. Что называется доверительным интервалом? От чего зависит его величина?
3. Как определить доверительный интервал при надежности α?
4. Как определить абсолютную ошибку косвенных измерений через ошибки прямых измерений?
5. Как определить величину относительной ошибки косвенных измерений?
6. На установке возможны две схемы включения амперметра и вольтметра. Какая систематическая погрешность измерения удельного сопротивления для каждой их схем?

Работа № 3. Измерительные приборы

Цель работы:

1. Изучить линейный нониус.
2. Научиться пользоваться измерительными приборами.
3. Научиться определять погрешность измерений измерительных приборов.

Оборудование: штангенциркуль, микрометр, микроскоп, масштабная линейка.

Содержание и методы выполнения работы

Нониус.

В экспериментальной практике, как правило, для сопоставления протяженности размеров тел их просто прикладывают друг к другу. Все приборы для измерений снабжены линейными шкалами. Чем большая точность измерения требуется, тем мельче должны быть деления шкалы. Однако отсчет по шкале с очень мелкими делениями затруднителен. Поэтому для увеличения точности отсчета удобнее использовать шкалу с достаточно крупными делениями, снабдив ее нониусом.

Нониус – дополнительная шкала к основному масштабу, позволяющая повысить точность измерения с данным масштабом в 10 - 20 и более раз.

Нониус представляет собой небольшую линейку (шкалу), скользящую вдоль основного масштаба (рис. 1).

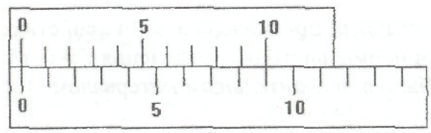


Рис. 1

Устройство нониуса основано на способности человеческого глаза различать, составляют ли два штриха продолжение один другого или же они несколько сдвинуты.

На этой линейке нанесена маленькая шкала, состоящая из m делений. Суммарная длина всех m делений нониуса равна (m - 1) наименьшим делениям основного масштаба, т.е.

$$mx = (m - 1)y,$$

где x – длина деления нониуса, y – длина наименьшего деления масштаба.

Таким образом, одно целое деление нониуса короче одного целого деления наименьшего масштаба на Δx

$$\Delta x = | y - x | = y/m.$$

Эта величина y/m, являющаяся разностью длин делений основного масштаба и нониуса, называется *точностью нониуса* и используется при измерении. Таким образом, нониус, предназначенный для отсчета десятых долей деления основной шкалы, должен содержать 10 делений; нониус, предназначенный для отсчета двадцатых долей – 20 делений, и т.д.

Выведем теперь правило пользования нониусом при измерении длин. Для этого представим, что при измерении длины L какого-то тела нуль нониуса, совпадающий ранее с нулем основной шкалы, сместился вправо на отрезок L и расположился между K и (K +1) делениями этой шкалы (см. рис. 2).

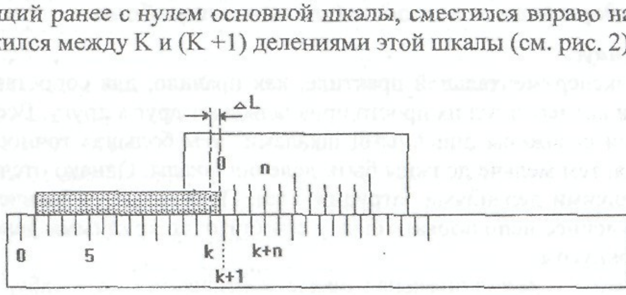


Рис. 2

Очевидно, искомая длина измерительного числа

$$L = kY + \Delta L , \qquad (1)$$

где ΔL – неизвестная пока еще доля деления основного масштаба, которую необходимо определить с помощью нониуса. Так как деления нониуса не равны делениям шкалы, то обязательно найдется на нем такое деление n, которое *ближе подходит к соответствующему (K + n)-му делению основной шкалы.* Как видно из рис. 2,

$$\Delta L = ny - nx = n(y - x) = nk_0 \qquad (2)$$

и вся длина L будет равна, следовательно,

$$L = ky + nk_0 .$$

Это можно записать и сформулировать следующим образом:

$$L = ky + n\frac{y}{m}, \text{ где } \frac{y}{m} = k_0 , \qquad (3)$$

т.е. длина отрезка, измеряемого при помощи нониуса, равна числу целых делений масштаба плюс точность нониуса, умноженная на номер деления нониуса, совпадающего с некоторым делением основной шкалы.

Может оказаться, что отклонение $\Delta L/n$ не равно целому числу, и, следовательно, на шкале нониуса не найдется ни одного деления, совпадающего с каким-либо делением основной шкалы. В таком случае n берется равным порядковому номеру того деления нониуса, которое ближе других расположено к одному из делений основной шкалы.

Погрешность нониуса, которая может возникнуть при таком методе отсчета, равна половине его точности.

Задание 1. Штангенциркуль.

Цель работы:

1. Ознакомиться с устройством и правилами пользования штангенциркулем.
2. Измерить линейные размеры прямоугольного параллелепипеда и цилиндра.
3. Обработать результаты измерений методом среднего арифметического.

Штангенциркулем называется прибор прямого действия, у которого размер тела определяется по положению измерительной рамки, перемещающейся вдоль штанги со штриховой шкалой (см. рис. 3).

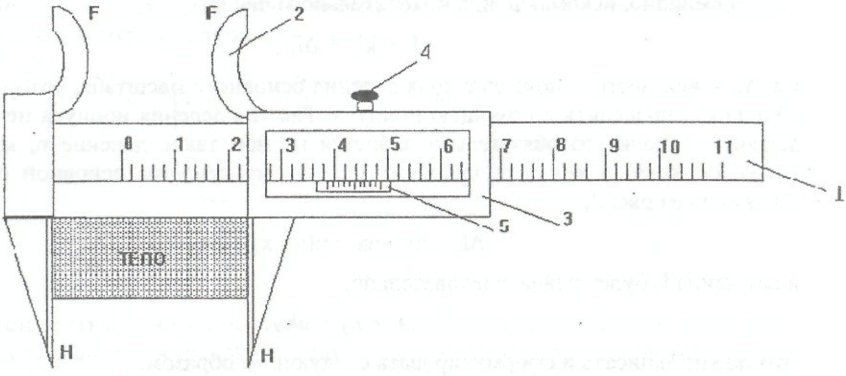


Рис. 3

Штангенциркуль предназначен для измерения наружных и внутренних размеров тел. Он состоит из массивной линейки - штанги (1), измерительных верхних и нижних губок (2), рамки (3), зажима рамки (4), нониуса (5). С внутренней стороны нижние измерительные губки имеют плоские поверхности. При сомкнутых губках нули нониуса и основной шкалы совпадают. При определении линейных размеров тела с помощью штангенциркуля измеряемое тело зажимается между плоскими поверхностями измерительных губок. При этом нуль нониуса смещается вдоль основной шкалы (штанги) на длину L, равную длине измеряемого тела.

Величина размера тела L определяется по формуле (3). В штангенциркулях наиболее часто используются нониусы с постоянным $K_0 = 0.1$ мм и $K'_0 = 0.05$ мм. Основными характеристиками штангенциркуля являются:

1) цена деления основной шкалы у;

2) цена деления нониуса х;

3) постоянная нониуса K_0;

4) инструментальная ошибка Δ.

Инструментальная ошибка, вызываемая износом инструмента или неточностью его изготовления, определяется следующим образом. Необходимо сдвинуть измерительные губки штангенциркуля до легкого соприкосновения и делают отсчет показаний. Взятый с обратным знаком отсчет показаний и равен инструментальной ошибке Δ.

Упражнение 1. Определение основных характеристик штангенциркуля (данные занести в таблицу 1).

Таблица 1

Номер и тип штангенциркуля	у	х	$k_0 = \frac{y}{m}$	Δ

Упражнение 2. Измерение линейных размеров тел и обработка результатов измерений.

a) С помощью линейки измерить 5 раз основные размеры (A, B, C) для металлической пластины. Измерения провести на различных участках тела. Результаты измерений занести в таблицу 2.

b) С помощью штангенциркуля измерить 5 раз основные размеры (A, B, C) для металлической пластины. Измерения провести на различных участках тела. Результаты измерений занести в таблицу 2.

Таблица 2

N	A	B	C	$\Delta\overline{A}$	$\Delta\overline{B}$	$\Delta\overline{C}$	E
1							
2							
3							
4							
5							
	$\overline{A}$	$\overline{B}$	$\overline{C}$	$A=\overline{A}\pm\Delta\overline{A}$	$B=\overline{B}\pm\Delta\overline{B}$	$C=\overline{C}\pm\Delta\overline{C}$	

Измерить 5 раз диаметр и высоту цилиндра D, h штангенциркулем. Результаты занести в таблицу 3.

Таблица 3

N	D	h	$\overline{D}$	$\overline{h}$	$\Delta\overline{h}$	$\overline{D}$
1						
2						
3						
4						
5						

Задание 2. Микрометр.

Цель работы:

1. Ознакомится с устройством микрометра и правилами пользования им.
2. Измерить диаметр цилиндра, провода.
3. Обработать результаты измерений.

Микрометрические инструменты основаны на применении микрометрических винтовых пар. Микрометр (см. рис. 4) имеет вид тисков, в которых измеряемое тело зажимается микрометрическим винтом.

На стержне винта жестко укреплен барабан В, на левой кромке которого нанесена круговая шкала, содержащая N (обычно 50 или 100) делений. При вращении микровинта барабан перемещается вдоль линейной шкалы Д. Трещотка Т микрометрической головке преобразующей вращательное движение барабана поступательное движение микровинта, обеспечивает ограничение вращающего момента. При одном обороте барабан и микровинт перемещаются на одно деление основной шкалы. Торец барабана является указателем для основной шкалы, а продольный штрих на барабане – указателем для круговой шкалы.

При измерении размера тела его помещают без переноса между пяткой и микровинтом и вращают барабан за трещотку до тех пор, пока она не начнет проворачиваться. Ближайший к торцу барабана штрих основной шкалы показывает число целых и десятых долей миллиметра в размере. К отсчету по основной шкале прибавляют отсчет по круговой шкале, равный произведению цены деления α_k на номер деления, который находится напротив продольного штриха. При вращении микровинта барабан перемещается вдоль линейной шкалы. Величина этого перемещения, соответствующая одному полному обороту барабана, называется шагом микровинта. Цена деления круговой шкалы α_k и шаг винта h связаны очевидным соотношением

$$\alpha_k = h/N. \qquad (4)$$

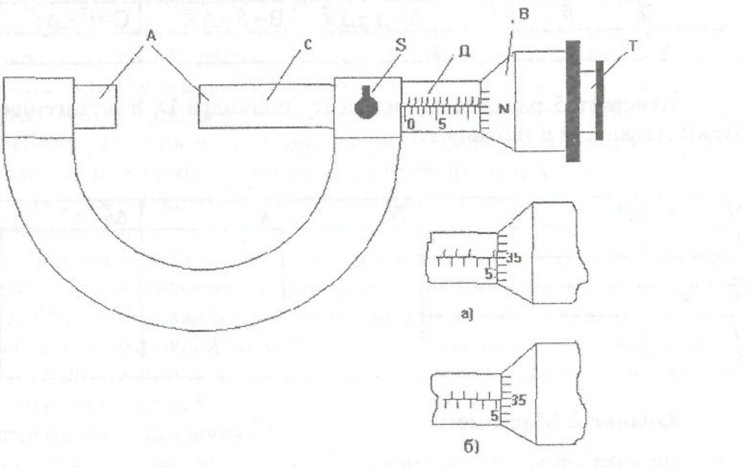


Рис. 4

Величины h и N всегда подбираются так, что $\alpha_k = 0.01$ мм:

h = 1 мм при N = 100,

h = 0.5 мм при N = 50.

При h = 0.5 мм, на корпусе микрометра (Д) наносятся 2 линейные шкалы: *нижняя для отсчета мм, а верхняя – для отсчета половинных долей миллиметра.*

Во избежание грубых ошибок при снятии отсчета по микрометру внимательно следите за положением края барабана относительно штрихов верхней шкалы!

При измерениях микрометром обязательно пользуйтесь трещоткой.

Для фиксации микрометрического винта в определенном положении служит стопор S. Чтобы застопорить винт, нужно повернуть стопор до отказа по часовой стрелке. Чтобы освободить винт, нужно повернуть стопор до отказа против часовой стрелки.

Упражнение 3. Измерение микрометром линейных размеров тел и обработка результатов измерений.

Измерить диаметр цилиндра (Д) пять раз и результаты занести в таблицу 3.

Диаметр медного провода измерить микрометром, проведя измерения в нескольких точках (порядка 10 раз).

Затем определить $\overline{D}$, $\Delta\overline{D}$.

Сравнить величину Δ, $\Delta\overline{D}$ и ΔD.

Результаты записать:

$$D_1 = \overline{D} \pm \Delta\overline{D}.$$

Задание 3. Измерительный микроскоп.

Микроскоп представляет собой комбинацию двух оптических систем: объектива и окуляра, позволяющих получать действительные и мнимые увеличенные изображения шкал и объектов измерения. Измерения на микроскопах можно производить теневым методом в происходящем свете, контурным методом в отраженном свете. Процесс измерений заключается в совмещении штриховых линий окулярной шкалы (сетки) с линиями контура изделия, ограничивающими проверяемый размер. Точность совмещения штриховых линий значительно выше, чем сплошных.

При практическом измерении размеров рассматриваемого в микроскоп предмета нужно непосредственно сравнить его с некоторым масштабом, расположенным в одной из плоскостей изображения предмета. При таком измерении с масштабом сравнивается не сам предмет, а его увеличенное изображение. Для получения правильного результата нужно в другом опыте, не перестраивая микроскопа, сравнить с нашим масштабом другой масштаб – объектную шкалу. При градуировке микроскопа совмещают произвольные деления объектной шкалы и окулярной шкалы (см. рис. 5).

Рис. 5

Так как расстояние между штрихами окулярной шкалы и изображением объективной шкалы не равны друг другу, то всегда находится такое (n)-е деление объективной шкалы, которое совпадает с (k)-м делением окулярной шкалы. Цена деления окулярной шкалы (приведенное к объективу и выраженное в миллиметрах расстояние между штрихами) $I_{ок}$ равна при этом

$$I_{ок} = \frac{n}{m} I_{об}, \qquad (5)$$

где $I_{об}$ – цена деления объективной шкалы; $I_{ок}$ – цена деления окулярной шкалы в мм.

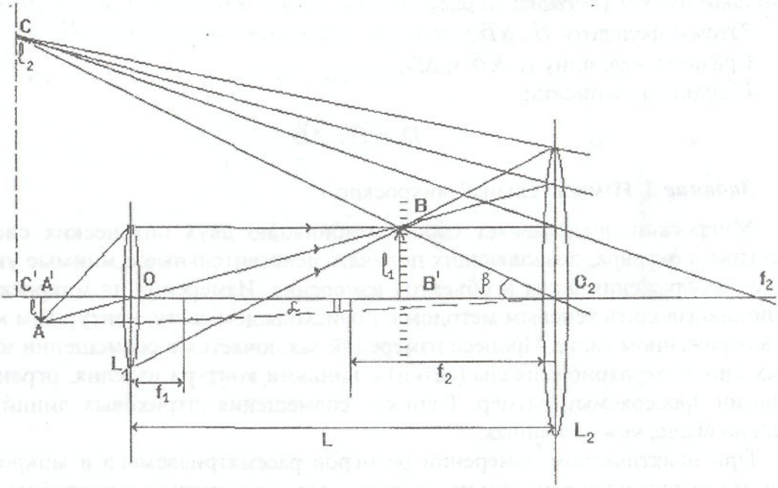


Рис. 6

Упражнение 4. Измерение диаметра провода измерительным микроскопом.

Прежде всего необходимо отъюстировать микроскоп (рис. 6). Это делается в следующем порядке:

1. Перемещая окуляр относительно окулярной шкалы, получают резкое изображение шкалы.

2. Наблюдая в окуляр, медленно поднимают тубус винтом грубой наводки до тех пор, пока в поле зрения не мелькнет изображение предмета. Винтом точной наводки регулируют микроскоп до получения резкого изображения. Таким образом, в поле зрения микроскопа одновременно и одинаково резко видны объект и окулярная шкала.

Чтобы определить размеры предмета по окулярной шкале, ее необходимо проградуировать. Для градуировки окулярной шкалы служит объектная шкала, нанесенная на стекле. Цена деления шкалы – 0.01 мм. Помещая эту шкалу вместо объекта и совмещая первичное изображение шкалы объектива с окулярной шкалой, можно определить цену деления окулярной шкалы по формуле (5).

Следует заметить, что определение цены деления окулярной шкалы имеет смысл для данного окуляра, данного объектива и данной длины трубки микроскопа.

Вместо окулярной шкалы для определения размеров предмета можно воспользоваться винтовым окулярным микрометром.

Нити, видимые в поле зрения окулярного микрометра, передвигаются с помощью микрометрического винта так, чтобы скрещение нитей совместилось сначала с одной границей изображения объекта, а затем с другой. Градуируют микроскопический винт с помощью объектной шкалы. После этого линейный размер объекта d можно вычислить в миллиметрах по формуле

$$d = (Nz + \delta n)\ [\text{мм}]\,, \tag{6}$$

где N – число полных оборотов винта окулярного микрометра; z – шаг винта за один полный оборот винта микрометра; δ – цена деления шкалы (на барабане) окулярного микрометра; n – номер деления на шкале барабана.

С помощью объектной шкалы определить цену деления окулярной шкалы или окулярного микрометра. Затем приступить к измерению диаметра проволоки, поместив ее на столик микроскопа (предварительно сняв объектную шкалу). Установить, сколько мелких делений окулярной шкалы помещается на изображении проволоки. Определить диаметр проволоки из пяти измерений.

Дать сравнительный анализ замеров диаметра проволоки штангенциркулем, микрометром и микроскопом.

Контрольные вопросы

1. Что такое нониус? Каков общий принцип построения нониусов?
2. Что называется постоянной нониуса, чем определяется ее величина?
3. Как с помощью нониуса отсчитываются доли деления основной шкалы? Обоснуйте это правило.
4. Чем определяется погрешность отсчета с помощью нониуса?
5. Что такое инструментальная погрешность, чем она вызывается, как ее определить?
6. Объясните устройство и принцип измерения штангенциркулем.
7. Объяснить устройство и принцип действия микрометра.
8. Что называется шагом микрометрического винта?
9. Как связана цена деления круговой шкалы с шагом микровинта?
10. Как определить цену деления окулярной шкалы измерительного микроскопа?
11. От чего зависит цена деления окулярной шкалы?
12. Каковы пределы измерения длины тела при помощи микроскопа?

Работа № 4. Методы точного взвешивания

Цель работы:

1. Определение силы тяжести и веса тела.
2. Ознакомление с принципами действия технических весов.
3. Изучение методов точного взвешивания.

Оборудование: технические весы, взвешиваемое тело.

Содержание и методы выполнения работы

Вес тела.

Среди всех видов сил, существующих в природе, имеется одна, которая играет особую роль, – сила тяжести. На тело, находящееся на поверхности Земли, действует сила тяжести (вес тела – притяжение к Земле), пропорциональная количеству вещества этого тела m. Масса тяготения тождественна инертной массе, которая входит в формулу второго закона Ньютона.

Самые точные исследования показали, что ускорение падающих тел в вакууме одинаково и не зависит от их массы:

$$\vec{p} = m\vec{g} \,. \tag{1}$$

Непосредственно сила, с которой данное тело притягивается к Земле, может быть определена с помощью пружинных весов. Абсолютное удлинение пружины Δx, по закону Гука, равно

$$\Delta x = \alpha F \,, \tag{2}$$

где F – деформирующая сила, α – коэффициент пропорциональности.

В случае взвешивания деформирующей силой является вес тела, тогда

$$\Delta x = \alpha P = \alpha mg \,. \tag{3}$$

Величина Δx пропорциональна весу тела.

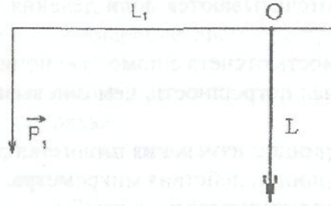


Рис.1

Пружина снабжается указателем, скользящим вдоль шкалы, проградуированной в единицах веса.

Рассмотрим принцип действия рычажных весов. Они представляют собой рычаг первого рода (рис. 1). На основании правила моментов сил

$$F_1L_1 = F_2L_2\,. \tag{4}$$

Так как весы равноплечны, то $L_1 = L_2$ и при равновесии $F_1 = F_2$. Но $F_1 = P_1 = m_1g$, а $F_2 = P_2 = m_2g$, значит $m_1 = m_2$. Таким образом, при взвешивании тел на рычажных весах мы сравниваем массу тела m_1 с эталонной массой m_2.

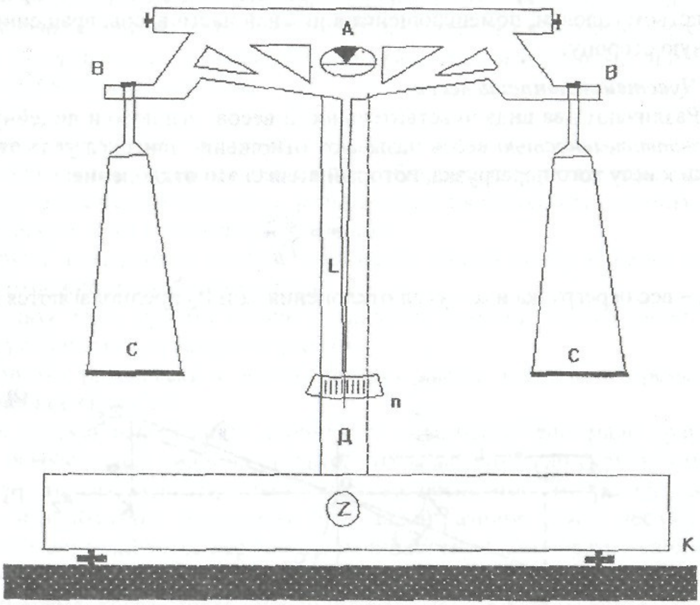


Рис. 2

Устройство технических весов.

Весы состоят из равноплечного рычага BB, называемого коромыслом, опорою которого служит ребро стальной закаленной призмы А, вставленной в середину коромысла перпендикулярно к его плоскости (см. рис. 2). Ребро призмы опирается на агатовую полированную пластинку (подушку), укрепленную на верху колонки Д. На концах коромысла на равных расстояниях от средней призмы имеются приспособления для подвешивания чашек СС, обыкновенно призмы ВВ. Ребра средних и крайних призм должны быть параллельны между собой. Если на чашках нет грузов, то коромысло должно устанавливаться горизонтально или почти горизонтально. Для определения положения коромысла служит длинная стрелка L, прикрепленная к его середине перпендикулярно к линии, соединяющей две крайние призмы. Конец стрелки движется перед шкалой n, находящейся у основания колонки. При горизонтальном положении коромысла стрелка должна указывать на среднее деление шкалы. Когда весы находятся в работе, их необходимо арретировать, это производится действием особого приспособления внутри колонки весов, при помощи которого коромысло и чашка несколько приподнимаются кверху, вследствие чего их призмы освобождаются от давления на плоскость опоры и неизбежно при этом напрасно не изнашиваются. Устройство арретиров у разных весов бывает различно. Обычно арретирование и освобождение коромысла производится посредством головки, помещающейся в нижней части весов, вращением ее в ту или иную сторону.

Чувствительность весов.

Различают два вида чувствительности весов: угловую и линейную. *Угловой чувствительностью* весов называют отношение тангенса угла отклонения стрелки к весу того перегрузка, который вызвал это отклонение:

$$\varphi = \frac{tg\alpha}{P_B},$$

где P_B – вес перегрузка и α – угол отклонения. α и P_B предполагаются малыми.

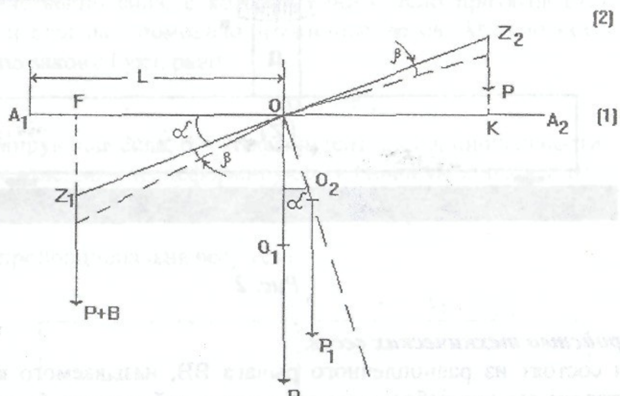


Рис. 3

Линейная чувствительность весов определяется отношением числа делений (a_0 - a_1), на которые перемещается стрелка по шкале, к добавочному перегрузку:

$$\varphi_1 = \frac{|a_1 - a_0|}{P_B}. \qquad (5)$$

Из условия равновесия весов следует, что (см. рис. 3)

$$P\,L\cos\alpha + P_0\,L\cos\alpha = P\,L\cos\alpha + P_в\,h\sin\alpha\,.$$

Отсюда $P_0\,L\cos\alpha = P_в\,h\sin\alpha$, или

$$\frac{tg\alpha}{P_B} = \frac{L}{P_в h} = \varphi\,. \qquad (6)$$

Чувствительность весов пропорциональна длине коромысла и обратно пропорциональна его весу и расстоянию от центра тяжести коромысла до ребра опорной призмы и зависит от их нагрузки. Кроме того, на чувствительность весов влияет ряд факторов – заточка ребер призмы, скольжение ребер призмы по поверхности агатовых пластинок.

Правила обращения с весами.

При обращении с весами необходимо соблюдать следующие правила:

1. Пока весы не арретированы, нельзя класть на чашки или снимать с них грузы (не следует даже прикасаться к чашкам).

2. Грузы накладывать следует так, чтобы общий центр тяжести приходился, по возможности, на центр чашки.

3. Нельзя брать руками мелкие разновески плоской формы (доли грамма), их берут пинцетом за загнутые уголки.

4. Снимая разновески с весов, следует класть каждую непременно в предназначенное ей место.

5. Не следует освобождать коромысло, пока чашки еще мало уравновешены, его освобождают лишь на столько, чтобы можно было судить, какая из чашек легче, замечая, куда отклоняется стрелка, после этого тотчас арретируют коромысло и прибавляют разновески (при малой разнице между весами взвешиваемого тела и разновесов коромысло начинает маятникообразно качаться).

6. Освобождать и арретировать коромысло следует всегда медленно и плавно в то время, когда стрелка проходит через положение равновесия, иначе коромысло получает толчки.

7. Если чашки качаются маятникообразно, то их следует прежде всего успокоить прикосновением листа бумаги и только после этого вполне освободить коромысло.

8. При наблюдении качания весов дверцы их следует непременно закрыть.

9. Не следует надолго оставлять грузы на чашках, в особенности, когда весы арретированы. Когда взвешивание окончено, весы надо арретировать, нагрузки снять и открыть дверцы.

Задание 1. Взвешивание на технических весах.

Для того чтобы произвести точное взвешивание, необходимо:

1. Определить нулевую точку весов.
2. Определить их чувствительность.
3. Произвести само взвешивание.

Определение нулевой точки весов.

Перед началом каждого взвешивания необходимо определить положение равновесия незагруженных весов, т.е. деление шкалы, против которого остановилась бы стрелка при отсутствии трения. В целях исключения влияния трения нулевая точка определяется по методу качания.

При качании коромысла указатель весов колеблется подобно маятнику. Положим, что при размахе влево конец указателя доходит до черты a_1 шкалы, считая от крайней левой черты, а при следующем размахе вправо доходит до положения a_2 шкалы. Если бы указатель совершал одинаковые по величине размахи в ту и другую стороны от своего положения, то оно определялось бы как подсумма величины a_2 и a_1. В действительности размахи указателя с течением времени уменьшаются. Первый размах влево больше следующего размаха влево и т.д., поэтому полусумма величин не дала бы истинного положения нуля весов.

Рассмотрим теперь три последовательных размаха указателя a_1, a_2, a_3, из которых a_1 и a_3 – в левую сторону, a_2 – в правую. Взяв полусумму величин a_1 и a_3, мы получим число, которое относительно a_2 будет более удовлетворять условию равенства размаха в ту или другую сторону от положения равновесия, чем одно a_1 или a_3. Следовательно, нуль весов, вычисленный как:

$$a_0 = \frac{1}{2}\left(-\frac{a_1 + a_3}{2} + a_2\right), \tag{7}$$

будет уже ближе к действительному положению его.

Изменение амплитуды происходит не произвольно во времени, а по экспоненциальному закону. Взяв, например, пять последних размахов – a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 , три – a_1, a_3, a_5 – в одну сторону и два – a_2, a_4 – в другую и выведя среднее из размахов в каждую сторону, мы, очевидно, найдем число, еще более удовлетворяющее условию равенства размахов от положения в ту или другую сторону; нуль весов вычислен не так, как будет еще ближе к положению истинного равенства.

$$a_0 = \frac{1}{2}\left(-\frac{a_1 + a_3 + a_5}{3} + \frac{a_2 + a_4}{2}\right). \tag{8}$$

В случае, если размахи будут отсчитаны не от крайнего левого, а от среднего деления шкалы, то само собой разумеется, что отсчетам, произведенным в разные стороны, следует приписывать разные знаки; обычно отрицательными считаются отсчеты, произведенные в левую сторону.

Обыкновенно при определении нуля весов ограничиваются наблюдением пяти последовательных качаний. При записывании наблюдаемых размахов левые размахи пишут в левом столбце, правые – в правом. Всегда берется одним качанием больше в ту сторону, с которой начали наблюдения первого качания. Если по освобождении арретира размахи колебаний весов очень малы, то их увеличивают, производя над одной их чашек весов слабые размахи листом бумаги, после чего опускают несколько колебаний весов без наблюдения и затем уже начинают наблюдать.

Части деления шкалы при колебания указателя оценивают на глаз до десятых долей деления.

Одним определением нуля весов нельзя удовлетвориться, а надо сделать еще два и взять за нуль весов среднее арифметическое из всех определений. Зная точку весов, можно приступать к определению их чувствительности.

Определение чувствительности весов.

Если на одну чашку (правую) ненагруженных весов мы положим разновеску 300 мг (при арретированных весах) и определим теперь из качаний положение равновесия (или остановку) весов так, как мы только что определяли нуль весов, то получим уже не прежнее число, а несколько иное, например a'_o, которое укажет нам на перемещение положения равновесия весов на $(a'_o - a_o)$ делений шкалы. Абсолютная величина этого перемещения и будет выражать чувствительность ненагруженных весов при перегрузке в 300 мг. Определив точку нуля весов и их чувствительность по формуле

$$\varphi = \frac{|a'_0 - a_0|}{300},$$

приступаем к взвешиванию на технических весах.

Взвешивание.

Всегда можно путем последовательного накладывания разновесок найти два числа P_1 и P_2 граммов, между которыми заключается вес взвешиваемого тела, если он не может быть выражен целым числом граммов.

Необходимо заметить, что при большей разнице в весе тела и положенных разновесов перевес одной из чашек наблюдается легко: коромысло весов при освобождении арретира тотчас накреняется в какую-нибудь сторону и не колеблется. При малой разнице в весе коромысло продолжает колебаться, и если нельзя во время качания заметить, что размах указателя в одну сторону от найденной нулевой точки весов больше, чем в другую, то необходимо определить в таком случае из качаний точку равновесия весов, т.е. то деление шкалы, на которое указывала бы при отсутствии трения стрелка, когда прекратились колебания коромысла. Определение точки равновесия ведется так же, как определение нуля весов.

На практике удобнее пользоваться величиной, обратной чувствительности весов, называемой постоянной прибора.

Постоянной весов называется нагрузка, отклоняющая стрелку весов на одно деление:

$$c = \frac{1}{\varphi} = \frac{P_0}{|a'_0 - a_0|}. \qquad (9)$$

Упражнение 1. Точное взвешивание по способу колебаний.

Для определения точного веса по способу колебаний проделываем следующее:

1. Находим нулевую точку технических весов по способу колебаний коромысла (из 3 колебаний):

$$a_0 = \frac{1}{2}\left(\frac{a_1 + a_3}{2} - a_2\right).$$

2. Производим взвешивание тела. Его кладут на левую чашку весов, разновески – на правую. Накладываем сначала разновески в последовательном их уменьшении, а затем – миллиграммы до примерного равновесия весов.

3. Определяем точку колебания a''_0 уравновешенных весов, стрелка при этом не должна выходить за пределы шкалы:

$$a''_0 = \frac{1}{2}\left(\frac{a_1 + a_3}{2} - a_2\right).$$

4. Определяем искомый вес тела $P = P_1 + \Delta P$, где P_1 – вес разновесок, а ΔP – добавочный вес.

Зная постоянную весов C и величину отклонения стрелки весов от положения равновесия $\Delta n = (a''_0 - a_0)$, определяем величину

$$\Delta P = c\Delta n = \frac{P_0}{|a'_0 - a_0|}(a''_0 - a_0). \qquad (10)$$

Точка качания уравновешенных весов может быть левее или правее точки a_0, следовательно, ΔP и ее знак зависят от этого.

Упражнение 2. Особые методы взвешивания.

Мы уже познакомились со взвешиванием тела, которое дает число, точное в пределах чувствительности и постоянства весов, когда длина обоих плеч коромысла одинакова. Если длины плеч коромысла различны, то вес разновесок, помещенных на одной чашке весов, не будет выражать собою веса взвешиваемого тела, помещенного на другой чашке. В последнем случае употребляются другие методы взвешивания, в частных подробностях вполне схожие с простым взвешиванием. Таких методов известно три: тарирования; двойного взвешивания; постоянной нагрузки.

1. Метод тарирования (Борда) (рис. 4А, 4Б).

На правую чашку весов помещают взвешиваемое тело, а на левую кладут тару (тарой называется предмет, имеющий одинаковый вес со взвешиваемым телом, в качестве тары часто используют мелкую дробь) и прибавляют к этой таре для окончательного уравновешивания кусочки листового олова до тех пор, пока положение равновесия, найденное из качаний коромысла, не будет одинаковым с определенным перед началом взвешивания нулем весов. После этого снимают тело и на его место кладут такое количество гирь, какое необходимо для уравновешивания тары, что снова определяется из качания весов. Вес гирь будет равен в таком случае весу тела. При этом методе взвешивания влияние неравенства плеч будет установлено, а точность взвешивания будет лежать в пределах чувствительности весов.

2. Метод двойного взвешивания (Гаусса) (рис. 5А, 5Б).

При этом методе неравенство плеч коромысла нисколько не влияет на полученный результат взвешивания.

Обозначим длины правого и левого плеч коромысла соответственно через L_1 и L_2. Кладем взвешиваемое тело на левую чашку весов и уравновешиваем его на правой чашке со всей возможной точностью веса разновесок P_1, производя взвешивание по всем правилам сообщенным выше. Вследствие неравенства вес тела P не будет равен P_1. На основании теоремы о моменте сил, приложенных к точкам подвеса чашек, имеем:

$$PL_2 = P_1 L_1 . \tag{11}$$

Производим по способу колебаний новое взвешивание, причем кладем тело P на правую чашку, а разновески – на левую. Вес последних, необходимый для уравновешивания тела P, пусть будет P_2.

По теореме моментов сил имеем в этом случае:

$$P\,L_1 = P_2\,L_2 .$$

Из последних уравнений находим

$$P = \sqrt{P_1 P_2}$$

(вес тела равен корню квадратному из произведения обоих весов разновесок). Их тех же уравнений можно найти уравнение длин плеч коромысла:

$$\frac{L_1}{L_2} = \sqrt{\frac{P_2}{P_1}} .$$

Но так как величины P_1 и P_2 очень мало отличаются друг от друга, то, обозначив $(P_2 - P_1)$ через 2g, имеем:

$$P = \sqrt{P_1 P_2} = \sqrt{P_1(P_1 + 2g)} = \sqrt{P_1^2 + 2gP_1} \approx \sqrt{P_1^2 + 2gP_1 + g^2} ;$$

$$P = \sqrt{(P_1 + g)^2} = P_1 + g , \text{ или } P = \frac{P_1 + P_2}{2} ; \tag{12}$$

$$\frac{L_1}{L_2} = \sqrt{\frac{P_2}{P_1}} = \sqrt{\frac{P_1 + 2g}{P_1}} = \sqrt{1 + \frac{2g}{P_1}} \approx \sqrt{1 + \frac{2g}{P_1} + \frac{g^2}{P_1^2}} ;$$

$$\frac{L_1}{L_2} = \sqrt{\left(1 + \frac{g}{P_1}\right)^2} = 1 + \frac{g}{P_1}, \text{ или } \frac{L_1}{L_2} = 1 + \frac{P_2 - P_1}{2P_1} . \tag{13}$$

Этот метод взвешивания необходимо применять при проверке разновесок.

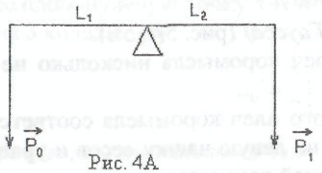


Рис. 4А

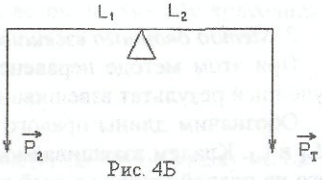


Рис. 4Б

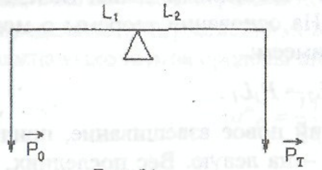


Рис.5А

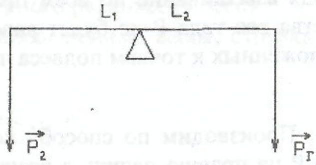


Рис.5Б

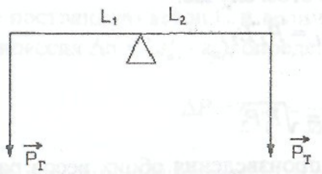


Рис. 6А

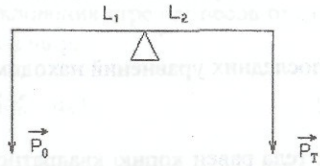


Рис.6Б

3. Метод постоянной нагрузки (Менделеева) (рис. 6А, 6Б).

При этом методе на левую чашку весов кладется гиря предельного веса, указанного для взвешивания на данных весах, на правую чашку – тара, точно уравновешивающая эту гирю. Равновесия стараются достигнуть с возможной тщательностью, взвешивая по способу колебаний.

При взвешивании тело помещают на левую чашку, и на эту чашку кладут разновески до тех пор, пока не уравновесят тару, лежащую на правой чашке. Вес тела и разновесок, положенных для равновесия на левую чашку, будет равен весу той гири, которая первоначально лежала на ней, следовательно, вес тела равен весу гири без тех разновесок, которые были положены для уравновешивания. Этот способ отличается постоянством чувствительности и требует каждый раз только одного взвешивания, что сокращает затраты времени и уменьшает погрешность, которая может происходить от многократного взвешивания.

Контрольные вопросы

1. Что называется весом тела?
2. Как формулируется условие равновесия рычага?
3. Что такое чувствительность весов? От чего она зависит?

4. Как определить цену деления весов?

5. Как определить нулевую точку весов?

6. Как изменится результат взвешивания на рычажных весах при перемещении с полюса на экватор Земли?

7. Какие методы точного взвешивания вы знаете? Какие виды систематических ошибок устраняются их применением?

8. Исключают ли методы особого взвешивания ошибку, обусловленную выталкивающей силой со стороны воздуха?

9. Назовите и обоснуйте правила взвешивания на технических весах.

10. Зависит ли точность взвешивания от положения груза на чашке весов?

Работа № 5. Определение массы тела с помощью взвешивания на аналитических весах

Цель работы:

1. Определение чувствительности весов.
2. Определение истинного веса тела.

Оборудование: аналитические весы, набор разновесок, взвешиваемое тело.

Содержание и методы выполнения работы

Аналитические весы.

Аналитические весы употребляются для точного взвешивания. Обыкновенно они заключены в ящик с подвижными стеклянными стенками. Ящик предохраняет весы от пыли и воздушных толчков и дает возможность равномерно и достаточно точно уравновесить их. Основной частью весов являются рычаг (коромысло), опирающийся на призму K_1. На концах рычага, на призмах KK, висят чашки CC. Ребра призм K_1 и KK находятся в одной горизонтальной плоскости (см. рис. 1).

Для определения положения коромысла служит длинная стрелка L, прикрепленная в его середине перпендикулярно к линии, соединяющей две крайние призмы. Конец стрелки движется перед шкалой NN, находящейся у основания колонки. Если на чашках нет грузов, то коромысло должно устанавливаться горизонтально, стрелка должна указывать на среднее деление шкалы.

Когда весы не находятся в работе, их необходимо арретировать. Это производится с помощью особого приспособления внутри колонки весов, при этом коромысла и чашки несколько приподнимаются кверху, вследствие чего их призмы освобождаются от давления на плоскость опоры и неизбежного в этом случае напрасного изнашивания. Освобождение и арретирование коромысла производится посредством вращения в ту или иную сторону головки, помещающейся в нижней части весов (Z).

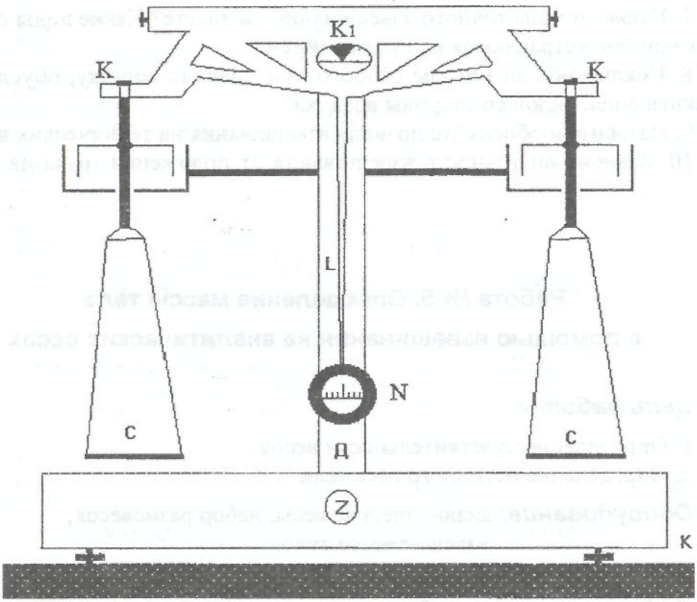


Рис. 1

Упражнение 1. Определение чувствительности весов.

Основной величиной, характеризующей весы, является их чувствительность. Чувствительностью весов называется отношение тангенса угла, на который отклоняется стрелка D, к прибавочному грузу P_B, создающему это отклонение.

Если ребра призм K_1 и KK находятся к одной горизонтальной плоскости (т.е. если коромысло не прогибается), то

$$\varphi = \frac{tg\alpha}{P_B} = \frac{L}{P_0 h},$$

где L – длина плеч коромысла, P_0 – его вес, h – расстояние центра тяжести коромысла от нижнего ребра средней призмы.

При невыполнении этого условия (прогибом пренебречь нельзя) чувствительность еще будет зависеть обратно пропорционально от суммы веса чашек весов и нагрузки.

На практике удобнее пользоваться величиной, обратной чувствительности, называемой постоянной прибора. *Постоянной весов* называется нагрузка, отклоняющая стрелку весов на одно деление.

Нежелательно употреблять при взвешивании разновески меньше 10 мг, представляющие большое неудобство.

Число единиц и десятых долей миллиграммов отсчитывается по оптической шкале.

Для определения постоянной аналитических весов на практике необходимо сначала определить нулевую точку a_0 , т.е. то деление шкалы, против которого остановилась стрелка весов при положении равновесия ненагруженных весов. Определение нулевой точки производится три раза, и в результате берется среднее ее значение. Затем взвешивается разновеска 10 мг и определяется положение стрелки a_1 таким же способом, как и нулевой точки.

Определяем постоянную весов по формуле:

$$C = \frac{P_B}{|a_1 - a_0|},$$

где P_B – перегрузок в 10 мг, который заставляет отклонятся стрелку от положения равновесия в пределах от a_0 до a_1.

Нагрузив обе чашки весов по 100 г, определяем постоянную весов при максимальной нагрузке. Сравнивая значения чувствительности в первом и во втором случае, можно убедиться, что чувствительность весов уменьшается и с увеличением нагрузки.

Упражнение 2. Определение истинного веса тела.

При точном взвешивании нужно иметь в виду, что тело, находясь в воздухе, теряет в своем весе столько, сколько весит вытесненный им воздух. Чтобы узнать истинный вес тела, необходимо внести поправки. Разность между истинным весом тела и выталкивающей силой называется *кажущимся весом* тела. Если плотность взвешиваемого тела $\rho_т$ и разновесок $\rho_р$ различны, то будут различны и соответствующие им потери веса, Вследствие чего при равновесии весов будут равны не истинные веса тела и гирь, а их кажущиеся веса. Для нахождения истинного веса тела в результате взвешивания необходимо внести поправку.

Пусть P – истинный вес тела,

P_r^* – истинный вес уравновешивающих его гирь, ($P^* = P_r^* \pm \Delta P^*$),

ρ_m – плотность тела, ρ_p – плотность гирь, V – объем тела,

V^* – объем гирь, $\rho_в$ – плотность воздуха.

При равновесии равноплечного коромысла результирующие силы, действующие на его правое и левое плечо, должны быть одинаковы:

$$P - F_A = P_r^* - F_A^* . \qquad (1)$$

Подставив в формулу (1) выражение для выталкивающих сил

$$F_A = V_T \rho_в g = \frac{P}{\rho_T}\rho_в \text{ и } F_A^* - V_p \rho_в g = \frac{P}{\rho_в}\rho_в ,$$

получим

$$P\left(1-\frac{\rho_в}{\rho_T}\right) = P^*\left(1-\frac{\rho_в}{\rho_P}\right),$$

откуда

$$P = P_r^*\left(1-\frac{\rho_в}{\rho_P}\right)\left(1-\frac{\rho_в}{\rho_T}\right)^{-1}. \qquad (2)$$

Из полученной формулы видно: вес тела тем сильнее отличается от веса уравновешивающих его гирь, чем больше отличаются плотности тела и гирь.

Произведя деление числителя на знаменатель по правилам деления многочленов, получим:

$$\frac{1-\rho_в/\rho_0}{1-\rho_в/\rho_T} = 1-\frac{\rho_в}{\rho_P}+\frac{\rho_в}{\rho_T}-\frac{\rho_в{}^2}{\rho_P{}^2}\cdot\frac{\rho_в{}^2}{\rho_T{}^2},$$

так как величины $\rho_в/\rho_р$ и $\rho_в/\rho_т$ всегда весьма малы, то можно отбросить все члены, начиная с $\rho_в{}^2/\rho_р{}^2$ и далее.

Следовательно, получаем, что истинный вес тела

$$P = P_r^*\left(1-\frac{\rho_в}{\rho_P}+\frac{\rho_в}{\rho_T}\right), \qquad (3)$$

или

$$P = P_r^* + P_r^*\, 0{,}0012\left(\frac{1}{\rho_T}-\frac{1}{\rho_P}\right). \qquad (3а)$$

Величина $\rho_в$ зависит от давления, температуры и влажности воздуха, но обычно ее считают постоянной и равной 1.2 кг/м^3. Разновески приготовляются обычно из латуни, для которой

$$\rho_р = 8.4 \text{ г/см}^3 = 8.4\,10^3 \text{ кг/м}^3 .$$

Контрольные вопросы

1. Опишите устройство аналитических весов и назначение демпфера.
2. Сформулируйте основные правила взвешивания на аналитических весах.
3. Что называется чувствительностью весов? Как ее определять?
4. От каких конструктивных параметров весов зависит их чувствительность?

5. Почему при взвешивании в воздухе вес тела не равен весу уравновешивающих его гирь?

6. Как рассчитывается истинный вес тела?

7. Исключают ли методы особого взвешивания ошибку, обусловленную выталкивающей силою со стороны воздуха?

Работа № 6. Определение плотности исследуемого тела

Цель работы:

1. Изучение методов определения плотности жидких и твердых веществ.
2. Оценка результатов измерений и расчет погрешности.

Оборудование: аналитические весы, пикнометр,
исследуемая жидкость, твердое тело.

Содержание и методы выполнения работы

Плотность и удельный вес.

Плотностью тела называется физическая величина, равная отношению массы тела к его объему:

$$\rho = \frac{m}{V}\ , \qquad (1)$$

где m и V – соответственно масса и объем тела.

Выражение (1) справедливо лишь для однородных тел. В неоднородных телах плотность различных участков различна. В этом случае выбирают малый объем ΔV, внутри которого тело можно считать однородным. Тогда плотности тела в данном месте называют величину

$$\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V}$$

или, переходя к пределу,

$$\rho = \frac{dm}{dV}$$

Удельным весом тела называется физическая величина, численно равная отношению веса тела в вакууме к его объему:

$$d = \frac{P}{V}\ ,$$

где P – вес тела в вакууме.

В общем случае

$$d = \frac{dP}{dV}.$$

Так как $P = mg$, то плотность и удельный вес связаны между собой соотношением $d = \rho g$.

Плотность и удельный вес тел играют большую роль в науке и технике, так как эти физические величины определяют многие важные свойства физических тел как твердых, так и жидких и газообразных.

Задание 1. Определение плотности жидкости с помощью пикнометра.

Метод определения плотности тел с помощью пикнометра является одним из наиболее точных. *Пикнометр* – это стеклянных сосуд определенной емкости (обычно 25 - 50 мл). На рисунке 1 изображены наиболее распространенные типы пикнометров.

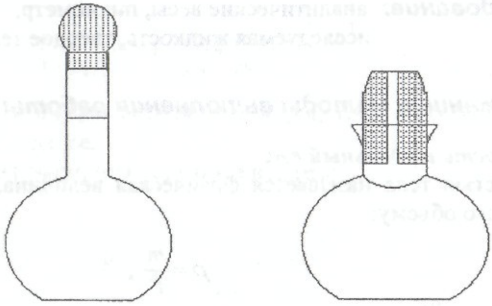


Рис. 1а *Рис. 1б*

Один из них (б) имеет притертую пробку с капилляром внутри. Если пикнометр, наполненный до краев жидкостью, закрыть пробкой, то излишек жидкости вытесняется через капилляр. В результате пикнометр будет наполнен до верхнего края капилляра. В пикнометре другого типа (а) жидкость наливается пипеткой до отметки на горлышке. Так как при последовательном наполнении его обьемы исследуемой жидкости и жидкость с известной плотностью (например, с дистиллированной водой) одинаковы, а вес жидкости можно определить с большой точностью на аналитических весах, то искомую плотность также можно определить довольно точно.

В специальных лабораторных исследованиях из жидкостей предварительно удаляют растворенный воздух, изменяющий их плотность. Для этого жидкость в стакане помещают в специальный сосуд, из которого откачивается воздух. Через небольшой промежуток времени из жидкости начинают выделятся пузырьки, и она освобождается от воздуха. После этого жидкость быстро переливают в пикнометр. При точных определениях плотности температура жидкости должна оставаться строго постоянной, что достигается термостатированием. В данном упражнении плотность исследуемой жидкости определяется с помощью трех последовательных взвешиваний.

1. Поставим на левую чашку аналитических весов пустой пикнометр и уравновесим его гирями. В случае равновесия весов силы, действующие на левую и правую чашки, равны. Сила, действующая на левую чашку, равна

$$F_1 = P,$$

где P – вес пикнометра в воздухе.

На правую чашку действует сила

$$F_2 = P_1 - V_2 \rho g,$$

где $V_2 \rho g$ – выталкивающая Архимедова сила (V_2 – объем гирь, g – плотность воздуха); P_1 – вес гирь в пустоте. Но $V_2 = \frac{P_1}{\rho_2 g}$, где ρ_2 – плотность гирь. Тогда

$$F_2 = P_1\left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right).$$

Условие равновесия запишется в виде

$$P = P_1\left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right). \qquad (1)$$

2. Наполним пикнометр дистиллированной водой и взвесим. Условие равновесия имеет вид

$$V\rho_в g - V\rho_1 g + P = P_2\left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right), \qquad (2)$$

где $V\rho_в g$ – вес воды в пустоте (V – объем воды, $\rho_в$ – плотность при данной температуре); $V\rho_1 g$ – выталкивающая сила, действующая со стороны воздуха на воду в объеме V.

3. Наполним пикнометр исследуемой жидкостью до риски и взвесим. Условие равновесия имеет вид:

$$V\rho_ж g - V\rho_1 g + P = P_3\left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right), \qquad (3)$$

где $V\rho_ж g$ – вес жидкости в пустоте (V и $\rho_ж$ – объем и плотность жидкости); $V\rho_1 g$ – выталкивающая сила.

Вычитая выражение (1) из (2) и (3) и деля полученные результаты друг на друга, имеем:

$$\frac{\rho_ж - \rho_1}{\rho_в - \rho_1} = \frac{P_3 - P_1}{P_2 - P_1},$$

откуда

$$\rho_ж = \frac{P_3 - P_1}{P_2 - P_1}(\rho_в - \rho_1) + \rho_1 . \qquad (4)$$

Измерения.

1. Промываем пикнометр дистиллированной водой и тщательно просушиваем, помещая его в сушильный шкаф. Затем взвешиваем его (P_1).

2. Наполняем пикнометр дистиллированной водой, не содержащей растворенных газов, и помещаем его в термостат так, чтобы горлышко чуть выступало над поверхностью воды. Устанавливают в термостате температуру на 2 - 3^{0}С выше комнатной. Через 5 минут закрывают пикнометр пробкой и помещают его на большую глубину так, чтобы над поверхностью воды выступала только верхняя часть пробки. Оставляют пикнометр в термостате на 25 - 30 минут. За это время вода примет температуру термостатирующей жидкости t, вследствие расширения часть ее выйдет из пикнометра через капилляр пробки.

Вынув пикнометр из термостата, осторожно вытирают его и устанавливают на чашку весов. Уравновешивают его разновесами и оставляют на 25 - 30 минут, после чего окончательно определяют вес. Масса жидкости, находящейся в пикнометре, занимала при температуре термостатирования t^0 объем $V_t = V_n$, где V_n – объем пикнометра. Поэтому, несмотря на изменение жидкости в пикнометре, вследствие непостоянства комнатной температуры, указанным методом можно определить плотность жидкости при температуре t_0.

3. Выливают воду, просушивают пикнометр и ополаскивают его исследуемой жидкостью.

4. Наполняют пикнометр исследуемой жидкостью, не содержащей растворенных газов, и повторяют опыт, описанный в пункте 2. Взвешивания производят методом Менделеева (см. лабораторную работу № 4).

5. Вычисляют плотность исследуемой жидкости при температуре t^o. Плотность воды при различных температурах и плотность воздуха берут из таблицы 1 и рисунка 2.

Задание 2. Определение плотности твердых тел с помощью пикнометра.

С помощью пикнометра можно определить не только плотность жидкости, но и плотность твердых тел. Исследуемое тело объемом 0.5 – 1 см^3 погружают в пикнометр с дистиллированной водой, не содержащей растворенных газов. При этом он вытеснит объем воды, равный объему тела. Плотность исследуемого тела определяется с помощью трех последовательных взвешиваний.

1. Положим на левую чашку весов исследуемое тело и уравновесим весы. Запишем условие равновесия

$$V_T \rho_T g - V_T \rho_1 g = P_1\left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) , \qquad (5)$$

где $V_m\rho_m g$ – вес тела в пустоте (V_m и ρ_m – объем и плотность тела); $V_m\rho_l g$ – выталкивающая сила воздуха, P_1 – вес гирь в пустоте.

2. Наполним пикнометр дистиллированной водой до метки и взвесим его. Условие равновесия имеет вид:

$$V\rho_в g - V\rho_1 g + P = P_2\left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right), \tag{6}$$

где P – вес пустого пикнометра, $V\rho_в g$ – вес воды в пустоте, $V\rho_l g$ – выталкивающая сила, действующая со стороны воздуха на воду в объеме V.

3. Погрузим в пикнометр исследуемое тело. При погружении тела в пикнометр уровень жидкости поднимается, его доводят до метки, откачивая жидкость пипеткой. Взвесим. Условие равновесия имеет вид:

$$(V - V_T)\rho_в g + V_T\rho_T g - V\rho_1 g + P = P_3\left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right), \tag{7}$$

где $(V - V_m)\ \rho_в g$ – вес воды в пустоте, $V_m\rho_T g$ – вес тела в пустоте, $V\rho_l g$ – выталкивающая сила воздуха, действующая на воду с погруженным в нее телом.

Решая совместно уравнения (5), (6) и (7), получим:

$$\rho_T = \frac{P_1}{P_1 + P_2 - P_3}(\rho_в - \rho_1) + \rho_1 . \tag{8}$$

Плотность воздуха при данном давлении и температуре определяется из номограммы. Обычно $\rho_в = 0.0012$ кг/см^3.

4. Произвести обработку результатов измерения плотности жидкости и плотность твердых тел.

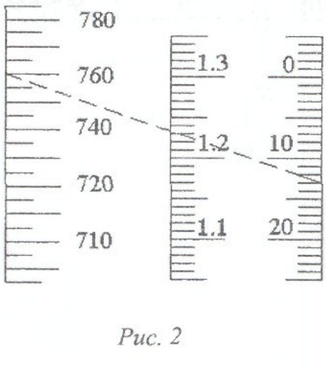


Рис. 2

Контрольные вопросы

1. Что такое плотность и удельный вес тела?

2. Покажите, что плотность и удельный вес численно могут быть равны друг другу.

3. Как определить плотность жидкости с помощью пикнометра?

4. Каковы источники погрешностей при определении плотности жидкости с помощью пикнометра?

5. Каковы источники погрешностей при определении плотности твердого тела с помощью пикнометра?

6. Для чего в данной работе необходима дегазация жидкости и термостатирования?

7. Как определить абсолютную погрешность $\Delta\rho$?

8. Какие существуют методы определения плотности тел?

Таблица 1

Плотность воздуха

t^0 с	ρ, кг/м³	t^0 с	ρ, кг/м³	t^0 с	ρ, кг/м³
0	999,841	20	998,203	40	992,21
1	999,900	21	997,992	50	988,04
2	999,941	22	997,770	60	983,21
3	999,965	23	997,538	70	977,78
4	999,973	24	997,296	80	971,80
5	999,965	25	997,044	90	965,31
6	999,941	26	996,783	100	958,35
10	999,700	27	996,512		
17	998,774	28	996,232		
18	998,595	29	995,944		
19	998,405	30	995,646		

ПРАКТИКУМ ПО КУРСУ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

Работа № 1(06). Изучение законов движения тел на приборе Атвуда

Цель работы:

1. Изучение динамики поступательного движения связанной системы тел с учетом силы трения.
2. Определение систематической ошибки.

Оборудование: прибор Атвуда.

Содержание и методы выполнения работы

Описание прибора.

Прибор Атвуда предназначен для проверки законов равноускоренного движения тел. Металлический стержень Z со шкалой, разделенной на сантиметры, прикреплен вертикально к стойке; на верхнем конце его имеется легкий алюминиевый блок B, вращающийся с весьма малым трением (см. рис.1).

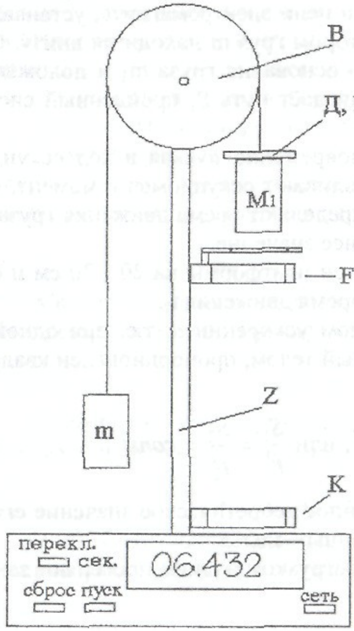


Рис. 1

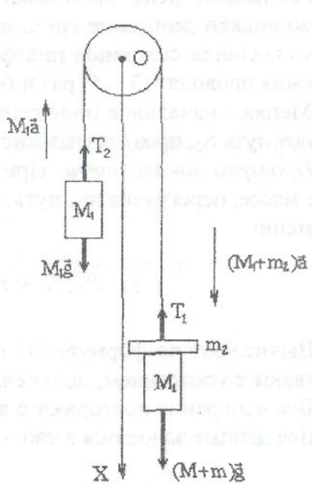


Рис. 2

Через блок перекинута тонкая нить с двумя одинаковыми грузами на концах так, что вся система находится в равновесии. Груз m внутри имеет железную пластинку и потому может удерживаться электромагнитом. Масса грузов m_1 и m может быть увеличена добавочными грузами Д и Е. Если на груз m положить добавочный груз Д массы m_2 и разомкнуть цепь электромагнита, то, как известно, система придет в равноускоренное движение с ускорением, определяемым элементарной формулой:

$$a = \frac{m_2 g}{m_1 + m_2 + m}. \qquad (1)$$

Если же груз m_2 во время ускоренного движения будет снят, то система начнет перемещаться равномерно с той скоростью, которую она имела в момент снятия перегрузки.

На стержне Z имеются две платформы: F – кольцевая и K – сплошная; обе эти платформы могут быть укреплены при помощи зажимных винтов в любом месте стержня.

Измерение времени производится при помощи секундомера.

Задание 1. Проверка закона пути.

Кольцевую платформу отводят в сторону. На левый груз m_1 кладут добавочный перегрузок (2 ÷ 6) г. Замыкают ток в цепи электромагнита, устанавливают грузы в начальное положение, при котором груз m находится внизу. Отсчитывают по шкале Z положение нижнего основания груза m_1 и положения сплошной платформы. Разность между ними даёт путь S, пройденный системой.

Размыкают цепь электромагнита, одновременно пуская в ход секундомер, наблюдают движение груза m_1; останавливают секундомер в момент, когда груз коснется сплошной платформы. Определяют время движения груза t_1. Измерения проводят (3 ÷ 5) раз и берут среднее значение.

Меняют начальное положение сплошной платформы на 20 - 30 см и определяют путь S_2, проходимый системой, и время движения t_2.

Проверка закона пути. При постоянном ускорении *a*, т.е. при одной и той же массе, перегрузка m_2, путь, пройденный телом, пропорционален квадрату времени:

$$S_1 : S_2 : S_3 = t_1^2 : t_2^2 : t_3^2, \text{ или } \frac{S_1}{t_1^2} = \frac{S_2}{t_2^2} = const. \qquad (2)$$

Вычисляют по формуле (1) приближенное теоретическое значение его и сравнивают с ускорением, полученным из данных опыта.

Все измерения повторяют с другим перегрузком и снова проверяют закон пути. Все данные заносятся в таблицу 1.

Таблица 1

№ п.п.	m – масса перегрузка	S_i	t_i	t_i^2	S_i/t_i^2
1					
2					
3					
4					
5					

Задание 2. Проверка закона скоростей.

Положив на груз m_1 перегрузок m_2 и замкнув электромагнит, устанавливают грузы в начальное положение. Ставят на пути груза кольцевую платформу F так, чтобы при движении вниз груза m_1 он свободно проходил бы сквозь неё, а перегрузок снимался бы платформой.

Определяют по шкале Z положение груза m_1 и положение обеих платформ. Отсчитывают путь S_1, пройденный грузом при равноускоренном движении (т.е. от верхнего положения до кольцевой платформы), и путь $S_2^{'}$, пройденный при равномерном движении (т.е. от кольцевой до сплошной платформы). При этом учитывают, что перегрузок снимается с верхней части груза m_1, и он ударяется о сплошную платформу своей нижней частью.

С помощью секундомера определяют:

1) время равноускоренного движения груза до кольцевой платформы -t_1;

2) время равномерного движения груза между платформами $t_2^{'}$. Тогда скорость системы при равномерном движении, равная скорости равноускоренного движения в момент снятия перегрузка, будет равна:

$$V_1 = S_1^{'}/t_1^{'} .$$

Меняют положение сплошной и кольцевой платформы и определяют аналогично путь S_2 и $S_2^{'}$, время t_2 и $t_2^{'}$ и скорость

$$V_2 = S_2^{'}/t_2^{'} .$$

Проверяют закон скоростей: при равноускоренном движении скорость тела прямо пропорционально времени, т.е.

$$V_1/V_2 = t_1/t_2 \text{ или } V_1/t_1 = V_2/t_2 = const . \qquad (3)$$

Все измерения производят несколько раз и с разными перегрузками. Проверку закона делают по средним значениям V и t:

$$m = m_1 .$$

Все результаты заносятся в таблицу 2.

Таблица 2

№ п.п.	m – масса перегрузка	S_1	t_1	V_1	S_2	t_2	V_2
1							
2							
3							
4							
5							

Задание 3. Проверка второго закона Ньютона.

$$\vec{F} = \frac{\Delta\vec{P}}{\Delta t}, \text{ или } \vec{F} = m\vec{a}\ .$$

Если перекладывать добавочные грузы с одной стороны на другую, то масса всей системы не изменится, но результирующая внешняя сила, приложенная к системе, будет меняться, а с ней и ускорение движения системы. Для двух различных случаев будем иметь:

$$F_1 = m_1 a_1\ ;\ \ F_2 = m_2 a_2\ ;$$

$$S_1 = \frac{a_1 t_1^2}{2}\ ;\ \ S_2 = \frac{a_2 t_2^2}{2}\ .$$

Делением этих выражений соответственно получим:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{a_1}{a_2} \text{ или } \frac{S_1}{S_2} = \frac{a_1 t_1^2}{a_2 t_2^2}\text{, что даёт } \frac{F_1}{F_2} = \frac{S_1 t_2^2}{S_2 t_1^2}\ .$$

Это выражение и подлежит проверке, проводимой так же, как и в задании 1.

Сначала на груз m_1 кладут, например, 3 г, а на груз m – 1 г, что даёт $F_1 = 2$ г. При таком расположении перегрузков определяют несколько значений S_1 и t_1 (при различных положениях сплошной платформы). После этого все 4 г накладывают на груз m_1, что даёт $F_2 = 4$ г (масса всей системы при этом остаётся неизменной), и снова определяют несколько значений S_2 и t_2.

Все выражения типа $\left(\frac{S_1 t_2^2}{S_2 t_1^2}\right)$ должны быть примерно равны между собой и в данном частном случае близки к 1/2, что и является проверкой второго закона Ньютона. Все результаты заносятся в таблицу 3.

Таблица 3

№	F_1	S_1	t_1	F_2	S_2	t_2	$\frac{S_1 t_2^2}{S_2 t_1^2}$	$\frac{F_1}{F_2}$
1								
2								
3								
4								
5								

Контрольные вопросы

1. Какие законы механики проверяются на приборе Атвуда?
2. Как компенсировать силу трения в блоке?
3. На что влияет величина момента инерции блока?
4. Укажите условия, при которых система грузов движется равномерно.
5. Как определить ускорение движения грузов?
6. Как экспериментально доказать, что грузы движутся равноускоренно?
7. В каких единицах измеряют массу и вес тела, его путь, скорость и ускорение?

Работа № 2 (08). Определение модуля Юнга

Цель работы:

1. Определение модуля Юнга при растяжении стержней.
2. Оценка результатов измерений и расчет погрешностей.

Оборудование: стальная проволока, набор грузов, лазер, измерительное зеркало.

Содержание и методы выполнения работы

Теория вопроса.

Между молекулами или атомами твердого тела существуют силы притяжения и отталкивания. При сближении частиц увеличиваются силы отталкивания, и тем больше, чем ближе частицы друг к другу. При растяжении тела получают перевес силы притяжения, действующей между частицами.

Всякое механическое воздействие на кристалл нарушает равновесное состояние кристаллической решетки. Оно создает внутри кристалла перемещение частиц, что приводит к изменению формы или объема тела. Изменение формы или объема тела называется *деформацией*. Деформации, исчезающей в теле после прекращения действия сил, называются *упругими*.

Различают четыре основных вида упругих деформаций: *растяжение, сдвиг, кручение и изгиб*.

Упругие деформации подчиняются законам Гука. Проще всего рассмотреть закон Гука на примере деформации растяжения (см. рис. 1).

Пусть L_0 – первоначальная длина проволоки; L – длина проволоки после деформации; S – площадь поперечного сечения проволоки; F – деформирующая сила. Разность между длиной тела после деформации и первоначальной длиной называется абсолютным удлинением. Обозначим абсолютное удлинение ΔL, тогда $\Delta L = L - L_o$ – абсолютное удлинение. Разделив абсолютное удлинение на первоначальную длину тела, получим относительное удлинение:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{L - L_0}{L}.$$

Отношение величины деформирующей силы к площади поперечного сечения тела называется напряжением и обозначается буквой σ:

$$\sigma = \frac{F}{S}.$$

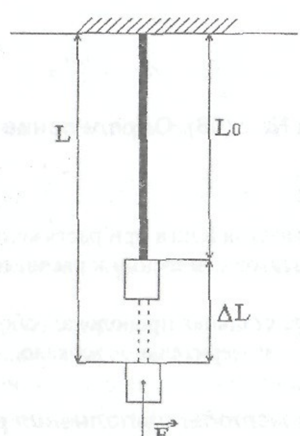


Рис. 1

Закон Гука устанавливает зависимость между величиной деформации и величиной деформирующей силы и может быть сформулирован в общем виде следующем образом: *«В пределах упругости величина деформации прямо пропорциональна величине деформирующей силы»*.

С учетом наших обозначений закон Гука можно записать и для деформации растяжения:

$$\frac{L - L_0}{L} = \alpha\sigma . \qquad (1)$$

Он будет гласить: *«Относительное удлинение в пределах упругости пропорционально напряжению».*

Но $\alpha\sigma = \alpha\frac{F}{S}$ и закон Гука можно записать:

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha\frac{F}{S} . \qquad (2)$$

Его можно сформулировать так: *«Относительное удлинение прямо пропорционально деформирующей силе и обратно пропорционально площади поперечного сечения».*

Величина α называется *коэффициентом линейного растяжения.* В формуле (2) положим $\sigma = \frac{F}{S} =$ 1кг/мм², тогда $\alpha = \frac{\Delta L}{L}$ т.е. коэффициент линейного растяжения α имеет следующий физический смысл: он численно равен относительному удлинению при напряжении, равном единице.

В технике принято вести расчеты не по коэффициенту растяжения, а по величине $E = \alpha^{-1}$, где E – модуль упругости, или модуль Юнга.

Тогда закон Гука можно записать так:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{F}{ES}, \text{ или } \Delta L = \frac{1}{E}\frac{F}{S}L . \qquad (3)$$

Из формулы (3) найдем значение E:

$$E = \frac{F}{S}\frac{L}{\Delta L} . \qquad (4)$$

Пусть $\Delta L = L$, т.е. первоначальная длина тела увеличилась вдвое, тогда $E = \sigma = F/S$. Из того, что $E = \sigma$, следует физический смысл модуля Юнга: *«Модуль Юнга обозначает напряжение, которое надо приложить к телу, чтобы его первоначальная длина увеличилась в 2 раза».*

Модуль Юнга является величиной постоянной для данного материала.

Описание установки.

Для определения модуля Юнга в этой работе используется прибор, схема которого изображена на рисунке 2.

Верхний конец проволоки прикреплен к кронштейну К, а нижний – к цилиндру (р), которым оканчивается шарнирный кронштейн (О). На этот же цилиндр опирается рычаг (R), связанный с зеркальцем (З). Исходя из этого удлинение проволоки можно измерить по углу поворота зеркальца.

Упражнение 1. Измерение зависимости удлинения проволоки от нагрузки.

1. Направьте луч лазера на зеркальце З. При этом на шкале должно быть четко видно отражение от зеркала зайчика.

2. Определите сечение проволоки. Для этого измерьте диаметр микрометром в пяти местах и во взаимно перпендикулярных направлениях в каждом месте.

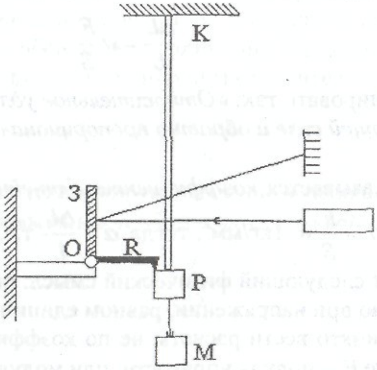


Рис. 2

3. Измерьте длину проволоки.

4. Оцените максимальную величину нагрузки (область пропорциональности), чтобы в процессе эксперимента не оборвать провод.

5. Снимите зависимость удлинения проволоки ΔL от ее напряжения при возрастающей и уменьшающейся нагрузке, для каждого значения нагрузки определите среднюю величину модуля Юнга E.

6. Оцените погрешность в определении значения E.

Смещения светового зайчика от зеркала З можно связать с удлинением проволоки ΔL. Принимая во внимание малость угла α поворота зеркала, имеем

$$\angle\alpha = \frac{\Delta n}{2L},$$

где Δn – смещение светового зайчика (см), L – расстояние от зеркала до шкалы. В свою очередь

$$\angle\alpha = \frac{\Delta L}{R},$$

где ΔL – удлинение проволоки (мм), R – длина рычага. Следовательно, $\Delta L = \Delta n R(2L)^{-1}$.

Данные измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1

№	R	L	F_i	Δn_i	Δl	E_i	$\overline{E}$	E
1								
2								
3								
4								
5								

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон Гука.
2. Напишите формулу закон Гука.
3. Какой физический смысл имеет относительное удлинение $\Delta L/L$?
4. Какой физический смысл имеет модуль Юнга E?
5. Дайте определение упругости и пластической деформации.
6. Какие деформации относятся к деформациям растяжения?
7. Выведите формулу для определения абсолютного удлинения проволоки в зависимости от перемещения светового зайчика на шкале.

Работа № 3(09). Определение модуля сдвига стержня статическим методом

Цель работы:

1. Определение модуля сдвига при деформации кручением.
2. Оценка результатов измерений и расчет погрешностей.

Оборудование: исследуемый стержень, лазер, рулетка, микрометр, набор грузов.

Содержание и метод выполнения работы

Сдвиг происходит под действием пары сил и проявляется в изменении угла γ (см. рис. 1).

В соответствии с законом Гука коэффициент γ пропорционален тангенсальному напряжению τ:

$$\gamma = \frac{\tau}{G},$$

где G – модуль сдвига. Если один из концов длинного однородного стержня закрепить, а к другому приложить закручивающий момент сил M, то этот конец повернется на угол φ, причем, согласно закону Гука:

$$M = f\varphi .$$

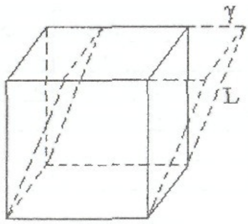


Рис. 1

Постоянная величина f носит название *модуля кручения*. Модуль кручения связан с модулем сдвига материала стержня G соотношением

$$f = \frac{\pi G r^4}{L}, \qquad (1)$$

где r – радиус стержня, L – длина стержня.

Следовательно, полный крутящийся момент, действующий на сечение, будет равен

$$M = \frac{\pi G r^4}{L}\varphi .$$

При этом угол φ называют углом закручивания и определяют в эксперименте с помощью зеркала, закрепленного на диске.

Экспериментальная установка изображена на рис. 2.

Верхний конец вертикального стержня С жестко закреплен на кронштейне, а нижний соединен с диском D. Момент M, закручивающий стержень, создают две нити, навитые на диск и перекинутые через блоки (б). К концам нити подвешиваются два одинаковых груза – m_1 и m_2. Диск снабжен зеркальцем З. Угол закручивания нижнего конца стержня относительно закрепленного определяем по отклонению светового зайчика на шкале.

Величина угла поворота зеркала φ связана с отклонением луча лазера формулой

$$\angle\varphi = \frac{\Delta n}{2L},$$

где Δn – отклонение луча на шкале (м), L – расстояние от зеркала до шкалы (м).

Из формулы (1) выведем модуль сдвига через параметры эксперимента:

$$G = \frac{M2L}{\pi r^4 \varphi}, \text{ или } G = \frac{m_1 g d 2L2l}{\pi r^4 \Delta n} . \qquad (2)$$

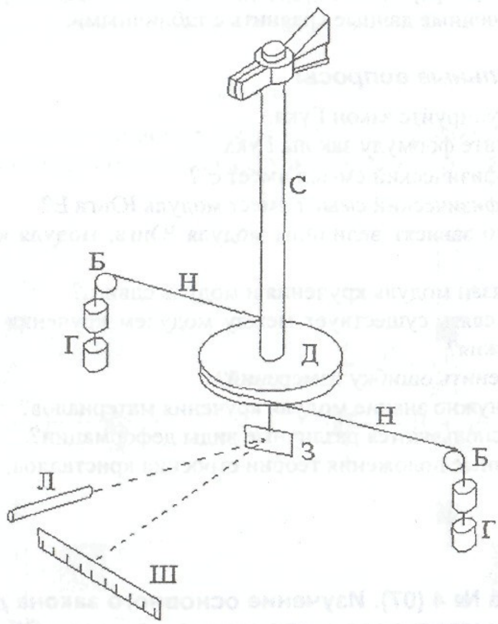


Рис. 2

Момент пары сил, вращающих диск, определяется

$$M = mgd\,,$$

где m – масса груза, d – диаметр диска.

Упражнение 1. Определение статистическим методом модуля сдвига.

1. Направить луч лазера на зеркало З таким образом, чтобы световой зайчик был четко виден на шкале.

2. Увеличивая нагрузки на нитях, снять зависимость угла закручивания φ от вращающего момента сил. Проделать эксперимент и в обратном порядке, постепенно уменьшая величину грузов m_1 и m_2.

3. Провести измерение необходимых параметров установки и данные записать в таблицу 1.

Таблица 1

L	d	r	l	N	M_1	Δn	f	G

4. Используя формулы (1) и (2), вычислить модуль кручения f и модуль сдвига G. Полученные данные сравнить с табличными.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон Гука.
2. Напишите формулу закона Гука.
3. Какой физический смысл имеет σ ?
4. Какой физический смысл имеет модуль Юнга E?
5. От чего зависят величины модуля Юнга, модуля кручения и модуля сдвига?
6. Как связан модуль кручения и модуль сдвига?
7. Какая связь существует между модулем кручения и модулем сдвига материала стержня?
8. Как оценить ошибку измерений?
9. Зачем нужно знание модуля кручения материалов?
10. Где используются различные виды деформации?
11. Основные положения теории строения кристаллов.

Работа № 4 (07). Изучение основного закона динамики вращательного движения на маятнике Обербека

Цель работы:

1. Изучение динамики вращательного движения.
2. Определение погрешности выполнения закона вращательного движения с учетом влияния трения.

Оборудование: маятник Обербека, секундомер, штангенциркуль, рулетка, набор грузов.

Содержание и метод выполнения работы

Маятник Обербека.

Вращение твердого тела постоянной массы вокруг неподвижной оси описывается уравнением моментов

$$M = J\frac{d\omega}{dt}\ , \tag{1}$$

которое читается так: момент сил, действующих на тело, взятый относительно некоторой оси, равен произведению момента инерции тела относительно той же оси J на угловое ускорение

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}\ . \tag{2}$$

Здесь M – момент сил, действующих на тело, J – момент инерции тела, ε – угловое ускорение, ω – угловая скорость. Момент силы – M = Fr, а момент инерции тела

$$J = 4\,m\,R^2 + J_0\,. \tag{3}$$

Экспериментальная установка представляет собой маятник Обербека (см. рис. 1). Четыре спицы (1) укреплены на втулке под прямым углом друг к другу.

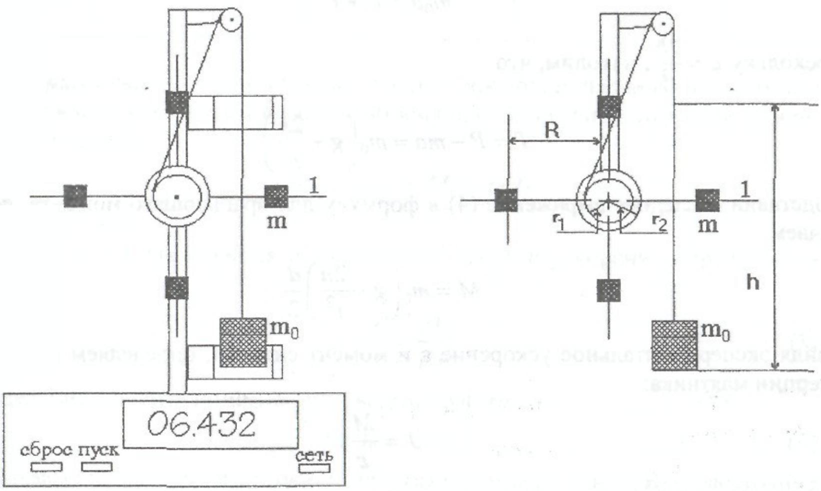


Рис. 1

На эту же втулку посажены два шкива различных радиусов (r_1 и r_2). Вся эта система может свободно вращаться вокруг горизонтальной оси. Момент инерции системы можно менять, передвигая грузы m симметрично вдоль спиц. Момент сил M создается грузом m_0 , привязанным к нити, которая навита на один из шкивов. Под действием груза нить, разматываясь, приводит маятник в равноускоренное вращательное движение.

С каким ускорением падает груз m_0, с таким же ускорением двигаются точки на поверхности валика, так как нить и валик имеют одинаковые мгновенные линейные скорости в момент отрыва. Если высота падения груза – h, а время падения – t , то линейное ускорение

$$a = \frac{2h}{t^2}.$$

Измерив радиус валика r, можно найти угловое ускорение валика:

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{a}{r}\ .$$

На маятник при его вращении действует вращающий момент

$$M = \frac{Td}{2}\ , \tag{4}$$

где d – диаметр шкива, T – натяжение нити.

Чтобы вывести формулу для вычисления момента силы T, запишем второй закон Ньютона для груза m_0 :

$$m_0\vec{a} = \vec{P} + \vec{T}\ .$$

Поскольку $a = \frac{2h}{t^2}$, находим, что

$$T = P - ma = m_0\left(g - \frac{2h}{t^2}\right). \tag{5}$$

Подставив последнее выражение (4) в формулу для вращающего момента, получаем

$$M = m_0\left(g - \frac{2h}{t^2}\right)\frac{d}{2}\ . \tag{6}$$

Найдя экспериментальное ускорение ε и момент силы M, определяем момент инерции маятника:

$$J = \frac{M}{\varepsilon}.$$

Менять момент силы при неизменном моменте инерции можно, изменяя величины подвешенного к шкиву груза m_0, изменять момент инерции системы при неизменном моменте силы – путем перемещения грузов m на спицах маятника.

Упражнение 1. Установление прямо пропорциональной зависимости между угловым ускорением и вращающимся моментом при постоянном моменте инерции. Сбалансируем маятник при R_1, т.е. приведем его в состояние безразличного равновесия, перемещая грузы m. Затем подвесим груз m_0 на шкиве с радиусом r_1 и будем определять M и ε при J = const.

Таким образом получаем, что

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{m_1(g - a_1)}{m_2(g - a_2)},\ \text{или}\ \ \frac{M_1}{M_2} = \frac{t_1^2}{t_2^2}\ . \tag{7}$$

Если положить $M_{тр} = 0$, то можно убедиться, что результаты опыта будут отличаться от зависимости (7). Необходимо экспериментально определить $M_{тр}$. Для этого, увеличивая массу грузов, найдите минимальное значение массы m_0, при котором маятник начинает вращаться. Данные занесите в таблицу 1.

Таблица 1

№	r	m_0	h	t	M	ε	$\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_R}$	$\frac{M_i}{M_R}$
1								
2								
3								
4								
5								

Упражнение 2. Установление обратно пропорциональной зависимости между угловым ускорением и моментом инерции тела (при постоянном моменте сил M = const):

$$M_1 = \varepsilon_1 J_1 \text{ и } M_2 = \varepsilon_2 J_2 .$$

Тогда $\varepsilon_1 / \varepsilon_2 = J_1/J_2$.

Измерение ε и J заключается в следующем: угловое ускорение определяется как

$$\varepsilon = \frac{d}{r} = \frac{2h}{t^2 r} . \qquad (8)$$

Определение момента инерции производим по формуле

$$J = J_0 + 4mR_1^2, \qquad (9)$$

где J_0 – момент инерции крестовины, m – масса груза на спице, R_1 – расстояние от оси вращения до центра груза.

Сначала определяем $J_0 = M_0 \varepsilon_0^{-1}$, т.е. делаем одно измерение момента инерции крестовины.

В каждом положении грузов m на спицах, взяв постоянную массу груза $m > m_{тр}$, время падения t груза с высоты h определяете три раза. Результаты измерений занесите в таблицу 2.

Таблица 2

№	$m_{тр}$	m_0	r	R	h	t	ε	J_0	J	$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_1}$	$\frac{Y_2}{Y_1}$
1											
2											
3											

Контрольные вопросы

1. Что называется моментом сил?
2. Что называется моментом инерции?

3. Связь между моментом силы и моментом инерции.
4. Уравнение динамики вращательного движения.
5. В каких единицах измеряется угловое перемещение, угловая скорость, угловое ускорение, момент силы, момент инерции тела?
6. Почему нельзя допускать раскачивание груза, подвешенного на нити, при его движении вниз?
7. Как определить момент инерции крестовины, не снимая с нее груза?
8. Как практически определить силу трения при движении маятника?
9. Почему данная установка называется маятником Обербека?

Работа № 5 (010). Определение ускорения силы тяжести

Цель работы:

1. Изучение свободных колебаний маятника.
2. Определение ускорения свободного падения.
3. Оценка результатов измерений и расчет погрешностей.

Оборудование: математический маятник, секундомер, штангенциркуль.

Содержание и метод выполнения работы

Математический маятник.

Математическим маятником называется колебательная система, состоящая из материальной точки, прикрепленной к концу идеально гибкой, нерастяжимой и невесомой нити, второй конец которой закреплен неподвижно.

Близким к математическому маятнику можно считать тяжелый шарик, подвешенный на длинной нити (см. рис. 1).

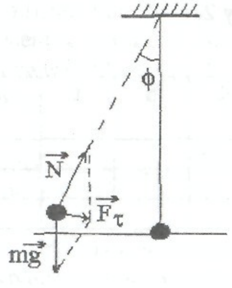


Рис. 1

Запишем уравнение движения в направлении касательной к траектории движения

$$m\ddot{S} = -F_\tau = -mg\sin\varphi \text{ (возвращающая сила).}$$

Если угол φ *очень мал, то в первом приближении можно написать, что при* [φ] = рад

$$\sin\varphi = \varphi,\ \ \varphi = \frac{x}{l},\ \ S \approx x,\ \ m\ddot{x} = -\frac{mgx}{l}\ . \qquad (1)$$

Тогда $\ddot{x} + \frac{g}{l}x = 0$, где $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$.

Следовательно, для малых углов отклонения период колебания равен

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}\ . \qquad (2)$$

Подвешенный на бифилярном подвесе шарик совершает колебания строго в одной плоскости (см. рис. 2). Длина подвеса может получиться в пределах до 3 м. Период колебаний с высокой (до 10^{-3}с) точностью измеряется с помощью электронного секундомера.

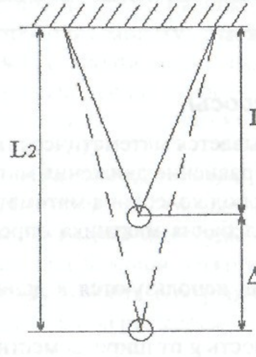


Рис. 2

Если непосредственно определить приведенную длину маятника L сложно, то можно определить период колебания T_1 на нити L_1 и T_2 на нити L_2. Отсюда следует, что

$$T_1^2 = 4\pi^2\frac{L_1}{g},\ T_2^2 = 4\pi^2\frac{L_2}{g}\ ; \qquad (3)$$

$$T_1^2 - T_2^2 = \frac{4\pi^2(L_1 - L_2)}{g},\ \text{но}\ (L_1 - L_2) = \Delta L\ .$$

Отсюда

$$g = \frac{4\pi^2 \Delta L}{T_1^2 - T_2^2}\ . \qquad (4)$$

Таким образом, для определения g нужно измерить лишь разность длин нитей ΔL и периоды T_1 и T_2. в данной работе проводится экспериментальная проверка соотношения (2) в случае, когда маятник можно приближенно считать математическим.

При измерениях амплитуда колебаний должна быть малой, т.е. находиться в диапазоне изохронности. Результаты измерений занесите в таблицу 1.

Таблица 1

№		ΔL	N	t	T_i	T_i^2	q_i	Δq
1	L_1							
2								
3								
4								
1	L_2							
2								
3								
4								

Контрольные вопросы

1. Какой маятник называется математическим?
2. Как записывается уравнение движения математического маятника?
3. От чего зависит период колебания математического маятника?
4. Почему период колебания маятника определяется из большого числа колебаний?
5. Какие приближения используются в данной работе при определении ускорения силы тяжести?
6. Объясните зависимость g от широты местности.
7. Маятник отводят из положения равновесия на угол $\varphi = 90^0$ и без толчка отпускает. Оцените силу натяжения нитей в тот момент, когда он проходит положение равновесия. Длина нити 40 см., диаметр шара 2.2 см. и плотность стали 7.8 г/см^3.
8. Оцените погрешность измерения Δg.

Работа № 6 (001). Определение коэффициента вязкости и длины свободного пробега молекул воздуха

Цель работы:

1. Изучение явления переноса в газах.
2. Определение экспериментально коэффициента внутреннего трения и длины свободного пробега молекул воздуха.
3. Оценка результатов измерений и расчет погрешности.

Оборудование: стеклянный сосуд, капилляр, микроманометр, мензурка, секундомер, измерительный микроскоп, маситабная линейка.

Содержание и метод выполнения работы

Заметное отклонение молекул от прямолинейных траекторий при тепловом движении происходит только при их достаточном сближении. Такое взаимодействие между молекулами называется *столкновением.* Процесс столкновения молекул удобно характеризовать величиной эффективного диаметра молекулы. Под ним понимается минимальное расстояние, на которое могут сблизиться центры двух молекул при их столкновении.

Расстояние, которое проходит молекула между двумя последовательными столкновениями, называется *длиной свободного пробега молекулы.* В данной работе определяется средняя длина свободного пробега, так как длины пробегов отдельных молекул из-за статистического характера процессов в газах естественно должны отличаться.

Молекулярно-кинетическая теория позволила получить формулы, в которых макроскопические параметры газа (давление, объем, температура) связаны с его микропараметрами (размеры молекулы, ее масса, скорость). Пользуясь этими формулами, можно при помощи легко измеримых макропараметров – давления, температуры, коэффициента внутреннего трения – получить интересующие нас микропараметры: размеры молекул, длину ее свободного пробега и т.д.

Из молекулярно-кинетической теории вытекает формула, связывающая вязкость со средней длиной свободного пробега молекулы:

$$\eta = \frac{1}{3}\left(\rho\bar{v}\bar{\lambda}\right), \tag{1}$$

где η – коэффициент внутреннего трения (динамическая вязкость), ρ - плотность газа, λ – средняя длина свободного пробега, v – средняя арифметическая скорость молекул, т.е. среднее значение абсолютной величины скорости молекул.

Из формулы (1) получаем

$$\overline{\lambda} = {3\eta}\big/{\rho\overline{v}} \,. \tag{2}$$

Вязкость можно определить, воспользовавшись известной формулой Пуазейля, выражающей вязкость через объем V газа, протекающего через сечение трубки за определенное время t при определенной разности давлений Δp на концах трубки:

$$\eta = \frac{\pi r^4}{8VL}\Delta pt \;, \tag{3}$$

где r – радиус, L – длина трубки, $\Delta P = \rho g L_0 \sin\alpha$.

При выводе формулы (3) пренебрегли кривизной капли вытекающей жидкости (эта поправка в данной задаче составляет менее 3%).

Средняя скорость газовых молекул может быть найдена из закона распределения Максвелла:

$$\overline{V} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} \,, \tag{4}$$

где R – молярная газовая постоянная, T – абсолютная температура, μ – молярная масса газа.

Плотность газа можно найти из уравнения Клапейрона - Менделеева:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\mu P}{RT} \,, \tag{5}$$

где P – давление газа.

Подставляя (3), (4), (5) в формулу (2), получим

$$\lambda = \frac{3\pi r^4 \Delta Pt\sqrt{\pi RT}}{16VLP\sqrt{2\mu}} \,. \tag{6}$$

Эффективный диаметр молекулы можно вычислить из формулы, выражающей его связь с длиной свободного пробега:

$$\overline{\lambda} = \frac{1}{\pi n D^2\sqrt{2}} \,, \tag{7}$$

где n – число молекул в единице объёма при данных условиях, D – эффективный диаметр молекулы.

Число молекул в единице объёма при данных условиях выражается формулой

$$n = n_0\frac{PT_0}{P_0T} \,, \tag{8}$$

где n_0 – число Лошмидта – число молекул в единице объёма при нормальных условиях (P_0, T_0).

Используя формулы (7) и (8), получаем выражение для эффективного диаметра молекулы газа:

$$D = \sqrt{\frac{TP_0}{\pi n_0 P T_0 \lambda \sqrt{2}}}. \qquad (9)$$

Для вычисления длины свободного пробега по формуле (6) и эффективного диаметра D по формуле (9) необходимо знать радиус и длину трубки, через которую протекает газ, разность давлений на её концах, температуру и давление окружающей среды и объём газа, протекшего через трубку за определенное время.

Описание установки.

Для определения вязкости смонтирована установка, изображённая на рис.1. Сосуд (Б) на три четверти заполняется водой. Сверху в сосуд вставлен капилляр (К). Если открыть кран (K_1) в нижней части сосуда, то вода будет вытекать из него, и через капилляр в сосуд будет засасываться воздух. По прошествии некоторого времени, необходимого для создания на концах капилляра постоянной разности давлений, течение воздуха через капилляр установится и можно будет воспользоваться формулой (3) для определения коэффициента вязкости воздуха. Для этого с помощью секундомера засекают время, за которое через капилляр пройдёт определенный объём воздуха. Этот объём численно равен объёму вытекшей из сосуда воды. Разность давлений на концах капилляра измеряется микроманометром (М).

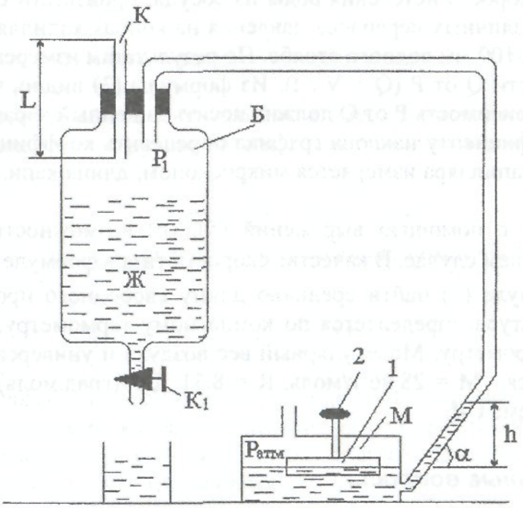


Рис. 1. Схема установки для определения коэффициента вязкости воздуха

В работе применяется микроманометр типа ММН, который позволяет измерять разность давлений до 250 мм водяного столба. Для повышения чувствительности трубке манометра придано наклонное положение. Цифры 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, нанесённые на стойке, обозначают коэффициент, на который должны быть умножены показания манометра при данном наклоне. Шкала микроманометра проградуирована в мм водяного столба. Установка мениска жидкости на нуль шкалы производится путём изменения уровня жидкости внутри манометра при помощи цилиндра 1. Глубина погружения цилиндра в воду регулируется винтом 2.

Микроманометр снабжён двумя уровнями, расположенными на плите прибора перпендикулярно один другому. Установка прибора по уровням производится двумя регулировочными ножками.

Измерение.

1. Подготовить установку к работе: наполнить сосуд водой, установить мениск микроманометра на нуль (h_0).

2. Медленно открывая кран K_1, понизить давление в сосуде на 20 мм вод. ст. по сравнению с атмосферным. Подождать, пока мениск в трубке манометра займёт устойчивое положение.

3. Поставить под кран сосуда мензурку, одновременно включить секундомер. Когда в мензурке будет около (10 - 30) мл воды, остановить секундомер. Записать объём вытекшей воды, время истечения жидкости и показания манометра.

4. Меняя скорость истечения воды из сосуда, произвести ещё несколько измерений для различных перепадов давления на концах капилляра, например, для P = 40, 60, 80, 100 мм водного столба. По результатам измерений построить график зависимости Q от P ($Q = V / t$). Из формулы (3) видно, что при ламинарном потоке зависимость P от Q должна носить линейный характер.

5. По коэффициенту наклона графика определить коэффициент вязкости воздуха. Радиус капилляра измеряется микроскопом, длина капилляра – линейкой.

6. Оценить с помощью выражений (5), (6) возможность применения формулы (4) в нашем случае. В качестве скорости газа в формуле (2) взять $\overline{V}_{кв}$.

7. По формуле (3) найти среднюю длину свободного пробега молекул воздуха. Температура определяется по комнатному термометру, атмосферное давление – по барометру. Молекулярный вес воздуха и универсальная газовая постоянная даются: M = 28.96 г/моль, R = 8.31 Дж /(град.моль). Вычисления проводить в системе СИ.

Контрольные вопросы

1. Объясните внутреннее трение в газах с молекулярно кинетической точки зрения.
2. Как зависит вязкость в газах от давления и температуры?
3. Влияет ли давление на коэффициент внутреннего трения газов?

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 1. М., 1970.

2. Чулановская М.В. Курс физики для биологов. Л.: Изд-во ЛГУ, 1972. Ч.1.

Работа № 7 (002). Измерение постоянной Больцмана (универсальной газовой постоянной)

Цель работы:

1. Определение постоянной Больцмана по парциальному давлению газа.
2. Изучение принципа действия микроманометра и его устройства.
3. Оценка результатов измерений и расчет погрешностей.

Оборудование: стеклянный сосуд, медицинский шприц, микроманометр, комнатный термометр.

Содержание и метод выполнения работы

Давление газа, заключенного в сосуд объёмом V при температуре T, определяется формулой

$$P = \frac{N}{V} kT \ , \qquad (1)$$

где: N – число молекул газа в сосуде, V – объём сосуда, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

Если в сосуде объёмом V находится смесь различных газов, химически не реагирующих друг с другом, то для такой смеси уравнение состояния примет вид:

$$pV = (N_1 + N_2 + \dots)\, kT \ ,$$

где N_1 , N_2 , ... – числа молекул соответствующих компонентов смеси, так как $N_1 + N_2 + \dots = N$, то

$$p = \frac{N_1}{V} kT + \frac{N_2}{V} kT + \dots + \frac{N_n}{V} kT \ . \qquad (2)$$

Данное выражение показывает, что каждая группа молекул оказывает на стенки сосуда давление, которое не зависит от того, какое давление оказывают на стенки другие группы молекул. Это обусловлено тем, что в идеальном газе нет взаимодействия между молекулами.

Выражения

$$p_1 = \frac{N_1}{V} kT \ , \ p_2 = \frac{N_2}{V} kT \ , \dots$$

представляют собой давления компонентов смеси, которые оказали бы эти компоненты, если бы находились в сосуде каждая по отдельности. Такие давления называются *парциальными*.

Из (2) следует, что давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений ее компонентов

$$p = p_1 + p_2 + \ldots + p_n\,,$$

что является содержанием закона Дальтона. В данной работе закон Дальтона используется для определения постоянной Больцмана.

Если в сосуд с установившимся давлением внести некоторую порцию газа ΔN, не реагирующего с газом, первоначально находившимся в сосуде, то давление в сосуде возрастает на величину парциального давления введенного газа ΔP.

Воспользовавшись уравнением состояния, получим

$$k = \frac{\Delta PV}{\Delta NT}\,.$$

Измерение V, T не составляет труда, ΔN определяется по формуле

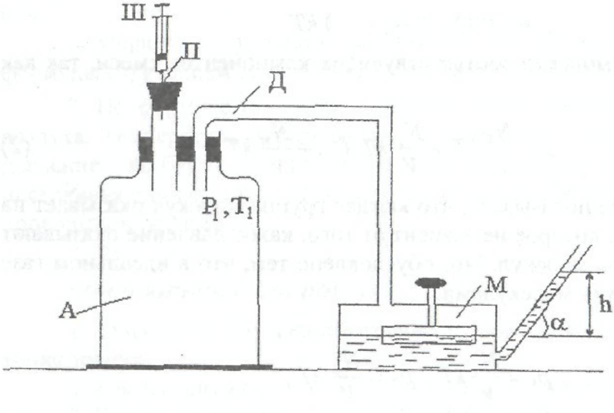
$$\Delta N = \frac{\Delta m}{\mu} N_A\,,$$

где Δm – масса вводимого газа (эфира), μ – масса моля того же газа.

Парциальное давление ΔP вычисляется по высоте h поднятия жидкости в трубке манометра:

$$\Delta p = \rho_0 gh,\ h = L \sin\alpha\,,$$

где ρ_0 – плотность жидкости в манометре.



$M = 74$ г/моль
$\rho_ж = 0.713$ г/см^3
$V = 22.3$ л
$\rho_0 = 0.8$ г/см^3 – плотность спирта в манометре

Рис. 2. Схема установки для определения постоянной Больцмана

Таким образом, получаем рабочую формулу:

$$k = \frac{\rho_0 g V \mu}{N_A} \frac{h}{\Delta m T}\ , \tag{3}$$

В качестве вводимой компоненты можно использовать эфир. При комнатной температуре он быстро испаряется, и, если вводимая масса мала, то в сосуде быстро образуется газообразный эфир, к которому применимы изложенные выше соображения. При этом массу вводимого эфира m можно определить как $\Delta m = V_{эф}\rho_{эф}$, где $V_{эф}$ – объём вводимого эфира, $\rho_{эф}$ – его плотность.

Ход работы.

1. Устанавливают уровень жидкости в манометре на нуль.

2. Набирают шприцем 1 см^3 эфира и впрыскивают его в сосуд с помощью иголки, вставленной в пробку сосуда. При этом давление в манометрической трубке будет возрастать. Когда давление установится, производят отсчет высоты h. По формуле (3) вычисляют постоянную Больцмана k.

3. Опыт проделывают не менее трех раз, вычисляют ошибку измерений.

4. По окончании работы шприц уложить в коробочку.

Контрольные вопросы

1. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории.
2. Что называется парциальным давлением?
3. Понятие температуры с молекулярно-кинетической точки зрения.
4. Физический смысл постоянной Больцмана.
5. От чего зависит точность результатов данной работы?

Литература

1. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс физики. Т. 1. М.: Наука, 1977. С. 46, 47.

2. Кикоин А.К., Кикоин О.К. Молекулярная физика, М.: Наука, 1976.

Работа № 8 (003). Определение показателя адиабаты методом Клемана и Дезорма

Цель работы:

1. Изучение метода Клемана и Дезорма для экспериментального определения C_p/C_v воздуха.
2. Оценка результатов измерения и расчет погрешностей.

Оборудование: стеклянный сосуд, микроманометр ММН, резиновая груша, двухходовой кран.

Содержание и метод выполнения работы

Отношение удельных теплоемкостей при постоянном давлении и при постоянном объёме $\gamma = C_p/C_v$ играет в термодинамике весьма важную роль. В частности, оно входит в уравнение Пуассона, которое описывает адиабатное расширение газа:

$$p_1V_1^\gamma = p_2V_2^\gamma \text{ или } pV^\gamma = \text{const} .$$

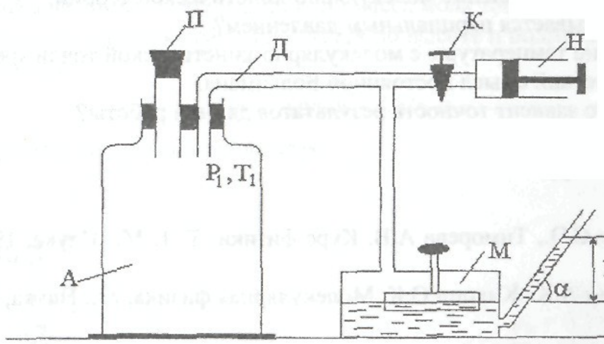


Рис. 1. Установка для определения C_p/C_v методом Клемана - Дезорма

Одним из самых простых методов определения C_p/C_v является метод Клемана и Дезорма.

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из стеклянного сосуда А (емкостью около 20 л), к которому подведена трубка Д, соединяющая установку с насосом. На дно баллона А для удаления из воздуха паров воды помещаются гранулы силикагеля или наливается тонкий слой концентрированной серной кислоты.

Пусть в закрытом стеклянном сосуде А находится исследуемый газ при комнатной температуре Т и давлении Р, несколько превышающем атмосферное давление P_0. Избыточное давление создается в результате закачки в сосуд А дополнительной массы воздуха из атмосферы при помощи насоса Н. Откроем кран П, через который баллон А сообщается с атмосферой. Давление газа начнет сравниваться с атмосферным, а его температура сначала несколько понизится из-за быстрого расширения, а затем снова начнет приближаться к комнатной.

Если теплопроводность стенок сосуда мала (стекло обладает, как известно, низкой теплопроводностью), отверстие крана П достаточно велико, то равновесие по давлению устанавливается значительно быстрее, чем по температуре, т. е.

$$\Delta t_p << \Delta t_T ,$$

где через Δt_p , Δt_T обозначены соответственно времена выравнивания давления и температуры.

Пусть кран П был открыт в течение промежутка времени Δt такого, что

$$\Delta t_T >> \Delta t >> \Delta t_p.$$

В этом случае теплообменом, происходящим за время Δt через стенки сосуда, можно пренебречь, и процесс расширения оказывается адиабатным. С помощью уравнения Менделеева - Клапейрона и переменных Р,Т найдем, что для адиабатного процесса

$$p_1V_1^\gamma = p_0V_1^\gamma \text{ или } \frac{p_1^{\gamma-1}}{T_1^\gamma} = \frac{p_0^{\gamma-1}}{T_2^\gamma} .$$

В конце адиабатного расширения давление P_2 равно атмосферному давлению P_0, а температура T_2 оказывается несколько ниже комнатной температуры T_1 (температура газа понижается, так как работа расширения совершается за счет внутренней энергии газа). Отметим, что исследование адиабатного расширения газа удобно проводить в переменных Р, Т, а не Р, V, потому что процесс происходит при переменной массе газа, остающегося в баллоне. Изменение массы газа никак не сказывается в переменных Р, Т на вычислениях, но крайне неудобно при использовании в качестве независимой переменной объема, занимаемого газом.

После того так кран К отключает сосуд от атмосферы, происходит медленное изохорное нагревание газа со скоростью, определяемой теплопроводностью стеклянных стенок. Вместе с ростом температуры растет и давление газа. За время Δt_T система достигает равновесия и устанавливается температура газа T_3 , равная комнатной температуре T_1.

Переход из второго состояния в первое происходит без изменения объёма (изохорический процесс). Для него можно применить закон Гей - Люссака:

$$\frac{p_2}{T_1} = \frac{p_0}{T_2} . \qquad (2)$$

Исключив из уравнений (1) и (2) T_1 и T_2 , получим:

$$\frac{p_1^{\lambda}}{p_2^{\gamma}} = \frac{p_1}{p_0} . \qquad (3)$$

Логарифмируя уравнение (3), находим:

$$\gamma = \frac{\lg p_1 - \lg p_0}{\lg p_1 - \lg p_2} , \qquad (4)$$

где $p_1 = p_0 + \rho g h_1$; $p_2 = p_0 + \rho g h_2$.

Разложим $\lg p_1$ и $\lg p_2$ в ряд Тейлора и ограничимся его двумя первыми членами так как h_1 и h_2 значительно меньше $P_0/(\rho g)$.

$$\lg p_1 = \lg(p_0 + \rho g h_1) = \lg p_0 + \frac{\rho g h_1}{p_0} ;$$

$$\lg p_2 = \lg(p_0 + \rho g h_2) = \lg p_0 + \frac{\rho g h_2}{p_0} .$$

Подставляя эти значения в (4), получим

$$\gamma = \frac{p_0 + \frac{\rho g h_1}{p_0} - p_0}{p_0 + \frac{\rho g h_1}{p_0} - p_0 - \frac{\rho g h_2}{p_0}} = \frac{h_1}{h_1 - h_2} . \qquad (5)$$

Как следует из (5), для определения $\gamma = C_p/C_v$ необходимо знать избыточное (над атмосферным) давление в сосуде до адиабатного расширения газа и его избыточное давление после изохорного нагревания.

Следует подчеркнуть, что обе величины должны измеряться в состоянии термодинамического равновесия, т.е. после прекращения теплообмена.

Удельная теплоемкость газов принимает различные значения в зависимости от условий нагревания. Если нагревать газ при постоянном объеме, то теплота в этом случае идет только на увеличение его внутренней энергии. Если же газ нагревать при постоянном давлении, то он будет расширяться и теплота при этом расходуется не только на увеличение внутренней энергии газа, но и на работу против сил внешнего давления. Следовательно, теплоемкость газа при постоянном объеме C_v меньше, чем удельная теплоемкость при постоянном давлении C_p.

Отношение этих теплоемкостей равно:

$$\frac{C_p}{C_V} = \gamma = 1 + \frac{2}{i} ,$$

где i – количество степеней свободы молекул газа.

Порядок выполнения работы.

1. Перед началом работы убедитесь, что кран и места сочленения трубок достаточно герметичны. Для этого наполните баллон воздухом до давления,

превышающего атмосферное на 10 - 25 см вод. ст., и закройте кран К. Увеличение давления в баллоне сопровождается повышением температуры. Вследствие теплопроводности стенок с течением времени происходит понижение температуры воздуха в сосуде и вместе с тем понижение давления (изохорное охлаждение).

По микроманометру последите за тем, как изменяется давление h в сосуду с течением времени t_T и постройте график

$$h = f(t_T).$$

Если установка достаточно герметична, то по истечении некоторого времени Δt , необходимого для установления термодинамического равновесия, давление в сосуде перестанет понижаться. В противном случае необходимо найти и устранить течь.

Из графика определите время установления термодинамического равновесия Δt_T. Стабильное избыточное давление воздуха h в сосуде должно быть тщательно измерено.

2. Определив значение h_1, поворотом крана П соединяют воздух, находящийся в баллоне А, с наружным воздухом и быстро возвращают кран в прежнее положение.

В этом случае необходимо обеспечить условия, при которых процесс расширения воздуха можно считать адиабатным, а конечное давление его – атмосферным. Рекомендуется возвращать кран П в прежнее положение немедленно после прекращения звука, возникающего при выходе воздуха через отверстие крана.

3. Когда температура воздуха в баллоне А станет равной комнатной, измерение уровня в микроманометре прекратится и уровень h_2 станет постоянным.

4. Повторите опыт 10 раз. Вычислите среднее значение γ и оцените ошибку измерений. Проанализируйте результаты измерений γ_i .

Контрольные вопросы

1. Почему при наполнении баллона А воздух в нем нагревается?
2. Почему в установке приняты меры предосторожности для удаления паров воды? Что будет, если этих мер не принять?
3. Изобразить графически процессы, протекающие в установке при проведении измерений.
4. Почему в данной работе не используют ртутный манометр?
5. Почему C_p больше, чем C_v?

Литература

1. Чулановская М.В. Курс физики для биологов. Л.: Изд-во ЛГУ, 1972. Ч. 1.

2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 1. М.: Наука, 1970.

3. Руководство к лабораторным занятиям по физике / Под ред. Л.Л. Гольдина. М., 1973.

Работа № 9 (004). Определение показателя адиабаты методом стоячих звуковых волн

Цель работы:

1. Определение длины стоячей волны в воздухе и скорости звука.
2. Определение Cp/Cv воздуха.
3. Оценка результатов измерений и расчет погрешностей.

Оборудование: звуковой генератор, милливольтметр, телефон, микрофон, труба с регулируемым уровнем жидкости.

Содержание и метод выполнения работы

Один из способов определения показателя адиабаты $\gamma = C_p/C_v$ в газах основан на измерении скорости звука. Как известно, скорость звука в газах определяется формулой

$$V = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}}, \tag{1}$$

где R – газовая постоянная, T – температура газа, μ – его молекулярный вес.

Преобразуя эту формулу, найдем

$$\gamma = \frac{\mu}{RT} V^2 \tag{2}$$

Таким образом, для определения γ достаточно измерить температуру газа и скорость распространения звука в нем (молекулярный вес газа предполагается известным). Для измерения скорости звука служит установка, изображенная на рис. 1.

Установка состоит из вертикальной стеклянной трубы К, снабженной миллиметровой шкалой Ш и наполненной водой. В нижней части трубы имеется сосуд С и маховик А, при помощи которого можно менять уровень воды в трубе. Над верхним открытым концом трубы установлены телефон Т и микрофон М, обращенные мембранами внутрь трубы. Телефон служит для возбуждения в трубе звуковых волн, микрофон для их улавливания. Мембрана телефона приводится в движение переменным током звуковой частоты, в качестве источника переменной ЭДС используется звуковой генератор ЗГ. Возникающий в микрофоне сигнал передается на милливольтметр МВ.

При отражении бегущей от телефона волны от поверхности воды в трубе возникает стоячая волна. При этом на поверхности воды образуется узел волны. Поэтому распределение давления в трубе описывается формулой

$$\Delta p = 2\Delta p_0 \cos\frac{2\pi x}{\lambda}\cos 2\pi\nu t\ , \qquad (3)$$

где Δp – отклонение давления от атмосферного, Δp_0 – амплитуда колебаний давления в бегущей волне, x – расстояние от поверхности воды, λ – длина волны, ν – частота колебаний.

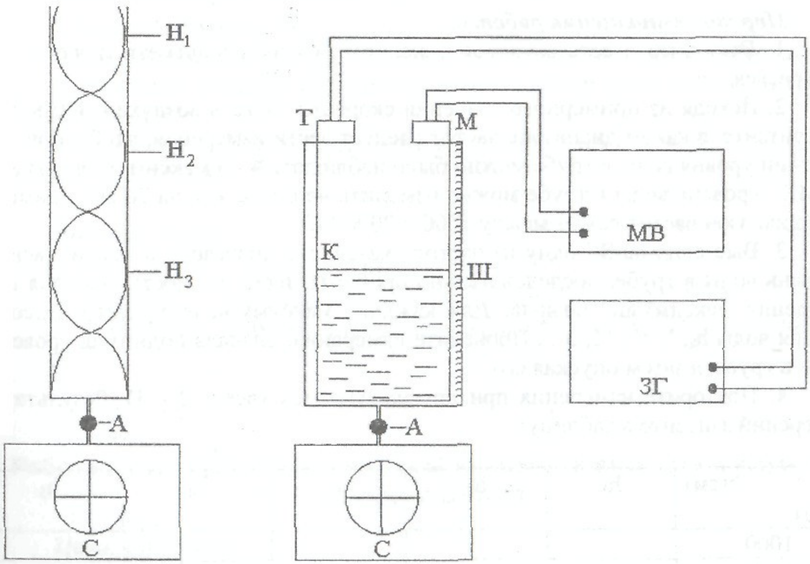


Рис. 1. Установка для измерения скорости звука в воздухе

Микрофон и телефон частично перегораживают отверстие трубы и тем самым возмущают стоячую волну в ней. Однако это возмущение будет мало, если перегороженная площадь отверстия будет мала по сравнению с его открытой площадью.

Амплитуда звуковых колебаний на верхнем конце трубы x = H зависит от соотношения между длиной волны λ и высотой H воздушного столба в трубе.

Если $H = k\lambda/2$, где $k = 1,2,\ldots$, то на верхнем конце трубы образуется узел и амплитуда звуковых колебаний обращается в нуль.

В этом случае мембрана микрофона не должна колебаться и стрелка милливольтметра должна упасть на нулевое деление шкалы. На опыте стрелка милливольтметра не опускается до нуля (объясните, почему?).

Если $H = (k+0.5)\lambda/2$, где $k = 0,1,2,\ldots$, то на верхний конец трубы приходится пучность стоячей волны и амплитуда колебаний становится максимальной. В этом случае милливольтметр должен показывать большую величину сигнала, очевидно, что разность высот воздушного столба, соответствующих двум последним максимумам сигнала на милливольтметре будет равна $\lambda/2$. Измерив таким образом длину волны λ, можно определить скорость звука по формуле:

$$V=\lambda\nu,$$

где ν задается на барабане звукового генератора.

Порядок выполнения работы.

1. Включите в сеть звуковой генератор и милливольтметр и дайте им прогреться.

2. Исходя из примерного значения скорости звука в воздухе (300 м/с), рассчитайте, в каком диапазоне частот следует вести измерения, чтобы при измерении уровня воды в трубе можно было наблюдать 4 - 5 максимумов сигнала на МВ. Уровень воды в трубе можно изменить не более чем на 70 см (примерный диапазон частот лежит между 1000 и 2000 Гц).

3. Выставив на ЗГ одну из частот указанного диапазона и плавно меняя уровень воды в трубе, последовательно пройдите через все доступные для наблюдения максимумы сигнала. Для каждого максимума определите высоту уровня воды h_k, $k = 1, 2, 3 \ldots$ Проведите измерения, сначала поднимая уровень воды в трубе, а затем опуская его.

4. Повторите измерения при других частотах (всего 2 - 3). Результаты измерений занесите в таблицу:

h(см) / ν(Гц)	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5
1000					
2000					
…					

В каждую клетку вписываются два значения высоты h_k , полученные при прямом и обратном ходе измерений.

5. Используя формулу $\lambda_k = 2(h_{k+1} - h_k)$, вычислите для каждой частоты ν среднее значение длины волны $\bar{\lambda}$, скорости звука $\bar{V}$ и их погрешности $\sigma_{\bar{\lambda}_{ср}}$, $\sigma_{\bar{V}_{ср}}$. Результаты вычислений занесите в таблицу:

ν(Гц)	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	$\bar{\lambda}$	$\Delta\bar{\lambda}$	$\bar{V}$	$\Delta\bar{V}$
1000								
2000								
…								

6. Учтите погрешности частоты ν (ошибка в градуировке шкалы звукового генератора не превосходит половины цены деления) и вычислите суммарную ошибку для $\bar{V}$. Сопоставьте значения скорости звука, измеренных на разных частотах. Зависит ли V от ν? Если нет, то найдите наилучшее значение скорости звука, используя все результаты измерений, и укажите её погрешность.

7. По формулам (2) и (4) вычислите показатель адиабаты γ и определите ошибку измерений.

Контрольные вопросы

1. Вывести формулу (1).
2. Почему процесс распространения звука в газе является адиабатным?
3. Выведите формулу (3). Почему стоячая волна будет иметь узел у поверхности воды?
4. Будет ли зависеть γ от температуры, если её изменять от очень малых температур до 1000^0С?

Литература

1. Стрелков С.П. Механика. М.: Наука, 1965.
2. Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.: Наука, 1971.
3. Кикоин И.К., Кикоин А.К. Молекулярная физика. М.: Наука, 1976.

Работа № 10 (005). Измерение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса

Цель работы:

1. Изучение динамики поступательного движения шарика в жидкости.
2. Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса.
3. Оценка результатов измерений и расчет погрешностей.

Оборудование: стеклянные цилиндрические сосуды с исследуемой жидкостью, мелкие шарики, измерительный микроскоп, аналитические весы, пикнометр, секундомер, масштабная линейка.

Содержание и метод выполнения работы

Этот метод широко применяется для определения коэффициента внутреннего трения сильно вязких жидкостей, таких как глицерин и различные масла. При движении шарика в вязкой жидкости возникает сила трения, величина которой зависит от коэффициента внутреннего трения жидкости. Формула для вычисления этой силы была выведена Стоксом, поэтому данный метод часто называют методом Стокса.

На шарик, падающий в вязкой жидкости, действуют три силы (рис. 1).

1. Направленная вниз сила тяжести

$$p = mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_T g,$$

где r – радиус шарика, ρ – плотность вещества, из которого сделан шарик.

2. Направленная вверх выталкивающая сила (архимедова сила), равная весу жидкости в объеме шарика

$$F_A = m_1 g = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_ж g,$$

где r – радиус шарика, $\rho_ж$ – плотность жидкости.

3. Сила трения $F_{тр}$. Эта сила также направлена вверх, а её численное значение находится по формуле Стокса:

$$F_{тр} = 6\pi r \eta v,$$

где r – радиус шарика, η – коэффициент внутреннего трения жидкости, а v – скорость движения шарика. Формула Стокса справедлива только для маленьких шариков, движущихся с небольшой скоростью. При увеличении размеров шариков и при возрастании скорости их движения возможно образование завихрений. В этом случае сила трения становится пропорциональной более высокой степени скорости.

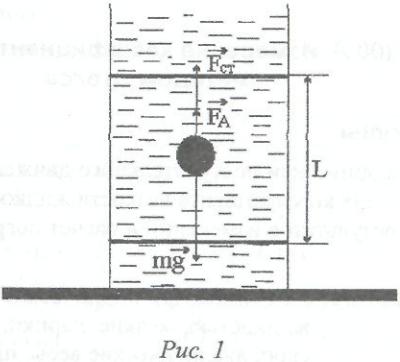


Рис. 1

При движении шарика силы P и F_A всё время остаются постоянными, а сила трения возрастает по мере увеличения скорости. В начале движения сила $F_{тр}$ очень мала, и шарик движется под действием силы, равной

$$\vec{F}_{уск} = \vec{P} + \vec{F}_A + \vec{F}_{тр} \quad \text{или} \quad F_{уск} = P + F_A + F_{тр}.$$

С увеличением скорости увеличивается и сила $F_{тр}$, и наступает такой момент, что направленные вверх силы $F_{тр}$ и F_A уравновесят направленную вниз силу тяжести P:

$$P = F_A + F_{тр},$$

или

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_m g = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{ж} g + 6\pi r \eta v \; . \qquad (1)$$

После этого движение станет равномерным, и скорость v можно найти, разделив путь L , пройденный шариком, на время t его равномерного движения. Из формулы (1) находим, что

$$\eta = \frac{2}{9} r^2 g \frac{(\rho_T - \rho_{ж})}{v} = \frac{2}{9} r^2 g \frac{(\rho_T - \rho_{ж})t}{L} \; . \qquad (2)$$

Формула (2) является не совсем точной, так как при её выводе не было учтено то обстоятельство, что шарик, падая вниз, вытесняет жидкость. Вследствие этого создаётся поток жидкости вверх и возникает дополнительная сила. При учёте этой силы формула (2) для цилиндрического сосуда принимает вид:

$$\eta = \frac{2}{9} r^2 g \frac{(\rho_T - \rho_{ж})t}{(1 + 2{,}4r/R)L} , \qquad (3)$$

где R – радиус сосуда. Вопрос о том, какой формулой пользоваться при расчёте, решается в зависимости от величины соотношения r/R. При движении шарика по оси цилиндра и при соотношении r/R = 1/10 различия в значениях коэффициента внутреннего трения, полученных по формулам (2) и (3), составляют около 25%. В реальных условиях соотношение r/R обычно колеблется в пределах от 1/10 до 1/20 , поэтому лучше пользоваться формулой (3).

При выводе формулы Стокса $F_{тр}=6\pi r v \eta$ предполагалось, что обтекание шарика жидкостью имеет ламинарный характер. Как известно, характер обтекания определяется значением числа Рейнольдса

$$\mathrm{Re} = \frac{v r \rho_{ж}}{\eta} .$$

Обтекание является ламинарным лишь при не очень больших значениях $0.5 < \mathrm{Re} < 10$.

Указания к работе.

В качестве меток в работе используются кольца из нити, охватывающие стеклянные цилиндры с исследуемой жидкостью (технический глицерин, вода). Кольца можно перемещать вдоль цилиндров, располагая их на требуемой высоте: верхнее – ниже уровня жидкости настолько, чтобы к моменту его прохождения скорость шарика успевала установиться; нижнее – на возможно большем расстоянии от верхнего, чтобы уменьшить ошибку измерения величин L и t . При фиксировании момента прохождения метки шариком глаз наблюдателя должен находиться на таком уровне, чтобы кольцо сливалось в отрезок прямой.

Радиусы шариков определяются с помощью измерительного микроскопа. Рекомендуется проверить сферичность шариков, измеряя их диаметр d по разным направлениям. При ее нарушении в качестве r надо брать 0.5 dср.

Плотность жидкости $\rho_т$ определяется с помощью пикнометра или берется из справочника. Плотность шариков находится по их массе и объёму или берется из таблиц, как, например, для свинцовых дробинок.

Данная методика определения коэффициента вязкости основана на формуле Стокса (2) и верна лишь при условии Re > 0.5

Проверить последнее можно, только определив из опыта величину η.

Однако есть иной способ проверить приемлемость описанной методики. Нужно провести опыты с разными по радиусу шариками. Если рассчитанные по формуле (5) значения η не обнаруживают систематической зависимости от r, значит методика справедлива. В противном случае условия опыта надо поменять.

Разумеется, при этом начальный участок пути ΔL (до верхней метки) должен быть достаточным для установления скорости шариков. Кроме того, во избежание влияния стенок сосуда на результаты опытов, необходимо бросать шарики вблизи осевой линии цилиндров.

Порядок выполнения работы

1. Отберите 2-3 группы тяжелых шариков (свинцовых дробинок), примерно по 5 одинаковых шариков в группе, так, чтобы шарики из разных групп заметно отличались по диаметру. Измерьте диаметры шариков. Для каждой группы вычислите среднее значение радиуса и его среднеарифметическую ошибку.

2. Бросая шарики в сосуд с техническим глицерином, измерьте время падения между двумя метками. Для каждой группы вычислите среднее время падения и его среднеарифметическую ошибку.

3. По формуле (3) для каждой группы шариков найдите среднее значение коэффициента вязкости. Его ошибку рассчитайте по формуле

$$\Delta\eta = \frac{\sum \Delta\eta_i}{n}.$$

Проверьте, лежит ли расхождение в значениях η для разных групп в пределах ошибки.

4. По найденному коэффициенту η и скорости $\bar{v}$ для каждой группы шариков рассчитайте число Re и путь установления скорости S. Проверьте выполнение условий

$$\mathrm{Re} = \frac{v r \rho_{ж}}{\eta} \text{ и } \Delta L \geq 3\bar{v}\,\tau ,$$

где $\tau = \dfrac{2\rho_{ж} r^2}{9\eta}$ – характерное время установления скорости.

Контрольные вопросы

1. Каков физический смысл коэффициента вязкости жидкости и как он зависит от температуры?

2. Что называется градиентом скорости и как он направлен в условиях опыта?

3. Выведите формулу (2) для расчета коэффициента вязкости по методу Стокса

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 1. М.: Наука, 1973.

Работа № 11 (007). Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом отрыва кольца

Цель работы:

1. Изучение явления поверхностного натяжения.
2. Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом отрыва кольца.
3. Определение систематической ошибки.

Оборудование: лабораторные весы, тонкое алюминиевое кольцо на трифилярной подвеске, станина с вертикально перемещаемым столиком и часовым индикатором перемещений, стеклянная кювета, разновески, мелкий песок, легкие коробочки.

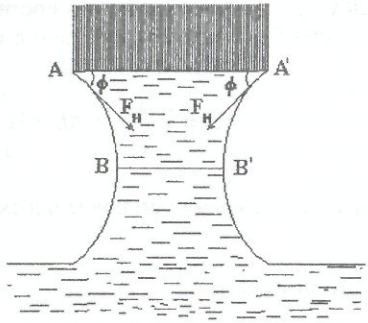


Рис. 1. Поперечное сечение стенки кольца и приподнятой жидкости

Содержание и метод выполнения работы

Кольцо, приведенное в соприкосновение со смачивающей его жидкостью, при подъеме увлекает за собой некоторую часть жидкости, которая благодаря поверхностным силам оказывается в подвешенном состоянии. Это явление изображено на рис. 1, где пунктиром показан уровень свободной поверхности жидкости вдали от стенки кольца.

Пусть d – диаметр кольца, с – его ширина по нижнему краю AA', Д – толщина перемычки BB' в самом узком месте, φ – угол между поверхностью жидкости и нижним краем кольца в точках касания A, A'.

Угол φ не следует путать с краевым углом, который определяется степенью смачивания твердой поверхности жидкостью.

Рассмотрим условия равновесия жидкости, соприкасающейся с твердой стенкой (рис. 2).

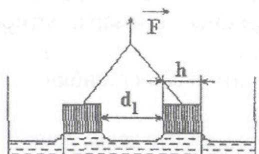


Рис. 2. Условия равновесия жидкости

В общем случае при неполном смачивании жидкостью твёрдого тела сила F_{12} направлена под некоторым углом β к поверхности твердого тела; этот угол β называют краевым углом.

Жидкость, граничащая с твёрдым телом, будет находиться в равновесии в том случае, если

$$F_{12}\cos\beta = F_{32} - F_{31}.$$

Краевой угол, под которым при равновесии свободная поверхность жидкости встречает поверхность твердого тела, определяется формулой:

$$\cos\beta = (F_{32} - F_{31})/F_{12}.$$

При полном смачивании краевой угол $\beta = 0$, а при полном отсутствии смачивания $\beta = \pi$. Краевой угол зависит от природы соприкасающихся веществ и от температуры. В случае равновесия поднятого кольцом столба жидкости $\varphi \geq \beta BB \geq 0$.

Для тонкого кольца (C<<d) можно пренебречь кривизной его стенки, и отрыв поверхности при φ > β, в результате исчезновения перемычки BB, т.е. при D = 0.

При этом $C < \left(1.066\sqrt{\sigma/\rho g}\right)$. Здесь σ – коэффициент поверхностного натяжения, ρ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения. Для величины h и F с углом действия сил поверхностного натяжения F (рис. 1) справедливы формулы:

$$h = 2\sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}}\cos\frac{\varphi}{2},\; F_1 = 2C\sqrt{\rho g\sigma}\cos\frac{\varphi}{2} + 2\sigma\sin\varphi, \tag{1}$$

где угол φ удовлетворяет трансцендентному уравнению

$$C = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}}\left[1.066 - \varphi\sin\frac{\varphi}{2} + \ln\frac{1+\sin\frac{\varphi}{2}}{1-\sin\frac{\varphi}{2}}\right]. \tag{2}$$

Для достаточно тонкого кольца отрыв поверхности происходит по достижении углом φ значения краевого угла β.

При этом $C > \left(1.066\sqrt{\sigma/\rho g}\right)$ максимальная величина поднятого столба жидкости h и силы отрыва F, приходящиеся на единицу длины кольца без учёта его веса, равны

$$h = 2\sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}} \text{ и } F_1 = 2C\sqrt{\rho g\sigma}. \tag{3}$$

В частности, из уравнений (1) и (2) следует, что

$$\frac{F_1}{\rho g h} \geq C, \tag{4}$$

где знак «равно» соответствует первому случаю отрыва, а знак «больше» – второму. Поскольку величина С также поддается измерению, соотношение (4) является удобным критерием для выяснения вопроса о том, какой случай отрыва имеет место в конкретном опыте.

Остановимся более подробно на втором случае отрыва. Разрешив уравнения (3) относительно величин σ и cos(φ/2), имеем

$$\sigma = \frac{\rho g}{4}\left(k^2 + h^2\right),\ \cos\frac{\varphi}{2} = \frac{h}{\sqrt{k^2 + h^2}}, \qquad (5)$$

где $k = \frac{F_1}{\rho g h} - C$. Если значение С известно, то формулы (5) позволяют рассчитать величины σ, φ. Если значение С не дано, то явных выражений для расчета величины σ, φ, С получить нельзя и следует решать систему (2), (3) методом последовательных приближений.

Можно предложить два вычислительных процесса такого рода:

1. По приближенному значению С из формулы (5) найти приближенные значения σ, φ, которые затем использовать для уточнения с помощью (3) значения С, и т.д.

2. Исключив из (2), (3) величины С, σ, получим трансцендентное уравнение

$$\frac{2F_1}{\rho g h^2}\cos\frac{\varphi}{2} = 1.066 - 2\sin\frac{\varphi}{2} + \ln\frac{1 + \sin\frac{\varphi}{2}}{1 - \sin\frac{\varphi}{2}}. \qquad (6)$$

Из него найти φ, которое затем использовать для отыскания значений С, σ.

Схема экспериментальной установки для измерения величин h, F изображена на рис. 3.

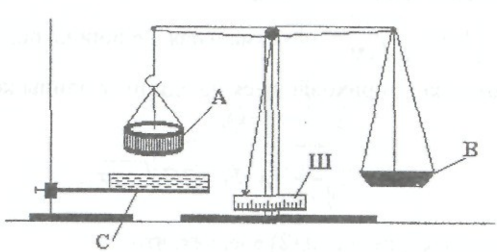


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Тонкое алюминиевое кольцо А подвешено на одно из плеч коромысла лабораторных весов вместо чашки. Трифилярная подвеска кольца осуществляется таким образом, чтобы плоскость нижнего края кольца была горизонтальной. Стеклянная кювета с исследуемой жидкостью ставится на вертикально перемещаемый столик С , позволяющий приводить кольцо в соприкосновение с жидкостью и обеспечивать условия опыта. Перемещения столика регистрируются индикатором часового типа И модели ИЧ 10 МН с ценой деления 0.01 мм и ходом 10 мм.

Методика измерений требует предварительного уравновешивания сухого кольца на воздухе, при котором стрелку весов желательно установить на нулевое деление шкалы Ш. Тогда при взаимодействии кольца с жидкостью равновесие будет нарушено. Для его восстановления на оставшуюся чашку весов В следует положить дополнительный груз Р – коробочку с песком – и переместить кювету по вертикали. Условие равновесия в этом случае будет иметь вид $F = P + nC_0$, где F – сила, действующая на кольцо со стороны жидкости, C_0 – цена деления шкалы весов, n – число делений, на которое отклоняется стрелка от положения равновесия (нулевое деление шкалы). При этом $n < 0$ при отклонении влево, в сторону кольца; $n > 0$ при отклонении в противоположную сторону.

Величина F зависит от положения нижнего края конца по отношению к свободной поверхности жидкости. В момент отрыва $F = \pi d_{cp} F_1$, где d_{cp} – средний диаметр кольца, F_1 – сила отрыва, приходящаяся на единицу длины кольца, которая при полном смачивании определяется формулами (1), (2).

Подготовка экспериментальной установки к измерениям.

Осмотрите лабораторные весы. Опорные призмы и подушки должны быть очищены от загрязнений и протерты спиртом, что может производиться лишь в арретированном состоянии весов.

Подставка весов должна быть приведена в горизонтальное положение, для чего служат установочные винты и отвес на колонке весов.

Освобожденное от арретира коромысло должно плавно качаться около положения равновесия, которое может не совпадать с нулевым делением шкалы весов. Совместить положение равновесия с нулевым делением шкалы можно при помощи гаечек, перемещаемых на концах коромысла.

Определите цену деления шкалы, поместив на чашку весов разновеску в 20 мг и измерив величину отклонения стрелки от положения равновесия:

$$C_0 = \frac{p}{(n_2 - n_1)} .$$

Подготовьте индикатор перемещений к измерениям высоты подвижного столика. Индикатор требует осторожного обращения. Необходимо следить за тем, чтобы его стержень перемещался без ударов в конце хода. Нельзя поворачивать корпус индикатора, когда он закреплен в державке за гильзу.

Обработайте спиртом или эфиром алюминиевое кольцо и внутреннюю поверхность кюветы. В дальнейшем не прикасайтесь к ним пальцами. После высыхания кюветы наполните ее на 2/3 дистиллированной водой.

Арретируйте весы. Опустите подвижный столик в нижнее положение. Поставьте на него кювету с жидкостью.

Измерение максимальной высоты столба жидкости, поднятой кольцом.

Плавно поднимая столик с кюветой, приведите кольцо в соприкосновение с поверхностью воды. (Погружение кольца в жидкость при этом не произойдет, так как весы арретированы.) Измерьте высоту столика h_1.

Медленно опустите столик до отрыва кольца от жидкости. Измерьте высоту столика h_2, соответствующую моменту отрыва.

Найдите максимальную высоту столба жидкости $h = h_2 - h_1$.

Повторив опыт несколько раз, определите среднее значение h и его ошибку.

Измерение силы отрыва кольца от жидкости.

Поднимите столик с кюветой до соприкосновения кольца с жидкостью. Положите на чашку весов пустую коробочку и освободите коромысло от арретира. Если при этом произойдет отрыв кольца от жидкости, поднимите столик выше или замените коробочку на более легкую так, чтобы отрыва не происходило. Опуская столик с кюветой или подсыпая мелкий песок в коробочку, оторвите кольцо от жидкости. Обратите внимание на положение стрелки весов непосредственно перед отрывом. Добейтесь того, чтобы в момент отрыва стрелка не зашкаливала и была возможно ближе к положению равновесия.

При помощи аналитических весов определите вес коробочки с песком P. Из формулы (7) найдите силу отрыва F.

Повторив опыт несколько раз, определите среднее значение F и его ошибку.

Разрывающее усилие выражается формулой

$$F = (2\pi r_1 \sigma + 2\pi r_2 \sigma) = 2\pi\sigma(r_1 + r_2).$$

Если стенки кольца достаточно тонки, то можно положить, что

$$\frac{r_1 + r_2}{2} = r\text{, т.е. } d = 2r.$$

В таком случае

$$F = 4\pi d\sigma\text{, или } \sigma = \frac{F}{4\pi d}.$$

Расчет коэффициента поверхностного натяжения.

Рассчитайте силу F_1 ,приходящуюся на единицу длины кольца. Пользуясь критерием (4), определите, какой случай отрыва имел место на опыте.

Используя полученные в опыте значения h и F_1, для данного a рассчитайте величину σ и ее ошибку.

Приведите уточняющие расчеты, уменьшающие систематическую ошибку, связанную с заданием величины С.

Контрольные вопросы

1. Когда и как может повлиять на результаты опытов неполное смачивание кольца жидкостью?
2. Как влияют на величину поверхностного натяжения воды небольшие примеси спирта и эфира?
3. Как направлена сила поверхностного натяжения в момент отрыва кольца?
4. Найдите радиус капли воды, отрывающейся от твердой горизонтальной поверхности при ее полном смачивании.
5. Оцените средний радиус капли воды, отрывающейся от твердой горизонтальной поверхности при ее полном смачивании.
6. Оцените силу поверхностного натяжения, действующую на лапку водомерки, и глубину ее погружения в воду.
7. Оцените максимальный вес насекомых, способных перемещаться по свободной поверхности воды.

Литература

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 2. М., 1990.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 1. М., 1973.
3. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М., 1981.

Работа № 12 (0010). Определение размеров молекулы олеиновой кислоты

Цель работы:

1. Изучение явления поверхностного натяжения на границе трех сред.
2. Определение диаметра и высоты молекулы олеиновой кислоты методом мономолекулярного слоя.
3. Оценка результатов измерения и расчет погрешностей.

Оборудование: раствор олеиновой кислоты в спирте, кювета, линейка, аналитические весы, пробковые опилки, пипетка.

Содержание и метод выполнения работы

Рассмотрим условия, возникающие на границе соприкосновения двух не смешивающихся друг с другом жидкостей. Пусть капля жидкости 2 помещена на поверхности другой жидкости 1. Вес капли заставляет ее несколько углубиться в жидкость 1, образуя чечевицу. Однако далеко не всегда капли одной жидкости на поверхности другой образуют чечевицу. Так, например, бензин и керосин на поверхности воды образуют тонкие пленки.

Рассмотрим, при каких условиях образуется чечевица и при каких – тонкая пленка.

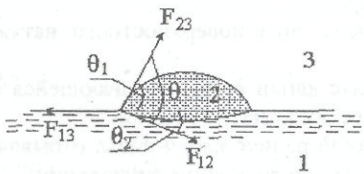


Рис.1. Форма чечевицы

Из рисунка видно, что в рассматриваемом случае друг с другом граничат следующие среды: жидкость 1 граничит с жидкостью 3; жидкости 1 и 3 граничат со средой 2 (смесь паров жидкостей 1 и 3 – с воздухом , если опыт проводится на воздухе). Границей соприкосновения трех сред является окружность, ограничивающая чечевицу. На элемент длины L этой окружности действуют три силы поверхностного натяжения:

$F_{12} = \sigma_{12}dl$ – между жидкостями 1 и 2;

$F_{13} = \sigma_{13}dl$ – между жидкостью 1 и газовой фазой ;

$F_{23} = \sigma_{23}dl$ – между жидкостью 2 и газовой фазой.

Каждая из этих сил направлена по касательной к поверхности соприкосновения соответствующих двух сред; σ_{12}, σ_{13} и σ_{23} – соответствующие коэффициенты поверхностного натяжения.

Чтобы жидкость 2 находилась в равновесии, необходимо, чтобы сумма проекций всех трех сил на оси координат равнялась нулю, т.е.

$$F_{13} = F_{23}\cos\theta_1 + F_{12}\cos\theta_2, \quad 0 = F_{23}\sin\theta_1 - F_{12}\sin\theta_2 \qquad (1)$$

или

$$\sigma_{13}=\sigma_{23}\cos\theta_1+\sigma_{12}\cos\theta_2, \quad 0=\sigma_{23}\sin\theta_1-\sigma_{12}\sin\theta_2\,. \qquad (2)$$

Возводя оба равенства (2) в квадрат, сложим их, получим:

$$\sigma_{13}^2 = \sigma_{23}^2 + \sigma_{12}^2 + 2\sigma_{23}\sigma_{12}\cos(\theta_1 + \theta_2).$$

Обозначив θ_1 и θ_2 через θ, получим

$$\sigma_{13}^2 = \sigma_{23}^2 + \sigma_{12}^2 + 2\sigma_{23}\sigma_{12}\cos\theta. \quad (3)$$

Углы θ_1 и θ_2 называются *краевыми углами.* Краевые углы (при равновесии) определяются соотношением трех коэффициентов σ_{12}, σ_{13} и σ_{23} на границе соприкосновения жидкостей, т.е. соотношением молекулярных сил взаимодействия внутри каждой жидкости и между жидкостями. В частности, соотношение между σ_{12}, σ_{13} и σ_{23} может быть таким, что $\cos\theta = 1$ и, значит $\theta = 0$. Тогда жидкость 2 растекается тонким слоем по поверхности жидкости 1. В этом случае говорят, что жидкость 1 полностью смачивается жидкостью 2, или наоборот. Физически это означает, что сила F_{13} по величине больше равнодействующей сил ($F_{12} + F_{23}$):

$$F_{13} > F_{12} + F_{23}\,. \quad (4)$$

Из рис. 1 видно, что результирующая сила в этом случае направлена так, что она растягивает каплю. Если же $F_{13} < F_{12} + F_{23}$, то жидкость будет стягиваться до тех пор, пока F_{13} не станет равной $F_{12} + F_{23}$. Это и есть условие образования чечевицы:

$$F_{13} = F_{12} + F_{23}\,. \quad (5)$$

Многие органические жидкости, например эфир, растекается на поверхности воды в монослой. Для таких жидкостей, как бензин, керосин, олеиновая кислота и др., растекание наблюдается только для первых капель, пока поверхность не загрязнена. Это объясняется тем, что первые капли, растекаясь на поверхности воды, изменяют ее поверхностное натяжение настолько, что для новых капель возможно выполнение условия (5).

В данной работе исследуется явление растекания первой капли раствора олеиновой кислоты $C_{18}H_{34}O_2$ в спирте по поверхности воды. Измерения сводятся к определению массы капли и площади, занятой этой каплей на поверхности воды.

Структура молекулы олеиновой кислоты:

$$CH_3(CH_2)_7CH = CH(CH_2)_7COOH.$$

Разные части молекулы кислоты обладают различными свойствами: парафиновая цепочка (CH_3-CH_2-CH_1…) инертна и выталкивается из воды, а гидроксильная часть (COOH) притягивается к воде. В результате гидроксильными «концами» молекулы оказываются обращенными к воде и над водой возвышаются несмачиваемые «парафиновые хвосты».

Если на поверхность воды капнуть раствор олеиновой кислоты в спирте, то спирт частично испарится, а олеиновая кислота покроет поверхность мономолекулярной пленкой. Для наблюдения такой пленки и измерения её площади поверхность воды посыпают тальком (или ликоподием). Пленка олеиновой кислоты уменьшает поверхностное натяжения воды, поэтому плавающие частицы талька отодвигаются за края пленки.

С помощью пипетки капают на поверхность воды, посыпанную тальком, одну каплю раствора олеиновой кислоты. Капля, растекаясь в мономолекулярный слой, образует круг, по диаметру Д которого можно рассчитать площадь S_m, занимаемую одной молекулой олеиновой кислоты:

$$S_m = \frac{\pi D^2}{4N}, \tag{6}$$

где N – число молекул олеиновой кислоты в одной капле. Если известна масса капли m, % содержания кислоты в растворе ($\alpha\%$) и молярная масса олеиновой кислоты ($C_{18}H_{34}O_2$), то

$$N = \frac{mN_A}{\mu}\frac{\alpha\%}{100\%}, \tag{7}$$

где N_A – число Авогадро, μ= 282 г/моль.

Отсюда

$$S_m = \frac{\pi D^2 \mu}{4mN_A}\frac{100\%}{\alpha\%}. \tag{8}$$

Горизонтальный и вертикальный размеры молекулы (d и L) оценим как

$$d = \sqrt{S_m}, \quad L = V / S. \tag{9}$$

Выражая объем монослоя V, образованного каплей, и его площадь S, получим

$$L = \frac{4m}{\pi D^2 \rho}\frac{\alpha\%}{100\%}, \tag{10}$$

где ρ – плотность олеиновой кислоты, равная $\rho = 0.898$ г/см^3.

Порядок выполнения работы.

1. Наполнить кювету водой и посыпать успокоившуюся поверхность её пробковыми опилками или тальком.
2. В маленький стаканчик с помощью пипетки накапать 20 капель раствора олеиновой кислоты и определить на аналитических весах массу одной капли.
3. Выпустить из пипетки, с небольшой высоты, одну каплю раствора кислоты на поверхность воды.
4. Измерить диаметр образовавшегося круга в нескольких направлениях и найти среднее значение.
5. Пользуясь формулами (8) – (10), рассчитать d и L молекулы олеиновой кислоты. Сравнить полученные значения.

Контрольные вопросы

1. Объясните явление смачивания.

2. Что такое краевой угол и чем он определяется?

3. Что представляют собой горизонтальный и вертикальный размеры молекулы в данной работе?

Литература

1. Кикоин И.К, Кикоин А.К. Молекулярная физика. М.: Наука, 1976.
2. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М., 1981.

Работа № 13 (0015). Определение удельной теплоты парообразования при температуре кипения воды

Цель работы:

1. Изучение явления парообразования при кипении воды.
2. Определение удельной теплоты парообразования при температуре кипения.
3. Оценка результатов измерения и расчет погрешностей.

Оборудование: дистиллятор, вольтметр, автотрансформатор, секундомер, весы, стакан для сбора конденсата.

Содержание и метод выполнения работы

Испарение жидкости происходит при любой температуре. С точки зрения молекулярно-кинетической теории это связано с тем, что при любой температуре в поверхностном слое жидкости имеются такие молекулы, которые обладают кинетической энергией, достаточной для того, чтобы покинуть жидкость и перейти в газообразную среду. Молекула покинет жидкость в том случае, если

$$A_{исп} < \frac{m\bar{v}^2}{2},$$

где $\bar{v}$ – нормальная к поверхности жидкости составляющая скорости молекулы, m – масса молекулы, $A_{исп}$ – так называемая работа испарения молекулы.

Работа испарения молекулы слагается из работы, совершаемой против сил молекулярного притяжения со стороны молекул поверхностного слоя жидкости, и работы против внешнего давления. Работа A_1 , совершаемая против сил молекулярного сцепления при испарении единицы массы, численно равна разности удельных внутренних энергий пара и жидкости:

$$A_1 = U_п - U_ж,$$

где $U_п$ и $U_ж$ – соответственно удельные внутренние энергии пара и жидкости. Работа A_2 , совершаемая против внешнего давления при испарении единицы массы жидкости, дается формулой:

$$A_2 = P(V_п - V_ж),$$

где P – внешнее давление, $V_п$ – удельный объём пара, $V_ж$ – удельный объём жидкости. Если при испарении к жидкости не подводится теплота, то температура жидкости понижается вследствие уменьшения средней кинетической энергии её молекул, вызванного уходом из жидкости наиболее быстрых из них. Поэтому для того, чтобы испарение жидкости происходило при постоянной температуре, к жидкости необходимо подводить определенное количество теплоты.

Величина λ , численно равная количеству теплоты, которое необходимо *подвести к единице массы данной жидкости для превращения её в пар при постоянной температуре*, называется *удельной теплотой парообразования*. В системе СИ λ измеряется в Дж/кг. Теплота, подводимая к жидкости при изотермическом испарении, идет на работу по преодолению сил молекулярного сцепления (внутренняя теплота парообразования) и на работу против внешнего давления (внешняя теплота парообразования). Поэтому для удельной теплоты парообразования получаем

$$\lambda = A_1 + A_2 = U_п - U_ж + P(V_п - V_ж).$$

Удельная теплота парообразования зависит от жидкости, а для данной жидкости является функцией температуры. С увеличением температуры удельная величина теплоты парообразования убывает, а с уменьшением – возрастает. В критическом состоянии различие между жидкостью и её насыщенным паром исчезает, и удельная теплота парообразования обращается в нуль.

Для определения удельной теплоты парообразования воды при температуре кипения под атмосферным давлением используется прибор – дистиллятор. *Дистиллятор* состоит из колбы с водой, в которую погружена нагревательная спираль, и соединенного с колбой конденсатора. Для нагревания спирали используется переменный ток, эффективную силу которого можно изменять, меняя эффективное напряжение на концах спирали с помощью автотрансформатора. Эффективное напряжение на концах спирали измеряется вольтметром.

Если нагреть воду в колбе до температуры кипения и дать ей покипеть минут 15 - 20, то за это время прибор прогреется настолько, что процессы, происходящие в нем, можно считать стационарными (не зависящими от времени). Это будет означать, что установится в среднем постоянная разность температур колбы и окружающей среды. Кроме того, при достаточно интенсивном охлаждении стенок конденсора весь образующийся за некоторое время пар при прохождении через конденсор будет превращаться в жидкость за то же самое время.

Согласно закону Джоуля - Ленца для переменных токов, количество тепла, выделившееся в спирали за время t, равно $\frac{U_1^2 t}{R}$, где U_1 – эффективное напряжение на концах спирали, R – сопротивление спирали. Выделившееся тепло идет на превращение воды в пар при температуре кипения и на нагревание окружающей среды вследствие теплообмена между ней и колбой. Отсюда имеем:

$$\frac{U_1^2 t}{R} = m_1 \lambda + g, \qquad (1)$$

где m_1 – масса воды, превратившейся в пар за время t, g – тепловые потери за то же самое время. При стационарном режиме масса m равна массе воды, полученной за время t при конденсации пара.

Тепловые потери определить экспериментально трудно. Поэтому для исключения их из уравнения опыт повторяют при другой мощности электрического тока. При этом снова собирают конденсат в условиях стационарного режима за то же самое время. Во втором случае масса пара, образующегося в единицу времени будет другой, то для обеспечения его полной конденсации необходимо изменить скорость потока охлаждающей воды в конденсоре. Тепловые потери во втором опыте при соблюдении вышеуказанных условий можно принять равными тепловым потерям в первом опыте. Тогда имеем:

$$\frac{U_2^2 t}{R} = m_2 \lambda + g, \qquad (2)$$

где m_2 – масса конденсата, собранного за время t во втором опыте, U_2 – эффективное напряжение на концах спирали. Исключая из уравнений (1), (2) неизвестную g, находим:

$$\lambda = \frac{\left(U_1^2 - U_2^2\right)}{R\left(m_1 - m_2\right)}. \qquad (3)$$

Основным недостатком этого метода является трудность получения сухого пара. В данной установке имеется вероятность уноса паром капелек кипящей жидкости, что приводит к ошибке при определении λ. Большое значение для обеспечения необходимой точности измерений имеет также стационарность режима. В условиях нестационарного режима возникает значительная ошибка за счет различия тепловых потерь и неполной конденсации.

Измерения.

1. Залейте в колбу воду так, чтобы спираль была полностью погружена. Соединив с водопроводным краном конденсор, пускают в него воду, плавно поворачивая кран. Устанавливают необходимую скорость потока воды. С помощью автотрансформатора подают на концы спирали напряжение U_1 = 25В (50 делений по шкале вольтметра). Через 15 - 20 минут после того, как вода в колбе закипит, приступают к измерениям.

2. Взвешивают стакан. Затем собирают в него конденсат в течении 5 минут и снова взвешивают. Массу сконденсировавшейся воды находят по разности двух измерений. В процессе сбора конденсата необходимо следить, чтобы напряжение, показываемое вольтметром, было постоянным. Нельзя допускать бурного кипения воды в колбе. Уменьшив напряжение на спирали до U_2 = 20 В, проводят аналогично второй опыт.

3. Зная сопротивление спирали R = U / I (Ом), найдите λ в Дж/кг. Сравните полученное значение с табличным. Оцените абсолютную и относительную погрешность измерений.

4. Рассчитайте внешнюю удельную теплоту парообразования при температуре кипения, полагая, что пар в колбе является насыщенным. Для расчета воспользуйтесь таблицей зависимости температуры кипения от давления. Для определения давления используйте барометр.

5. Найдите внутреннюю удельную теплоту парообразования. Вычислите работу, совершаемую против сил молекулярного сцепления и при переходе одной молекулы воды из жидкой фазы в газообразную.

Плотность насыщенного пара при t =100° С и атмосферном давлении P = 760 мм рт. ст. равна $\rho_п$ = 598 г/м^3 .

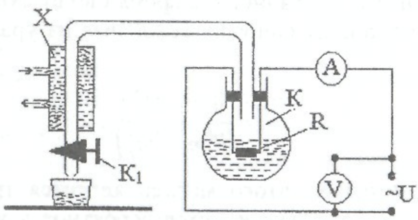


Рис. 1. Схема установки

Контрольные вопросы

1. Как объяснить с точки зрения молекулярно-кинетической теории убывание удельной теплоты парообразования при возрастании температуры?

2. Какая из составляющих удельной теплоты парообразования больше: внутренняя или внешняя и почему?

3. Что называется сублимацией?

4. Как скажется на величине λ попадание капелек воды в пар?

Литература

1. Телеснин Р.В. Молекулярная физика. М., 1973.
2. Кикоин И.К., Кикоин А.К. Молекулярная физика. М., 1963.

СОДЕРЖАНИЕ

Кириков Михаил Викторович,
Алексеев Вадим Петрович

Лабораторный практикум по физике
для биологов

Редактор, корректор А.А. Антонова
Компьютерная верстка С.Д. Глызин

Лицензия ЛР № 020319 от 30.12.96.

Подписано в печать 24.05.2001. Формат 60x84/16.
Бумага тип. Усл.-печ. л. 5,81. Уч.-изд. л. 5,2.
Тираж 200 экз. Заказ 102

Оригинал-макет подготовлен
в редакционно-издательском отделе ЯрГУ.

Отпечатано на ризографе.

Ярославский государственный университет.
150000 Ярославль, ул. Советская, 14.