

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени АБУ РАЙХАНА БЕРУНИ**



**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К
ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ФИЗИКА»**

ЧАСТЬ I

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ, МОЛЕКУЛЯРНАЯ
ФИЗИКА И ЭЛЕКТРОСТАТИКА**

Ташкент - 2015

Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Физика» (механика, молекулярная физика и электростатика). Сост.: Юсупов Д. Б., Химматкулов О., Эшкулов А.А. – Ташкент, ТашГТУ, 2015. - 96 с.

В методических указаниях рассмотрены основные теоретические вопросы разделов физики: механика, молекулярная физика и электростатика. Приведены рекомендации к выполнению лабораторных работ, а также необходимые таблицы физических величин.

Они предназначены для студентов вузов, обучающихся по направлениям технического образования.

Печатаются по решению научно-методического совета Ташкентского государственного технического университета им. Абу Райхана Беруни.

Рецензенты:

к.ф.-м.н. доц. Турсунов И.Г. (НУУз),

к.ф.-м.н. доц. Гаилов А.Г. (ТашГТУ)

© Ташкентский государственный технический университет, 2015

Введение

Предлагаемые методические указания к лабораторным работам по физике содержат описание 12 лабораторных работ по механике и молекулярной физике, а также электростатике. Они предназначены для обучения студентов по программам бакалавриата специальностей технического образования.

В связи с тем, что изложение теоретического материала на лекциях отстает от регламентированных лабораторных работ, возникает потребность совмещения в одной работе рассмотрения основных теоретических положений и методических указаний к каждой лабораторной работе. По замыслу авторов, это должно дать возможность студентам осмысленно выполнять лабораторные работы и свести к минимуму затраты времени на самостоятельную подготовку к занятиям по рекомендуемому списку учебной литературы.

Методические указания разработаны в соответствии с учебной программой бакалавриата факультетов: «Нефти и газа», «Авиационного», «Механико-машиностроительного», «Электроника и автоматика», «Энергетика» и «Горно-геологического». Обращено внимание на аналитические и графические способы обработки результатов измерений, расчет погрешностей экспериментов. Изложение ведется с применением системы единиц СИ.

Цель данных методических указаний к лабораторным работам состоит в том, чтобы на практике проверить теоретические знания студентов, выработать у них умение работать с приборами, развить навыки в проведении экспериментов, умение обрабатывать, анализировать, обобщать результаты, делать выводы.

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ. СОВЕТЫ И УКАЗАНИЯ

Цель любого исследования – установление связей между различными явлениями и параметрами. Количественная зависимость между исследуемыми величинами получается в результате измерений.

Измерение – это нахождение значения физической величины опытным путем техническими средствами. Результат измерений физических величин следует выражать в системе единиц СИ.

Всякое значение, полученное в результате измерений, дает лишь приближенное значение измеряемой величины. Если систематические и грубые ошибки измерений могут быть учтены и устранены, то случайные погрешности неизбежны как в каждом измерении, так и в величине среднего значения, вычисленного по отдельным измерениям. Поэтому необходимо уметь рассчитывать возможные погрешности измерений и представлять достоверные результаты.

Измерения называются прямыми, если определяемая величина непосредственно сравнивается с эталоном меры (измерение длины, времени, массы и т. Д.). Чаще производят не прямые измерения данной величины, а косвенные – через другие величины, связанные с измеряемой определенной математической зависимостью. Например, плотность тела определяется по измерениям массы и объема.

Погрешности, допускаемые во время измерений, делятся на две категории: систематические и случайные.

Систематические погрешности, связанные с ограниченной точностью изготовления прибора, неточностью самого метода измерения (пренебрежение силами сопротивления и трения), неправильной установкой прибора (например, сбит ноль шкалы прибора), но эти погрешности можно исключить, введя соответствующие поправки. Для этого приходится периодически проводить проверку приборов по эталонным.

Случайные погрешности вызываются большим числом случайных причин, действие которых на результат каждого измерения различно, и они не могут быть заранее учтены.

Случайные погрешности могут быть вызваны сотрясениями здания, влиянием незначительного движения воздуха, трением

подвижных элементов приборов и переносятся в разной мере и с разным знаком из опыта в опыт. Математическая теория случайных величин (математическая статистика) позволяет уменьшить влияние этих погрешностей на конечный результат и установить величины погрешностей измерений. Для этого необходимо провести не одно измерение, а несколько. Теория ошибок дает возможность выбрать разумное число измерений для обеспечения заданной точности.

Погрешности при прямых измерениях.

Пусть имеется некоторая случайная величина X , которая может принимать ряд из n произвольных значений. Их можно наглядно представить, построив диаграмму, которая показывала бы, как часто использовались при измерениях те или иные значения. Для этого диапазон значений, отложенных по оси OX , разбивают на равные интервалы шириной ΔX . Затем подсчитывают число m значений величины, попавших в каждый интервал и на каждом интервале строят прямоугольник с основанием, равным ширине интервала, и высотой, равной числу значений измеренной величины, попавшей в данный интервал. Полученный график называется *гистограммой*, а огибающая гистограмму кривая, проведенная через центры каждого интервала ΔX - *кривой распределения случайной величины*. Функция $y = f(x)$, описывающая эту кривую, называется *плотностью вероятности* данного распределения или *функцией распределения вероятностей*.

Существуют различные виды распределения случайных величин, однако особое значение имеет нормальный закон распределения случайной величины (закон Гаусса), для которого функция распределения вероятностей описывается формулой

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где $\bar{x}$ - математическое ожидание случайной величины (сумма произведений всех возможных значений случайной величины на их вероятности); σ - среднее квадратичное отклонение.

Зная закон распределения случайной величины, можно провести вероятностную оценку погрешности измерения.

Допустим, что при определении неизвестной величины A нами

получен ряд из n отдельных измерений $X_1, X_2, \dots, X_n$, средняя арифметическая которых равна:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \text{ или } M = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}.$$

Каждое отдельное измерение и среднее из всех измерений имеют свои погрешности. Абсолютной ошибкой ε приближенного значения некоторой величины называют разность между точным и приближенным значениями этой величины по модулю

$$\varepsilon_i = |A - X_i|. \quad (2)$$

Относительной ошибкой δ приближенного значения некоторой величины называют отношение его абсолютной ошибки ε к точному значению данной величины. Относительную ошибку принято выражать в процентах:

$$\delta_i = \frac{\varepsilon_i}{A} \cdot 100\%, \quad (3)$$

Вместо точного значения величины A , которое нам, как правило неизвестно, в формулы (2 – 3) подставляют средние значения экспериментальных данных, т.е. величину M . Тогда получим $\varepsilon_i = |M - X_i|$, $\delta_i = \frac{\varepsilon_i}{M} \cdot 100\%$.

Средняя абсолютная ошибка

При достаточно большом количестве проведенных исследований случайной величины (по крайней мере больше десяти), достоверную величину погрешности измерений отражает *средняя абсолютная ошибка* η . Она вычисляется как среднее из всех абсолютных значений ошибок отдельных измерений, взятых по модулю.

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n |\varepsilon_i|}{n} = \frac{|\varepsilon_1| + |\varepsilon_2| + \dots + |\varepsilon_n|}{n}. \quad (4)$$

Средняя квадратичная ошибка

При малом числе проведенных измерений (3-5) для достоверной оценки погрешностей вычисляют средний квадрат абсолютных ошибок

$$\sigma^2 = \frac{\sum \varepsilon_i^2}{n - 1}. \quad (5)$$

Величина σ^2 называется *дисперсией* и характеризует случайный разброс данных. Корень квадратный из величины дисперсии называется *средней квадратичной ошибкой* отдельного измерения - σ (средним квадратичным отклонением, стандартным отклонением). Величина σ вычисляется по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (M - X_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_i^2}{n-1}} \quad (6)$$

Между величинами σ и η существует следующая численная зависимость: $\sigma = 1,253\eta$; $\eta = 0,8\sigma$.

Средняя квадратичная ошибка

Средняя квадратичная ошибка σ и средняя абсолютная ошибка η , являясь очень важными характеристиками точности экспериментов, сами не включаются в форму записи результатов. Результат измерений записывается через среднюю величину M и ее погрешность. Средняя квадратичная ошибка средней величины M вычисляется по формуле:

$$m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_i^2}{n(n-1)}} \quad (7)$$

В итоге вычислений результат измерений записывается в виде

$$X = M \pm m = \frac{\sum X_i}{n} \pm \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_i^2}{n(n-1)}} \quad (8)$$

Относительная ошибка измерений, выраженная в процентах, будет равна $\frac{m}{M} \cdot 100\%$.

Рассмотрим пример: Вычислить среднее и его ошибку для ряда чисел – 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18.

№п./п.	X	ε	ε^2
1	10	4	16
2	11	3	9
3	12	2	4
4	13	1	1
5	14	0	0
6	15	-1	1
7	16	-2	4
8	17	-3	9
9	18	-4	16
	$\sum x = 126$	$\sum \varepsilon = 20$	$\sum \varepsilon^2 = 60$

$$N=9; \quad M=\frac{126}{9}=14;$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum \varepsilon^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{60}{8}} = 2,74$$

или

$$\sigma_2 = 1,253 \frac{\sum |\varepsilon|}{n} = 1,253 \cdot \frac{20}{9} = 2,78.$$

Далее

$$m_1 = \frac{\sigma_1}{\sqrt{n}} = \frac{2,79}{\sqrt{9}} = 0,91$$

$$m_2 = \frac{\sigma_2}{\sqrt{n}} = \frac{2,78}{\sqrt{9}} = 0,93.$$

Следовательно, $X=M \pm m = 14 \pm 0,9$.

Из примера видно, что величины средней квадратичной ошибки среднего, вычисленные по указанным формулам, через среднюю квадратичную ошибку – σ и через среднюю абсолютную ошибку – η , отличаются друг от друга. Следовательно, принимая второй путь расчета, как более простой, мы незначительно увеличиваем оцениваемые ошибки среднего значения.

Удобство оценки погрешности измерений с помощью средней квадратичной погрешности заключается в том, что σ является параметром в нормальном законе распределения. Значит, используя формулу (1), можно вычислить доверительную вероятность p , определяемую как вероятность того, что результат измерения отличается от истинного значения не более, чем на ΔX .

$$p = P(\bar{x} - \Delta x < x < \bar{x} + \Delta x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{\bar{x}-\Delta x}^{\bar{x}+\Delta x} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} dx \quad (9)$$

Интервал значений измеряемой величины от $\bar{x} - \Delta x$ до $\bar{x} + \Delta x$ называется *доверительным интервалом*.

Доверительную вероятность погрешности среднего арифметического значения можно найти в Приложении 1.

Приведенные в Приложении 1 формулы справедливы только для большого числа измерений, что не всегда возможно.

В случае небольшого количества измерений ($n < 30$) задают

доверительную вероятность p по таблице Приложения 2, затем находят соответствующее значение коэффициента Стьюдента t для данного числа измерений n . Определив t , находят случайную погрешность ΔX с заданной вероятностью p по формуле:

$$\Delta X = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \cdot t.$$

Рассмотрим пример: Пусть в результате четырех измерений x получены следующие значения: 2,80; 2,79; 2,84; 2,83. Найдем их среднее арифметическое значение:
 $\bar{x} = (2,80 + 2,79 + 2,84 + 2,83) / 4 = 2,82.$

Средняя квадратичная погрешность отдельного измерения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(2,82 - 2,80)^2 + (2,82 - 2,79)^2 + (2,82 - 2,84)^2 + (2,82 - 2,83)^2}{4 - 1}} = 0,024$$

Средняя квадратичная погрешность среднего значения:

$$m = 0,024 / \sqrt{4} = 0,012.$$

Зададим доверительную вероятность $p=0,95$. По таблице Приложения 2 находим значения коэффициента Стьюдента при $n=4$ и $p=0,95$ – получим $t=3,2$. Величину случайной погрешности ΔX определим по формуле $\Delta X = m \cdot t = 3,2 \cdot 0,012 = 0,38 \approx 0,4$

Окончательный результат запишем в виде: $X = 2,82 \pm 0,04$ ($p=0,95$).

Точность измерительных приборов

Точностью измерительного прибора называется наименьшая величина, которую можно вполне надежно определять с помощью данного прибора.

Если точность прибора неизвестна, ее считают равной половине цены наименьшего деления шкалы прибора. Если измерения проводятся прибором, снабженным нониусом (штангенциркуль), то точность прибора принимается равной разности между ценой одного деления прибора и одного деления нониуса. Для электроизмерительных приборов погрешность измерения характеризуется классом точности в пределах от 0,05 до 4. Значение класса точности указывается на лицевой стороне прибора.

Классом точности k прибора называется выраженное в процентах отношение абсолютной погрешности Δx к наибольшему значению измеряемой величины x_{max} (предел измерения), которое можно определить данным прибором:

$$k = \frac{\Delta x}{x_{\max}} 100 \% \quad (10)$$

Зная класс точности и предел измерения прибора, можно рассчитать его абсолютную погрешность:

$$\Delta x = \frac{kx_{\max}}{100} \quad (11)$$

Погрешность одинакова для любого измерения, сделанного с помощью данного прибора.

Рассмотрим пример: Имеется амперметр с классом точности $k=1,5$ и пределом измерения 3А . Абсолютная погрешность прибора

$$\Delta I = \frac{kI_{\max}}{100} = \frac{1,5 \cdot 3}{100} = 0,045 \text{ А}.$$

Рассчитаем относительную погрешность для 3-х измерений тока: $I_1=0,5\text{А}$, $I_2=1,5\text{А}$, $I_3=2,5\text{А}$.

$$\frac{\Delta I}{I_1} = \frac{0,045}{0,5} 100\% = 9\% ;$$

$$\frac{\Delta I}{I_2} = \frac{0,045}{1,5} 100\% = 3\% ;$$

$$\frac{\Delta I}{I_3} = \frac{0,045}{2,5} 100\% = 1,8\% .$$

Из примера видно, что лучше выбирать для измерения такие приборы, чтобы отсчет показаний производился как можно ближе к концу его шкалы.

Погрешности при косвенных измерениях.

При косвенных измерениях точность выполнения серии опытов ограничивается погрешностями, допущенными при прямых измерениях величин, входящих в расчетную формулу.

Расчет погрешностей при косвенном измерении нельзя произвести так, как при прямом измерении. Из теории математической статистики следует, что если некоторая величина f является функцией других независимых величин x, y, z , которые могут быть определены прямыми измерениями, то ее абсолютная погрешность σ_f определяется абсолютными погрешностями $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ (для величин x, y, z соответственно) согласно выражению:

$$\sigma_f = \sqrt{\left\langle \frac{\partial f}{\partial x} \right\rangle^2 \sigma_x^2 + \left\langle \frac{\partial f}{\partial y} \right\rangle^2 \sigma_y^2 + \left\langle \frac{\partial f}{\partial z} \right\rangle^2 \sigma_z^2}. \quad (12)$$

Здесь $f=f(x,y,z)$, а $\left\langle \frac{\partial f}{\partial x} \right\rangle, \left\langle \frac{\partial f}{\partial y} \right\rangle, \left\langle \frac{\partial f}{\partial z} \right\rangle$ - частные производные функции f , вычисленные для средних значений ее переменных, т. Е. $\langle x \rangle, \langle y \rangle, \langle z \rangle$.

При этом наиболее достоверное (т. Е. среднее) значение величины f находится как:

$$\langle f \rangle = f(\langle x \rangle, \langle y \rangle, \langle z \rangle) \quad (13)$$

Используя соотношение (12, 13), в качестве примеров, ниже приводятся выражения для вычисления относительных погрешностей некоторых часто встречающихся величин, выражаемых соотношениями (здесь σ_x и σ_y – абсолютные погрешности отдельных измеряемых величин, а $\langle x \rangle, \langle y \rangle$ - средние значения величин).

Таблица 1.

Относительная погрешность

№п/п	Функциональная связь	Относительная погрешность
1	$\left. \begin{aligned} f &= x + y \\ f &= x - y \end{aligned} \right\}$	$\varepsilon = \frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}}{\langle x \rangle \pm \langle y \rangle}$
2	$\left. \begin{aligned} f &= x \cdot y \\ f &= \frac{x}{y} \end{aligned} \right\}$	$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sigma_x^2}{\langle x \rangle^2} + \frac{\sigma_y^2}{\langle y \rangle^2}}$
3	$f = x^n$	$\varepsilon = n \left(\frac{\sigma_x}{\langle x \rangle} \right)$
4	$f = e^x$	$\varepsilon = \sigma_x$
5	$f = \ln x$	$\varepsilon = \frac{\sigma_x}{\langle x \rangle \cdot \ln \langle x \rangle}$
6	$f = \sin x$	$\varepsilon = \sigma_x \cdot ctg \langle x \rangle$
7	$f = \cos x$	$\varepsilon = \sigma_x \cdot tg \langle x \rangle$

Зная среднее значение величины - $\langle f \rangle$ и относительную погрешность ее измерения ε , можно найти ее абсолютную погрешность по формуле:

$$\sigma_f = \langle f \rangle \cdot \varepsilon \quad (14)$$

Пример 1: Пусть при определении объема V цилиндра в результате пяти измерений высоты h цилиндра и диаметра D его основания были получены следующие значения:

h , см	12,2	12,8	12,7	12,2	12,6
D , см	2,0	4,7	5,2	4,9	4,8
V , см ³	240	222	263	230	228

По формуле $V = \frac{\pi h D^2}{4}$ вычислим значения объема для каждого из пяти измерений. Найдем среднее арифметическое значение объема:

$$\bar{V} = \frac{240+222+263+230+228}{5} = 237 \text{ см}^3$$

Вычислим среднюю квадратичную погрешность объема:

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{(240-237)^2 + (222-237)^2 + (263-237)^2 + (230-237)^2 + (228-237)^2}{5-1}} = 16,1 \text{ см}^3.$$

Найдя из приложения 2 значение параметра $t=2,8$, определим доверительный интервал $\Delta \bar{V} : \Delta \bar{V} = \frac{2,8 \cdot 16,1}{\sqrt{5}} = 20,1 \text{ см}^3$

Окончательный результат запишем в виде $V = (237 \pm 20) \text{ см}^3$ ($p = 0,95$).

Пример 2: Определение коэффициента поверхностного натяжения (КПН) жидкости α , по измерению абсолютного удлинения пружины динамометра $l = (b - a)$, при предварительно измеренных и заданных коэффициенте жесткости пружины динамометра k и общем периметре используемого кольца - $p = \pi(d_1 + d_2)$.

Основные соотношения: $\alpha = \frac{k \cdot l}{p}$, тогда согласно (12) - (14), получаем:

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\sigma_\alpha}{\langle \alpha \rangle} = \sqrt{\frac{\sigma_k^2}{k^2} + \frac{\sigma_l^2}{l^2} + \frac{\sigma_p^2}{p^2}},$$

где $\sigma_k, \sigma_l, \sigma_p$ - соответствующие абсолютные значения погрешностей величин k, l, p ; ε_α - относительная погрешность измерения КПН; $\sigma_\alpha = \varepsilon_\alpha \cdot \langle \alpha \rangle$ - абсолютная погрешность измерения КПН.

Выполнение лабораторных работ

До занятия

1. Изучить теоретический материал и методические указания к работе по учебнику, конспекту лекций.
2. Приготовить формуляр лабораторного отчета, содержащего:
 - оформленную титульную страницу (название работы, фамилию и группу, дату занятия);
 - цель работы, используемые приборы и принадлежности;
 - краткое описание метода измерений с расчетными формулами, схемой установки;
 - таблицы для внесения результатов измерений.

Во время занятия

3. Ответить на вопросы программированного контроля, получить допуск к выполнению работы.
4. Провести эксперимент. Результаты измерений записать в таблицы лабораторного отчета.
5. Проверить и подписать результаты измерений у преподавателя.
6. Провести расчеты, проанализировать результаты и сделать выводы. Оформить и сдать отчет.

Правила оформления отчета по выполненной лабораторной работе

Правильно составленный отчет состоит из следующих частей:

1. *Номер и название выполняемой работы.*
2. *Цель работы.*
3. *Используемые приборы.* Так как вместо отдельных приборов для измерений используются готовые установки, то здесь можно указать, что использует установка для измерений той или иной величины.
4. *Теоретическое введение* представляет собой краткий

конспект основных теоретических сведений и ответы на контрольные вопросы. В тексте правильно составленного конспекта будут содержаться ответы на все контрольные вопросы.

5. *Результаты измерений* заносятся в предварительно составленную таблицу. Результаты вычислений тоже заносятся в таблицу. Таблица не должна содержать пустых клеток. В отчет необязательно включать все вычисления. Достаточно привести одно-два, чтобы преподаватель смог оценить, насколько правильно выполнялись расчеты и указать на ошибку, если таковая имеется.

6. *Оценка погрешности измерений*. Результат, приведенный без погрешности, не имеет научной ценности.

7. *Вывод* пишется, исходя из целей выполненной работы. В нем обязательно должна содержаться информация о результате проведенных опытов и о соответствии практических и теоретических результатов. В выводе также записывается результат измерений с указанием точности (погрешности) измерений.

Лабораторная работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

Цель работы: изучение одномерного равноускоренного движения. Определение ускорения свободного падения.

Приборы и принадлежности: лабораторная установка.

Основание к выполнению лабораторной работы

1. Иметь краткий конспект теоретической части и практического выполнения работы.
2. Знать порядок выполнения лабораторной работы.

Основание к сдаче лабораторной работы

1. Иметь оформленный отчет с расчетами в системе единиц «СИ» и заполненной таблицей.
2. Ответить на контрольные вопросы.

Краткая теория

Механическое движение - это изменение с течением времени взаимного расположения тела или их частей. Траектория движения материальной точки - линия, описываемая этой точкой в пространстве. В зависимости от формы траектории движение может быть прямолинейным или криволинейным.

Криволинейным называют движение, траекторией которого является кривая линия. Прямолинейным называют движение, траекторией которого является прямая линия. По характеру изменения скорости движение может быть равномерным и ускоренным, замедленным. Если тело движется с постоянной скоростью $\vec{V} = const$, движение является равномерным. При этом ускорение тела равно нулю, а движение является прямолинейным. Если за любые равные промежутки времени скорость тела изменяется на одинаковую величину $\Delta\vec{V} = const$, движение называется равнопеременным. При этом ускорение тела отлично от нуля и не изменяется $\vec{a} = const$. Траекторией равнопеременного движения может являться как прямая, так и кривая линия. Если при прямолинейном движении с постоянным ускорением скорость тела с течением

времени уменьшается ($\Delta V < 0$), движение называется равнозамедленным. Если скорость тела с течением времени увеличивается ($\Delta V > 0$), движение называется равноускоренным.

Для описания движения в кинематике используют кинематические уравнения - уравнения зависимости физических величин (ускорения, скорости, радиус-вектора и пр.) от времени. Равноускоренное прямолинейное движение описывается векторными кинематическими уравнениями.

При ускорении $\vec{a} = const$: уравнение скорости $\vec{V} = \vec{V}_0 + \vec{a} t$;

уравнение радиус-вектора

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{V}_0 t + \frac{\vec{a} t^2}{2} .$$

Для скалярного описания равноускоренного прямолинейного движения достаточно одномерной системы координат, направленной вдоль вектора скорости тела $\vec{V}$. В этой системе координат движение тела описывается скалярными кинематическими уравнениями.

При ускорении $\vec{a} = const$: уравнение скорости $V = V_0 + at$;

уравнение координаты $x = v_0 t + \frac{at^2}{2}$; уравнение пути

$$S = v_0 t + \frac{at^2}{2} .$$

На любое тело, расположенное вблизи поверхности Земли, действует сила тяготения $\vec{F}$, под влиянием которой и в согласии со вторым законом Ньютона тело начнет двигаться с ускорением свободного падения $\vec{g}$. Таким образом, в системе отсчета, связанной с Землей, на всякое тело массой m действует сила:

$$\vec{P} = m \vec{g} , \quad (1.1)$$

называемой **силой тяжести**.

В физике применяется также понятие вес тела. Весом тела называют силу, с которой тело вследствие тяготения к Земли действует на опору или подвес, удерживающую тело от свободного падения. Вес тела проявляется только в том случае, если тело движется с ускорением, отличным от $\vec{g}$, т.е. когда на тело кроме силы тяжести действуют другие силы.

Для описания свободного падения выберем систему координат

(рис. 1.1) так, чтобы начало координат совпадало с начальным положением тела $x=h$, а координатная ось x была направлена вверх. Тогда скалярные кинематические уравнения имеют вид:

$$g = \text{const}; \quad v = gt; \quad S = x = \frac{gt^2}{2}.$$

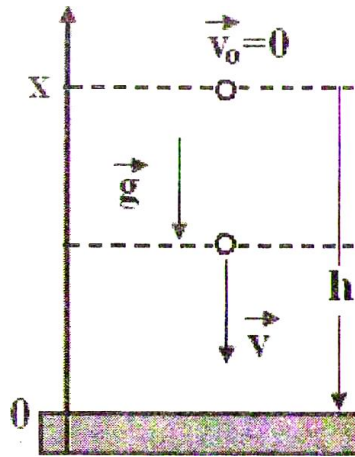


Рис. 1.1. Свободное падение тела

В момент падения на Землю с высоты h путь, пройденный телом, равен высоте, с которой оно упало, $S = h = \frac{gt_{\text{пад}}^2}{2}$. Тело упадет на Землю спустя время $t_{\text{пад}} = \sqrt{\frac{2h}{g}}$ после начала движения и будет иметь скорость $v = \sqrt{2gh}$.

Сила тяжести – одно из проявлений закона всемирного тяготения. Сила взаимного притяжения тел (гравитационная сила) действует между всеми телами независимо от их состояния и может быть определена из закона всемирного тяготения. Сила, с которой два тела притягиваются друг к другу, пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и направлены вдоль прямой соединяющей центры твердых тел

$$\vec{F} = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}, \quad (1.2)$$

где m_1, m_2 - массы взаимодействующих тел, r - расстояние между центрами масс взаимодействующих тел, γ - коэффициент пропорциональности, который называется гравитационной постоянной (постоянной всемирного тяготения), $\frac{\vec{r}}{r}$ - единичный

вектор.

Гравитационная постоянная численно равна силе притяжения между двумя телами массой 1 кг каждое, которые расположены на расстоянии 1 м друг от друга. Гравитационная постоянная в системе СИ равна $\gamma = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$. Если $m_1 = m_2 = 1 \text{ кг}$, $r = 1 \text{ м}$, то сила $F = \gamma$ - численно равна гравитационной постоянной.

Если пренебречь суточным вращением Земли вокруг своей оси, то сила тяжести и сила гравитационного тяготения равны между собой:

$$\gamma \frac{mM}{R^2} = mg, \quad (1.3)$$

где M - масса Земли, R - расстояние между центрами тел и Земли. Эта формула дана для случая, когда тело находится на поверхности Земли.

Отсюда можно найти

$$g = \gamma \frac{M}{R^2}, \quad (1.4)$$

Видно, что ускорение свободного падения которое сообщает телу Земля, не зависит от массы тела и, следовательно, оно одинаково для всех тел. Если учесть высоту тела над поверхностью планеты, то можно показать, что ускорение свободного падения уменьшается при удалении от поверхности планеты. Например, при подъеме на высоту 300 км над поверхностью Земли ускорение свободного падения уменьшится на 1 м/с^2 (на 10,2 % ускорения свободного падения у поверхности Земли).

Пусть тело расположено на высоте h от поверхности Земли, тогда

$$P = \gamma \frac{mM}{(R_0 + h)^2}, \quad (1.5)$$

т.е. сила тяжести с удалением от поверхности Земли уменьшается. R_0 - радиус Земли.

Поскольку на разных географических широтах сила тяжести одного и того же тела разная, то ускорение свободного падения меняется в зависимости от широты места. Ускорение сила тяжести на полюсе $g_n = 9,8322 \text{ м/с}^2$. На экваторе, где центробежная силы инерции направлена в сторону, противоположную силе притяжения, сила тяжести принимает минимальное значение и ускорение силы тяжести

$g_{экв}=9,7805 \text{ м/с}^2$. Ускорение силы тяжести на широте $\varphi = 45^\circ$ называется нормальным, оно равно $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$.

Все перечисленные значения ускорения силы тяжести относятся к определению этой величины над уровнем моря.

Закон тяготения Ньютона определяет зависимость силы тяготения от масс взаимодействующих тел и расстояния между ними, но не показывает, как осуществляется это взаимодействие. Гравитационное взаимодействие между телами осуществляется с помощью поля тяготения Земли или гравитационного поля. Ускорение свободного падения можно определить экспериментально, если бросить тело с известной высоты h , измерить время падения t , а затем вычислить по формуле ускорение:

$$g = \frac{2h}{t^2} \quad (1.6)$$

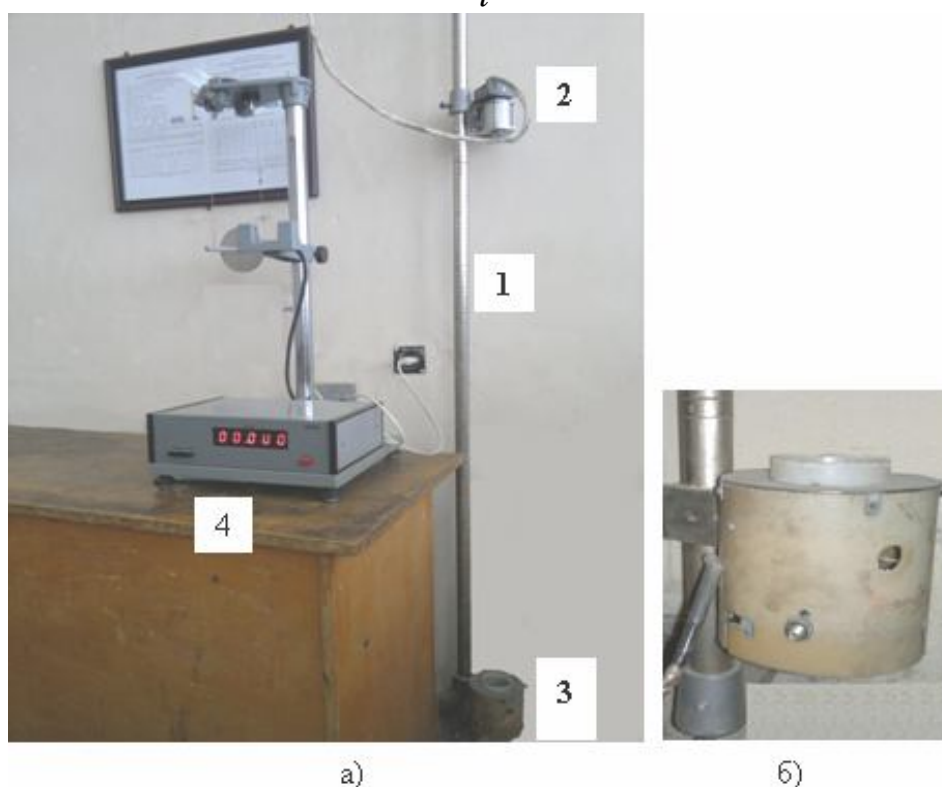


Рис. 1.2. а) - Общий вид установки: 1- штанга, 2 - электромагнит, 3 - ловушка для шариков; 4 - электрический секундомер; б) - ловушка для шариков показано крупным планом.

Но сопротивление воздуха при движении тел возрастает с увеличением их скорости. При малых скоростях сила сопротивления воздуха пропорциональна первой степени скорости. При больших скоростях движения тел из-за возникновения завихрений потоков

воздуха (турбулентности) сила сопротивления возрастает еще быстрее, пропорционально более высоким скоростям движения тела.

Если стальной шарик диаметром 2-3 см падает с небольшой высоты 1-2 м, то сопротивлением воздуха можно пренебречь и считать падение шарика свободным.

Установка для определения ускорения свободного падения (рис. 1.2) состоит из укрепленного строго вертикально на стене стержня с мерными делениями (штанга (1)), на котором крепятся электромагнит (2) и ловушка для шариков с заслонкой (3). Высоту падения шарика можно регулировать, перемещая электромагнит вдоль стержня. Время падения шарика определяется с помощью электрического секундомера (4). Он дает возможность измерить время падения шарика с точностью до сотых долей секунды.

Порядок выполнения работы

1. Установить электромагнит на нужной высоте.
2. Тумблер «Магнит» поставить в положение «Вкл». Затем включить тумблер «Секундомер».
3. Поднести шарик к магниту.
4. Рычагом вернуть стрелку секундомера в нулевое положение.
5. Отключить тумблер «Магнит». При этом размыкается цепь электромагнита и одновременно включается электросекундомер. Таким образом, начало падения шарика должно точно совпадать с началом отсчета времени электросекундомером. В конце своего падения шарик, коснувшись заслонки, размыкает цепь и останавливает секундомер. Записать показания секундомера.
6. Опыт проделать минимум для трех различных высот, пользуясь одним и тем же шариком. Для каждой высоты время падения измерить 3 раза.
7. Все результаты измерений и вычислений занести в таблицу 1.1.
8. По измеренному значению t в каждой серии опытов вычислить ускорение свободного падения с помощью формулы
$$g = \frac{2h}{t^2}.$$
9. Результат всей работы определяется как среднее значение $\bar{g}$ и $\Delta \bar{g}$ из 3 серий опытов на разных высотах h .

Таблица 1.1

№	h, m	t, c	t^2, c^2	$g, \frac{m}{c^2}$	$g_{ср}, \frac{m}{c^2}$	$\Delta g, \frac{m}{c^2}$	$\Delta g_{ср}, \frac{m}{c^2}$	$\varepsilon = \frac{\Delta g_{н\delta}}{g_{н\delta}} \cdot 100\%$

Контрольные вопросы:

1. Что такое ускорение свободного падения?
2. Сформулируйте закон всемирного тяготения.
3. Что называются силой тяжести и весом тела? Напишите их формулы.
4. От чего зависит ускорение свободного падения?

Лабораторная работа № 2.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ЮНГА МЕТОДОМ ИЗГИБА

Цель работы: определение модуля Юнга для деревянного бруска.

Приборы и принадлежности: деревянный стержень, чувствительный индикатор, набор грузов.

Основание к выполнению лабораторной работы

1. Иметь краткий конспект теоретической части и практического выполнения работы.
2. Знать порядок выполнения лабораторной работы.

Основание к сдаче лабораторной работы

1. Иметь окончательно оформленную работу с заполненными

- таблицами, расчетами, выполненными в СИ.
2. Ответить на контрольные вопросы:

Краткая теория

Прочностные характеристики растений являются одним из факторов, определяющих устойчивость растений к неблагоприятным погодным условиям. В селекционной работе необходимо учитывать, что увеличение урожайности сельскохозяйственных культур сопровождается соответствующими изменениями их прочности и упругости. Кроме того, для целого ряда сельскохозяйственных культур (лен, хлопок, древесина и др.) такие параметры, как модуль Юнга, предел прочности и т. д., имеют большое значение при определении их качества и влияют на дальнейшую переработку и эксплуатацию изделий из них. Используемые в пищевой промышленности сепараторы работают при больших скоростях вращения барабана. Развиваемые при этом центробежные силы вызывают высокие напряжения в материале, из которого изготовлены отдельные части барабана. Для расчета механических напряжений в нем используют значения модуля Юнга для материала, из которого изготовлен сепаратор.

Под действием внешних сил тела меняют форму и размер, т.е. составляющие их частицы смещаются друг относительно друга.

Изменение формы и размеров тела под действием внешних сил называется **деформацией**.

Все виды деформаций (растяжение, сжатие, сдвиг, изгиб, кручение) можно свести к деформации растяжения – сжатия. При изгибе верхняя часть работает на растяжение, нижняя – на сжатие. Средняя часть почти не оказывает сопротивления изгибу. Это обстоятельство учитывается в технике и находит отражение в природе. Например, стебли злаковых растений и кости птиц имеют трубчатое строение, неокрепшие листья бывают свернуты трубкой. Части аппаратов пищевых производств также испытывают различные виды деформации: вал пресса для отжима сока испытывает деформацию кручения, части транспортера для фасовочных устройств – деформацию растяжения и сжатия.

Если после снятия деформирующей силы тело восстанавливает свою первоначальную форму, то такая деформация называется **упругой**, если же не восстанавливает – **остаточной**.

Деформация приводит к возникновению внутри тела упругих сил. Природа их определяется характером межатомных и молекулярных сил. Изменение межатомных расстояний приводит к появлению сил отталкивания или притяжения между атомами. Эти упругие силы равны по величине внешним силам, но направлены в противоположную сторону.

Происходящие в образцах деформации подчиняются **закону Гука**, который выполняется только для упругих деформаций (т. е. когда сила упругости не очень велика):

$$F_y = -k \cdot \Delta l, \quad (2.1)$$

где F_y – сила упругости, k – коэффициент жесткости (например, пружины), Δl – изменение длины тела.

Из рис.5 $F_y = -F$, где F – деформирующая сила, то закон Гука запишется

$$F = k \cdot \Delta l. \quad (2.2)$$

Закон Гука для абсолютного удлинения формулируется так: *в пределах упругих деформаций силы упругости прямо пропорциональны величине деформации.*

Пусть к нижнему концу закрепленного стержня длиной l_0 и площадью поперечного сечения S приложена деформирующая сила F (рис. 2.1).

Стержень удлинится на Δl , и в нем возникнет сила упругости $F_y = -F$. Величину Δl , представляющую собой разность между конечной и начальной длинами стержня, называют абсолютным удлинением стержня:

$$\Delta l = l - l_0 \quad (2.3)$$

Эта величина не может служить мерой деформации, т. к. зависит от первоначальной длины стержня. Мерой деформации служит относительное удлинение ε , представляющее собой отношение абсолютного удлинения к первоначальной длине стержня (это безразмерная величина):

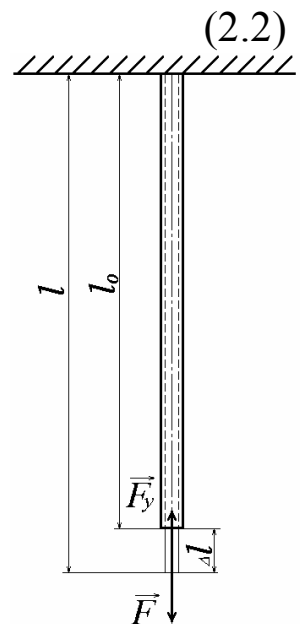


Рис. 2.1.
Деформация
стержня

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}. \quad (2.4)$$

Закон Гука для деформации одностороннего растяжения: относительное удлинение прямо пропорционально деформирующей силе и обратно пропорционально площади поперечного сечения стержня.

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \cdot \frac{F}{S}, \quad (2.5)$$

где E – коэффициент, характеризующий упругие свойства вещества и называемый модулем упругости, или модулем Юнга.

Отношение $\frac{F}{S} = \sigma$ называется **механическим напряжением**.

Тогда равенство (2.5) можно представить в виде:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \text{ или } \sigma = \varepsilon \cdot E \quad (2.6)$$

Чтобы выяснить физический смысл модуля Юнга, в формуле (2.4) полагая $\Delta l = l_0$, получим $\varepsilon = 1$ и $E = \sigma$, т.е. **модуль Юнга вещества равен механическому напряжению, при котором длина стержня растягивается вдвое.**

Модуль Юнга выражается в паскалях (Па). Фактическое удвоение длины можно получить у резины и ряда полимерных материалов. Другие материалы разрушаются раньше, чем длина образца удвоится.

Экспериментальная часть

В настоящей работе изучается только область упругих деформаций, которые возникают в стержне при его изгибе под действием нагрузки. Стрела прогиба будет тем больше, чем больше нагрузка, кроме того, она зависит от формы стержня, его размеров и материала, из которого он изготовлен.

Следует отметить, что когда длина тела увеличивается, то площадь его поперечного сечения несколько уменьшается, тем самым компенсируется удлинение. Если растяжение тела сравнительно невелико, то изменением площади можно пренебречь. Деформацию растяжения испытывают тросы подъёмных кранов канатных дорог, струны музыкальных инструментов. Сжатию подвергаются колонны,

стены, фундаменты, зданий.

Деформация изгиба возникает тогда, когда к стержню, один конец которого закреплен (рис. 2.2а) или к стержню, свободно лежащему на опорах (рис. 2.2б) приложена сила, перпендикулярная к его оси. И в том, и в другом случае стержень изгибается и характеристикой этой деформации может служить стрела прогиба λ . Измерив экспериментально стрелу прогиба стержня, можно вычислить модуль Юнга деформации изгиба.

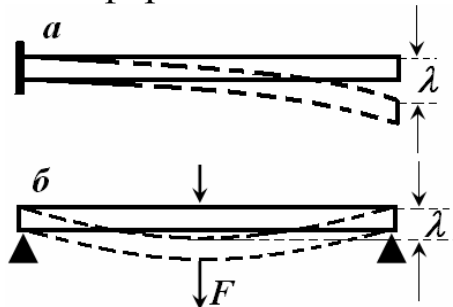


Рис. 2.2. Деформация изгиба

В лабораторной работе будет исследоваться изгиб стержня прямоугольного сечения, свободно лежащего на опорах (рис. 2.2б). В этом случае стрела изгиба определяется соотношением

$$\lambda = \frac{FL^3}{3BE}, \quad (2.7)$$

где L – длина стержня, E – модуль Юнга материала стержня, F – сила, действующая на середину стержня. Величина B определяется только формой сечения стержня и рассчитывается по формуле

$$B = \int_{b_1}^{b_2} a(x) \cdot x^2 dx, \quad (2.8)$$

Величины, входящие в эту формулу, поясняются на рис. 2.3а. Буквой O обозначен центр масс сечения стержня. Через него проходит нейтральный слой, который не испытывает деформацию сжатие-растяжение.

В данной работе используется стержень прямоугольного сечения (рис. 2.3б). Очевидно, что в этом случае центр масс сечения совпадает с его геометрическим центром и, следовательно, $b_1 = b_2 = \frac{b}{2}$. Здесь b – размер стержня в направлении действия нагрузки, иначе говоря, толщина стержня. Кроме того, очевидно, что величина a не

зависит от x (стержень имеет постоянную ширину). Теперь интеграл (2.8) вычисляется просто:

$$B = a \int_{-b/2}^{b/2} x^2 dx = a \frac{x^3}{3} \Big|_{-b/2}^{b/2} = \frac{ab^3}{12}, \quad (2.9)$$

Подставляя полученное выражение в (2.7), получим

$$\lambda = \frac{FL^3}{4ab^3 E}, \quad (2.10)$$

Зная стрелу прогиба λ , из выражения (2.10) можно найти модуль Юнга по формуле

$$E = \frac{FL^3}{4ab^3 \lambda}, \quad (2.11)$$

где F – сила, вызывающая деформацию (изгиба), L – длина стержня, a – ширина стержня, b – толщина (высота) стержня.

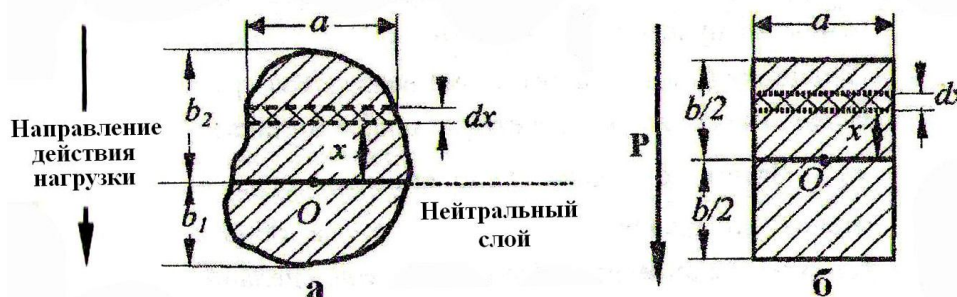


Рис. 2.3. Сечение стержня.

Прибор для определения стрелы прогиба (рис. 2.4.) представляет собой основание, к которому прикреплены опорные стальные призмы N_1 и N_2 так, что ребра их параллельны между собой. На этих призмах свободно лежит исследуемый стержень.

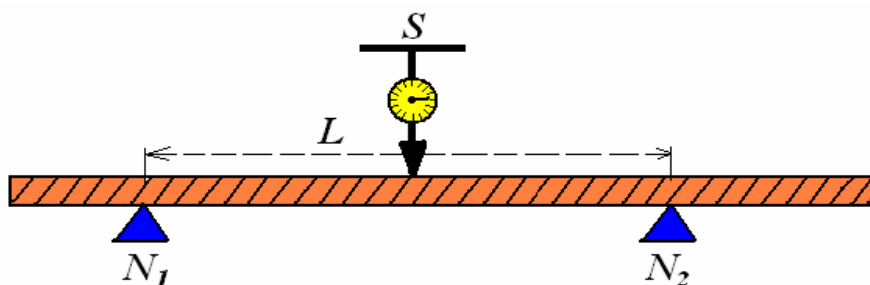


Рис. 2.4. Внешний вид установки.

Порядок выполнения работы

1. С помощью штангенциркуля в нескольких местах измеряются

ширина a и высота b стержня. Результат измерений заносим в таблицу.

2. Стержень обоими концами положим на твердые опоры и с помощью линейки измерим расстояние l между опорами N_1 и N_2 . Результат измерений заносим в таблицу.
3. Стержень устанавливается симметрично относительно призмы и на его середину устанавливают индикатор. Измеряют начальное показание индикатора n_0 без грузов.
4. На площадку индикатора последовательно ставят грузы массами **0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25 кг**, и записывают показания индикатора $n'_1, n'_2, n'_3, n'_4, n'_5$. Затем последовательно убирая грузы, записывают показания индикатора $n''_5, n''_4, n''_3, n''_2, n''_1$. После измерений для каждого груза находим средние значения показаний по формулам

$$n_1 = \frac{n'_1 + n''_1}{2}, \quad n_2 = \frac{n'_2 + n''_2}{2}, \quad n_3 = \frac{n'_3 + n''_3}{2}, \quad n_4 = \frac{n'_4 + n''_4}{2}, \quad n_5 = \frac{n'_5 + n''_5}{2}$$

5. Определяем стрелку прогиба λ с помощью формул.

$$\lambda_1 = |n_1 - n_0|, \quad \lambda_2 = |n_2 - n_0|, \quad \lambda_3 = |n_3 - n_0|, \quad \lambda_4 = |n_4 - n_0|, \quad \lambda_5 = |n_5 - n_0|$$

6. По формуле $E = \frac{Fl^3}{4\lambda ab^3}$ рассчитаем Модуль Юнга. При этом введем

следующее обозначение $C = \frac{l^3}{4ab^3}$. Тогда формула для модуля

Юнга примет вид $E = C \frac{F}{\lambda}$.

Вычисленные значения E заносят в таблицу.

№	a , мм	b , мм	L , мм	F , кГ	n' , мм	n'' , мм	$n_{\text{ср}}$, мм	λ , мм	E , кГ/мм ²	$E_{\text{ср}}$, кГ/мм ²	$ \Delta E $, кГ/мм ²	$\Delta E_{\text{ср}}$, кГ/мм ²	$\varepsilon = \frac{\Delta E_{\text{ср}}}{E_{\text{ср}}} \cdot 100\%$

7. Результат измерений и вычислений записываем в виде:.

$$E = E_{\text{ср}} \pm \Delta E_{\text{ср}}$$

Контрольные вопросы:

1. Деформации, виды деформаций и их физические

- характеристики. Упругость и пластичность.
2. Механическое напряжение и модуль Юнга.
 3. Закон Гука для абсолютной и относительной деформации.
 4. Силы упругости.

Лабораторная работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ГРУЗА НА МАЯТНИКЕ ОБЕРБЕКА

Цель работы: определение момента инерции твердого тела.

Приборы и принадлежности: диск металлический со шкивом закрепленных вместе, четыре массивных стержня, линейка, секундомер и набор грузов.

Основание к выполнению лабораторной работы

1. Иметь краткий конспект теоретической части и практического выполнения работы.
2. Знать порядок выполнения лабораторной работы.

Основание к сдаче лабораторной работы

1. Иметь оформленный отчет с расчетами в системе единиц «СИ» и заполненной таблицей.
2. Ответить на контрольные вопросы:

Краткая теория

При вращательном движении твердого тела вокруг неподвижной оси любые точки тела описывают окружности, лежащие в параллельных плоскостях. Центры этих окружностей расположены на одной прямой, называемой осью вращения. Вращательное движение тела вокруг закрепленной оси широко используется в различных аппаратах пищевых производств (центрифуги, мельницы, измельчители и др.), а также в молекулярной биологии, физической химии.

Известно, что инертные свойства тела при вращательном движении характеризует момент инерции.

Момент инерции I_i материальной точки массой m_i ,

находящейся на расстоянии r_i от оси вращения, численно равен произведению массы точки на квадрат этого расстояния:

$$I_i = m_i \cdot r_i^2. \quad (3.1)$$

Для вычисления момента инерции какого-либо тела его делят на множество достаточно малых i - элементов, каждый из которых может быть приближенно принят за материальную точку. Для каждого из этих элементов вычисляют момент инерции, сумма которых и составит момент инерции всего тела.

Моментом инерции тела относительно оси вращения называется физическая величина, равная сумме моментов инерции материальных точек, составляющих данное тело:

$$I = \sum_{i=1}^n m_i \cdot r_i^2. \quad (3.2)$$

В случае непрерывного распределения масс эта сумма сводится к интегралу:

$$I = \int r^2 \cdot dm = \int_V r^2 \cdot \rho \cdot dV, \quad (3.3)$$

где ρ – плотность вещества и интегрирование производится по всему объему тела – V .

Подобным образом вычисляются моменты инерции однородных тел правильной геометрической формы относительно оси, проходящей через центр масс этих тел. Рассмотрим в качестве примера несколько таких тел:

обруч, тонкостенный цилиндр радиусом R и массой m :

$$I_c = m \cdot R^2; \quad (3.4)$$

тонкий однородный круглый диск, круглый сплошной цилиндр радиусом R и массой m :

$$I_c = \frac{m \cdot R^2}{2}; \quad (3.5)$$

тонкий прямой стержень массой m и длиной l :

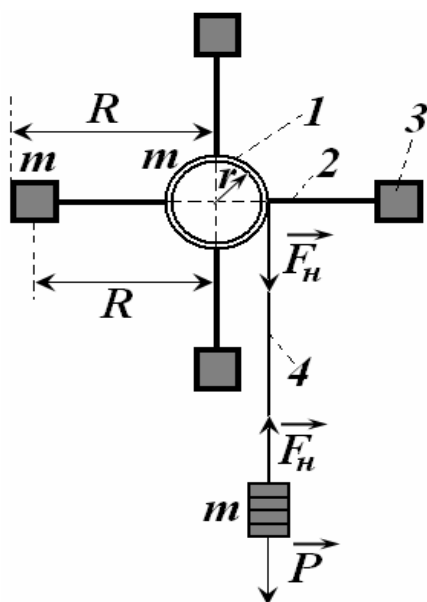
$$I_c = \frac{m \cdot l^2}{12}; \quad (3.6)$$

однородный сплошной шар массой m и радиусом R :

$$I_c = \frac{2 \cdot m \cdot R^2}{5}. \quad (3.7)$$

Момент инерции в СИ измеряется в $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Моменты инерции тел зависят от того, где проходит закрепленная ось вращения. Нахождение моментов инерции тела при параллельном произвольном переносе его оси вращения можно рассчитать, если воспользоваться **теоремой Штейнера**:



Момент инерции тела I относительно произвольной оси вращения равен его моменту инерции I_0 относительно оси вращения, параллельной данной и проходящей через центр массы тела, сложенному с произведением массы тела на квадрат расстояния d между параллельными осями.

$$I = I_0 + md^2.$$

(3.8)

Для тел неоднородных или сложной геометрической формы момент инерции обычно определяют опытным путем.

Рис. 3.1. Маятник Обербека

Экспериментальная часть

Основной закон динамики вращательного движения твердого тела, для которого $I = \text{const}$, запишется так:

$$\vec{M} = I \cdot \vec{\varepsilon}, \quad (3.9)$$

где, $\vec{M}$ - вращающий момент, I – момент инерции тела, $\vec{\varepsilon}$ - угловое ускорение.

В лабораторной работе по определению основных величин, характеризующих вращательное движение твёрдого тела, используется маятник Обербека (рис. 3.1). Основной частью прибора являются четыре стержня-спицы (2), которые жестко скреплены с металлическим шкивом (1) и расположены под прямым углом друг к другу. По стержням можно перемещать одинаковые по массе муфты (3). На шкив намотана нить (4), к которой привязана платформа известной массы. На платформу кладется груз, нить натягивается и создает вращающий момент:

$$M = F_n r \quad (3.10)$$

Силу F_n можно найти из уравнения движения платформы с

грузом:

$$mg - F_n = ma, \quad (3.11)$$

где m и a – масса платформы с грузом и ее ускорение, соответственно.

Используя (3.10) и (3.11), получим:

$$M = m(g - a)r$$

На маятник действует также момент силы трения в оси M_{mp} , тогда уравнение (3.9) примет вид:

$$m(g - a)r - M_{mp} = I\varepsilon = I \frac{a}{r}, \quad (3.12)$$

В уравнение (3.12) входит ускорение платформы, его можно определить из формулы $h = \frac{a \cdot t^2}{2}$ для пути ускоренного движения тела без начальной скорости (процесс падения груза) определим ускорение:

$$a = \frac{2 \cdot h}{t^2}, \quad (3.13)$$

где h – высота падения груза, t – время его падения.

В формулу (3.12) входит также неизвестная величина M_{mp} .

Момент инерции вращающейся системы может быть записан в виде:

$$I = I_0 + m_{cp}R^2, \quad (3.14)$$

где R – расстояние центров грузов m_{cp} от оси вращения.

Роль момента сил трения можно оценить так. Пусть маятник в начальный момент вращается с угловой скоростью ω_0 , тогда к моменту остановки он повернется на угол φ , определяемый соотношением:

$$\frac{1}{2}I\omega_0^2 = A_{mp} = M_{mp}\varphi, \quad (3.15)$$

где $\frac{1}{2}I\omega_0^2$ – начальная кинетическая энергия вращающегося маятника, A_{mp} – работа сил трения, M_{mp} – момент сил трения, определяемый по формуле:

$$M_{mp} = I \cdot \varepsilon_0, \quad (3.16)$$

где ε_0 – ускорение, определяемое только моментам сил трения. Из

(3.15) и (3.16) находим:

$$\omega_0^2 = 2\varepsilon_0\varphi, \quad (3.17)$$

Пусть n – полное число оборотов, которое делает маятник до остановки, а T_0 – период вращения маятника в начале движения.

Тогда

$$\varphi = 2\pi n, \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$$

Из формулы (3.17) получаем

$$\varepsilon_0 = \frac{\pi}{nT_0^2}, \quad (3.18)$$

Учитывая, что момент сил трения значительно меньше силы натяжения, из формулы (3.12) без учета сил трения момент инерции маятника будет определяться:

$$I = mr^2 \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right). \quad (3.19)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Измеряют штангенциркулем диаметр шкива, вычисляют его радиус r .
2. Вращая крестовину, поднимают площадку на высоту h над скамейкой и отмечают это расстояние.
3. На площадку массой **66 г** кладут грузик массой **$m_0=50$ г** и предоставляют площадке с грузиком падать. Определяют время падения t , для этого секундомер включают в момент начала падения и останавливают в момент удара площадки об скамейку.
4. Вычисляют момент инерции вращающейся системы по формуле

$$I = mr^2 \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right)$$

5. Опыт повторяют с грузами **100 г, 150 г, 200 г**. Результаты измерений и вычислений заносят в таблицу 1.

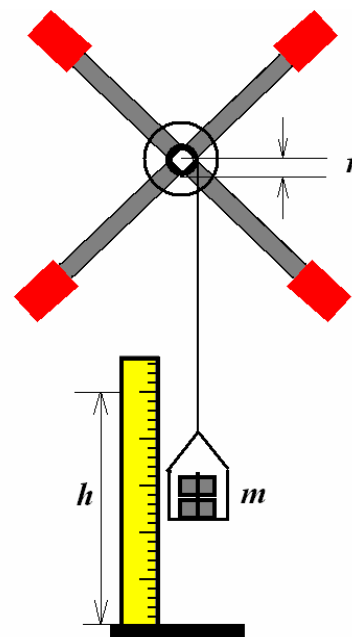


Рис. 3.2. Схематический вид установки

Вычисляют среднее значение момента инерции крестовины без грузов I_0 .

6. На концах крестовины закрепляют грузы так, чтобы крестовина была в безразличном равновесии, и повторяют опыт с грузиком m 4 раз. Каждый раз вычисляют момент инерции. Находят среднее значение момента инерции крестовины с грузами I .

7. Вычисляют абсолютную и относительную ошибки по формуле:

$$\Delta I_i = |I_{icp} - I_i|, \quad \eta = \frac{\Delta I_{cp}}{I_{cp}} \cdot 100\%.$$

Таблица 3.1.

Определение момента инерции крестовины без грузов

№	m , кг	r , м	h , м	t , с	I_0 , кг·м ²	I_{0cp}	ΔI_0	ΔI_{0cp}	η , %
1.									
2.									
3.									
4.									

Таблица 3.2.

Определение момента инерции крестовины с грузами

№	m , кг	r , м	h , м	t , с	I , кг·м ²	I_{cp}	ΔI	ΔI_{cp}	η , %
1.									
2.									
3.									
4.									

8. Момент инерции закрепленного на крестовину груза вычисляется по формуле.

$$I = \frac{1}{4} (I_{cp} - I_{0cp})$$

Контрольные вопросы:

1. Какое движение называется вращательным?

2. Что называется угловой скоростью и угловым ускорением?

Напишите их формулы.

3. Что называется моментом инерции материальной точки и твердого тела?

4. Дайте определение моменту силы. Напишите основные уравнения динамики вращательного движения материальной точки и твердого тела

5. По какой формуле рассчитывается кинетическая энергия вращающегося тела?

Лабораторная работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ТЕЛА С ПОМОЩЬЮ ТРИФИЛЯРНОГО ПОДВЕСА

Цель работы: определение момента инерции тела с помощью трифилярного подвеса и экспериментальная проверка теорема Штейнера

Приборы и принадлежности: трифилярный подвес; секундомер; штангенциркуль; набор исследуемых тел.

Основание к выполнению лабораторной работы

1. Иметь краткий конспект теоретической части и практического выполнения работы.
2. Знать порядок выполнения лабораторной работы.

Основание к сдаче лабораторной работы

1. Иметь оформленный отчет в установленном порядке.
2. Ответить на контрольные вопросы:

Краткая теория

Момент инерции тела является мерой его инертности при вращательном движении. Одним из методов экспериментального определения момента инерции твердого тела является метод крутильных колебаний с использованием трифилярного подвеса. Трифилярный подвес представляет собой круглую однородную платформу **Р**, подвешенную на трех симметрично расположенных нитях, закрепленных у краев платформы, как показано на рис. 4.1. Наверху эти нити также симметрично закреплены на верхней платформе **Р'**.

Если повернуть нижнюю платформу **Р** вокруг вертикальной оси на малый угол ($5 - 6^\circ$), возникает момент сил, стремящийся вернуть ее в положение равновесия. В результате платформа начнет совершать близкие к гармоническим крутильные колебания относительно вертикальной оси, перпендикулярной ее плоскости и проходящей через ее центр масс. Центр тяжести платформы при этом

будет перемещаться вдоль оси вращения, периодически поднимаясь и опускаясь.

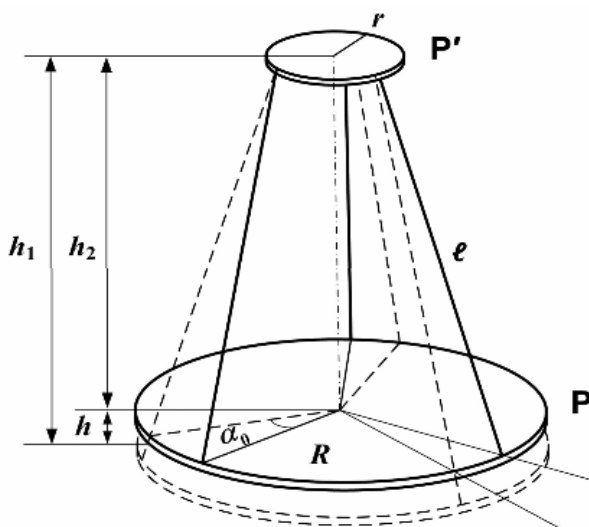


Рис. 4.1. Трифилярный подвес

На основании закона сохранения механической энергии для колеблющейся платформы можно написать следующее уравнение:

$$mgh = \frac{I_o \omega_{\max}^2}{2}, \quad (4.1)$$

где h – высота поднятия платформы; I_0 – момент инерции платформы; $\omega_{\max}$ – угловая скорость вращения платформы в момент прохождения ею положения равновесия, m – масса платформы P .

Из формулы (4.1) можно найти момент инерции I_0 . Для этого выразим h и $\omega_{\max}$ через параметры установки: длину нити l , радиусы платформ R и r , период колебания платформы T .

При повороте нижней платформы на угол α_0 ее центр тяжести поднимется на высоту $h = h_1 - h_2$, где h_1 – расстояние между нижней и верхней платформами в положении равновесия, h_2 – расстояние между платформами после поворота нижнего диска на угол α_0 .

Очевидно, что

$$h = \frac{Rr \alpha_0^2}{2l} \quad (4.2)$$

Зависимость угла поворота платформы от времени выражается формулой

$$\alpha = \alpha_0 \cos \frac{2\pi}{T} t,$$

где α_0 – начальный угол поворота; T – период крутильных

колебаний платформы.

Угловая скорость при таком движении равна производной по времени от угла поворота:

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt} = -\frac{2\pi\alpha_0}{T} \sin \frac{2\pi}{T}t = -\omega_{\max} \sin \frac{2\pi}{T}t, \quad (4.3)$$

где $\omega_{\max} = \frac{2\pi\alpha_0}{T}$.

Подставляя h из формулы (4.2) и $\omega_{\max}$ из формулы (4.3) в уравнение (4.1), получаем выражение для момента инерции платформы:

$$I_0 = \frac{2mgh}{\omega_{\max}^2} = \frac{mgRr}{4\pi^2 l} T^2 \quad (4.4)$$

Для определения момента инерции исследуемого тела воспользуемся свойством аддитивности момента инерции, которое состоит в том, что момент инерции системы тел относительно некоторой оси равен сумме моментов инерции каждого из тел системы относительно этой же оси.

Чтобы найти момент инерции тела, следует определить момент инерции платформы I , нагруженной телом, и момент инерции пустой платформы I_0 . Их разность и будет равна моменту инерции тела I_T :

$$I_T = I - I_0 \quad (4.5)$$

В случае, когда необходимо определить момент инерции I тела массой m относительно произвольной оси, применяют теорему Штейнера:

$$I = I_C - md^2, \quad (4.6)$$

где I_C – момент инерции тела относительно оси, параллельной данной и проходящей через центр масс тела; d – расстояние между осями.

Чтобы убедиться в справедливости теоремы (4.6), определим с помощью трифилярного подвеса момент инерции исследуемого тела и сравним эту величину с вычисленной по формуле (4.6). В

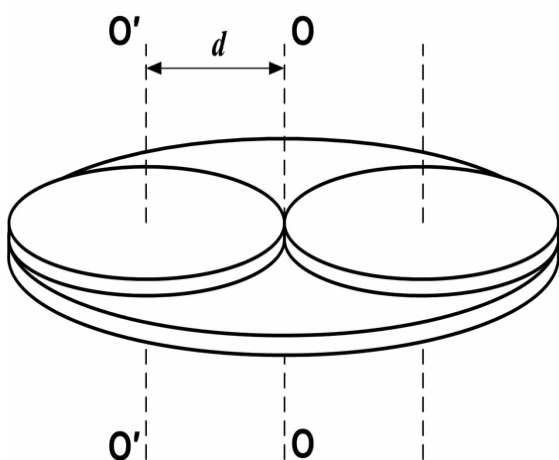


Рис. 4.2. Трифилярный подвес с двумя одинаковыми однородными дисками

качестве исследуемого тела возьмем однородный диск и определим его момент инерции относительно оси, касательной боковой поверхности диска и перпендикулярной к его основанию. Для этого расположим на нижней платформе трифилярного подвеса два одинаковых однородных диска так, чтобы они касались друг друга в центре платформы, как показано на рис. 4.2. Измерив момент инерции платформы с дисками I , можно найти момент инерции одного из них, исходя из свойства аддитивности момента инерции. Для этого разность I и момента инерции пустой платформы I_0 следует разделить на два:

$$I_{\text{д}} = \frac{I - I_0}{2} \quad (4.7)$$

Порядок выполнения работы

1. Измерить с помощью штангенциркуля толщину нижней платформы h .

2. Вычислить массу пустой платформы m_0 по формуле $m_0 = \rho \pi R^2 h$,

где ρ – плотность материала платформы (указана на установке).

3. Определить период колебаний T_0 пустой платформы. Для этого повернуть ее на малый угол $(5-6)^\circ$ относительно вертикальной оси и отпустить. С помощью секундомера измерить время t_0 для n колебаний и по формуле $T_0 = \frac{t_0}{n}$ вычислить период колебаний (n взять равным 10 – 30).

4. По формуле (4.4) вычислить момент инерции пустой платформы

$$I_0 = \frac{m_0 g R r}{4\pi^2 l} T_0^2$$

5. Поместить один из дисков массой m_1 на нижнюю платформу так, чтобы центр масс диска совпал с центром масс платформы. Измерив время t_1 для n колебаний нагруженной одним диском платформы, рассчитать период колебаний $\left(T_1 = \frac{t_1}{n}\right)$

6. Рассчитать момент инерции нижней платформы, нагруженной одним диском, по формуле

$$I_1 = \frac{(m_0 + m_1) g R r}{4\pi^2 l} T_1^2$$

7. Поместить два диска массой m_1 каждый на нижнюю платформу так, чтобы они касались друг друга в центре платформы (см. рис. 4.2). Измерив время t_2 для n колебаний, определить период колебаний платформы с двумя дисками $\left(T_2 = \frac{t_2}{n}\right)$

8. Рассчитать момент инерции нижней платформы, нагруженной двумя дисками, по формуле $I_2 = \frac{(m_0 + 2m_1)gRr}{4\pi^2 l} T_2^2$.

9. Вычислить момент инерции I_C одного диска массой m_1 в случае, когда ось вращения проходит через его центр масс перпендикулярно к плоскости основания диска, по формуле $I_C = I_1 - I_0$.

10. Вычислить момент инерции I одного диска массой m_1 в случае, когда ось вращения находится на расстоянии d от его центра масс (в данном случае d равно радиусу диска), по формуле $I = \frac{I_2 - I_0}{2}$.

11. Вычислить момент инерции $I_{ш}$ одного диска массой m_1 в случае, когда ось вращения находится на расстоянии d от его центра масс, по теореме Штейнера

$$I_{ш} = I_C - md^2 = \frac{3}{2} m_1 d^2$$

12. Рассчитать относительное отклонение момента инерции I от момента инерции $I_{ш}$ по формуле $\left(\frac{I - I_{ш}}{I_{ш}}\right) \cdot 100\%$

13. Найти относительную погрешность определения момента инерции

$$\frac{\Delta I_0}{I_0} \text{ пустой платформы.}$$

14. Сделать выводы.

№	Не нагружена				Нагружена телом				I_C	Нагружена телом				I	$I_{ш}$
	n_0	t_0	T_0	I_0	n	t	T	I		n_2	t_2	T_2	I_2		

Контрольные вопросы.

1. Сформулируйте теорему Штейнера.
2. Как можно определить момент инерции однородных тел правильной геометрической формы ?
3. Запишите формулы для момента силы и момента импульса.
4. Какие величины характеризуют инертность тела при поступательном и вращательном движениях?
5. Выведите формулу для момента инерции однородного стержня длиной l и массой m относительно оси, проходящей через его конец перпендикулярно стержню.

Лабораторная работа №5

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ.

Цель работы: изучение свободных колебаний маятника, определение ускорения свободного падения, момента инерции физического маятника относительно нескольких произвольных осей вращения

Приборы и принадлежности: математический маятник, физический маятник, секундомер, секундомер, линейка.

Основание к выполнению лабораторной работы

1. Иметь краткий конспект теоретической части и практического выполнения работы.
2. Знать порядок выполнения лабораторной работы.

Основание к сдаче лабораторной работы

1. Иметь оформленный отчет с расчетами в системе единиц «СИ» и заполненной таблицей.
2. Ответить на контрольные вопросы.

Краткая теория

Колебательные процессы, характеризующиеся повторяемостью во времени параметров физических величин, которые определяют движение или состояние, часто встречаются в окружающей среде.

Свойства повторяемости имеют, например, колебания маятника часов, струны или ножек камертона, корабля на волнах, молекул в твердом теле и т.д. Такие движения совершают также некоторые части технических приспособлений: поршни, клапаны, вращающиеся валы и др. Универсальность законов колебательных процессов позволяет с одной точки зрения трактовать разные по своей природе колебания, встречающиеся в физических явлениях, механизмах и машинах. Колебания, при которых состояние движения тела повторяется через равные промежутки времени, называются периодическими.

Колебательным движением называется движение, обладающее той или иной степенью повторяемости во времени.

Среди разнообразных колебательных движений отдельное место занимают гармонические колебания. При таких колебаниях физические величины, описывающие эти движения (например, отклонение от состояния равновесия, скорость, ускорение и т.д.), изменяются с течением времени по закону косинуса или синуса. Этот вид колебаний особенно важен, потому что в соответствии с учением о колебаниях любые периодические колебания, которые наблюдаются в природе и технике, можно представить как наложение нескольких гармонических колебательных движений. Таким образом, гармонические колебания являются простейшим видом колебательного движения.

Гармоническим колебанием называется периодическое колебательное движение, при котором координаты положения тела меняются во времени по закону синуса или косинуса.

Функция, описывающая гармоническое колебание, имеет вид:

$$x = A \cdot \sin(\omega t + \varphi) = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot t}{T} + \varphi\right) = A \cdot \sin(2\pi \nu t + \varphi), \quad (5.1)$$

где x – расстояние отклонения от положения равновесия материальной точки (тела) в любой момент времени, A – амплитуда колебания: наибольшее отклонение от положения равновесия, T – период колебания: время, в течение которого совершается одно полное колебание, $(\omega t + \varphi)$ – фаза колебания: величина, характеризующая положение и направление колеблющегося тела в любой момент времени, φ – начальная фаза колебания (отсчет

производится не от положения равновесия), ω – круговая (циклическая) частота, ν – частота колебаний (число колебаний в единицу времени).

Если начальная фаза равна 0, то уравнение (5.1) примет вид:

$$x = A \cdot \sin \omega t, \quad (5.2)$$

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

Гармонические колебания совершаются только при малых углах отклонения колеблющегося тела относительно положения равновесия. Известно несколько основных видов маятников, совершающих гармонические колебания (математический, физический, пружинный). В данной работе нас интересует физический маятник.

Наиболее точные измерения ускорения свободного падения выполняются с помощью косвенных методов. Многие из них основаны на использовании формул для периода колебаний математического и физического маятников.

Математическим маятником называется материальная точка массой m , подвешенная на невесомой нерастяжимой нити и совершающая колебания в вертикальной плоскости под действием силы тяжести.

Период колебаний математического маятника

$$T = 2\pi\sqrt{l/g}, \quad (5.3)$$

где l – длина маятника;

g – ускорение свободного падения.

Ускорение g можно вычислить, измерив T и l . Погрешность определения g в этом случае связана с тем, что реальный маятник, используемый в лабораторных условиях, может только с некоторым приближением рассматриваться как математический: чем больше l , тем точнее измерения.

Физическим маятником называется абсолютно твердое тело, совершающее колебания под действием силы тяжести вокруг горизонтальной оси, не проходящей через его центр тяжести (рис. 5.1).

Период колебаний физического маятника

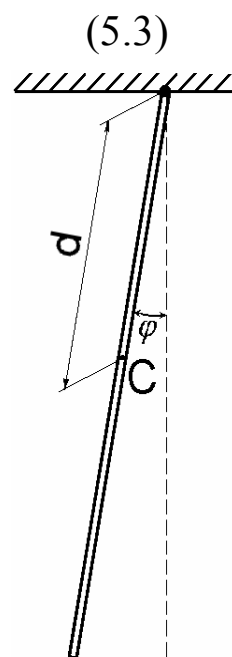


Рис.5.1

$$T = 2 \pi \sqrt{\frac{J}{mgl}} = 2 \pi \sqrt{\frac{L}{g}}, \quad (5.4)$$

где J – момент инерции маятника относительно оси (точки подвеса); m – его масса; l – расстояние от центра тяжести до точки подвеса.

Величину $L = J/(ml)$ называют **приведенной длиной физического маятника, которая равна длине такого математического маятника, период колебаний которого совпадает с периодом колебаний данного физического маятника.**

Зная T , m , и J по формуле (5.4) можно найти ускорение свободного падения g . Массу маятника и период его колебаний можно измерить с очень высокой точностью, большие затруднения вызывает точность измерения момента инерции. Указанного **недостатка лишен метод обратного маятника**, который позволяет исключить момент инерции из расчетной формулы для g .

Определение ускорения силы тяжести с помощью математического маятника

Ускорение свободного падения характеризует гравитационное поле Земли в каждой точке вблизи её поверхности. Экспериментально ускорение свободного падения можно определить с помощью математического маятника.

Математический маятник - это идеализированная система, состоящая из материальной точки массой m , подвешенной на нерастяжимой нити, и колеблющаяся под действием силы тяжести (рис. 5.2). Хорошим приближением математического маятника является небольшой тяжелый шарик, подвешенный на тонкой длинной нити.

Докажем, что колебания груза будут гармоническими при условии, что отклонения маятника φ от положения устойчивого равновесия (от вертикали) достаточно малы.

Шарик колеблется в вертикальной плоскости под действием тангенциальной составляющей силы тяжести $F = mg \sin \varphi$. Возвращающая сила всегда направлена к положению $\varphi=0$ и всегда направлена противоположно смещению. Смещение груза из положения равновесия по дуге s окружности радиуса l

пропорционально углу отклонения φ (выраженного в радианах):

$s = l\varphi$. Согласно второму закону Ньютона

$$m\ddot{s} = -mgl \sin \varphi. \quad (5.5)$$

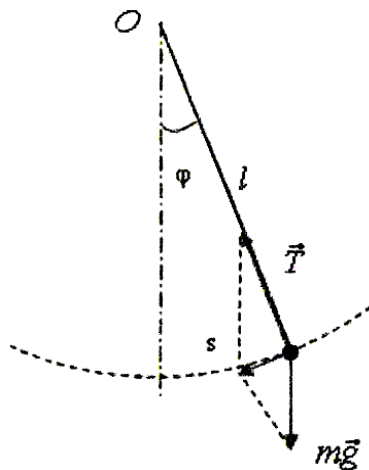


Рис. 5.2. Математический маятник

Так как l постоянная величина, то

$$\ddot{\varphi} + \frac{g}{l} \varphi = 0, \quad (5.6)$$

Так как правая часть пропорциональна не φ , а $\sin\varphi$, то колебание не будет являться гармоническими. Однако, если $\varphi < 5^\circ$, то в этом случае $\sin\varphi \approx \varphi$, где угол должен быть выражен в радианах. Тангенциальная составляющая силы тяжести становится квазиупругой силой, а колебание маятника становится гармоническим.

Циклическая частота маятника равна

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}, \quad (5.7)$$

Период малых колебаний маятника равен

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (5.8)$$

Другими словами, период и частота малых колебаний математического маятника зависят только от длины подвеса l и ускорения свободного падения. Поскольку период не зависит от массы груза, то все математические маятники одинаковой длины на данной широте будут иметь одинаковые периоды колебаний.

Математический маятник может быть использован для

выполнения точных измерений зависимости ускорения свободного падения от географической широты местности.

Из формулы (5.8) можно найти g :

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}. \quad (5.9)$$

Порядок выполнения работы

1. Вращая барабан, установить шарик на расстояние $l' = 60-70$ см. С помощью штангенциркуля определяют диаметр шарика и по формуле $l = l' + \frac{d}{2}$ находят длину маятника. Закрепить маятника стопорным винтом.

2. Отводят маятник от положения равновесия на небольшой угол (не больше 6°) и отпускают его. По секундомеру определяют время t для $n=20$ полных колебаний, причем время 20 полных колебаний измеряют не менее трех раз, а затем вычисляют период колебаний T : $T = \frac{t}{n}$

3. По формуле $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$ вычислить ускорение свободного падения.

4. Опыт повторить 3 раза для различного количества полных колебаний.

5. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 6.

6. Изменить длину маятника и повторить опыт согласно пунктам 1-7.

Таблица 1.

№	l , м	N	t , с	T , с	g , м/с ²	g_{cp}	$ \Delta g $	Δg_{cp}	η

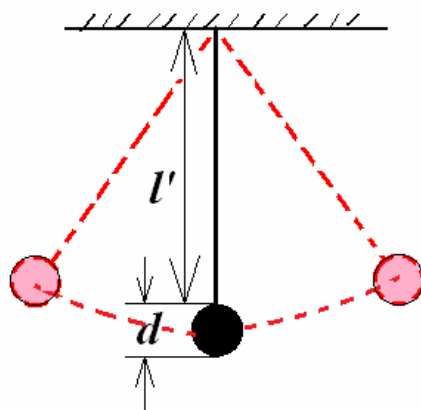


Рис. 5.3. Математический маятник

Определение момента инерции оборотного физического маятника

Физический маятник - это твердое тело, совершающее под действием силы тяжести колебания вокруг горизонтальной оси, проходящей через точку O , не совпадающую с центром масс C тела (рис. 5.3).

На рис. 5.4 схематически изображен физический маятник, совершающий малые колебания в гравитационном поле Земли относительно оси, проходящей через точку подвеса O .

Если маятник отклонен от положения равновесия на угол φ , то в соответствии с уравнением динамики вращательного движения твердого тела момент M возвращающей силы можно записать в виде:

$$M = I\varepsilon = -mgl \sin \varphi = -mgl\varphi, \quad (5.10)$$

где I - момент инерции маятника относительно оси O . l - расстояние между центром масс C и точкой подвеса. При малых углах отклонения $\sin \varphi = \varphi$.

Уравнение (5.10) можно записать в виде:

$$\ddot{\varphi} + \frac{mgl}{I} \varphi = 0. \quad (5.11)$$

Принимая, что $\frac{mgl}{I} = \omega_0^2$ получим уравнение:

$$\ddot{\varphi} + \omega_0^2 \varphi = 0. \quad (5.12)$$

Решение этого уравнения будет в виде

$$\varphi = \varphi_0 \sin(\omega_0 t + \alpha), \quad (5.13)$$

где φ_0 - амплитуда колебания, α - начальная фаза, ω_0 - циклическая частота.

Из (5.13) следует, что при малых колебаниях физический маятник совершает гармонические колебания с циклической частотой ω_0 и периодом

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgl}} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}, \quad (5.14)$$

где $L = \frac{I}{ml}$, приведенная длина физического маятника.

По теореме Штейнера момент инерции I может быть представлен в виде:

$$I = I_0 + ml^2, \quad (5.15)$$

где I_0 - момент инерции относительно оси, параллельной оси вращения и проходящей через центр инерции физического маятника.



Рис. 5.4. Общий вид физического маятника

Оборотные маятники в зависимости от предъявляемых к ним требованиям имеют самую различную форму. Они обычно состоят из металлического стержня, на поверхности которого нанесены деления. По стержню могут передвигаться и закрепляться в том или ином положении тяжелые и легкие чечевицы (грузы) и опорные призмы. Различные комбинации чечевиц и их положений на стержне с опорными призмами дают различные типы оборотных маятников.

В настоящей работе применяется оборотный маятник, изображенный на рис.5.4. Физический маятник выполнен в виде стержня, на котором закреплена треугольная ножевая опора путем добавления еще одного треугольного опорного ножа и двух чечевиц. Период колебания такого маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgl}}, \quad (5.16)$$

Откуда получим момент инерции

$$I_1 = \frac{T_1^2}{4\pi^2} mgl, \quad (5.17)$$

где l - расстояние от центра тяжести до точки опоры. Если маятник повернуть, то период его колебаний изменится, т.к. изменится момент инерции и расстояние от оси вращения до центра тяжести:

$$I_2 = \frac{T_2^2}{4\pi^2} mg(z-l), \quad (5.18)$$

z - расстояние между опорами (осями).

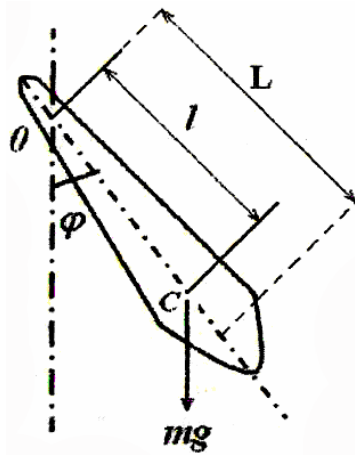


Рис. 5.5. Схематический вид физического маятника.

Из теоремы Штейнера имеем:

$$I_1 = I_0 + ml^2, \quad (5.19)$$

где I_0 - момент инерции относительно оси, проходящей через центр тяжести.

Для перевернутого маятника:

$$I_2 = I_0 + m(z-l)^2, \quad (5.20)$$

Вычитая из (5.20) выражение (5.19), получим:

$$I_2 - I_1 = m(z-2l)z, \quad (5.21)$$

Вычитая из (5.18) выражение (5.17) и сравнивая результат с формулой (5.21), имеем:

$$l = \frac{4\pi^2 z^2 - g z T_2^2}{8\pi^2 z - g(T_2^2 + T_1^2)}, \quad (5.22)$$

Определив l , нетрудно по формулам (5.18) и (5.17) вычислить моменты инерции относительно двух осей вращения I_2 и I_1 .

Порядок выполнения работы

1. Маятник подвешивается с помощью призмы “С” и отклоняется на угол $5^\circ - 6^\circ$ от положения равновесия. Затем с помощью секундомера измеряют время t 30 полных колебаний и находят период колебаний по формуле

$$T_1 = \frac{t_1}{n_1},$$

где n – число полных колебаний.

2. Маятник переворачивается и подвешивается с помощью призмы “D” и отклоняется на угол $5^\circ - 6^\circ$ от положения равновесия. Затем с помощью секундомера измеряют время t 30 полных колебаний и находят период колебаний по

$$T_2 = \frac{t_2}{n_2}$$

3. С помощью формулы (1) определяется расстояние от призмы до центра инерции (плечо маятника). Расстояние z между призмами **0.73 м**.

$$l = \frac{4\pi^2 z^2 - g z T_2^2}{8\pi^2 z - g(T_2^2 - T_1^2)}.$$

4. С помощью формул (2) и (3) определяются моменты инерции для двух положений физического маятника

$$I_1 = \frac{T_1^2}{4\pi^2} mgl, \quad I_2 = \frac{T_2^2}{4\pi^2} mg(z-l),$$

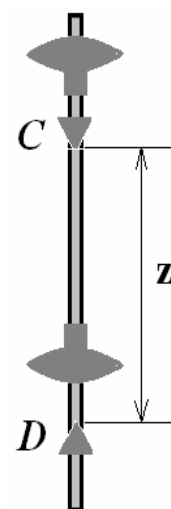


Рис. 5.6. Обратный маятник

Результаты измерений и расчетов записываются в следующую таблицу (**m=10 кг.**)

№	n_1	t_1, c	T_1, c	$\langle T_1 \rangle, c$	$\langle T_1^2 \rangle, c^2$	n_2	t_2, c	T_2, c	$\langle T_2 \rangle, c$	$\langle T_2^2 \rangle, c^2$	l, m	$I_1, кг \cdot м^2$	$I_2, кг \cdot м^2$
1													
2													
3													

Контрольные вопросы:

1. Какие колебания называются гармоническими? Напишите уравнение гармонического колебания.
2. Что такое фаза, период, частота и амплитуда колебания?
3. Что называется математическим маятником? По какой формуле определяется период его колебания?
4. Что называется физическим маятником? Чему равен период его колебания?

Лабораторная работа № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ МЕТОДОМ РЕЗОНАНСА

Цель работы: определение скорости звука в воздухе методом стоячей волны.

Приборы и принадлежности: звуковой генератор, стеклянная трубка с подвижным стержнем.

Основание к выполнению лабораторной работы

1. Иметь краткий конспект теоретической части и практического выполнения работы.
2. Знать порядок выполнения лабораторной работы.

Основание к сдаче лабораторной работы

1. Иметь оформленный отчет.
2. Ответить на контрольные вопросы:

Краткая теория

Колебания, возбужденные в какой-либо точке среды (твердой, жидкой или газообразной), распространяется в ней с конечной скоростью, зависящей от свойств среды, передаваясь от одной точки среды к другой. Чем дальше расположена частица среды от

источника колебаний, тем позднее она начнет колебаться.

Процесс распространения колебаний в сплошной среде называется **волновым процессом** или **волной**. При распространении волны частицы среды не движутся вместе с волной, а колеблются около своих положений равновесия. Вместе с волной от частицы к частице среды передаются лишь состояние колебательного движения и его энергия. Поэтому основным свойством всех волн, независимо от их природы, является перенос энергии без переноса вещества.

Среди разнообразных волн, встречающихся в природе и технике, выделяются следующие их типы: волны на поверхности жидкости, упругие и электромагнитные волны.

Упругими или механическими волнами называются механические возмущения, распространяющиеся в упругой среде. Упругие волны бывают **продольные** и **поперечные**. В продольных волнах частицы среды колеблются в направлении распространения волны, в поперечных — в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения волны.

В жидкостях и газах возникают только продольные волны, в твердых телах - как продольные, так и поперечные. Поверхности, до которых доходит колебание в некоторый момент времени, называются фронтом волны. Поверхности волны, в которых все частицы колеблются в одинаковой фазе, называются волновыми поверхностями. Волновых поверхностей можно провести бесчисленное множество, а волновой фронт в каждый момент времени - один. Волновой фронт также является волновой поверхностью.

Звуковыми или акустическими волнами называются распространяющиеся в среде упругие волны, обладающие частотами в пределах 16 - 20000 Гц. Волны указанных частот, воздействуя на слуховой аппарат человека, вызывают ощущение звука. Волны с $\nu < 16$ Гц (инфразвуковые) и $\nu > 20000$ Гц (ультразвуковые) органами слуха человека не воспринимаются.

Звуковые волны в газах и жидкостях могут быть только продольными, так как эти обладают упругостью лишь по отношению к деформациям сжатия (растяжения). В твердых телах звуковые волны могут быть как продольными, так и поперечными, так как твердые тела обладают упругостью по отношению к деформациям сжатия (растяжения) и сдвига.

Бегущими волнами называются волны, которые переносят в пространстве энергию. Если плоская волна распространяется в направлении x , то

$$y = A \cos \omega(t - \tau) = A \cos \omega\left(t - \frac{x}{v}\right), \quad (6.1)$$

где y - смещение колеблющейся точки, A - амплитуда волны, ω - циклическая частота, v - скорость распространения волны. Уравнение (6.1) есть уравнение бегущей волны, вдоль оси x .

Расстояние между ближайшими частицами, колеблющимися в одинаковой фазе, называется длиной волны λ . Длина волны равна тому расстоянию, на которое распространяется определенная фаза колебания за период, т.е.

$$\lambda = vT \quad (6.2)$$

или, учитывая, что $(\nu = \frac{1}{T})$, где ν - частота колебаний,

$$v = \lambda \nu, \quad (6.3)$$

Колебания частиц среды имеют ту же частоту, что и колебания источника волн.

Метод определения скорости звука основан на свойствах стоячей волны. Стоячие волны являются частным случаем интерференции волн. В среде могут распространяться одновременно звуковые колебания, исходящие из разных центров колебаний. Особый интерес представляет тот случай, когда две звуковые волны имеют одинаковую частоту (одинаковый период) колебаний и постоянную во времени разность фаз. Согласованное протекание во времени и пространстве нескольких колебательных или волновых процессов связывают с понятием когерентности. **Волны** называются **когерентными**, если разность их фаз остается постоянной во времени. Наложение когерентных волн приводит к явлению **интерференции**, заключающемуся в том, что в некоторых точках пространства наблюдается усиление звуковых колебаний, в других ослабление.

Стоячие волны — это волны, образующиеся при наложении двух бегущих волн, распространяющихся навстречу друг другу с одинаковыми частотами и амплитудами, а в случае поперечных волн и одинаковой поляризацией.

Для вывода уравнения стоячей волны предположим, что две плоские волны распространяются навстречу друг другу вдоль оси x в

среде без затухания, причем обе волны характеризуются одинаковыми амплитудами и частотами. Кроме того, отсчет времени начнем с момента, когда начальные фазы обеих волн равны нулю. Тогда соответственно уравнения волны, распространяющейся вдоль положительного направления оси x , и волны, распространяющейся ей навстречу, будут иметь вид:

$$y_1 = A \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right); \quad y_2 = A \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right), \quad (6.4)$$

Сложив эти уравнения и учитывая $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, получим уравнения стоячей волны:

$$y = y_1 + y_2 = A \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) + A \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) = 2A \cos \left(2\pi \frac{x}{\lambda} \right) \cos(2\pi vt), \quad (6.5)$$

Из уравнения стоячей волны (6.5) вытекает, что в каждой точке этой волны происходят колебания той же частоты ω с амплитудой $2A \cos \left(2\pi \frac{x}{\lambda} \right)$, зависящей от координаты x рассматриваемой точки.

В точках среды, где

$$2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm n\pi, \quad (n = 0, 1, 2, \dots), \quad (6.6)$$

амплитуда колебаний достигает максимального значения, равного $2A$. Эти точки называются пучностями стоячей волны.

В точках среды, где

$$2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm (2n + 1) \frac{\pi}{2}, \quad (n = 0, 1, 2, \dots), \quad (6.7)$$

амплитуда колебаний обращается в нуль. Эти точки называются узлами стоячей волны. Точки среды, находящиеся в узлах колебаний не совершает.

Из выражении (6.6) и (6.7) получим соответственно координаты пучностей и узлов:

$$x = \pm n \frac{\lambda}{2}, \quad (n = 0, 1, 2, \dots), \quad (6.8)$$

$$x = \pm (2n + 1) \frac{\lambda}{4}, \quad (n = 0, 1, 2, \dots), \quad (6.9)$$

Из формул (6.8) и (6.9) следует, что расстояние между двумя соседними пучностями и двумя соседними узлами одинаковы и равны:

$$x_{n+1} - x_n = [2(n+1)+1]\frac{\lambda}{4} - (2n-1)\frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda}{2}, \quad (6.10)$$

Расстояние между соседней пучностью и узлом стоячей волны равно $\frac{\lambda}{4}$:

$$(2n+1)\frac{\lambda}{4} - n\frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{4}, \quad (6.11)$$

Если после кратковременного действия внешней силы в системе устанавливаются колебания под действием внутренних сил, то колебания называются свободными, а частота колебаний - собственной частотой. Если на систему постоянно действует внешняя сила периодически меняющаяся, колебания называются вынужденными. Резонанс - это явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний в колебательной системе при приближении частоты внешней силы к частоте какой-либо из собственных колебаний данной колебательной системы. Вынужденными будут колебания в столбе воздуха при непрерывном излучении источника звука. Стоячие волны постоянного вида и максимальной амплитуды будут только тогда, когда частота звука, излучаемого источником, равна одной из собственных частот колебаний в столбе воздуха. Это и есть явление акустического резонанса.

Для проведения измерений в работе используется установка, изображенная на рис. 6.1.

Установка для определения скорости звука состоит из генератора звуковой частоты (ЗГ), микрофона (М), стеклянной цилиндрической трубки (СТ) с подвижным поршнем (П) (рис. 6.1).

Чтобы наблюдать акустический резонанс, надо, смещая поршень, подобрать такую длину воздушного столба, чтобы частота собственных колебаний равнялась частоте источника звука. При этом слышится усиление звука. Расстояние, на которое смещается поршень между двумя последними усилениями звука, равно $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ и называется **длиной стоячей волны**.

Работа заключается в определении длины звуковой волны и последующем вычислении скорости звука. Частота колебаний задается звуковым генератором.

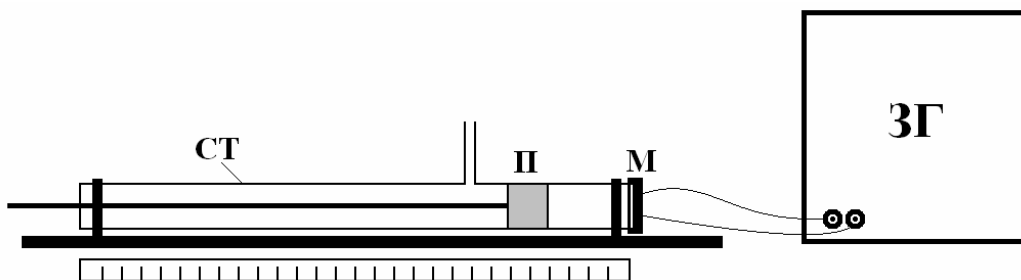


Рис. 6.1. Общий вид установки для измерения скорости звука.

Порядок выполнения работы:

1. Звуковой генератор (ЗГ) включается в сеть и устанавливается максимальная интенсивность звука.

2. Устанавливается частота **1000 Гц** с помощью ручки генератора, а диапазон частот в интервале **0-5 кГц**.

3. Двигая поршень **П**, добиваются максимальной интенсивности звука в двух-трех местах цилиндра и записывают показания длин L_i , считая от динамики до поршня с помощью линейки.

4. Расстояние между соседними максимальными интенсивностями звука L_2-L_1 и L_3-L_2 равно половине длины волн, т. е.

$$L_n - L_{n-1} = \frac{\lambda}{2}, \text{ отсюда } \lambda = 2(L_n - L_{n-1})$$

5. Также при частоте **1000 Гц** можно находить минимальные интенсивности звука и повторять пункты 3–4 и записать показания L' .

6. Пункты 3–5 повторяются для частот **1500 Гц** и **2000 Гц** и определяются длины волн.

7. Определяется скорость звука v для измеренных частот по формуле

$$v = \nu \lambda = 2\nu (L_n - L_{n-1}),$$

и рассчитываем среднее значение скорости звука по формуле:

$$v_{cp} = \frac{v_1 + v_2 + v_3}{3}$$

8. Окончательный результат для скорости звука представить в виде

$$v = v_{cp} \pm \Delta v$$

9. Измерения и вычисления заносят в таблицу 6.1.

Таблица 6.1.

№	$\nu, \text{Гц}$	$L, \text{м}$	$\lambda, \text{м}$	$\nu, \text{м/с}$	$\nu_{\text{срт}}, \text{м/с}$	$\Delta \nu, \text{м/с}$	$\Delta \nu_{\text{ср}}, \text{м/с}$	$\varepsilon = \frac{\Delta \nu_{\text{ср}}}{\nu_{\text{ср}}} \cdot 100\%$
1	1000							
2								
3								
1	1500							
2								
3								
1	2000							
2								
3								

Контрольные вопросы.

1. Дайте определение бегущей волны и напишите ее уравнение.
2. Объясните связь скорости с длиной волны.
3. Какую волну называют стоячей? Объясните процесс ее образования, напишите уравнение стоячей волны.
4. Дайте определение свободных и вынужденных колебаний.
5. Дайте определение и объясните явление акустического резонанса.
6. Объясните метод определения длины волны с помощью акустического резонанса.

Лабораторная работа № 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

Цель работы: определение коэффициента динамической вязкости вакуумного масла.

Приборы и принадлежности: цилиндр с вакуумным маслом, секундомер, свинцовые шарики, микрометр, вискозиметры.

Основание к выполнению лабораторной работы

1. Иметь краткий конспект теоретической части и практического выполнения работы.
2. Знать порядок выполнения лабораторной работы.

Основание к сдаче лабораторной работы

1. Иметь оформленный отчет, расчеты, сделанные в СИ, оценки погрешностей и выводов.
2. Ответить на контрольные вопросы.

Краткая теория

Наличие вязкости в жидкости приводит к тому, что при движении жидкости в направлении по трубе скорости движения у стенок трубы минимальна, а вдоль оси трубы максимальна. При малых скоростях потока скорость движения жидкости в направлении поперечного сечения меняется непрерывно, смешивание жидкости между слоями практически отсутствуют, взвешенные частицы в таком потоке движутся по гладким кривым. Такие потоки жидкостей называют **ламинарными**, слоистыми. Если в потоке скорости движения жидкости в каждой точке остаются постоянной во времени, то движение жидкости становится **стационарным**. Естественно, в различных точках стационарного режима скорости могут существенно отличаться.

Если в стационарном потоке имеется какое-либо тело и скорость потока незначительно, то действующая на тело сила, стремящаяся, увлечь тело в движение, характеризуется только силами трения в жидкости: тонкий слой у поверхности тела остается неподвижным, следующий слой по мере удаления от поверхности тела движется с возрастающей скоростью. По крайней мере, вблизи любого тела скорость потока изменяется, изменяется и импульс части движущейся жидкости. Это изменение импульса характеризуется силами, с которыми тело действует на движущуюся жидкость. По третьему закону Ньютона, точно с такой же силой, движущаяся жидкость действует на тело. При этом совершенно не важно, что жидкость движется относительно неподвижного тела, или тело в неподвижной жидкости. Важна здесь относительная скорость жидкости относительно тела. Указанная выше сила и является силой трения тела, движущегося в жидкости.

При больших скоростях жидкость начинает интенсивно перемешиваться, скорость движения жидкости в одних и тех же точках потока быстро меняется, в отдельных частях потока образуются вихри. Такое движение называют турбулентным.

Внутреннее трение (вязкость) – это свойство реальных жидкостей (или газов) благодаря которому выравнивается скорость движения различных слоев. Вязкость проявляется в том, что возникающее в жидкости движение после устранения причин его вызывающих, постепенно прекращается.

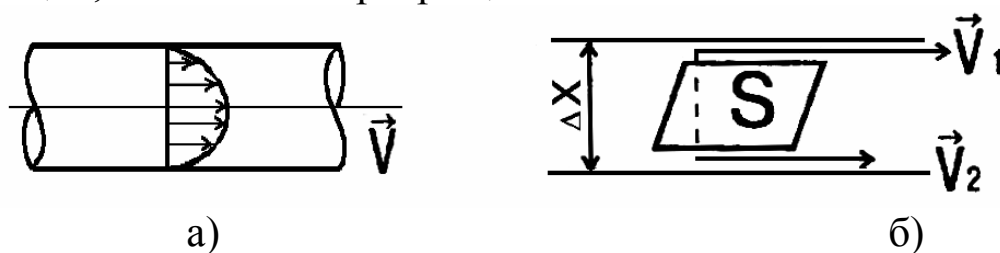


Рис. 7.1. Течение жидкости в трубе. а) под давлением вдоль движения; б) скорость движения разных слоев

Внутреннее трение относится к явлениям переноса. Рассмотрим медленное течение жидкости в трубе под действием постоянной внешней разности давлений, направленной вдоль движения (рис. 7.1. а). Скорости движения разных слоев в ней будут неодинаковы: наибольшее ее значение в центре и минимальное (близкое к нулю) – у стенок (рис. 7.1. б).

Это связано с тем, что, наряду с направленным движением вдоль трубы, молекулы жидкости из-за хаотического (теплового) движения переходят из слоя в слой.

При таком переходе происходит перенос импульса направленного движения из слоя в слой, что приводит к ускорению слоя, движущегося более медленно, и замедлению слоя, движущегося быстрее.

Сила внутреннего трения, возникающая при относительном перемещении слоев жидкости, определяется **формулой Ньютона**:

$$F_{TP} = -\eta S \frac{\Delta v}{\Delta x}, \quad (7.1)$$

где η – коэффициент внутреннего трения (динамической вязкости) жидкости, $\frac{\Delta v}{\Delta x}$ – градиент скорости – векторная величина, направленная перпендикулярно вектору скорости и показывающая

изменение скорости на единице расстояния между слоями (рис. 7.1. б), измеряется в c^{-1} , S – площадь соприкасающихся слоев.

Из (7.1) следует:

$$\eta = \left| \frac{F_{TP}}{\frac{\Delta v}{\Delta x} S} \right|. \quad (7.2)$$

Для выяснения физического смысла коэффициента η подставим в уравнении (7.2) $\frac{\Delta v}{\Delta x} = 1 \text{ c}^{-1}$, а $S = 1 \text{ м}^2$.

Тогда $\eta = |F_{TP}|$, т. е. **коэффициентом динамической вязкости** называется физическая величина, численно равная силе внутреннего трения, действующей на единицу площади соприкасающихся слоев, при градиенте скорости равном 1 (единице).

В системе «СИ» коэффициент динамической вязкости измеряется в $[\text{Па} \cdot \text{с}]$.

Экспериментальная часть

При небольших скоростях движения тело в жидкостях, как было показано Стоксом, силы трения пропорциональны этим скоростям и первой степени поперечных размеров тела. В частности, при движении шара эта сила равна:

$$f = 6\pi\eta r \vartheta, \quad (7.3)$$

где ϑ – скорость его падения, r – радиус шара. Формула (7.3) называется законом Стокса.

Коэффициент динамической вязкости может быть измерен **методом Стокса**, который основан на измерении скорости шарика, равномерно падающего в вязкой среде.

На шарик, свободно падающий в вязкой среде, действуют следующие силы (рис. 7.2):

1) сила тяжести шарика:

$$F = mg = \rho_2 V g = \frac{4\pi r^3 \rho_2 g}{3}, \quad (7.4)$$

где m – масса шарика, g – ускорение силы тяжести, ρ_2 – плотность материала шарика, V – объем шарика, r – радиус шарика;

2) выталкивающая сила Архимеда:

$$F_A = \rho_1 V g = \frac{4\pi r^3 \rho_1 g}{3}, \quad (7.5)$$

где F_A – равна весу вытесненной шариком жидкости, $\frac{4\pi r^3}{3}$ – объем вытесненной шариком жидкости, ρ_l – плотность жидкости;

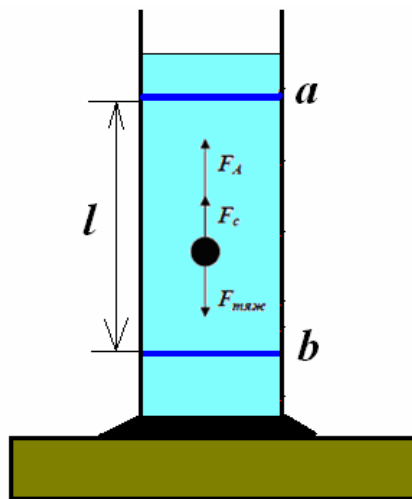


Рис. 7.2. Схематический вид установки

3) сила сопротивления движению (сила Стокса), обусловленная силами внутреннего трения между слоями жидкости, которая для малых скоростей падения небольших шарообразных тел, как показал Стокс, равна:

$$F_c = 6 \pi r \eta v, \quad (7.6)$$

где v – скорость падения шарика, r – радиус шарика.

Вначале шарик движется ускоренно, но по мере увеличения скорости падения шарика сила сопротивления F_c будет тоже возрастать, и наступит такой момент, когда сила тяжести уравнивается выталкивающей силой и силой сопротивления:

$$F = F_c + F_A. \quad (7.7)$$

Движение шарика станет равномерным.

Подставляя в (7.7) соответствующие значения (7.4), (7.5) и (7.6), получим

$$\frac{4\pi r^3 \rho_2 g}{3} = \frac{4\pi r^3 \rho_1 g}{3} + 6\pi r \eta v$$

или

$$6\pi r \eta v = \frac{4\pi r^3 \rho_2 g}{3} - \frac{4\pi r^3 \rho_1 g}{3} \quad (7.8)$$

Из уравнения (7.8) определим коэффициент динамической вязкости

$$\eta = \frac{[2gr^2(\rho_2 - \rho_1)]}{9\nu} = \frac{gd^2(\rho_2 - \rho_1)t}{18 \cdot h}. \quad (7.9)$$

где $d = 2r$ – диаметр шарика, h – расстояние его падения по вертикали.

В формуле (7.9) выражение

$$C = \frac{[g(\rho_2 - \rho_1)]}{18 \cdot h} \quad (7.10)$$

постоянное, поэтому рабочая формула приобретает вид

$$\eta = C \cdot d^2 \cdot t. \quad (7.11)$$

Порядок выполнения работы

1. Измерить диаметры 7–10 шариков с помощью микрометра.

2. Установить метки a и b на цилиндре и измерить расстояние l между ними по миллиметровой линейке (глаз при наблюдении должен находиться на одной горизонтали с меткой). После чего отпускаем шарик.

3. Измеряем с помощью секундомера время падения шарика t между лотками a и b .

4. Измерения повторить для каждого шарика.

5. С помощью формулы $C = \frac{1}{18}(\rho_{ш} - \rho_{ж})\frac{g}{l}$ вычисляется коэффициент C ($\rho_{ш}=7.85 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{ж}=1.26 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$).

6. С помощью формулы $\eta = Ctd^2$ вычисляется коэффициент внутреннего трения и все данные заносятся в таблицу 7.1.

Таблица 7.1.

$N_{\text{ш}}$	$\rho_{ш}, \text{ кг/м}^3$	$\rho_{ж}, \text{ кг/м}^3$	$l, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$d^2, \text{ м}^2$	$t, \text{ с}$	$\eta, \text{ кг/(м} \cdot \text{с)}$	$\eta_{\text{ср}}, \text{ кг/(м} \cdot \text{с)}$	$\Delta\eta, \text{ кг/(м} \cdot \text{с)}$	$\Delta\eta_{\text{ср}}, \text{ кг/(м} \cdot \text{с)}$	$\varepsilon = \frac{\Delta\eta_{\text{ср}}}{\eta_{\text{ср}}} \cdot 100\%$

7. Результат измерений и вычислений записываем в виде:

$$\eta = \eta_{\text{ср}} \pm \Delta\eta_{\text{ср}}$$

Контрольные вопросы.

- 1) Как записывается уравнение Ньютона для внутреннего трения?
- 2) Каков физический смысл коэффициента динамической вязкости? В каких единицах он измеряется?
- 3) Записать формулу силы Стокса.
- 4) От чего зависит сила трения при движении тел шарообразной формы в вязкой среде?
- 5) Какие силы действуют на падающий в вязкой среде шарик и каков характер движения шарика?

Лабораторная работа № 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ

Цель работы: определение коэффициента поверхностного натяжения (КПН) дистиллированной воды при комнатной температуре.

Приборы и принадлежности: чашка с водой, алюминиевые кольца, пружинный динамометр, линейка, капельница, аналитические весы.

Основание к выполнению лабораторной работы

1. Иметь краткий конспект теоретической части и практического выполнения работы.
2. Знать порядок выполнения лабораторной работы.

Основание к сдаче лабораторной работы

1. Иметь отчет о данной лабораторной работе с заполненными таблицами и графиками.
2. Ответить на контрольные вопросы:

Краткая теория

На молекулы жидкости, расположенные на ее поверхности со стороны других молекул, действуют силы, направленные внутрь жидкости, вследствие чего поверхностный слой жидкости производит

на остальные слои молекулярное давление, в результате которого жидкость принимает такую форму, чтобы поверхность ее была наименьшей при данном объеме (роса в форме шарика).

Напряженное состояние поверхностного слоя жидкости называется **поверхностным натяжением** и вызвано силами притяжения между молекулами этого слоя.

Сумма сил притяжения, действующих на контур, ограничивающий поверхность жидкости, называется **силой поверхностного натяжения**. Отношение силы поверхностного натяжения, действующей на контур, ограничивающий поверхность жидкости, к длине этого контура называется **коэффициентом поверхностного натяжения (КПН)**:

$$\alpha = \frac{F}{l}. \quad (8.1)$$

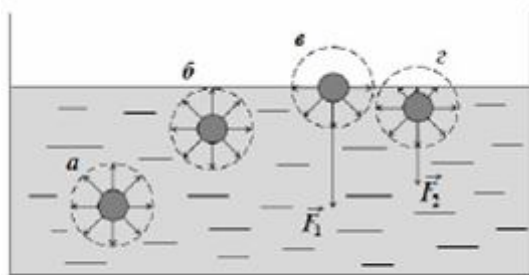


Рис. 8.1. Взаимодействие молекул жидкости

Измеряется коэффициент поверхностного натяжения в Н/м.

При растяжении поверхности жидкости из глубины жидкости извлекаются молекулы, совершается работа против молекулярных сил, потенциальная энергия поверхности жидкости увеличивается. При уменьшении поверхности молекулярные силы сами совершают работу по затягиванию молекул внутрь и потенциальная энергия поверхности уменьшается. Эта энергия называется **свободной энергией поверхности жидкости W** . КПН может быть определен как отношение свободной энергии поверхности жидкости к площади этой поверхности и измеряется в $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$,

$$\alpha = \frac{W}{S}. \quad (8.2)$$

Величина КПН меняется от находящихся в жидкости примесей. Вещества, ослабляющие поверхностное натяжение, называются **поверхностно активными веществами (ПАВ)** (нефть, спирт, эфир, мыло). Соль и сахар увеличивают силу поверхностного натяжения. На действии ПАВ основан метод борьбы с малярийными комарами, личинки которых тонут, если поверхность зараженного водоема полита нефтью, ослабляющей поверхностное натяжение.

Молекулы жидкости взаимодействуют не только друг с другом, но и с молекулами твердых тел. Если взаимодействие между молекулами самой жидкости больше взаимодействия между молекулами жидкости и твердого тела, то такая жидкость будет несмачивающей (рис. 8.2. а). Если же силы взаимодействия между молекулами жидкости и твердого тела больше сил взаимодействия между молекулами самой жидкости, то жидкость будет смачивающей (рис. 8.2. б).

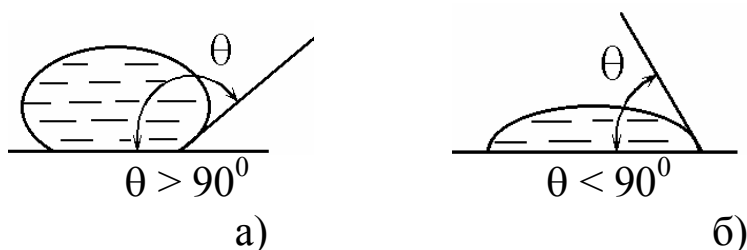


Рис. 8.2.

Листья и стебли растений покрыты тонким **воскообразным налетом – кутикулой**, не смачивающейся водой, поэтому не размокают под дождем деревья, стога сена, скирды соломы.

Угол между поверхностью твердого тела и касательной к поверхности жидкости **называется краевым углом смачивания θ** .

Поверхность жидкости (мениск), налитой в сосуд, искривляется у ее стенок: приподнимается в случае смачивающей жидкости (мениск вогнутый – рис. 8.3. а) и опускается в случае несмачивающей жидкости (мениск выпуклый – рис. 8.3. б).

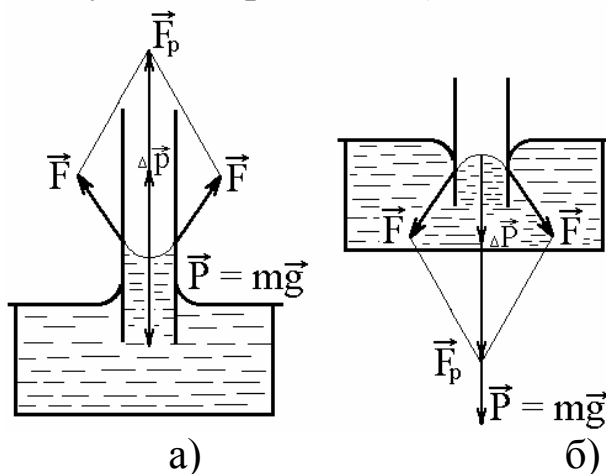


Рис. 8.3.

Так как поверхность жидкости стремится сократиться до минимума, то за счет изогнутой поверхности возникает дополнительное давление Δp , определяемое **формулой Лапласа**

$$\Delta p = \pm \alpha \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (8.3)$$

где R_1 и R_2 – радиусы кривизны двух взаимно перпендикулярных поверхностей. Знаки «+» и «–» указывают направление дополнительного давления (рис. 8.3).

Если жидкость налита в узкий цилиндрический сосуд малого диаметра (капиллярные трубки), то за счет дополнительного давления она поднимается вверх по трубке (в случае смачивающей жидкости) на высоту h , определяемую **формулой Жюрена** (рис. 8.3. а)

$$h = \frac{2\alpha \cos \theta}{\rho g r}, \quad (8.4)$$

где r – радиус капилляра; ρ – плотность жидкости. Капиллярные явления играют большую роль в природе. Если поступление питательных веществ в корневую систему регулируется процессом диффузии, то подъем питательного раствора по стеблю или стволу растения в значительной мере обусловлен явлением капиллярности: раствор поднимается по тонким капиллярным трубкам, образованным стенками растительных клеток.

По капиллярам почвы поднимается вода из глубинных в поверхностные слои почвы. Уменьшая диаметр почвенных капилляров путем уплотнения почвы можно усилить приток воды к поверхности почвы, то есть к зоне испарения и этим ускорить высушивание почвы. Наоборот, разрыхляя поверхность почвы и создавая тем самым прерывистость в системе почвенных капилляров можно задержать приток воды к зоне испарения, и замедлить высушивание почвы. Именно на этом основаны известные агротехнические приемы регулирования водного режима почвы – прикатка и боронование. Коэффициент поверхностного натяжения можно определить различными методами. В нашей работе он определяется методом отрыва кольца.

Порядок выполнения работы

1. Проверьте состояние установки. Плоскость кольца должна быть горизонтальна.
2. Отсчитайте положение указателя «а» на шкале ненагруженного динамометра, затем положение «b», когда на чашку положен груз массой m , выраженной в кг. Вес определите по формуле

$$P=mg.$$

3. Убрав грузик, поднимите кювету с водой при помощи кремальеры до соприкосновения поверхности жидкости с кольцом. Опустите кювету, определите положение «с» указателя в момент отрыва кольца. Опыт повторите 3 раза и возьмите среднее значение.

4. По формуле $k = \frac{P}{(b-a)}$ вычислите цену деления шкалы динамометра в Н/дел.

5. По формуле $l = \pi (d_1 + d_2)$ (где d_1 и d_2 – внешний и внутренний диаметр кольца) вычислите длину границы поверхностного слоя в метрах, ограниченного кольцом.

6. По формуле $\alpha = \frac{k(c-a)}{\pi(d_1 + d_2)}$ вычислите коэффициент

поверхностного натяжения воды.

7. Найдя по таблице значение коэффициента поверхностного натяжения воды при температуре опыта, найдите погрешность

$$\varepsilon = \frac{\alpha_{теор} - \alpha_{оп.ср}}{\alpha_{теор}} \cdot 100\%.$$

8. Данные занесите в таблицу.

Таблица 8.1.

№	1	2	3	4	5	6
a						
c						
$(c-a)$						
α , Н/м						

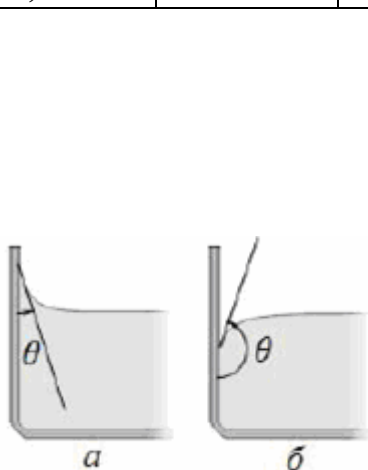


Рис. 8.4. Краевые углы

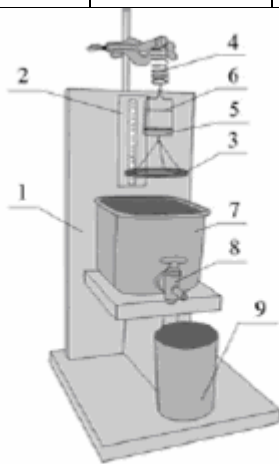


Рис. 8.5. Внешний вид установки

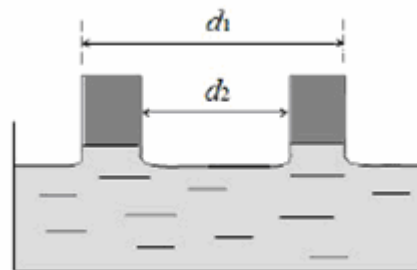


Рис. 8.6. Отрыв кольца

Контрольные вопросы.

1. Что называется КПН? Формула. Единицы его измерения.
2. Что такое свободная энергия поверхности жидкости?
3. Какие вещества называются поверхностно активными?
4. Чем объясняется смачивание жидкостью поверхности твердого тела?
5. Какую форму имеет поверхность смачивающей и несмачивающей жидкости? Изобразить схематически.
6. Чем обусловлено и как направлено дополнительное давление? Формула.
7. Как объяснить капиллярные явления? Как рассчитать высоту подъема жидкости в капиллярной трубке?

Лабораторная работа № 9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЁМКОСТЕЙ (C_p/C_v) ВОЗДУХА МЕТОДОМ КЛЕМАНА И ДЕЗОРМА

Цель работы: определение показателя адиабаты для воздуха.

Приборы и принадлежности: стеклянный баллон с клапаном, насос Камовского, водяной манометр.

Основание к выполнению лабораторной работы

1. Иметь краткий конспект теоретической части и практического выполнения работы.
2. Знать порядок выполнения лабораторной работы.

Основание к сдаче лабораторной работы

1. Иметь оформленный отчет.
2. Ответить на контрольные вопросы:

Краткая теория

Количество теплоты, необходимое для нагревания тела на один градус, называется **теплоемкостью вещества**.

Различают теплоемкости:

а) **молярную** - количество теплоты, необходимой для нагревания 1 моля вещества на один Кельвин:

$$C = Q / [(m/\mu)\Delta T], \quad (9.1)$$

где m - масса вещества; μ - молярная масса; ΔT - разность температур.

Единица измерения Дж/моль·К;

б) **удельную** - количество теплоты, необходимой для нагревания единицы массы вещества на один Кельвин:

$$c = Q / m\Delta T, \quad (9.2)$$

Единица измерения Дж/кг·К.

Теплоемкость газа зависит от того, при каких условиях он нагревается: при постоянном объеме или при постоянном давлении. Если нагревать газ при постоянном объеме, то подводимая теплота идет только на увеличение его внутренней энергии. В этом случае говорят о теплоемкости при постоянном объеме, или изохорной теплоемкости C_v .

Если нагревать газ при постоянном давлении, то подводимая теплота идет не только на увеличение внутренней энергии, но и на работу расширения. В этом случае говорят о теплоемкости при постоянном давлении, или изобарной теплоемкости C_p .

Для идеального газа между изохорной и изобарной теплоемкостями по закону Майера существует следующая связь:

$$C_p = C_v + R, \quad (9.3)$$

где $R=8,31$ Дж/моль·К - универсальная газовая постоянная.

Энергия одной молекулы газа определяется формулой:

$$\langle w \rangle = \frac{ikT}{2}, \quad (9.4)$$

где i - число степеней свободы, т.е. число независимых координат, определяющих положение молекулы в пространстве. Для одноатомного газа ($i = 3$), для двухатомного газа ($i = 5$), для многоатомного газа ($i = 6$);

k - постоянная Больцмана;

T - абсолютная температура.

Энергия одного моля газа, содержащего число молекул, равное числу Авогадро N_A , рассчитывается по формуле:

$$U = N_A \langle w \rangle = N_A \cdot \frac{ikT}{2} = \frac{iRT}{2}, \quad (9.5)$$

Тогда молярная теплоемкость при постоянном объеме может

быть рассчитана по формуле:

$$C_V = \frac{dU}{dT} = \frac{iR}{2}, \quad (9.6)$$

Исходя из уравнения Майера

$$C_P = C_V + R = \frac{iR}{2} + R = \frac{R(i+2)}{2}, \quad (9.7)$$

Адиабатным называется быстропротекающий процесс без теплообмена с окружающей средой, т.е. $dQ=0$. Первое начало термодинамики для адиабатного процесса запишется:

$$dU + dA = 0 \text{ или } dA = -dU, \quad (9.8)$$

Интегрирование этого уравнения приводит к уравнению Пуассона:

$$pV^\gamma = const, \quad (9.9)$$

где γ – показатель адиабаты, равный отношению молярной теплоемкости идеального газа при постоянном давлении к молярной теплоемкости при постоянном объеме:

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} \quad (9.10)$$

Через число степеней свободы показатель адиабаты выражается:

$$\gamma = \frac{\frac{R(i+2)}{2}}{\frac{Ri}{2}} = \frac{(i+2)}{i}. \quad (9.11)$$

Закономерности изопроцессов применяются в пищевой технологии для определения и контроля параметров среды в установках охлаждения, копчения, орошения, сушки выработанной продукции. Например, различных видов колбас, а также в установках брожения при изготовлении и расфасовке спирта, вина, шампанского, пива. Так, изобарический способ разлива пенящихся виноматериалов характеризуется истечением жидкости из дозатора только в поле действия гравитационных сил, но при избыточном давлении в дозаторе и в наполняемой таре.

Описание установки и методики определения

Существуют калориметрический, электрический, адиабатный методы определения показателя адиабаты. В данной работе используется метод адиабатного расширения.

Экспериментальная установка состоит из стеклянного баллона 2

и соединенного с ним манометра 1 и насоса Камовского 3 (рис. 9.1.). Посредством крана 4 баллон может быть соединен с атмосферой.

На графике изображены процессы перехода газа из одного состояния в другое (рис. 9.2.). Линия AC является изотермой, АВ – адиабатой, ВС – изохорой.

Состояние 1. В баллоне находится воздух, давление которого равно атмосферному, температура равна температуре окружающей среды: p_0 , T_0 .

Состояние 2. При помощи насоса накачать в баллон некоторое количество воздуха ΔV . Это состояние соответствует началу эксперимента и на графике (рис. 9.2.) характеризуется точкой А.

При накачивании масса воздуха, занимающая первоначально баллон, сжимается до некоторого меньшего объема V_1 . Давление, установившееся в баллоне, будет равно:

$$p_1 = p_0 + \rho g h_1, \quad (9.12)$$

где p_0 – атмосферное давление; ρ – плотность воды в манометре, g – ускорение силы тяжести, h_1 – разность уровней воды в манометре.

Температура газа не изменилась: $T_1 = T_0$.

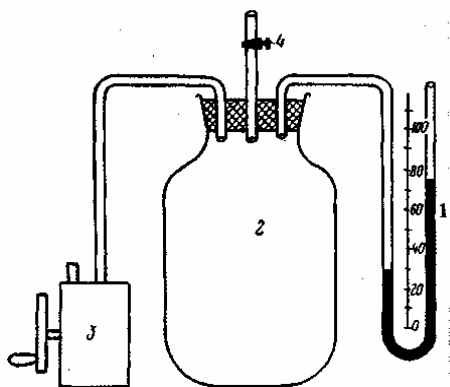


Рис. 9.1. Установка для определения отношения удельных теплоемкостей воздуха методом адиабатного расширения

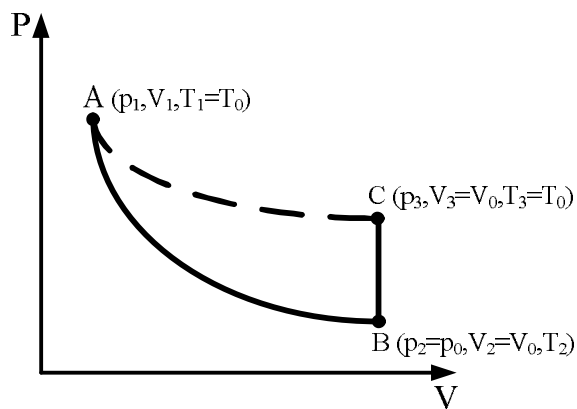


Рис. 9.2. График изменения состояния воздуха в баллоне

Состояние 3. Если открыть на короткое время кран 4, то воздух в баллоне будет расширяться. Этот процесс расширения можно считать адиабатическим. Давление в баллоне установится равным атмосферному, температура газа понизится до T_2 . Оставшийся воздух в баллоне занял объем V_0 , тогда:

$$p_2 = p_0, \quad T_2 < T_1 \quad (9.13)$$

Это состояние газа выражено на графике (рис. 9.2.) точкой В.

Параметры газа при переходе из состояния А в состояние В связаны уравнением адиабаты:

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma. \quad (9.14)$$

Состояние 4. Охладившийся при расширении воздуха в баллоне через некоторое время, вследствие теплообмена, нагреется до температуры окружающей среды T_1 , давление возрастает до некоторой величины p_3 :

$$p_3 = p_0 + \rho g h_2 \quad (9.15)$$

где h_2 – разность уровней в манометре.

Объем воздуха не изменится и будет равен V_2 . Новое состояние газа выражено на графике (рис. 9.2.) точкой С (процесс В-С – изохорный).

Сравнивая конечное состояние газа (точка С.) с исходным (точка А.), видим, что они характеризуются одной температурой, а тогда по закону Бойля-Мариотта для изотермического процесса имеем:

$$p_3 V_2 = p_1 V_1. \quad (9.16)$$

Проведя преобразования формул (9.14) и (9.16), получим окончательное соотношение:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (9.17)$$

Порядок выполнения работы

1. Убедившись в том, что кран K_2 закрыт, осторожно с помощью насоса (N) нагнетают воздух в баллон (B) до тех пор, пока разность уровней жидкости в манометре не достигнет $140 \div 180$ мм и закрыть кран K_1 .

2. Когда давление в баллоне полностью установится, показателем чего служит прекращение колебаний уровней жидкости в коленах манометра,

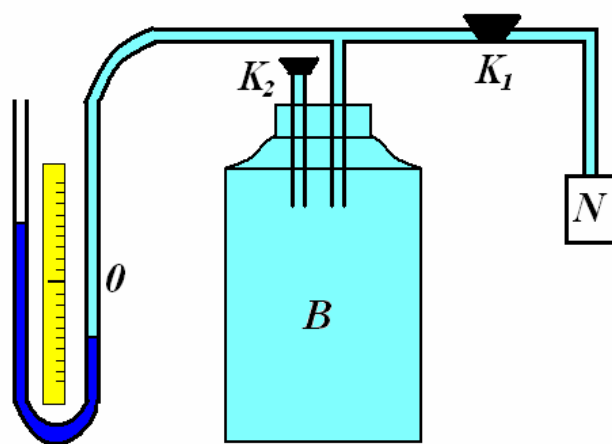


Рис. 9.3. Общий вид установки

производят по шкале отсчет разности уровней жидкости h в манометре M .

3. Быстро открывают кран K_2 и тотчас же (как только уровни жидкости в манометре сравняются) его закрывают. Когда давление окончательно установится, производят второй отсчет разности уровней h_1 в манометре M .

Опыт повторяют 5–6 раз, меняя величину M_1 .

4. Подставляя в формулу $\gamma = \frac{h}{h - h_1}$ значения h и h_1 , взятые из каждого отдельного опыта, вычисляют $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ и т.д.

Все полученные опытом (и вычислением) результаты измерений сводятся в таблицу.

№	$h, м$	$h_1, м$	γ	γ_{cp}	$\Delta\gamma$	$\Delta\gamma_{cp}$	ε

5. Затем определяем $\gamma_{cp}, \Delta\gamma_{cp}$ и ε .

6. Результат измерений и вычислений записываем в виде:

$$\gamma = \gamma_{cp} \pm \Delta\gamma_{cp}$$

7. Рассчитайте погрешность измерений по формуле

$$\varepsilon = \frac{|\gamma_T - \langle \gamma \rangle|}{\gamma_T} \cdot 100\%.$$

Контрольные вопросы.

1. Как формулируется первое начало термодинамики?
2. Что такое C_p и C_v ? Как записываются формулы для определения C_p и C_v ? Почему $C_p > C_v$? Как записывается уравнение Майера?
3. Что называется удельной и молярной теплоемкостями? В каких единицах они измеряются?
4. Что называют числом степеней свободы тела? Каким числом степеней свободы обладают молекулы одноатомного,

- двухатомного, многоатомных газов?
5. Какой процесс называется адиабатическим? Напишите уравнение Пуассона.

Лабораторная работа № 10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

Цель работы: определение абсолютной и относительной влажности воздуха для температуры окружающей среды на время измерения.

Приборы и принадлежности: психрометр Асмана, психрометр Августа, справочные таблицы.

Основание к выполнению лабораторной работы

1. Иметь краткий конспект теоретической части и практического выполнения работы.
2. Знать порядок выполнения лабораторной работы.

Основание к сдаче лабораторной работы

3. Иметь оформленный отчет.
4. Ответить на контрольные вопросы.

Краткая теория

Процесс перехода жидкости в газообразное состояние называется **парообразованием**. Парообразование может происходить двумя путями: 1 – испарением (с поверхности жидкости при любой температуре); 2 – кипением (со всего объема жидкости при температуре кипения).

Вследствие происходящего повсеместно в природе парообразования атмосферный воздух содержит водяной пар. Пар бывает насыщенным и ненасыщенным. Если количество вылетающих из жидкости молекул в единицу времени равно количеству возвращающихся в нее частиц, то такое состояние называется динамическим равновесием пара и жидкости, а пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называется

насыщенным паром. Концентрация молекул воды в нем и производимое им давление будут максимальными, но они будут зависеть от температуры. Чем выше температура, тем выше давление пара.

Содержание водяного пара в воздухе характеризуется абсолютной и относительной влажностью.

Под **абсолютной влажностью воздуха** понимается физическая величина, численно равная массе водяного пара, содержащегося в единице объема воздуха при данной температуре. Обычно абсолютную влажность выражают в г/м^3 или мм рт. ст. Так как плотность пара и его давление пропорциональны абсолютной температуре, то часто абсолютную влажность называют упругостью (парциальным давлением).

Ощущение сухости или сырости воздуха связано не с абсолютной влажностью, а с относительной.

Под **относительной влажностью воздуха** понимают отношение абсолютной влажности к ее максимальному значению при данной температуре. Относительная влажность выражается в процентах.

Если обозначить относительную влажность через f , абсолютную через e , а максимальную влажность при той же температуре через E , то

$$f = \left(\frac{e}{E} \right) \cdot 100\%. \quad (10.1)$$

Разность между упругостью насыщенного водяного пара E и упругостью e водяного пара, фактически имеющегося в воздухе при той же температуре, называют **дефицитом влажности**.

$$D = E - e. \quad (10.2)$$

Точка росы τ – температура, при которой находящиеся в воздухе водяные пары становятся насыщенными, т. е. если понижать температуру воздуха, то при τ данный пар будет насыщенным, а при дальнейшем понижении температуры выпадет роса.

Влажность воздуха играет важную роль в жизнедеятельности растений, кроме того, она является одним из параметров, определяющих комфортность условий труда человека. Контроль влажности воздуха и соблюдение ее нормативов снижают потери зерна и готовой продукции. Например, готовые макаронные изделия

очень гигроскопичны, поэтому их влажность при хранении не должна быть выше 11%. Если влажность выше 16 %, возникает опасность плесневения. Другой пример: консистенция вафельного теста существенно зависит от влажности и температуры. Необходима минимальная влажность теста, тогда в нем не образуются агрегаты из частиц муки. В виноделии испарение летучих компонентов вина в процессе выдержки происходит через поры дубовой клепки, при этом протекают диффузионные и капиллярные процессы. Испарение увеличивается с повышением температуры и понижением относительной влажности воздуха.

Влажность воздуха может быть определена многими способами. В нашей работе мы пользуемся двумя:

- 1) при помощи стационарного психрометра Августа;
- 2) при помощи аспирационного психрометра Асмана.

Сущность психрометрического определения влажности воздуха

Психрометр представляет собой два одинаковых термометра, укрепленных на штативе. Один из термометров является влажным. Шарик этого термометра обтянут слоем батиста, который, как фитиль, погружен в стаканчик с дистиллированной водой. Уровень воды должен отстоять на 3 см от шарика термометра.

Если воздух содержит ненасыщенные пары, то показания влажного термометра t_B всегда будут ниже показаний сухого термометра t_C , так как вода, испаряясь, будет понижать его температуру. Разность температур ($t_C - t_B$) подчиняется строгой закономерности, на основании которой составлены психрометрические таблицы, по которым, зная температуры воздуха t_C и t_B , можно найти все параметры влажности

Порядок выполнения работы: ***I. Определение влажности воздуха*** ***психрометром Асмана***

1. Смочите дистиллированной водой батист правого термометра, набрав воду

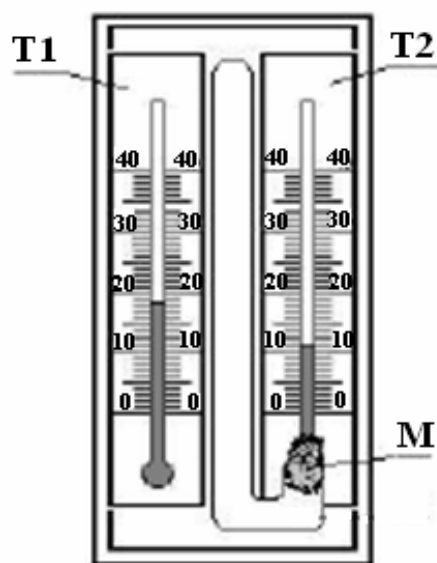


Рис. 10.1. Психрометр
Августа

- пипеткой.
- Включите вентилятор.
 - Когда стабилизируется температура при работающем вентиляторе, запишите показания термометра t_C и t_B .
 - Запишите по данным ртутного барометра атмосферное давление H .
 - По справочной таблице максимальной упругости водяных паров запишите упругость насыщенного пара E , соответствующую температуре сухого термометра, E_I – соответствующую температуре влажного термометра.
 - Вычислите абсолютную влажность по формуле:

$$e = E_I - A (t_C - t_B) H, \quad (10.3)$$
 где $A = 0,00066$ – коэффициент, зависящий от скорости движения воздуха, обдувающего термометры.
 - Вычислите относительную влажность воздуха по формуле (10.1).
 - Вычислите дефицит влажности по формуле (10.2).
 - Определите точку росы по таблице максимальной упругости водяного пара.
 - Результаты измерений занесите в таблицу 10.1.

Таблица 10.1.

Показания термометра, °C		Макс. упругость водяного пара, мм. рт. ст.		Барометричес- кое давление, мм. рт. ст.	Абс. влажность, мм. рт. ст.	Отн. влажность, %	Дефицит, мм. рт. ст.	Точка росы, °C
t_C	t_B	E	E_I	H	e	f	D	τ

II. Определение влажности воздуха психрометром Августа

- Проверьте состояние прибора и положение батиста, смоченного водой.
- Запишите показания термометров t_C и t_B .
- По таблице максимальной упругости водяного пара запишите значение E , соответствующее t_C .
- По психрометрической таблице найдите относительную влажность f .

5. Вычислите абсолютную влажность по формуле $e = \frac{f E}{100\%}$.
6. Вычислите дефицит влажности по формуле (10.2).
7. Найдите точку росы по таблице максимальной упругости водяного пара.
8. Полученные данные внесите в таблицу 10.2.

Таблица 10.2

Показания термометра, °C		Макс. упругость водяного пара, мм. рт. ст.	Отн. влажность, %	Абс. влажность, мм. рт. ст.	Дефицит, мм. рт. ст.	Точка росы, °C
t_C	t_B	E	f	e	D	τ

Контрольные вопросы.

1. Что называется абсолютной влажностью? Единицы ее измерения.
2. Что называется относительной влажностью?
3. Какой пар называется насыщенным? Его свойства.
4. Как определить точку росы?
5. Принцип работы психрометра.
6. В чем разница между кипением и испарением?
7. Какое значение имеет влажность воздуха в природе и при хранении сельхозпродуктов?

Лабораторная работа № 11

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Цель работы: построение качественной картины электростатического поля при помощи кривых равного потенциала и силовых линий.

Приборы и принадлежности: набор электродов, установка для изучения электростатического поля.

Основание к выполнению лабораторной работы

1. Иметь краткий конспект теоретической части и практического выполнения работы.
2. Знать порядок выполнения лабораторной работы.

Основание к сдаче лабораторной работы

1. Иметь оформленный отчет.
2. Ответить на контрольные вопросы.

Краткая теория

Всякий неподвижный заряд создаёт в окружающем пространстве электрическое поле, которое обнаруживается при внесении пробных электрических зарядов в любую точку поля. Силовой характеристикой поля является его напряженность $\vec{E}$.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q},$$

где E - напряженность электростатического поля в данной точке, [В/м]; F - сила, [Н]; q – пробный заряд, [Кл].

Напряженность поля численно равна силе, действующей на единицу положительной заряд, помещённый в данную точку поля.

По закону Кулона взаимодействия между точечными зарядами

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \times \frac{q_1q_2}{r^2} \times \frac{\vec{r}}{r},$$

где q_1 – заряд, образующий поле, [Кл]; r – расстояние между зарядами q_1 и q_2 , [м]; ϵ - диэлектрическая проницаемость среды; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - диэлектрическая постоянная вакуума.

Напряженность поля, созданная точечным зарядом

$$E = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}.$$

Линия, касательная к которой в каждой точке совпадает по направлению с напряженностью электростатического поля, называется силовой линией, причем их густота характеризует численное значение напряженности (рис. 11.1.).

Графическое изображение полей с помощью силовых линий представлено на рис. 11.1, где а – поле положительного точечного

заряда; б – поле отрицательного точечного заряда; в – поле двух разноименных точечных зарядов.

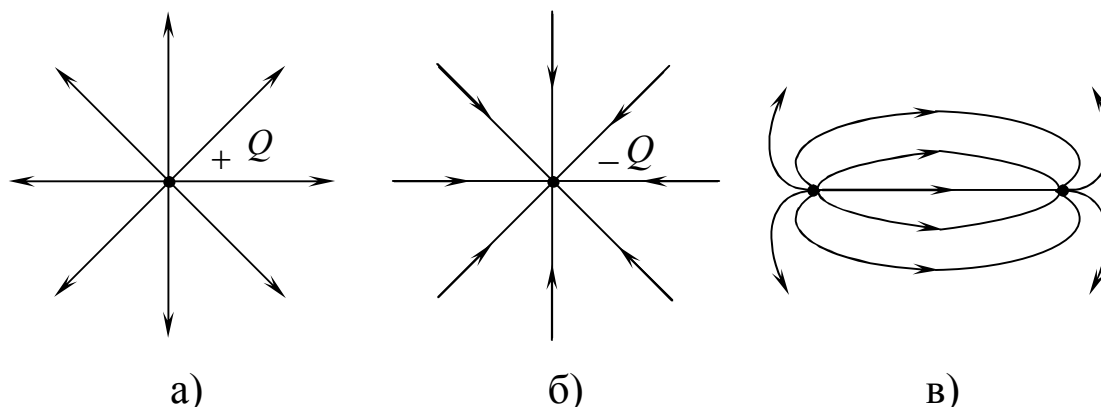


Рис. 11.1. Графическое изображение полей с помощью силовых линий: а) поле положительного точечного заряда; б) поле отрицательного точечного заряда; в) поле двух разноименных точечных зарядов

Энергетической характеристикой поля является потенциал

$$\varphi = \frac{A_{\infty}}{q},$$

где φ - потенциал данной точки поля, В; A_{∞} – работа, [Дж].

Потенциал поля численно равен работе, совершаемой силами поля при перемещении единичного положительного заряда из данной точки поля в бесконечность.

Работа по перемещению единичного положительного заряда из одной точки поля в другую равна разности потенциалов этих точек

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q}.$$

Работа по перемещению заряда q между точками, потенциалы которых φ_1 и φ_2 ,

$$A_{12} = q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Потенциал поля точечного заряда q на расстоянии r

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}.$$

Электростатическое поле является консервативным. Работа по перемещению заряда в электрическом поле не зависит от траектории, а определяется лишь положением начальной и конечной точек перемещения.

Каждой точке поля соответствует свой потенциал, который

является функцией расстояния. Однако, можно выделить такую совокупность точек, для которых потенциал одинаков.

Геометрическое место точек равного потенциала называется эквипотенциальной поверхностью.

Силовые линии везде перпендикулярны к поверхности равного потенциала (рис. 11.2).

Между напряженностью поля и потенциалом существует соотношение $\vec{E} = -grad\varphi$.

Напряженность поля численно равна изменению потенциала на единицу длины, отсчитанной в перпендикулярном к поверхности потенциала направлении. Знак (-) говорит о том, что напряженность направлена в сторону убывания потенциала.

Графическое изображение полей с помощью сечений эквипотенциальных поверхностей и силовых линий показано на рис. 11.2., где а – поле положительного точечного заряда; б – поле отрицательного точечного заряда; в - поле двух разноименных зарядов; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3 \dots$ - потенциалы поверхностей.

Величина $\frac{d\varphi}{dr}$ показывает быстроту изменения потенциала в направлении, перпендикулярном к эквипотенциальной поверхности и называется градиентом потенциала, $\vec{E} = -grad\varphi$, где $grad\varphi$ - градиент потенциала, В/м.

Градиент потенциала направлен противоположно вектору напряженности поля (см. рис. 11.2.).

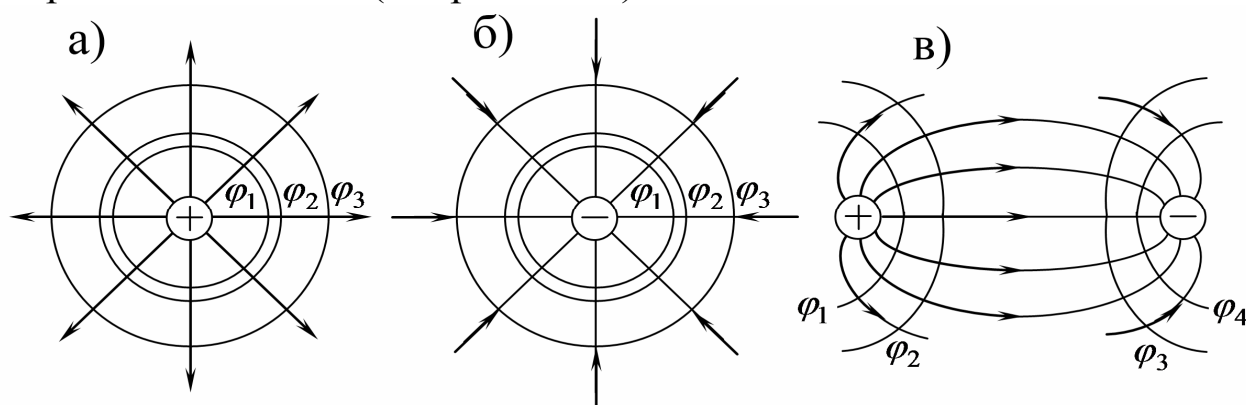


Рис. 11.2. Графическое изображение полей с помощью сечений эквипотенциальных поверхностей и силовых линий: а) поле положительного точечного заряда; б) поле отрицательного точечного заряда; в) поле двух разноименных зарядов; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3 \dots$ - потенциалы поверхностей.

Ортогональность силовых линий и поверхностей равного потенциала существенно облегчает как экспериментальное, так и теоретическое исследование электростатического поля. По найденным значениям вектора напряженности можно построить поверхности равного потенциала и наоборот: найденное положение поверхностей равного потенциала позволяет построить силовые линии поля.

Экспериментально измерения потенциалов оказываются проще, чем измерения напряженности поля, так как большинство приборов, пригодных для изучения полей, измеряют разность потенциалов. Поэтому в данной работе экспериментально изучается распределение потенциалов в поле.

Силовые линии строятся как ортогональные кривые к экспериментально найденным поверхностям равного потенциала.

Описание установки и метода измерений

В данном эксперименте постоянные электростатические поля моделируются с помощью постоянного тока, который пропускают через слабо проводящую среду.

Оказывается, что при некоторых условиях распределение потенциалов в среде, по которой течет ток между установленными в ней электродами, может быть сделано тождественным с распределением потенциалов между теми же электродами, когда между ними имеется электростатическое поле в вакууме или в однородном диэлектрике.

Изучение поля производится с помощью зондов: в исследуемую точку поля вводится дополнительный электрод – зонд, соединённый проводником с прибором, измеряющим приобретённый зондом потенциал относительно какой-либо избранной за начало отсчёта точки поля.

Чтобы включение зонда не искажало распределение потенциалов в исследуемом поле, электрическая цепь зонда должна иметь большее сопротивление по сравнению с сопротивлением проводящих слоёв вещества между точкой, в которую помещён зонд, и ближайшим электродом. Схема установки показана на рис. 11.3.

В ванну, сделанную из диэлектрического материала и залитую жидким электролитом, помещают электроды А и В (см. рис. 11.3).

На электроды подаётся напряжение от источника питания (220В) через выпрямитель ИП. В измерительную часть схемы, кроме зонда Z, входят также нулевой гальванометр G, вольтметр V и делитель напряжения R.

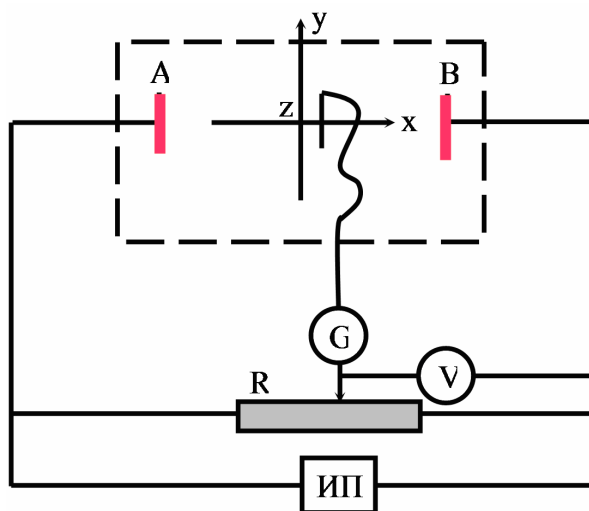


Рис. 11.3. Схематический вид установки

Установка оснащена копировальным устройством, которое позволяет переносить получаемые точки на бумагу. Перемещая движок на делителе R, можно фиксировать различные значения потенциала зонда относительно электродов, погружаемых в ванну. Если зонд находится в такой точке поля, потенциал которой равен потенциалу, установленному на движке делителя, то тока в цепи зонда и гальванометра не будет.

Геометрическое место всех точек поля, для которых ток в цепи зонда будет равен нулю (при данном положении движка на делителе), образует эквипотенциальную поверхность в исследуемом поле. Для измерения потенциала этой поверхности служит вольтметр, включённый между движком и одним из электродов.

Порядок выполнения работы:

При практическом выполнении работы очевидно, что нахождение зондом эквипотенциальных поверхностей не должно проводиться бессистемно. Необходимо для каждого набора установленных в ванне электродов руководствоваться разумными соображениями о возможной в общих чертах конфигурации поля. В частности, использовать свойства симметрии поля.

1) Установите в ванне систему двух цилиндрических электродов.

2) На листе бумаги, закреплённом на копировальном столике, отметьте положение электродов путём обводки их зондом (отметьте на бумаге карандашом).

3) Ручку «потенциал зонда» переведите в нулевое положение, для чего поверните её против часовой стрелки до упора.

4) Включите электропитание установки и с помощью ручки «потенциал зонда» подайте на зонд напряжение 2....3 В (определяется по вольтметру).

5) Перемещением зонда по осям X и Y (см. рис. 11.3) добейтесь нулевого положения стрелки гальванометра. Полученную точку отметьте на бумаге. Не изменяя потенциала зонда, получите ещё 5 – 6 точек и, соединив точки плавной кривой, покажите эквипотенциальную поверхность, соответствующую начальному значению потенциала.

6) Увеличивая показания вольтметра в целое число раз относительно значения по п. 5, проведите построение других эквипотенциальных поверхностей (не менее четырех).

7) Установите в ванне сплошной и кольцевой цилиндрические электроды, совместив их оси. Исследуйте зависимость напряженности поля цилиндрического электрода от расстояния $E(r)$ и постройте график этой зависимости.

8) Проведя линии, ортогональные к полученным, покажите силовые линии исследуемого электростатического поля постоянного тока (учтите полярность электродов).

9) По заданию преподавателя установите в ванне электроды другой формы и повторите п.п. 2 – 6.

Таблица 11.1.

№	Тип электрода	I четверть	II четверть	III четверть	IV четверть
		X, Y	$-X, Y$	$-X, -Y$	$X, -Y$
1					
2					
3					
4					
5					

Контрольные вопросы.

1. Что такое электростатическое поле?
2. Как записывается закон Кулона?
3. Что называется напряженностью электростатического поля? Потенциалом данной точки поля?
4. По какой формуле определяются напряженность и потенциал электростатического поля точечного заряда?
5. В чем заключается физический смысл $\text{grad } \varphi$?
6. Как математически связаны напряженности и потенциал электростатического поля в данной точки поля?
7. Что называется эквипотенциальной поверхностью?

Лабораторная работа № 12

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА С ПОМОЩЬЮ МОСТИКА УИТСТОНА

Цель работы: определение емкости неизвестного конденсатора.

Приборы и принадлежности: реохорд, телефон или осциллограф, ключ, магазин емкостей, конденсаторы неизвестной емкости.

Основание к выполнению лабораторной работы

1. Иметь краткий конспект теоретической части и практического выполнения работы.
2. Знать порядок выполнения лабораторной работы.

Основание к сдаче лабораторной работы

3. Иметь оформленный отчет.
4. Ответить на контрольные вопросы:

Краткая теория

Опытом установлено, что при сообщении уединенному проводнику электрического заряда q пропорционально происходит

возрастание его потенциала φ : $q \sim \varphi$. Для уединенного проводника эта зависимость имеет вид:

$$q = C \varphi, \quad (12.1)$$

Уединенным проводником называют такой проводник, вблизи которого нет других тел и зарядов, влияющих на распределение электрического заряда на его поверхности.

Величину

$$C = \frac{q}{\varphi}, \quad (12.2)$$

называют **электроемкостью** (или просто **емкостью**) уединенного проводника. Емкость уединенного проводника определяется зарядом, сообщением которого проводнику изменяет его потенциал на единицу.

Емкость проводника зависит от его формы, размеров его поверхности, от диэлектрической проницаемости окружающей среды и от расположения, окружающих проводников и не зависит от материала проводника, от его заряда и от потенциала.

Единица электроемкости - фарад (Ф): 1 Ф - емкость такого уединенного проводника, потенциал которого изменяется на 1 В при сообщении ему заряда 1 Кл: $1\text{Ф} = \frac{1\text{Кл}}{1\text{В}}$.

Потенциал уединенного шара радиуса R , находящегося в однородной среде с диэлектрической проницаемостью ϵ , равен

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\epsilon R}. \quad (12.3)$$

Используя формулу (12.2), получим, что емкость шара

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon R \quad (12.4)$$

Если Землю рассматривать как проводник, тогда согласно (12.4) электроемкость Земли равен

$$C = 4\pi \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 6.371 \cdot 10^6 \text{ Ф} = 7.1 \cdot 10^{-4} \text{ Ф}$$

Следовательно, фарад - очень большая величина, поэтому на практике используются дольные единицы:

$$1 \text{ микрофарад (мкФ)} = 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$1 \text{ нанофарад (нФ)} = 10^{-9} \text{ Ф}$$

$$1 \text{ пикофарад (пФ)} = 10^{-12} \text{ Ф}.$$

Как видно из последнего примера, для того чтобы проводник обладал большой емкостью, он должен иметь очень большие

размеры. На практике, однако, необходимы устройства, обладающие способностью при малых размерах и небольших относительно окружающих тел потенциалах накапливать значительные по величине заряды, иными словами, обладать большой емкостью. Эти устройства получили название **конденсаторы**.

Конденсатором называют систему двух близко расположенных, заряженных одинаковым по величине и противоположным по знаку зарядом и имеющих такие размеры и форму, что создаваемое ими электрическое поле сосредоточено в ограниченной части пространства.

Конденсатор состоит из двух проводников (обкладок), разделенных диэлектриком.

В настоящее время конденсаторы изготавливаются из алюминиевой фольги, проложенной парафинированной бумагой или другими диэлектриками.

Конденсаторы в зависимости от формы делятся на **плоские, сферические и цилиндрические**.

Под емкостью конденсатора понимается физическая величина, равная отношению заряда q , накопленного в конденсаторе, к разности потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2 = U$ между его обкладками:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}, \quad (12.5)$$

Рассчитаем емкость плоского конденсатора, состоящего из двух параллельных пластин площадью S каждая, расположенных на расстоянии d друг от друга и имеющих заряды q^+ и q^- . Заряд на одной пластине

$$q = \sigma S, \quad (12.6)$$

где σ - поверхностная плотность заряда.

Разность потенциалов между пластинами:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = Ed, \quad (12.7)$$

где, E - напряженность электростатического поля.
Напряженность поля плоского конденсатора:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon}. \quad (12.8)$$

Тогда из формулы (12.5), с учетом (12,6), (12,7) и (12.8), получим формулу емкости плоского конденсатора (рис. 12.1):

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d} . \quad (12.9)$$

Как видно из формулы (12.9), величина емкости плоского конденсатора определяется только его геометрией (размерами обкладок, величиной зазора между ними) и относительной диэлектрической проницаемостью вещества, заполняющего зазор.

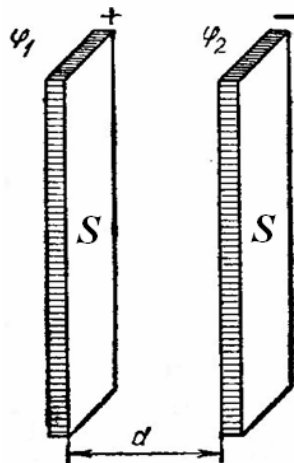


Рис. 12.1. Схематический вид плоского конденсатора

Для получения нужной емкости конденсаторы соединяют друг с другом в батареи последовательно, параллельно или смешанно.

1. Параллельное соединение конденсаторов (рис. 12.2). При параллельном соединении конденсаторов положительные обкладки соединяются с положительными, отрицательные с отрицательными. Разность потенциалов $(\varphi_1 - \varphi_2)$ на пластинках одинаковы и равны разности потенциалов точек 1 и 2, а заряд батареи конденсаторов равен:

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \sum_{i=1}^n q_i , \quad (12.10)$$

где $q = C_{\text{нар}}(\varphi_1 - \varphi_2)$, $q_1 = C_1(\varphi_1 - \varphi_2)$, $q_2 = C_2(\varphi_1 - \varphi_2)$, ..., $q_n = C_n(\varphi_1 - \varphi_2)$,

а заряд батареи конденсаторов

$$C_{\text{нар}}(\varphi_1 - \varphi_2) = C_1(\varphi_1 - \varphi_2) + C_2(\varphi_1 - \varphi_2) + \dots + C_n(\varphi_1 - \varphi_2) , \quad (12.11)$$

Здесь $C_1, C_2, \dots, C_n$ - емкость отдельных конденсаторов.

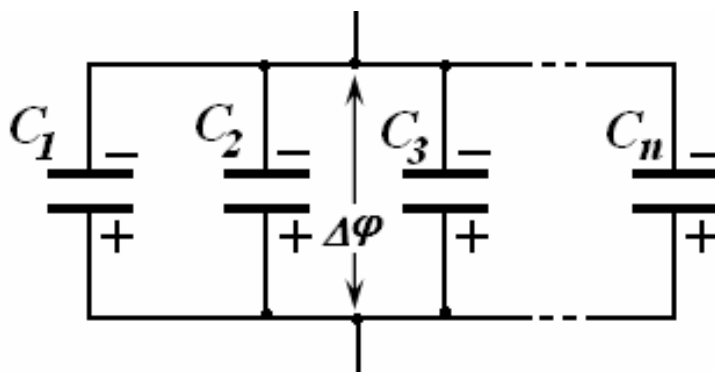


Рис. 12.2 . Параллельное соединение конденсаторов

Полная емкость батареи

$$C_{\text{пар}} = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{i=1}^n C_i, \quad (12.12)$$

т.е. при параллельном соединении конденсаторов она равна сумме емкостей отдельных конденсаторов.

2. Последовательное соединение конденсаторов (рис. 12,3).

При последовательном соединении отрицательная обкладка одного конденсатора соединяется с положительной обкладкой следующего конденсатора. У последовательно соединенных конденсаторов заряды всех обкладок равны по модулю, а разность потенциалов на зажимах батареи:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + \dots + \Delta\varphi_n, \quad (12.13)$$

где $\Delta\varphi = \frac{q}{C_{\text{посл}}}$, $\Delta\varphi_1 = \frac{q}{C_1}$, $\Delta\varphi_2 = \frac{q}{C_2}$, ..., $\Delta\varphi_n = \frac{q}{C_n}$. Учитывая это,

можно найти следующее:

$$\frac{1}{C_{\text{посл}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}, \quad (12.14)$$

При последовательном соединении конденсаторов суммируются обратные величины емкостей и полная емкость ($C_{\text{посл}}$) всегда меньше наименьшей емкости, используемой в батарее.

Измерение емкости конденсаторов можно произвести с помощью мостика Уитстона. Возможность использования мостиковой схемы для определения емкости основана на следующем.

Пусть ЭДС источника тока изменяется по закону синуса:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t, \quad (12.15)$$

где ε - мгновенное значение ЭДС источника, ε_0 - наибольшее

значение ЭДС, называется амплитудным, $\omega = \frac{2\pi}{T}$ - циклическая частота, T - период. В любой момент времени заряд конденсатора равен:

$$q = C\varepsilon = C\varepsilon_0 \sin \omega t, \quad (12.16)$$

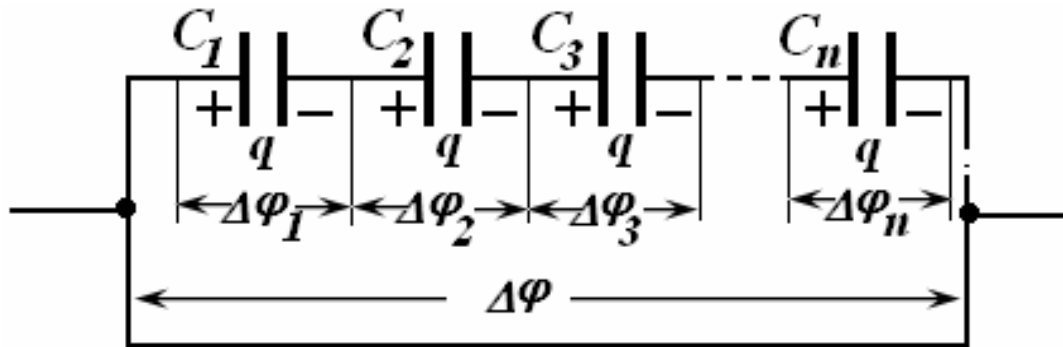


Рис. 12.3. Последовательное соединение конденсаторов

С изменением напряжения на обкладках конденсатора изменяется и количество электричества. Тогда сила тока равна:

$$I = \frac{dq}{dt} = C\omega\varepsilon_0 \cos \omega t, \quad (12.17)$$

при $\cos \omega t = 1$, сила тока достигает максимальное значение:

$$I = C\omega\varepsilon_0, \quad (12.18)$$

Сравнивая эту формулу с законом Ома $\left(I = \frac{\varepsilon}{R}\right)$, получим

$$R_C = \frac{1}{\omega C}, \quad (12.19)$$

где R_C - емкостное сопротивление конденсатора, которые обратно пропорционально частоте ω .

Мостик Уитстона (рис. 12.4) состоит из реохорда АВ, к концам которого подается переменный ток с клеммы 1 и 2. В плечи мостика включены конденсаторы с известной емкостью C_0 и неизвестной емкостью C_X . Телефон Т, включенный между точками Е и D, образует мостик.

Равновесие моста достигается передвижением контакта D вдоль проволоки реохорда. Положение контакта D, при котором потенциалы точек Е и D равны, соответствует равновесию моста. При равновесии моста:

$$\varphi_A - \varphi_B = \varphi_A - \varphi_D; \quad \varphi_B - \varphi_C = \varphi_D - \varphi_C, \quad (12.20)$$

и звук в телефоне отсутствует.

Обозначим емкостное сопротивление конденсатора неизвестной емкости через $R_{C_x} = \frac{1}{\omega C_x}$, а известной емкости через $R_{C_o} = \frac{1}{\omega C_o}$.

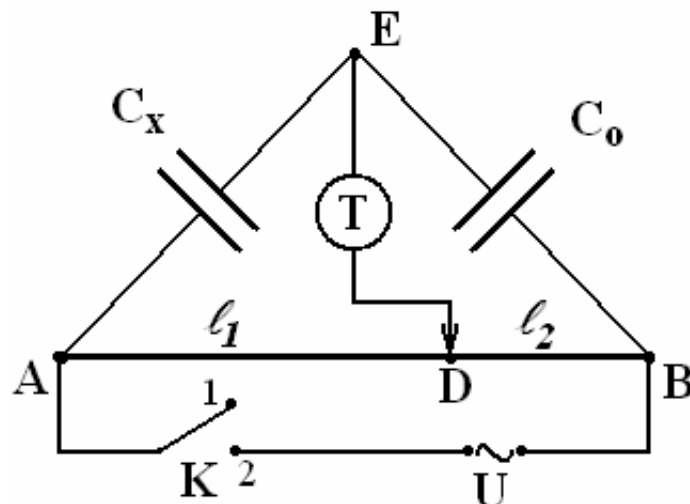


Рис. 12.4. Мостик Уитстона

По закону Ома для мгновенного значения тока:

$$\varphi_A - \varphi_B = I \frac{1}{\omega C_x}, \quad \varphi_A - \varphi_D = I \rho \frac{l_1}{S}, \quad \varphi_B - \varphi_C = I \frac{1}{\omega C_o}, \quad \varphi_D - \varphi_C = I \rho \frac{l_2}{S}, \quad (12.21)$$

Подставляя выражения для разности потенциалов (12.21) в (12.20), получим расчетную формулу:

$$C_x = C_o \frac{l_2}{l_1}, \quad (12.22)$$

Порядок выполнения работы

1. Включают в цепь неизвестный конденсатор C_x .
2. Устанавливают конденсатор известной емкости C_o на 0,5 мкФ.
3. Перемещая движок D, добиваются исчезновения звука в телефоне и по реохорду отсчитывают плечо l_1 и плечо l_2 .
4. По формуле (12.22) определяют неизвестную емкость.
5. Повторяют опыт по определению C_{x_1} при $C_o = 1$ мкФ.
6. Вместо первого неизвестного конденсатора включают второй неизвестный конденсатор C_{x_2} . Проводят с этим конденсатором такие же измерения, как и с конденсатором C_{x_1} .
7. Конденсаторы C_{x_1} и C_{x_2} включают в цепь вместе сначала

параллельно, а потом последовательно. Измеряют общую емкость двух конденсаторов также, как при измерении C_{X_1} и C_{X_2} по формуле (12.22).

8. Вычисляют емкость системы конденсаторов при параллельном и последовательном соединении по формулам (12.12) и (12.14), подставляя C_{X_1} и C_{X_2} .

9. Результаты измерений заносят в таблицу.

Таблица.

Конденсаторы	№	C_0 мкФ	l_1 , см	l_2 , см	C_x мкФ	$\bar{C}_x$
C_{X_1}	1					
	2					
	3					
C_{X_2}	1					
	2					
	3					
Параллельное соединение конденсаторов	1					
	2					
	3					
Последовательное соединение конденсаторов	1					
	2					
	3					

Контрольные вопросы.

1. Что называется емкостью уединенного проводника, и в каких единицах она измеряется?

2. Что называется конденсатором? Типы конденсаторов?

3. От чего зависит электроемкость плоского конденсатора? Вывод формулы электроемкости плоского конденсатора.

4. Выведите формулу электроемкости при последовательном и параллельном соединении конденсаторов.

5. Напишите формулу равновесия мостика и объясните способ ее получения.

П р и л о ж е н и я

Перечень основных таблиц физических величин

Основные и дополнительные единицы СИ

Величина	Наименование	Обозначение
Основные		
Длина	метр	м
Масса	килограмм	кг
Время	секунда	с
Сила электрического тока	Ампер	А
Термодинамическая температура	Кельвин	К
Сила света	кандела	кд
Количество вещества	моль	моль
Дополнительные		
Плоский угол	радиан	рад
Телесный угол	стерадиан	ср

Соотношения между внесистемными единицами и единицами СИ

Длина 1 ангстрем (Å) = 10^{-10} м	Давления 1 мм.рт.ст. = 133 Па.
Объем 1 литр = 10^{-3} м ³	1 бар = 10^5 Па.
Сила 1 кГ = 9,81 Н	1 атм = $1.01 \cdot 10^5$ Па.
Работа, энергия 1 кГ м = 9,81 Дж	1 мм. вод. ст. = 9.8 Па.

Множители и приставки для образования десятичных, кратных и дольных единиц и их наименования.

Множитель	Приставка		
	Наименование	Обозначение	
		Русское	Международное
10^{18}	экса	Э	<i>E</i>
10^{15}	пета	П	<i>P</i>
10^{12}	тера	Т	<i>T</i>
10^9	гига	Г	<i>G</i>
10^6	мега	М	<i>M</i>
10^3	кило	к	<i>k</i>
10^2	гекто	г	<i>h</i>
10^1	дека	да	<i>da</i>
10^{-1}	деци	д	<i>d</i>

10^{-2}	санти	с	<i>c</i>
10^{-3}	милли	м	<i>m</i>
10^{-6}	микро	мк	μ
10^{-9}	нано	н	<i>n</i>
10^{-12}	пико	п	<i>p</i>
10^{-15}	фемто	ф	<i>f</i>
10^{-18}	атто	а	<i>a</i>

Основные физические константы

Скорость света в вакууме	$c = 299792458 \text{ м/с} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	$R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Элементарный заряд	$e = 1,601892 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi \text{ Ф/м} \approx 8,84 \text{ Ф/м}$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \approx 12,57 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Постоянная смещения Вина	$b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Постоянная Планка	$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Число «пи»	$\pi = 3,14159 \dots$
Основание натуральных логарифмов	$e = 2,71828 \dots$
Атомная единица массы	$a.e.m. = 1,660540 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Гравитационная постоянная	$G = 6,67259 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,109390 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,672623 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Радиус первой Боровской орбиты	$r_0 = 0,529177 \cdot 10^{-10} \text{ м}$
Удельный заряд электрона	$e/m_e = 1,758820 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$

Греческий алфавит

Печатная буква	Название	Печатная буква	Название
Αα	альфа	Νν	ню
Ββ	бета	Ξξ	кси
Γγ	гамма	Οο	омикрон
Δδ	дельта	Ππ	пи
Εε	эпсилон	Ρρ	ро
Ζζ	дзэта	Σσς	сигма
Ηη	эта	Ττ	тау
Θθ	тэта	Υυ	ипсилон
Ιι	йота	Φφ	фи
Κκ	каппа	Χχ	хи
Λλ	ламбда	Ψψ	пси
Μμ	мю	Ωω	омега

Плотность вещества, кг/м³ (t = 20 °C)

Алюминий	2700	Керосин	820
Бензин	680-720	Глицерин	1284
Никель	8900	Лед при 0°C	917
Латунь (70% Cu, 30% Zn)	8400-8700 8520	Масло касторовое	960
Олово	7300	Золото	19300
Вода при 4 °C	1000	Медь	8930
Воздух при нормальных условиях	1,29	Сталь	7700-7900
Дерево сухое: Береза Дуб Тополь	600-800 700-1000 300-500	Ртуть	13546
		Свинец	11342
Железо	7870	Спирт этиловый	789

Психрометрическая таблица

Показ. сухого терм. °C	Разность показаний термометров, °C																			
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
	О т н о с и т е л ь н а я в л а ж н о с т ь , %																			
5	91	83	75	66	58	50	42	34	26	19										
6	92	84	76	67	60	52	45	37	30	22	15									
7	92	84	77	69	62	54	47	40	33	26	19									
8	92	85	78	70	63	56	49	42	36	29	22	16								
9	93	86	79	71	65	58	51	45	38	32	25	19								
10	93	86	79	73	66	60	53	47	41	34	28	22	16							
11	93	87	80	74	67	61	55	49	43	37	31	26	20							
12	93	87	81	75	69	63	57	51	45	40	34	28	23	18						
13	94	88	82	76	70	64	58	53	47	42	36	31	26	20						
14	94	88	82	76	71	65	60	54	49	44	39	33	28	23	18					
15	94	88	83	77	72	66	61	56	51	46	41	36	31	26	21	18				
16	94	89	83	78	73	68	63	57	52	48	43	38	33	29	24	20				
17	95	89	84	79	74	69	64	59	54	49	45	40	35	31	27	22	19			
18		90	84	79	74	70	65	60	55	51	47	42	37	33	29	24	21	17		
19		90	85	80	75	70	66	61	57	52	48	44	39	35	31	27	23	19		
20		90	85	81	76	71	67	63	58	54	50	45	41	37	33	29	25	22	18	
21		90	85	81	77	72	68	64	59	55	51	47	43	39	35	31	28	24	21	17
22		91	85	82	77	73	69	64	61	56	52	48	44	41	37	33	30	26	23	19
23		91	86	86	78	74	70	65	62	58	54	50	46	42	39	35	32	28	25	21
24		91	87	87	78	74	70	66	62	59	55	51	48	44	40	37	33	30	27	24
25		91	87	83	79	75	71	67	63	60	56	52	49	45	42	38	35	35	29	26

Динамическая вязкость некоторых веществ, Па · с

Вода (0 ⁰ С)	0,001787
(20 ⁰ С)	0,001005
(100 ⁰ С)	0,00028
Воздух (0 ⁰ С)	0,0000181
Глицерин (20 ⁰ С)	1,5
Жир рыбий (20 ⁰ С)	0,046
Кровь (20 ⁰ С)	0,005
Масло касторовое (20 ⁰ С)	0,970
Молоко (20 ⁰ С)	0,0018
Спирт этиловый (0 ⁰ С)	0,001773
(20 ⁰ С)	0,0012

Вязкость водного раствора глицерина, Па · с

t, ⁰ С	60 %	80 %	95 %	100 %
20	0,011	0,062	0,545	1,499
25	0,008	0,045	0,366	0,945
30	0,007	0,034	0,248	0,624

Модуль Юнга некоторых веществ (p=0,1 мПа, t=20⁰С)

Вещество	Модуль Юнга * 10 ¹⁰ Па	Вещество	Модуль Юнга * 10 ¹⁰ Па
Алюминий	7,05	Медь	12,98
Олово	5,43	Никель	20,4
Железо	21,2	Свинец	1,62
Латунь (70% Cu, 30% Zn)	9,7-10,2	Сталь	20,9

Максимальная упругость водяного пара при различных температурах

⁰ С	E, мм. рт. ст.	⁰ С	E, мм. рт. ст.	⁰ С	E, мм. рт. ст.
0	4,6	13	11,2	26	25,2
1	4,9	14	12,0	27	26,7
2	5,3	15	12,8	28	28,4
3	5,7	16	13,6	29	30,0
4	6,1	17	14,5	30	31,8
5	6,5	18	15,5	31	33,7
6	7,0	19	16,5	32	35,7
7	7,5	20	17,5	33	37,7
8	8,0	21	18,6	34	39,9
9	8,6	22	19,8	35	42,2
10	9,2	23	21,1	36	44,6
11	9,8	24	22,4	37	47,1
12	10,5	25	23,8	38	49,7

**Коэффициент поверхностного натяжения различных жидкостей на
границе «жидкость-воздух» при 20 °С, Н/м**

Белок куриного яйца	0,053	Масло касторовое	0,0364
Бензол	0,03	Молоко	0,042-0,046
Вода при 0° С	0,0756	Раствор мыла	0,04
Вода при 20° С	0,0726	Ртуть	0,05
Бром	0,0442	Скипидар	0,026
Кровь	0,058	Спирт этиловый	0,022

Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики: Учебное пособие. –7 изд., испр.- М.: Высшая школа, 2007. – 588 с.
2. Детлаф А.А. Курс физики: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2007. – 720 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1977, т.1; 1978, т.II
4. Грабовский Р. И. Курс физики. 6-е изд. -СПб.: Издательство. «Лань», 2002. -608 с.
5. Иверонова В.И. Физический практикум. -М. Наука. 1998.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Введение</i>	3
Элементы теории погрешностей. Советы и указания.....	4
<i>Лабораторная работа №1</i>	
Определение ускорения свободного падения	15
<i>Лабораторная работа № 2</i>	
Определение модуля Юнга методом изгиба	21
<i>Лабораторная работа № 3</i>	
Определение момента инерции груза на маятнике Обербека.....	28
<i>Лабораторная работа № 4</i>	
Определение момента инерции тела с помощью трифилярного подвеса.....	34
<i>Лабораторная работа № 5</i>	
Изучение законов колебательного движения.....	39
<i>Лабораторная работа № 6</i>	
Определение скорости звука в воздухе методом резонанса.....	49
<i>Лабораторная работа № 7</i>	
Определение коэффициента внутреннего трения жидкости методом Стокса.....	55
<i>Лабораторная работа № 8</i>	
Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости..	61
<i>Лабораторная работа № 9</i>	
Определение отношения теплоёмкостей (C_p/C_v) воздуха методом Клемана и Дезорма.....	66
<i>Лабораторная работа № 10</i>	
Определение влажности воздуха.....	72
<i>Лабораторная работа № 11</i>	
Исследование электростатического поля	76
<i>Лабораторная работа № 12</i>	
Определение ёмкости конденсатора с помощью мостика Уитстона.....	83
<i>Приложение..</i>	91
<i>Литература</i>	95

**Редактор
Корректор**

**Ахметжанова Г.М.
Марданова Э.З.**