

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ



Москва
2016

ВВЕДЕНИЕ

Данное учебное пособие «Лабораторный практикум по общей физике» составлено на кафедре «Прикладной физики» Российского университета дружбы народов. Пособие является составной частью учебно-методического комплекса обучения школьников в физических лабораториях на базе кафедры «Прикладной физики» с целью осуществления программы «Школа – ВУЗ». Рекомендуется для учащихся 10 – 11 классов общеобразовательных школ с углубленным изучением физики и школ с инженерно-физическим направлением.

В учебном пособии представлены описания лабораторных работ и рекомендации к их выполнению. В каждом из описаний кратко изложены основы теории экспериментально изучаемого явления на основе рекомендуемого в школе учебника* в соответствии с новым ФГОС, даны описания экспериментальных стендов, методики проведения измерений и расчета искомых физических величин. Пособие содержит описание лабораторных работ по разделам «Механика», «Молекулярная физика», «Электричество и магнетизм» и «Оптика».

*Б.М.Яворский, А.А.Пинский «Основы физики» т.1, 2

Г.Я.Мякишев «Физика»

Л.Э.Генденштейн, Ю.И.Дик «Физика»

ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерение какой-либо величины может быть проведено только путем ее сравнения с известным масштабом. Так, для измерения протяженности объекта используется линейная шкала (линейка), масштабированная в соответствии с международным стандартом длины, которым является метр. Наименьший масштаб на измерительном приборе определяет максимальную точность проводимых измерений. Например, на ученической линейке цена наименьшего деления составляет 1 мм и поэтому с ее помощью более точные измерения проведены быть не могут. Наименьшая цена деления прибора определяет его ошибку – *ошибку прибора* $\Delta a_{пр}$.

При *прямых измерениях* физических параметров искомая величина определяется непосредственно по шкале измерительного прибора. При этом ошибка измерений (Δa) определяется: а) при однократном измерении - ошибкой прибора, б) при многократном - совокупностью ошибок прибора и *случайной ошибки* ($\Delta a_{сл}$).

$$\Delta a = \sqrt{(\Delta a_{сл})^2 + (\Delta a_{пр})^2} \quad (1)$$

Ошибка измерений никогда не может быть меньше ошибки прибора.

Случайная ошибка ($\Delta a_{сл}$) возникает вследствие влияния различных, случайно действующих на результаты измерений факторов, например, не стабильность температурного режима, не стабильность атмосферного давления, плохое зрение у человека, проводящего измерения и т.д. Для того, чтобы учесть влияние случайных факторов на точность измерений, проводят серию прямых измерений искомой величины.

Предположим, что проведена серия из n (обычно $n \geq 5$) измерений некоторого параметра a и получены значения: $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$. Наиболее близкой к истинному значению измеряемой

величины считается среднее арифметическое результатов измерений (a_{cp}):

$$a_{cp} = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} a_i \quad (2)$$

Чтобы найти ошибку возникающую в результате влияния случайных факторов ($\Delta a_{сл}$) следует определить отклонения каждой измеренной величины (a_i) от найденного среднего значения (a_{cp}). **Замечание:** отклонение не может быть отрицательной величиной.

$$\begin{aligned} |a_1 - a_{cp}| &= \Delta a_1 ; \\ |a_2 - a_{cp}| &= \Delta a_2 ; \\ |a_3 - a_{cp}| &= \Delta a_3 \\ &\dots\dots\dots \\ |a_n - a_{cp}| &= \Delta a_n \end{aligned} \quad (3)$$

Среднее арифметическое от найденных значений Δa_i является случайной ошибкой ($\Delta a_{сл}$):

$$\Delta a_{сл} = \frac{\Delta a_1 + \Delta a_2 + \Delta a_3 + \dots + \Delta a_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \Delta a_i \quad (4)$$

Результат измерений представляется с указанием размерности искомой величины в виде:

$$a = (a_{cp} \pm \Delta a) \text{ размерность} \quad (5)$$

где значение Δa определяется выражением (1).

Δa является **абсолютной ошибкой** измерений и имеет ту же размерность, что и измеряемая величина.

Относительная ошибка измерений (E) показывает, какую часть от среднего значения измеряемой величины

составляет абсолютная ошибка, и обычно выражается в процентах:

$$E = \frac{\Delta a}{a_{cp}} \cdot 100\% \quad (6)$$

Полная запись результатов измерений *всегда представляется в виде:*

$$a = (a_{cp} \pm \Delta a) \text{ размерность } ; \quad E = \frac{\Delta a}{a_{cp}} \cdot 100\% \quad (7)$$

Ошибки в определении физических параметров, полученных косвенным путем.

Предположим, что на основании результатов измерений параметров тела необходимо провести расчет какой-либо его характеристики. Например: проведены измерения размеров трех граней параллелепипеда (a, b, c). Найдены средние значения (a_{cp}, b_{cp}, c_{cp}) и абсолютные ошибки в их определении ($\Delta a, \Delta b, \Delta c$). Требуется найти объем тела (V) и абсолютную ошибку в его определении (ΔV). Очевидно, для V имеем:

$$V = a_{cp} \cdot b_{cp} \cdot c_{cp} \quad (8)$$

а для нахождения ΔV необходимо воспользоваться формулой:

$$\Delta V = a_{cp} \cdot b_{cp} \cdot \Delta c + b_{cp} \cdot c_{cp} \cdot \Delta a + c_{cp} \cdot a_{cp} \cdot \Delta b \quad (9)$$

Формулы для расчета абсолютной и относительной ошибок для различных математических операций представлены в таблице 1.

Таблица 1

№№	Математическая операция	Абсолютная ошибка	Относительная ошибка
1	$X = a + b$	$\Delta X = \Delta a + \Delta b$	$E_x = \frac{\Delta a + \Delta b}{a + b}$
2	$X = a - b$	$\Delta X = \Delta a + \Delta b$	$E_x = \frac{\Delta a + \Delta b}{ a - b }$
3	$X = a \cdot b$	$\Delta X = b\Delta a + a\Delta b$	$E_x = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$
4	$X = \frac{a}{b}$	$\Delta X = \frac{b\Delta a + a\Delta b}{b^2}$	$E_x = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$
5	$X = a^n$	$\Delta X = na^{n-1}\Delta a$	$E_x = n \frac{\Delta a}{a}$
6	$X = \sin \alpha$	$\Delta X = \Delta \alpha \cdot \cos \alpha$	$E_x = \Delta \alpha \cdot \operatorname{ctg} \alpha$

Пример расчета абсолютной ошибки. Найти абсолютную ошибку (ΔX), возникающую в результате расчета по формуле

$$X = \frac{a^5 - c^2}{b^3}. \text{ Значения } \Delta a, \Delta b, \Delta c \text{ известны.}$$

Воспользуемся формулой (4) из таблицы 1 и запишем:

$$\Delta X = \frac{b^3 \Delta(a^5 - c^2) + (a^5 - c^2) \Delta b^3}{b^6}$$

Используя формулы (1) и (5) получим:

$$\Delta(a^5 - c^2) = \Delta a^5 + \Delta c^2 = 5a^4 \Delta a + 2c \Delta c$$

$$\Delta b^3 = 3b^2 \Delta b$$

Подставим полученные соотношения в формулу для ΔX

$$\Delta X = \frac{5a^4}{b^3} \Delta a + \frac{2c}{b^3} \Delta c + \frac{3(a^5 - c^2)}{b^4} \Delta b$$

Округление результатов расчетов.

Результаты измерений и расчетов необходимо округлять.

Пример. Запись ответа, представленная в виде $X = (81,361 \pm 0,412)$ см, не является корректной, т.к. если абсолютная ошибка находится на уровне 0,4 см, то последующие цифры не несут никакой полезной информации. И далее, если абсолютная ошибка составляет 0,4 см, то в представленном значении самой расчетной величины последние две цифры, соответствующие сотым и тысячным долям сантиметра, не информативны. Правильная форма ответа: $X = (81,4 \pm 0,4)$ см.

Примеры

Ошибочное представление результата измерений (расчета)	Правильное представление результата измерений (расчета)
$V_m = (235,3578 \pm 4,289125) \text{ см}^3$	$V_m = (235 \pm 4) \text{ см}^3$
$m = (53,04352 \pm 0,3458923) \text{ г}$	$m = (53,0 \pm 0,4) \text{ г}$
$V = (2,783257 \pm 0,03397) \text{ м/с}$	$V = (2,78 \pm 0,03) \text{ м/с}$
$L = (12,7586 \pm 0,147531) \text{ м}$	$L = (12,76 \pm 0,15) \text{ м}$
$\rho = (2785,354 \pm 300,458) \text{ кг/м}^3$	$\rho = (28 \pm 3) \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3$

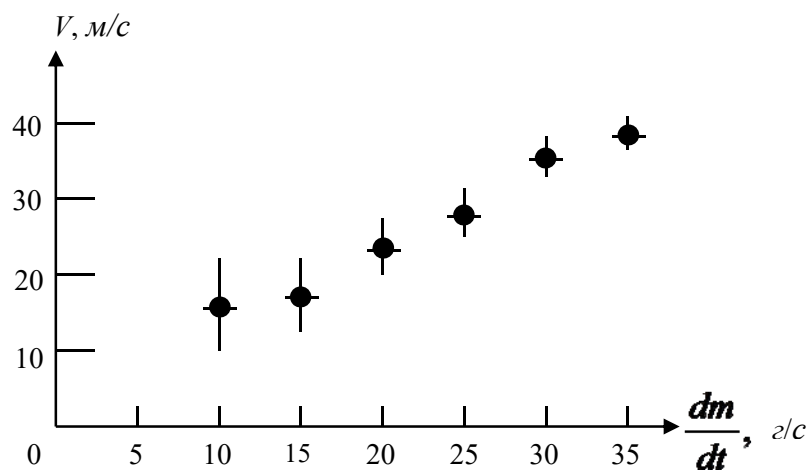
$k = (25 \pm 0,3) \text{ Н/м}$	$k = (25,0 \pm 0,3) \text{ Н/м}$
--------------------------------	----------------------------------

Построение графиков.

Если в задании к лабораторной работе требуется построение графика, то:

1. на осях графика необходимо указать единицы измерения и обозначить выбранный масштаб,
2. размеры наносимых на график экспериментальных точек должен соответствовать их абсолютной ошибке.

Пример.



Из представленного графика видно, что абсолютная ошибка в определении скорости расхода массы вещества ($\frac{dm}{dt}$) не меняется, а в определении скорости (V) – уменьшается с ее увеличением.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ ТЕЛА В ПОЛЕ ТЯЖЕСТИ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ФИЗИЧЕСКОГО МАЯТНИКОВ

Цель работы. Изучение гармонических колебаний твердого тела. Определение ускорения свободного падения твердого тела в поле тяжести Земли.

Краткая теория.

Математический маятник.

Математический маятник состоит из подвешенной на невесомой нерастяжимой нити материальной точки, которая может совершать колебательное движение в поле действия гравитационных сил или в поле действия сил инерции.

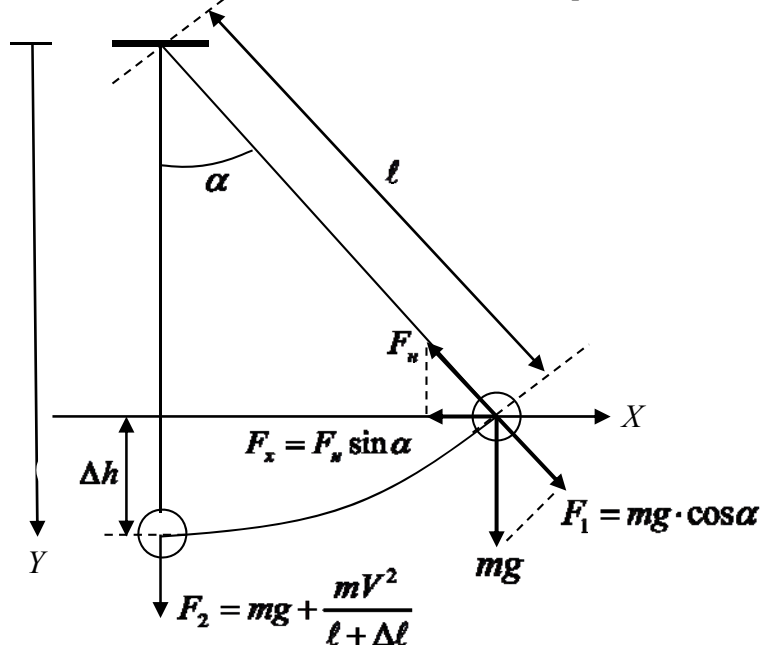


Рис.1 Схематическое изображение математического маятника.

Для того, чтобы реализовать эту модель на практике должны выполняться следующие условия:

1. размер тела должен быть много меньше длины нити ($d \ll \ell$),
2. масса тела должна быть много больше массы нити ($m \gg m_n$),
3. происходящее во время колебаний изменение длины нити должно быть много меньше длины самой нити ($\Delta\ell \ll \ell$).

Остановимся на последнем более подробно.

При максимальном отклонении маятника от состояния равновесия на максимальный угол α сила деформирующая нить

$$F_1 = mg \cos \alpha .$$

При прохождении телом положения равновесия эта сила больше и равна сумме сил тяжести и центробежной силы

$$F_2 = mg + \frac{mV^2}{\ell + \Delta\ell} . \quad (1)$$

Величина $F_2 - F_1 = k\Delta\ell$ (закон Гука) определяет значение $\Delta\ell$, которое должно быть много меньше ℓ . Расчет показывает, что это условие выполняется, когда

$$\ell \gg \frac{3mg}{k}(1 - \cos \alpha) . \quad (2)$$

Из полученного выражения следует, что подбором амплитуды колебаний (угла максимального отклонения) это соотношение может быть всегда выполнено.

Теперь рассмотрим движение самого математического маятника. Возвращающая в положение равновесия сила, действующая вдоль оси «х»,

$$F_x = F_n \sin \varphi, \quad (3)$$

определяется углом отклонения φ ($\alpha \leq \varphi \leq \alpha$) и силой натяжения нити

$$F_n = -\left(mg \cos \varphi + \frac{mV^2}{\ell}\right). \quad (4)$$

Воспользуемся законом сохранения энергии

$$mg\Delta h + \frac{mV^2}{2} = mg\Delta h_{\max}, \quad (5)$$

где $\Delta h_{\max} = \ell(1 - \cos \alpha)$ соответствует отклонению маятника на максимальный угол (α), а $\Delta h = \ell(1 - \cos \varphi)$, и найдем зависимость центробежной силы от φ

$$\frac{mV^2}{\ell} = 2mg(\cos \varphi - \cos \alpha) \quad (6)$$

После подстановки найденной величины в выражение для F_x получим:

$$F_x = -mg(3 \cos \varphi - 2 \cos \alpha) \sin \varphi \quad (7)$$

Если угол отклонения маятника настолько мал, что $\cos \alpha \approx 1$, то

$$F_x = -mg \sin \varphi = -mg \frac{x}{\ell} \quad (8)$$

Сравнивая это выражение с выражением для силы, определяющей гармонические колебания (см. приложение 1), видим, что частота колебаний математического маятника

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{\ell}}, \quad (9)$$

а период колебаний составляет величину:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}. \quad (10)$$

Период колебаний математического маятника зависит от его длины и от характеристики поля, в котором он находится.

Физический маятник.

Физическим маятником называется твердое тело, способное совершать колебательное движение в поле действия гравитационных сил или сил инерции (см. рис. 2).

Законы вращательного (колебательного) движения тела формально не отличаются от законов поступательного движения материальной точки, с той разницей, что производится замена величин $x \rightarrow \varphi$, $m \rightarrow I$, $\vec{F} \rightarrow \vec{K}$, где φ - угол отклонения маятника от положения равновесия, I - момент инерции тела, совершающего колебательное движение относительно оси, проходящей через точку подвеса физического маятника, \vec{K} - действующий момент силы (см. приложение 2).

Рассмотрим тело массой m подвешенное на идеальной нити, имеющее момент инерции относительно точки подвеса (O) I и совершающее колебательное движение в поле действия притяжения Земли (см. рис.2)

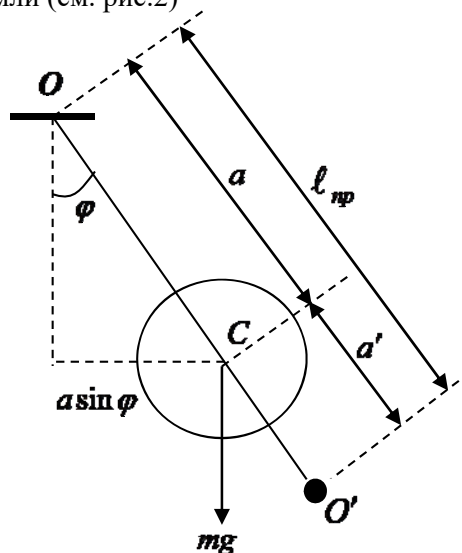


Рис. 2 Схематическое изображение физического маятника.

Момент силы (K), действующий на физический маятник длиной a , равен:

$$K = -amg \sin \varphi .$$

Если амплитуда колебаний мала, то и углы отклонения маятника (φ) от положения равновесия малы, поэтому $\sin \varphi \cong \varphi$. В этом случае можем записать:

$$K = I \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -amg \varphi , \quad (11)$$

или

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -\frac{amg}{I} \varphi = -\omega_\varphi^2 \varphi , \quad (12)$$

где

$$\omega_\varphi = \sqrt{\frac{amg}{I}} \quad (13)$$

частота колебаний физического маятника.
Период колебаний физического маятника

$$T_\varphi = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mga}} . \quad (14)$$

Замечания:

1) Если в полученное выражение для частоты колебания физического маятника подставить значение момента инерции, соответствующее материальной точке, находящейся на расстоянии a от точки подвеса ($I = ma^2$), то полученное

выражение (13) будет соответствовать частоте колебаний математического маятника, длиной $\ell = a$.

2) Из сравнения формул для частоты колебаний физического маятника (13) и формулы для математического маятника ($\omega = \sqrt{\frac{g}{\ell}}$), видно, что их частоты будут равны, если длина физического маятника будет составлять величину

$$\ell_{np} = \sqrt{\frac{I}{am}}. \quad (15)$$

Это, так называемая, **приведенная длина физического маятника**.

Свойство приведенной длины физического маятника.

Так как $I = I_0 + ma^2$ - теорема Штейнера (см. приложение 2), где I_0 - момент инерции тела относительно оси, проходящей через его центр инерции (точка C на рис.2), выражение для приведенной длины (15) можно записать в виде:

$$\ell_{np} = a + \frac{I_0}{am}. \quad (16)$$

Покажем, что периоды колебаний физического маятника, подвешенного на параллельных осях, отстоящих друг от друга на расстояние ℓ_{np} равны. Для этого отложим на продолжении прямой OC отрезок $OO' = \ell_{np}$. Подвесим маятник на ось, проходящую через точку O' . Тогда приведенная длина будет:

$$\ell'_{np} = a' + \frac{I_0}{a'm}, \quad (17)$$

где $a' = O'C$.

Но $a' = \ell_{np} - a = \frac{I_0}{am}$. Поэтому для ℓ'_{np} получаем:

$$\ell'_{np} = \ell_{np} - a + \frac{I_0}{mI_0/am} = \ell_{np} \quad (18)$$

Итак: приведенные длины, а значит и периоды (частоты) колебаний физического маятника, подвешенного на параллельных осях, отстоящих друг от друга на величину равную приведенной длине, равны.

Описание лабораторного стенда.

Схематическое изображение лабораторного стенда представлено на рис.3.

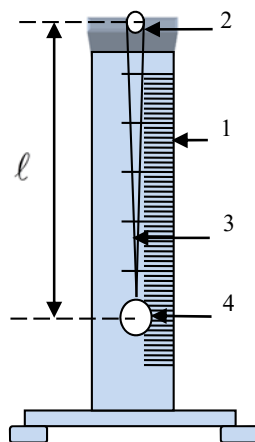


Рис.3 Схематическое изображение лабораторного стенда.

Стенд (см. рис.3) состоит из вертикально установленного штатива (1), в верхней части которого находится ролик (2) с прикрепленной к нему нитью (3). На нить подвешено шарообразное тело (4). Изменение длины нити (ℓ) осуществляется вращением ролика (2).

Задание №1. *Определить ускорение свободного падения тела с помощью математического маятника.*

Для расчета искомой величины преобразуем формулу (10) к виду:

$$g = \frac{4\pi^2 \ell}{T^2} \quad (19)$$

Порядок выполнения задания.

Порядок выполнения задания.

1. Установить длину нити маятника $\ell_1 = 55$ см (длина нити может отличаться от предложенной).

2. Отклонить тело, подвешенное на нить, от положения равновесия на угол, не превышающий 5° , и измерить секундомером время 20-и полных колебаний маятника (t_1). Определить период колебаний (T_1). Значения величин t_1 и T_1 занести в таблицу 1.

Таблица 1

№№	$\ell, \text{ см}$	$t, \text{ с}$	$T, \text{ с}$	$g, \text{ см/с}^2$	$\Delta g, \text{ см/с}^2$
1	55				
2	50				
3	45				
Средние значения величин g и Δg					

3. Повторить измерения для $\ell_2 = 50 \text{ см}$ и $\ell_3 = 45 \text{ см}$. Соответствующие этим длинам маятника значения t_2, t_3, T_2 и T_3 занести в таблицу 1.

4. Для каждого из найденных периодов колебаний и соответствующих им длин маятника

(а) провести расчет величины g по формуле (19) и занести результат в таблицу 1,

(б) вычислить среднее значение величины g и записать в таблицу 1,

(в) вычислить отклонения каждой из найденных величин g от среднего значения (Δg) и результаты занести в таблицу 1,

(г) вычислить и записать в таблицу 1 среднее значение величины Δg .

5. Вычислить относительную ошибку $E_g = \frac{\Delta g_{\text{ср}}}{g_{\text{ср}}} \cdot 100 \%$ и

представить результат проведенных расчетов в виде:

$$g = (g_{\text{ср}} \pm \Delta g_{\text{ср}}) \text{ см/с}^2; \quad E_g = \dots \%$$

Задание №2. *Определить ускорение свободного падения тела с помощью физического маятника.*

Для определения ускорения свободного падения тела с помощью физического маятника используется система, состоящая из шара (радиус шара равен r , его масса - m), подвешенного на идеальной нити, длина которой сравнима с его размером.

Для расчета искомой величины преобразуем формулу (14) к виду:

$$g = \frac{4\pi^2 I}{T_{\phi}^2 m a} \quad (20)$$

где величина a соответствует расстоянию от точки подвеса шара до его центра инерции.

Если момент инерции шара относительно точки подвеса представим в виде $I = I_0 + ma^2$, где I_0 - момент инерции шара относительно оси, проходящей через его центр инерции ($I_0=0,4 mr^2$, r – радиус шара), то выражение (20) примет вид:

$$g = \frac{4\pi^2(0,4r^2 + a^2)}{T_{\phi}^2 a} \quad (21)$$

Порядок выполнения задания.

1. Определить радиус шара (r) с помощью штангенциркуля. Результат измерений занести в таблицу 2.

2. Шар прикрепить к нити и установить длину маятника $a_1 = 9$ см.

3. Отклонить тело, подвешенное на нить от положения равновесия на малый угол и измерить секундомером время 20-ти полных колебаний маятника (t_1). Определить период колебаний ($T_{\phi 1}$). Значения величины t_1 и $T_{\phi 1}$ занести в таблицу 2.

4. Повторить измерения для $a_2 = 12$ см и $a_3 = 15$ см. Соответствующие этим длинам маятника значения $t_2, t_3, T_{\phi 2}$ и $T_{\phi 3}$ занести в таблицу 2.

5. Для каждого из найденных периодов колебаний и соответствующих им длин

(а) провести расчет величины g по формуле (21) и занести результаты в таблицу 2,

(б) вычислить и записать в таблицу 2 среднее значение величины g ($g_{\text{ср}}$),

(в) вычислить и записать в таблицу 2 отклонения каждой из найденных величин g от среднего значения (Δg),

(г) вычислить и записать в таблицу 2 среднее значение величины Δg ($\Delta g_{\text{ср}}$).

Таблица 2

№№	$a, \text{ см}$	$t, \text{ с}$	$T_{\phi}, \text{ с}$	$g, \text{ см/с}^2$	$\Delta g, \text{ см/с}^2$
1	9,0				
2	12,0				
3	15,0				

$r = \dots\dots\dots \text{см}$	Средние значения величин g и Δg		
---------------------------------	--	--	--

6. Вычислить относительную ошибку $E_g = \frac{\Delta g_{\text{ср}}}{g_{\text{ср}}} \cdot 100 \%$

7. Результат проведенной работы представить в виде:

$g = (g_{\text{ср}} \pm \Delta g_{\text{ср}}) \text{ см/с}^2; \quad E_g = \dots\%$
--

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УПРУГОСТИ ПРУЖИНЫ

Цель работы. Изучение гармонических колебаний твердого тела. Определение коэффициента упругости пружины.

Краткая теория.

Закон Р. Гука.

При действии внешних сил на физическое тело происходит изменение его геометрических размеров, возникает его деформация. Деформации подразделяются на упругие и неупругие. Если после прекращения действия деформирующей силы тело его геометрические размеры полностью восстанавливаются, то такая деформация является упругой. В противном случае – деформация неупругая.

Если мысленно разбить тело на слои, то в результате деформации происходит смещение слоев друг относительно друга, между слоями возникают силы препятствующие смещению. Интенсивность этих сил характеризуется величиной возникающего в теле напряжения (P), которое определяется силой, действующей между слоями (F), отнесенной к единице площади их поверхности $P = \frac{F}{S}$. Напряжение может действовать как в направлении перпендикулярном поверхности слоя - «нормальное напряжение» (всестороннее сжатие или расширение, продольное сжатие или растяжение), так и вдоль слоя – «тангенциальное напряжение» (деформация типа «сдвиг»).

Для упругой деформации Роберт Гук установил взаимосвязь между напряжением, возникающем в деформируемом теле, и величиной его относительной деформации:

$$P = K \frac{\Delta X}{X} \quad (1)$$

Здесь K – модуль упругости, X – параметр тела, деформация которого (ΔX) возникает. Для всестороннего сжатия (расширения) – это объем, для продольной деформации стержня – это его длина, для деформации «изгиб» – это угол.

Пружинный маятник.

Пружинный маятник представляет собой систему, состоящую из пружины длиной L и тела массой m , прикрепленного к ней (см.рис.1). При растяжении или сжатии пружины изменяется ее длина на величину $\Delta \ell$. Для рассматриваемой системы закон Гука запишем в виде:

$$P = K \frac{\Delta \ell}{L} . \quad (2)$$

Эта формула может быть представлена через силу, возникающую в пружине при ее деформации и препятствующей ей:

$$F_{\text{уп}} = k \Delta \ell , \quad (3)$$

где k – коэффициент упругости (жесткости) пружины, величина которого зависит от ее геометрии (диаметр проволоки, диаметр витков пружины, длина пружины, число витков в пружине) и материала из которого она изготовлена. В системе единиц СГС

$$[k] = \frac{\text{дн}}{\text{см}} , \text{ в СИ } [k] = \frac{\text{Н}}{\text{м}} .$$

В соответствии со вторым законом Ньютона

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{V}}{dt} = \sum_i \vec{F}_i \quad (4)$$

Для пружинного маятника, находящегося в поле земного притяжения ($F_m = mg$, см.рис.1) имеем:

$$F = -k(\Delta \ell) + mg \quad (5)$$

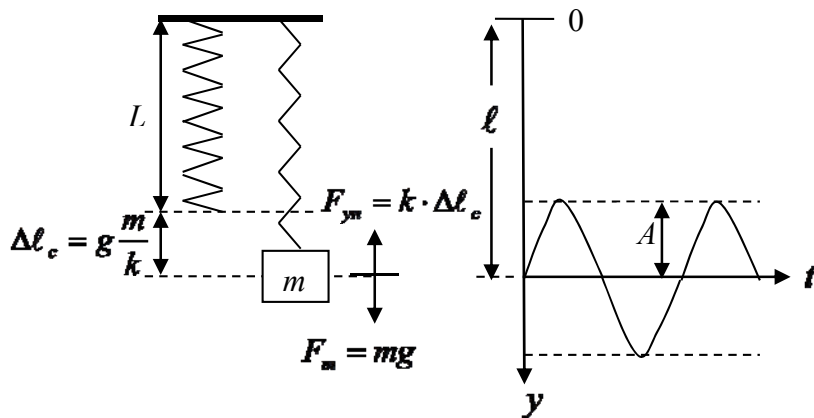


Рис.1 Схематическое изображение пружинного маятника.

Если рассматриваемая система неподвижна, то (первый закон Ньютона)

$$\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i = \vec{F}_m + \vec{F}_{yn} = 0 \quad (6)$$

и изменение длины пружины определяется массой подвешенного к ней груза

$$\Delta \ell_c = \frac{mg}{k}, \quad (7)$$

что позволяет определить коэффициент упругости (жесткости) пружины

$$k = g \frac{m}{\Delta \ell_c}, \quad (8)$$

Если прикрепленное к пружине тело сместить в вертикальном направлении на величину A и отпустить (см.рис.1), то возникнут

продольные колебания. В этом случае $\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i \neq 0$ и динамика

изменения величины $\Delta\ell$ описывается уравнением:

$$\frac{F}{m} = \frac{dV}{dt} = \frac{d^2(\Delta\ell)}{dt^2} = -\frac{k}{m}(\Delta\ell - \frac{mg}{k}) = -\omega^2(\Delta\ell - \Delta\ell_c) \quad (9)$$

где $\omega^2 = \frac{k}{m}$ (см. приложение 1),

Сделаем замену переменных: $x = \Delta\ell - \Delta\ell_c$, получим:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2x. \quad (10)$$

Решением этого уравнения являются гармонические колебания (см. приложение 1)

$$x = A \cos(\omega t + \varphi). \quad (11)$$

Возвращаясь к переменной $\Delta\ell$, получаем:

$$\Delta\ell = A \cos(\omega t + \varphi) + \Delta\ell_c \quad (12)$$

или, с учетом собственной длины пружины L , уравнение описывающее движение пружинного маятника вдоль оси y примет вид:

$$y = A \cos(\omega t + \varphi) + \Delta\ell_c + L. \quad (13)$$

Из представленного решения видно, что тело с массой m может совершать колебательное движение вблизи положения равновесия, находящегося на расстоянии $\ell = L + \Delta\ell_c$ от точки подвеса пружины. Положение точки равновесия определяется собственной длиной пружины (L) и величиной $\Delta\ell_c = \frac{mg}{k} = \frac{g}{\omega^2}$.

Следует отметить, что в колебательном процессе участвует не только тело массой m подвешенное на пружине, но и сама пружина. Таким образом, возникает вопрос о влиянии массы пружины (m_{np}) на частоту колебаний пружинного маятника. Заметим, что если тело массой m в полной мере участвует в колебательном движении, то различные части пружины имеют различную амплитуду колебаний. Таким

образом, следует ожидать, что в выражении для частоты колебаний войдет не вся m_{np} , а только ее часть. Расчеты показывают, что это действительно так, и в этом случае выражение для частоты колебаний пружинного маятника имеет

вид:
$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m + \frac{m_{np}}{3}}} \quad (14)$$

Используя соотношение $\omega = \frac{2\pi}{T}$, где T - период колебаний, получим зависимость, позволяющую определить коэффициент упругости (жесткости) пружины в динамическом

режиме:
$$k = \frac{4\pi^2(m + \frac{m_{np}}{3})}{T^2} . \quad (15)$$

Описание лабораторного стенда.

Стенд (см. рис.2) состоит из вертикально установленного штатива (1), в верхней части которого находится вращающаяся

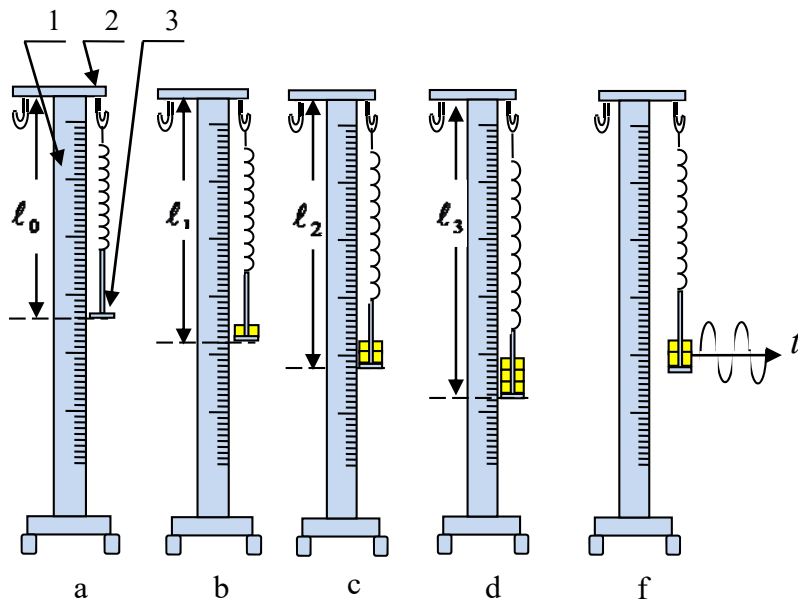


Рис.2 Схематическое изображение лабораторного стенда

планка (2) с двумя крючками для крепления пружины, расположенными на различных расстояниях от оси ее вращения, и платформы (3), на которой могут располагаться грузы.

Задание №1. *Определение коэффициента упругости (жесткости) пружины статическим методом.*

Порядок выполнения задания.

1. Подвесить пружину с платформой на ближний к штативу крючок.

2. Определить по шкале, нанесенной на штатив, положение нижней поверхности платформы l_0 (см. рис.2 (а)). Величину l_0 записать в таблицу 1 в строчке «нагрузка».

3. Положить на платформу груз, массой m_1 , определить по нижней поверхности платформы l_1 (см. рис.2 (б)). Значения m_1 и l_1 записать в таблицу 1. l_1 в строчке «нагрузка», m_1 – в соответствующей ей графе.

4. Положить на платформу еще один груз, массой m_2 , определить по нижней поверхности платформы l_2 (см. рис.2 (с)). Значения $(m_1 + m_2)$ и l_2 записать в таблицу 1. l_2 в строчке «нагрузка», $m_1 + m_2$ – в соответствующей графе таблицы.

5. Положить на платформу третий груз, массой m_3 , определить по нижней поверхности платформы l_3 (см. рис.2 (d)). Значения $(m_1 + m_2 + m_3)$ и l_3 записать в таблицу 1. l_3 в строчке «нагрузка», $m_1 + m_2 + m_3$ – в соответствующей графе таблицы.

6. Чтобы убедиться в отсутствии остаточной деформации еще раз провести измерение l_3 , снять груз m_3 и измерить l_2 , снять груз m_2 и измерить l_1 , снять груз m_1 и измерить l_0 . полученные значения записать в таблицу 1 в строчке «разгрузка». Запись в таблицу проводить справа налево.

7. Определить средние значения l_0^{cp} , l_1^{cp} , l_2^{cp} , l_3^{cp} .
 Результаты записать в таблицу 1.

Таблица 1

	$l_0, \text{ см}$	$l_1, \text{ см}$	$l_2, \text{ см}$	$l_3, \text{ см}$
нагрузка				
разгрузка				
среднее значение				
массы грузов, г		m_1	$m_1 + m_2$	$m_1 + m_2 + m_3$

8. Используя формулу (8) для каждого из значений $\Delta l_1 = l_1^{cp} - l_0^{cp}$ и $m = m_1$, $\Delta l_2 = l_2^{cp} - l_0^{cp}$ и $m = (m_1 + m_2)$, $\Delta l_3 = l_3^{cp} - l_0^{cp}$ и $m = (m_1 + m_2 + m_3)$ определить коэффициент упругости (жесткости) k_1, k_2, k_3 . Результаты записать в таблице 2.

9. Вычислить среднее значение (k_{cp}), найти отклонения k_1, k_2, k_3 от k_{cp} ($\Delta k_1, \Delta k_2, \Delta k_3$) и среднее значение Δk_{cp} . Результаты записать в таблицу 2.

Таблица 2

№№	$k, \text{ Н/м}$	$\Delta k, \text{ Н/м}$
1		
2		
3		
среднее значение		

10. Вычислить относительную ошибку $E = \frac{\Delta k_{cp}}{k_{cp}} \cdot 100 \%$

и представить результат проведенных расчетов в виде:

$$k = (k_{\text{ср}} \pm \Delta k_{\text{ср}}) \text{ Н/м. } E = \dots\dots\dots\%$$

Задание №2. ***Определение коэффициента упругости (жесткости) пружины динамическим методом.***

Порядок выполнения задания.

1. Измерить в граммах массу платформы ($m_{\text{пл}}$) и массу пружины ($m_{\text{пр}}$). Результаты измерений записать в таблицу 3.

2. Подвесить пружину с платформой на дальний от штатива крючок (рис. 2(f)), чтобы исключить влияние силы трения платформы о штатив при колебательном движении.

3. Положить на платформу груз, массой m_1 . Рассчитать величину $m_1 + m_{\text{пл}} + \frac{m_{\text{пр}}}{3}$ и записать в таблицу 3.

4. Сместить платформу с грузом вверх примерно на 1 см и отпустить – маятник начнет совершать продольные колебания в вертикальном направлении.

5. Измерить время десяти полных колебаний (t_1), определить период колебаний (T_1). Значения t_1 и T_1 записать в таблицу 3.

6. Рассчитать по формуле

$$k_1 = \frac{4\pi^2 (m_1 + m_{\text{пл}} + \frac{m_{\text{пр}}}{3})}{T_1^2}$$

коэффициент упругости (жесткости) пружины.

7. Результат расчета записать в таблицу 3.

8. Провести аналогичные измерения и расчеты для двух и для трех грузов расположенных на платформе. Результаты измерений и расчетов записать в таблицу 3.

9. Вычислить среднее значение (k_{cp}), найти отклонения k_1, k_2, k_3 от k_{cp} ($\Delta k_1, \Delta k_2, \Delta k_3$) и среднее значение Δk_{cp} . Результаты записать в таблицу 3.

Таблица 3

№№	$m_{nl} =$ $m_{np} =$	$z,$ z	t, c	T, c	$k,$ H/M	$\Delta k,$ H/M
1	$m_1 + m_{nl} + \frac{m_{np}}{3} =$					
2	$m_1 + m_2 + m_{nl} + \frac{m_{np}}{3} =$					
3	$m_1 + m_2 + m_3 + m_{nl} + \frac{m_{np}}{3} =$					
средние значения k и Δk						

9. Вычислить относительную ошибку $E = \frac{\Delta k_{cp}}{k_{cp}} \cdot 100 \%$

и представить результат проведенных расчетов в виде:

$k = (k_{cp} \pm \Delta k_{cp}) H/M. \quad E = \dots\dots\dots\%$

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОВ ДВИЖЕНИЯ НА МАШИНЕ АТВУДА

Цель работы: Изучение законов кинематики и динамики поступательного прямолинейного движения тел в поле тяготения Земли.

Оборудование: машина Атвуда, набор перегрузков, весы, секундомер.

Краткая теория.

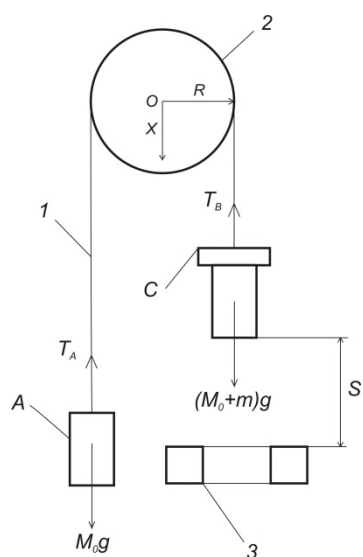


Рис.1 Схематическое изображение машины Атвуда.

Для изучения законов прямолинейного поступательного движения удобно использовать простое классическое устройство, которое называется машиной Атвуда (рис.1). Машина Атвуда состоит из двух одинаковых тел A и B , соединенных нитью 1, перекинутой через блок 2. На одном из тел, например, B (см рис.1) можно класть дополнительно тело C малой массы. Его называют перегрузком. Под действием веса перегрузка система начнет двигаться с ускорением.

Рассмотрим ускоренное движение системы на участке S .

Определим ускорения a_A и a_B движения грузов и действующие на них силы.

При расчетах за положительное направление оси Ox координат выберем направление вниз. Пусть массы тел A и B равны M_0 , масса перегрузка C равна m_1 . На каждое из тел будет действовать сила тяжести и сила натяжения T нити. Спроектируем все силы на ось Ox и запишем систему уравнений

в соответствии со вторым законом Ньютона в виде:

$$\begin{cases} M_0 g - T_A = M_0 a_A, & (\text{груз } A) \\ (M_0 + m_1)g - T_B = (M_0 + m_1)a_B & (\text{груз } B + C) \end{cases} \quad (1)$$

Будем считать нить, соединяющую тела, нерастяжимой, а силу трения, массы нити и блока пренебрежимо малыми. Это означает, что ускорения тел A и B равны по абсолютной величине: $|\vec{a}_B| = |\vec{a}_A| = |\vec{a}|$, а также равны натяжения нити: $|\vec{T}_B| = |\vec{T}_A| = |\vec{T}|$.

С учетом вышесказанного система уравнений (1) принимает простой вид:

$$\begin{cases} M_0 g - T = -M_0 a, \\ (M_0 + m_1)g - T = (M_0 + m_1)a \end{cases}$$

Решая систему относительно неизвестных a и T , получим

$$\begin{cases} a = \frac{m_1}{2M_0 + m_1} g & (2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} T = \left(1 + \frac{m_1}{2M_0 + m_1}\right) M_0 g & (3) \end{cases}$$

Как видно из полученного выражения (2), ускорение системы равно отношению результирующей силы, действующей на систему (вес перегрузка $m_1 g$), к полной массе системы ($2M_0 + m_1$).

В общем случае равноускоренного прямолинейного движения уравнения для пути S и скорости v записываются следующим образом

$$v = v_0 + at \quad (4)$$

$$S = v_0 t + \frac{at^2}{2} \quad (5)$$

где v_0 – начальная скорость движения.

В машине Атвуда на участке движения S $v_0 = 0$ и выражения (4) и (5) принимают простейший вид

$$v = at \quad (6)$$

$$S = \frac{at^2}{2} \quad (7)$$

где t – интервал времени от начала движения до момента снятия перегрузка, а v – скорость в конце пути S . Ускорение в этих формулах определяется выражением (2).

Описание экспериментальной установки и методики измерений.

Прибор Атвуда представляет собой систему двух грузов A и B цилиндрической формы и одинаковой массы M_0 , соединенных тонкой нитью (рис.1). Нить 1 перекинута через легкий блок 2, который может вращаться с небольшим трением вокруг горизонтальной оси. Блок закреплен в верхней части вертикальной стойки, имеющей отградуированную в сантиметрах шкалу. Стойка укреплена на массивном основании, на котором также размещен электронный секундомер. На грузы A и B могут надеваться один или несколько кольцеобразных перегрузков различной массы, предназначенные для задания ускорения системе, а также для компенсации силы трения.

При подготовке опыта груз B устанавливается на требуемом расстоянии S от платформы 3, на которой укреплен фотоэлектрический выключатель секундомера. Положение груза B фиксируется в исходном состоянии с помощью электромагнитного тормоза. Электрическая схема включается клавишей СЕТЬ, расположенной на лицевой панели электронного секундомера. Перед опытом нажатием клавиши СБРОС устанавливаются нулевые показания на шкале секундомера. При нажатой клавише ПУСК выключается электромагнитный тормоз, и система грузов приходит в ускоренное движение, одновременно включается секундомер. В момент пересечения основанием груза B платформы 3 секундомер выключается и на табло высвечивается время движения груза B на пути S .

Порядок выполнения лабораторной работы.

Прежде чем приступать к экспериментам, необходимо подбором массы добавочного перегрузка, добиться компенсации силы трения покоя в подшипниках блока 2. Перегрузок выбирается максимальной массы, при которой система еще не начинает движения, и накладывается на груз B в каждом из проводимых экспериментов.

Задание №1. *Определение ускорения тел.*

Экспериментальная установка позволяет измерять время t движения груза на отрезке пути S , поэтому из выражения $S =$

$\frac{at^2}{2}$ получим формулу для определения экспериментального значения ускорения:

$$a_{\text{э}} = \frac{2S}{t^2}. \quad (8)$$

Теоретическое значение ускорения получаем из выражения (2):

$$a_{\text{т}} = \frac{m_1}{2M_0 + m_1} g. \quad (9)$$

Порядок выполнения задания.

1. Измерить массу перегрузка m и массу груза M_0 . Результат измерений записать в таблицу 1.
2. Включить в сеть шнур питания прибора.
3. Перекинуть через блок 2 нить с двумя грузами А и В и убедиться, что система находится в положении равновесия.
4. Переместить нить с грузами так, чтобы правый груз занял верхнее положение.
5. Нажать на кнопку “СЕТЬ” миллисекундомера, при этом включается электромагнит, удерживающий систему в положении покоя.
6. Положить на правый груз перегрузок С.
7. Нажатием клавишей СБРОС установить нулевые показания секундомера.
7. Нажать на кнопку «ПУСК» электронного блока, закрепленного на платформе 3. Происходит растормаживание электромагнита, правый груз начинает опускаться, а таймер электронного блока начинает отсчет времени. При пересечении правым грузом оптической оси фотодатчика отсчет времени прекратится. Записать показания таймера с дисплея электронного блока измерения времени t движения грузов в таблицу 1.
8. Определить пройденный грузами путь по шкале, как расстояние от нижнего основания правого груза В платформы 3. Результат занести в таблицу.
9. Повторить с выбранным перегрузком опыт не менее трех раз.

Таблица 1

№№	S, м	t, с	m, кг	M ₀ , кг	a _э , м/с ²	a _т , м/с ²
1						
2						
3						
Ср. значение						

10. Определить по результатам опытов значение t_{cp} и рассчитать по формуле (8) экспериментальное значение ускорения $a_э$.

11. Вычислить теоретическое значение ускорения по формуле (9). Результаты записать в таблицу и представить в виде

$$a = (a_{cp} \pm \Delta a_{cp}) \text{ м/с}^2$$

12. Сравнить теоретическое и экспериментальное значения ускорения, рассчитав относительную погрешность

$$\varepsilon = \frac{|a_э - a_т|}{a_т} \cdot 100\%$$

13. Провести измерения и расчёт по пунктам 1-11 для другого перегрузка m_2 .

№№	S, м	t, с	m ₂ , кг	M ₀ , кг	a _э , м/с ²	a _т , м/с ²
1						
2						
3						
Ср. значение						

$$a_2 = (a_{cp} \pm \Delta a_{cp}) \text{ м/с}^2$$

$$\varepsilon = \frac{|a_э - a_т|}{a_т} \cdot 100\%$$

Задание №2. Проверка квадратичного характера зависимости времени равноускоренного прямолинейного движения от пройденного телом пути.

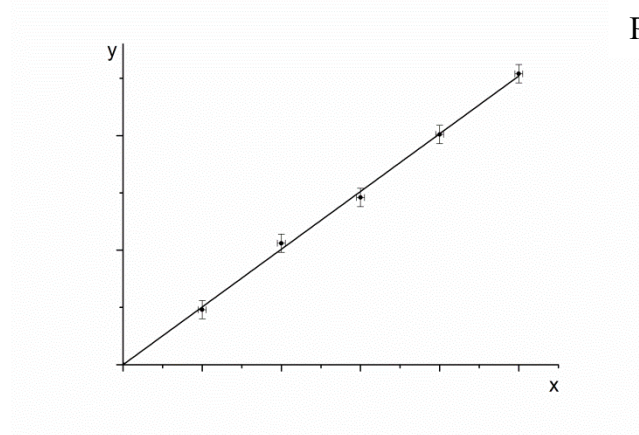
С помощью данной установки легко непосредственно проверить соотношение

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

Для различных значений пройденного пути S можно измерить время опускания груза B с перегрузком. Полученные результаты удобно представить графически в виде зависимости

$$y = f(x), \text{ где } y = S, x = \frac{t^2}{2}. \quad (10)$$

Если экспериментальные точки в пределах точности измерений ложатся на прямую (рис.2), то это может являться экспериментальным подтверждением равноускоренного характера движения. Теоретическая зависимость $y = f(x)$ согласно (10) имеет вид: $y = ax$ (вид прямой линии).



Тангенс угла наклона позволяет найти константу

$$a = \frac{\Delta y}{\Delta x}. \quad (11)$$

Сняв экспериментальную зависимость $t = f(S)$ и построив соответствующий график в координатах $(\ln t, \ln S)$, необходимо с

помощью линейки проверить, является ли график прямой линией, а затем по данным графика и формуле (11) значение коэффициента a . Если график окажется прямой линией, это будет означать, что реальное движение груза было равноускоренным и может описываться уравнением (7).

Порядок выполнения задания.

1. Измерить путь S и время t движения груза B с надетым перегрузком (той же массы, что и в задании №1) по методике, описанной в предыдущем задании. Результаты записать в таблицу 2.
2. Перемещая платформу 3, изменить значение пути S .
3. Измерить время движения груза B с перегрузком для пяти различных значений пути S . Результаты занести в таблицу 2.
4. Рассчитать значения $\frac{t^2}{2}$ и внести в таблицу.

Таблица 2

N_2, N_3	$S, \text{ м}$	$t, \text{ с}$	$\frac{t^2}{2}, \text{ с}^2$
1			
2			
3			
4			
5			

5. Построить график функции S от $\frac{t^2}{2}$. По графику определить значение ускорения a .
6. Сравнить с результатами, полученными в задании №1.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ

Цель работы. Определение динамической вязкости жидкости по скорости падения в ней шарика методом Стокса.

Краткая теория.

Вязкость (внутреннее трение), это свойство подвижных сред (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой.

Молекулярно-кинетическая теория объясняет вязкость тепловым движением молекул и их взаимодействием между собой. Механизмы возникновения силы вязкого трения в газах и жидкостях различны, что следует из опыта, показывающего, что с увеличением температуры силы вязкого трения в газах возрастают, а в жидкостях уменьшаются.

В газах расстояния между молекулами существенно больше радиуса действия межмолекулярных сил, поэтому вязкость газов определяется тепловым движением молекул. Рассмотрим два слоя газа (см. рис.1). Молекулы из слоя 1, движущегося в направлении X со скоростью V_1 , за счет теплового движения проникают в слой 2, а из слоя 2, движущегося вдоль X со скоростью V_2 , в слой 1. При этом общее число молекул в каждом слое остается неизменным. Молекулы из слоя 1 переносят в слой 2 в направлении X количество движения, пропорциональное V_1 , а из слоя 2 в слой 1 – пропорциональное V_2 . Происходит обмен количеством движения между слоями газа. Изменение количества движения в единицу времени определяет силу, которая в рассматриваемом случае является силой вязкого трения. Для газов она определяется скоростью обмена количеством движения, т.е. температурой. Чем выше температура, тем интенсивней происходит обмен и тем больше сила вязкого трения.

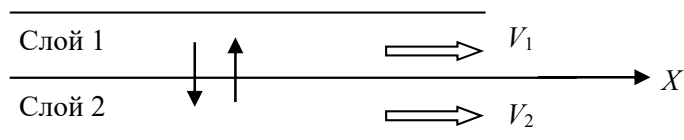


Рис.1 Схема, демонстрирующая возникновение силы вязкого трения в потоке газа

При этом вязкость газа не зависит от его плотности (давления) – закон Максвелла, подтвержденный экспериментально Бойлем.

В жидкостях, где расстояния между молекулами много меньше, чем в газах, вязкость обусловлена в первую очередь межмолекулярным взаимодействием, ограничивающим подвижность молекул. Степень влияния межмолекулярных сил взаимодействия уменьшается с увеличением температуры. Вязкость жидкости уменьшается с увеличением ее температуры.

Сила вязкого трения Ньютона.

Рассмотрим однородную жидкость, заключенную между двумя твердыми поверхностями AA и BB (рис.2), из которых нижняя неподвижна, а верхняя перемещается параллельно нижней со скоростью V в направлении оси X . Разделим жидкость условно на слои, параллельные рассматриваемым поверхностям. Слой жидкости, прилегающий к верхней поверхности, будет перемещаться вместе с ней и с такой же скоростью. Вследствие внутреннего трения этот слой будет увлекать за собой нижележащий слой, который в свою очередь будет увлекать следующий и т.д. Скорости перемещения слоев будут уменьшаться по мере приближения к нижней неподвижной поверхности.

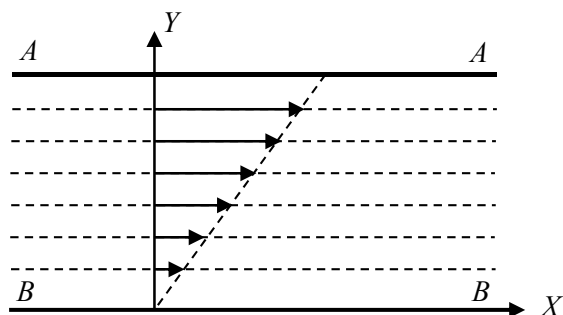


Рис.2 Профиль скоростей.

Сила трения (F_η) тем больше, чем больше площадь соприкосновения слоев жидкости (S) и определяет быстроту изменения скорость течения жидкости при переходе от слоя к слою $\frac{\Delta V}{\Delta Y}$, где $\Delta V = V_1 - V_2$ - разность скоростей двух слоев, находящихся на расстоянии ΔY друг от друга. Величина $\frac{\Delta V}{\Delta Y}$ - называется градиентом скорости ($\text{grad}V$).

Величина силы внутреннего трения определяется законом Исаака Ньютона

$$F_\eta = \eta \frac{\Delta V}{\Delta Y} S \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности η называется коэффициентом внутреннего трения, динамической вязкостью или просто вязкостью. Единицей измерения динамической вязкости в системе СГС является Пуаз ($\frac{\text{г}}{\text{см} \cdot \text{с}}$). Размерность этой единицы в интернациональной системе (СИ) - Па·с.

Сила вязкого трения Стокса.

Сэр Джордж Габриэль Стокс установил, что при относительно медленном движении сферического тела в вязкой среде сила вязкого трения определяется выражением:

$$F_Q = 6\pi\eta rV \quad (2)$$

где r - радиус сферического тела, V - его скорость.

Движение сферического тела в вязкой среде в поле действия силы тяжести.

Уравнение, описывающее динамику рассматриваемого движения, имеет вид:

$$\vec{F} = \vec{F}_T + \vec{F}_A + \vec{F}_Q \quad (3)$$

где $\vec{F}_T = m_u \vec{g} = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho \cdot \vec{g}$ - сила тяжести, $\frac{4}{3}\pi r^3$ - объем сферического тела (шарика) радиуса r , ρ - плотность материала шарика (масса шарика $m_u = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho$), \vec{g} - ускорение свободного падения, $\vec{F}_A = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_c \vec{g}$ - сила Архимеда, ρ_c - плотность вязкой среды.

В случае $F_T > F_A + F_Q$ (см.рис.3) уравнение (3) принимает вид:

$$F = F_T - F_A - F_Q \quad (4)$$

и имеет решение относительно скорости движения шарика (см. приложение 3).

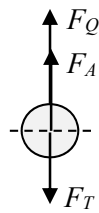


Рис.3

$$V = (V_0 - V_{стац}) \exp\left\{-\frac{6\pi\eta r}{m_u} t\right\} + V_{стац} \quad (5)$$

где

$$V_{\text{стац}} = \frac{F_T - F_A}{6\pi\eta r} = \frac{2}{9} \frac{r^2}{\eta} g(\rho - \rho_c) \quad (6)$$

Представленное решение показывает, что можно указать такое время t , начиная с которого скорость сферического тела (шарика) практически не меняется, $V \approx V_{\text{стац}}$.

Выражение (6) может быть использовано для определения коэффициента динамической вязкости.

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{r^2}{V_{\text{стац}}} g(\rho - \rho_c) \quad (7)$$

или

$$\eta = \frac{1}{18} \frac{d^2 g t}{L} (\rho - \rho_c) \quad (8)$$

где d – диаметр шарика, t – время, за которое шарик проходит с постоянной скоростью путь L .

Определить динамическую вязкость жидкости.

Оборудование. Стеклоанный цилиндр с жидкостью (глицерин), микроскоп с окулярным микрометром, шарики, секундомер.

Описание лабораторного стенда.

Стенд состоит из стеклянной цилиндрической емкости (рис.4), наполненной жидкостью (глицерин). В верхней и нижней части емкости имеются метки. Предполагается,

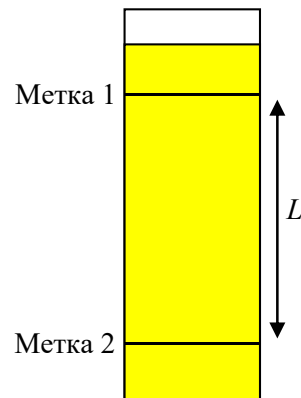


Рис.4. Лабораторный стенд.

что расстояние между поверхностью жидкости и верхней меткой обеспечивает время движения шарика, достаточное для того, чтобы его скорость перестала меняться. Для определения диаметра шарика используется микроскоп с окулярным микрометром. Через окуляр микроскопа виден одновременно шарик и шкала микрометра. Цена наименьшего деления шкалы указана на предметном столике прибора. Время движения шарика измеряется секундомером, расстояние между метками на емкости – ученической линейкой. Значения плотностей материала шарика и жидкости представлены на табличке, расположенной вблизи лабораторного стенда.

Порядок выполнения задания.

1. Разместить верхнюю метку на цилиндрической емкости не ближе 4 см от поверхности жидкости, а нижнюю на расстоянии $L=15-20$ см от верхней. Значение L записать в таблицу 1.
2. Определить диаметр шарика. Для этого положить шарик на предметный столик микроскопа. Перемещением тубуса микроскопа сфокусировать изображение шарика. Определить число наименьших делений измерительной шкалы, соответствующих диаметру шарика (см. рис.5). Результат записать в таблицу 1. Изменить положение шарика и повторить измерения. Результат записать в таблицу 1.

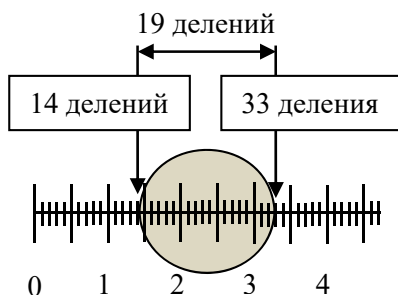


Рис.5 Пример измерения диаметра шарика.

3. Найти среднее арифметическое значение измеренных величин и умножить его на цену деления шкалы. Результат записать в таблицу 1.

4. Поместить шарик на поверхность жидкости вблизи центральной оси цилиндрической емкости. Шарик начнет движение. В момент прохождения шариком верхней метки включить секундомер. При прохождении шариком нижней метки секундомер выключить. Время, в течение которого шарик проходит расстояние между двумя метками, записать в таблицу. Внимание. Если погружение шарика сопровождается прилипший к нему пузырек воздуха, то измерения времени движения шарика не проводить.
5. Используя формулу (8), рассчитать динамическую вязкость жидкости. Результат записать в таблицу 1.
6. Повторить измерения (пункты 2-5) еще для двух шариков. Результаты записывать в таблицу 1.
- Замечание. В работе использовать одну и ту же цилиндрическую емкость с жидкостью.
7. Определить среднее значение динамической вязкости (η_{cp}). Результат записать в таблицу 1.
8. Определить отклонение каждой из найденной величины динамической вязкости от среднего значения, найти среднее отклонение ($\Delta\eta_{cp}$). Результат записать в таблицу 1.

Таблица 1

№№ шара	Диаметр шара, (число делений)	Среднее значение диаметра шара, см	L , см	t , сек	η , Па·с	$\Delta\eta$, Па·с
1						
2						
3						
					$\eta_{cp} =$	$\Delta\eta_{cp} =$

9. Вычислить относительную ошибку E_η .

10. Результат проведенной работы представить в виде:

$$\eta = (\dots \pm \dots) \text{ Па} \cdot \text{с}; E_\eta = \dots\%$$

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПО МЕТОДУ МАКСИМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ В ПУЗЫРЬКЕ

Цель работы: Установить, как изменяется поверхностное натяжения раствора спирта в воде с увеличением его концентрации.

Оборудование: Прибор для определения поверхностного натяжения жидкости, термометр, дистиллированная вода, набор растворов различной концентрации, нагреватель воды, стакан.

Краткая теория.

На молекулу жидкости действуют силы притяжения со стороны окружающих молекул. Если молекула находится внутри жидкости и удалена от ее поверхности на расстояние, превышающее радиус сферы молекулярного действия ($\sim 10^{-7}$ см), то эти силы в среднем уравниваются. Если же молекула находится в тонком слое вблизи поверхности жидкости, толщина которого равна радиусу сферы молекулярного действия, то появляется результирующая сила, направленная внутрь жидкости, нормально к ее поверхности. Действие молекул газа над жидкостью очень мало, и его можно не учитывать.

Для того чтобы молекулу из внутренних частей жидкости переместить на ее поверхность, необходимо совершить работу против сил, действующих в поверхностном слое. Эта работа расходуется на увеличение потенциальной энергии молекул, а, следовательно, и на увеличение энергии поверхностного слоя. Поэтому молекулы в поверхностном слое обладают избыточной энергией по сравнению с молекулами внутри жидкости.

При увеличении поверхности жидкости некоторое число молекул из объема жидкости должно быть поднято в поверхностный слой. Для этого необходимо затратить работу. Величина этой работы зависит от интенсивности межмолекулярных сил в данной жидкости.

Для изменения поверхности жидкости на величину ΔS , необходимо совершить работу ΔA , равную

$$\Delta A = \sigma \Delta S \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности σ называется поверхностным натяжением или удельной плотностью поверхностной энергии. Величина этого коэффициента зависит от рода обеих сред, образующих поверхность. Из уравнения (1) следует, что

$$\sigma = \frac{\Delta A}{\Delta S}, \quad (2)$$

то есть, поверхностное натяжение σ равно работе, которую надо затратить, чтобы изотермически и квазистатически увеличить поверхность жидкости на единицу.

Изотермическая работа, как известно, равна убыли свободной энергии системы. При этом система в изотермических условиях стремится достигнуть состояния с наименьшей свободной энергией. Поэтому поверхность жидкости стремится сократиться. Благодаря этому вдоль поверхности жидкости действуют силы, называемые силами поверхностного натяжения. В этом отношении жидкость уподобляется тонкой резиновой пленке, растянутой изотропно по всем направлениям в плоскости поверхности. Поэтому поверхностное натяжение σ может быть также определено как сила F , действующая на единицу длины линии, ограничивающей поверхность жидкости. Эта сила действует в плоскости, касательной к поверхности жидкости в данной точке, и направлена в сторону уменьшения поверхности. Таким образом,

$$\sigma = \frac{F}{l}, \quad (3)$$

где l - длина линии, ограничивающей поверхность жидкости.

Из определений σ следует, что единицей измерения поверхностного натяжения в системе СГС является эрг/см² или дина/см, а в системе СИ Н/м.

В состоянии равновесия свободная энергия системы должна быть минимальной. Допустим, что жидкость совершенно свободна, то есть, не ограничена стенками сосуда и не подвержена действию внешних силовых полей. Тогда под действием сил поверхностного натяжения она должна принять форму шара, так как из всех тел заданного объема шар имеет наименьшую поверхность, а потому и наименьшую поверхностную свободную энергию. Получению шаровой формы капли жидкости мешает сила тяжести. Потенциальная энергия

силы тяжести пропорциональна объему жидкости, тогда как энергия поверхностного натяжения пропорциональна ее поверхности. Поэтому относительное влияние силы тяжести по сравнению с влиянием поверхностного натяжения тем больше, чем больше объем капли. Малые капли воды и, в особенности, капли ртути практически шарообразны.

Если свободная поверхность жидкости имеет некоторую кривизну, то силы поверхностного натяжения вызывают дополнительное давление $\pm \Delta p$ под искривленной поверхностью. Силы поверхностного натяжения дают при выпуклых и вогнутых поверхностях слагающую f , направленную всегда в сторону вогнутой поверхности (рис.1).



Рисунок 1.

Пусть поверхность имеет форму сферы радиуса r . Выделим на этой поверхности площадку S , опирающуюся на основание S_0 радиуса $r_0 = r \cos \theta$ (рис.2). Силы поверхностного натяжения, возникающие по периметру этой площадки, имеют равнодействующую, перпендикулярную к S_0 и равную

$$|\sum \vec{F}| = \sum F_0 = \sigma 2\pi r_0 \cos \theta,$$

(составляющие F , в сумме дают нуль). Эта равнодействующая уравновешивается силой дополнительного давления газа под искривленной поверхностью:

$$\Delta p S_0 = \Delta p \pi r_0^2$$

то есть

$$\sigma 2\pi \cos \theta = \Delta p \pi r_0$$

Откуда

$$\begin{aligned} \Delta p &= \frac{2\sigma}{r_0} \cos \theta \\ \Delta p &= \frac{2\sigma}{r}, \end{aligned} \quad (4)$$

где r – радиус кривизны сферической поверхности, σ – поверхностное натяжение. Формула (4) показывает, что дополнительное давление определяется только радиусом кривизны поверхности и не зависит от величины участка сферы, выбранного нами для рассмотрения.

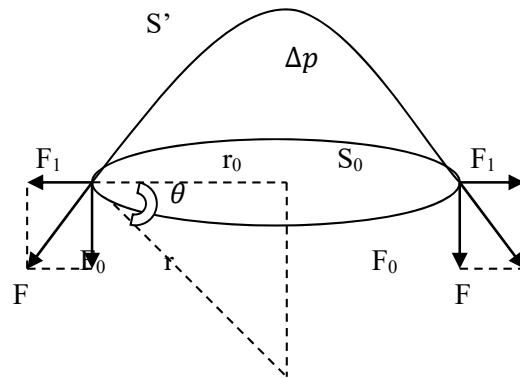


Рисунок 2. К расчету избыточного давления под искривленной поверхностью.

Сферическую поверхность жидкости можно получить, если ввести пузырек воздуха в жидкость. На рис.3 показано, как при повышении давления в капилляре на его конце, погруженном в жидкость, постепенно образуется пузырек воздуха.

В этой работе идея метода состоит в том, что при проталкивании пузырька воздуха через капиллярное отверстие в исследуемую жидкость поверхностное натяжение жидкости на границе с пузырьком воздуха оказывается пропорциональным наибольшему давлению p_{max} , необходимому для проталкивания пузырька. При некотором давлении p_{max} , соответствующем его максимальному значению, пузырек воздуха теряет устойчивость и отрывается, а на его месте образуется новый пузырек. В этом случае, принимая во внимание

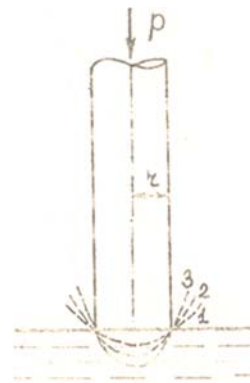


Рисунок 3

выражение (4) для избыточного давления сферической поверхности и формулу для гидростатического давления, находим, что

$$p_{max} = \frac{2\sigma}{r} + \rho gh, \quad (5)$$

где r - наименьшее значение радиуса пузырька, равное радиусу капилляра, ρ - плотность исследуемой жидкости, g - ускорение силы тяжести.

При малом погружении капилляра в жидкость ($h = 0$) с достаточной точностью можно считать, что

$$p_{max} = \frac{2\sigma}{r} \quad (6)$$

Откуда

$$\sigma = \frac{1}{2} r p_{max}. \quad (7)$$

Следовательно, зная радиус капилляра и максимальное давление p_{max} , под действием которого пузырек воздуха проталкивается в жидкость, можно определить поверхностное натяжение.

Величина $\frac{r}{2} = A$ постоянна для данного капилляра. Из (7) следует, что

$$\sigma = A p_{max}. \quad (8)$$

Так как p_{max} удобно измерять в мм высоты H вертикального столба какой-либо жидкости, имеющей плотность ρ , то (8) можно записать в виде

$$\sigma = A_p H, \quad (9)$$

где

$$A_p = A \rho g.$$

Постоянную прибора A_p можно определить на опыте, если произвести соответствующие измерения с жидкостью, поверхностное натяжение σ_0 которой известно. Тогда

$$\sigma_0 = A_p H_0, \quad (10)$$

где H_0 - показание манометра, соответствующее максимальному значению давления в пузырьке в жидкости с известным значением поверхностного натяжения. Следовательно,

$$A_p = \frac{\sigma_0}{H_0} \quad (11)$$

Таким образом, для определения поверхностного натяжения исследуемой жидкости получаем

$$\sigma = A_p H = \frac{\sigma_0}{H_0} H.$$

Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки для определения поверхностного натяжения жидкости по методу максимального давления в пузырьке изображена на рис.4.

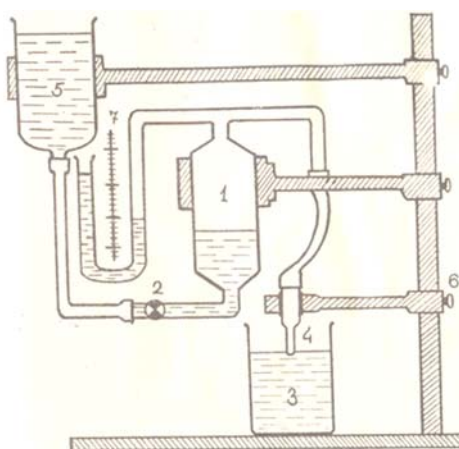


Рисунок 4.

Основными частями прибора являются: сосуд (1), в которой поступает вода, создающая необходимое давление воздуха; манометр (7) для измерения этого давления; капилляр (4), который можно поднимать и опускать с помощью винта (6); сосуд (5), соединенный с сосудом (1), в который наливается вода до эксперимента; кран (2), регулирующий поступление воды из сосуда (5) в сосуд (1).

Порядок выполнения работы

Перед началом работы уровни воды в приборе должны быть такими, как это изображено на рис.4.

Упражнение 1.

Определение постоянной прибора.

Наливают дистиллированную воду в хорошо промытый стакан, устанавливают его в прибор и погружают в воду капилляр (4) на глубину около 1-го мм /это делается на глаз/. Затем

медленно открывают кран (2) и добиваются, чтобы разность уровней воды в плечах манометра (7) изменялась медленно. Замечают разность уровней H_0 жидкости в манометре в момент отрыва пузырька, после чего кран закрывают. Вычисляют постоянную прибора A_p и ошибку ΔA_p по формулам

$$A_p = \frac{\sigma_0}{H_0}$$

σ_0 - поверхностное натяжение воды, равное 71,78 дин/см при температуре 25⁰С,

$$\Delta A_p = A_p \left(\frac{\Delta \sigma_0}{\sigma_0} + \frac{\Delta H_0}{H_0} \right). \quad (12)$$

Результаты записываются в таблицу 1.

Таблица 1

H_0		σ_0	$\Delta \sigma_0$	A_p	ΔA_p

Упражнение 2.

Установление зависимости σ от концентрации раствора.

Поднимают капилляр, выливают из стакана воду и наливают в него раствор с наименьшей концентрацией. Затем продельвают все операции, описание выше (упражнение 1), и определяют H . Таким же образом производят измерения H для всех концентраций раствора.

Поверхностное натяжение раствора и ошибку определяют по формулам

$$\sigma = A_p H, \quad \Delta \sigma = \sigma \left(\frac{\Delta A_p}{A_p} + \frac{\Delta H}{H} \right). \quad (13)$$

Результаты записывают в таблицу 2.

Таблица 2

$C\%$	H	ΔH	σ	$\Delta \sigma$

Построить график зависимости поверхностного натяжения от концентрации раствора.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЛЯРНОЙ ГАЗОВОЙ ПОСТОЯННОЙ МЕТОДОМ ОТКАЧКИ

Цель работы: Ознакомиться с установкой и определить молярную газовую постоянную.

Оборудование: Установка ФПТ-1-12, источник питания.

Краткая теория.

Величины, характеризующие состояние системы, называются параметрами состояния. Соотношение, определяющее связь между параметрами состояния какого-либо тела, называется уравнением состояния этого тела. В простейшем случае равновесное состояние тела определяется значениями трех параметров: давления p , объема V и температуры T . Связь между этими параметрами может быть выражена

$$F(p, V, T) = 0,$$

где $F(p, V, T)$ – некоторая функция параметров.

Опытным путем было установлено, что при обычных условиях (при комнатной температуре и атмосферном давлении) параметры состояния таких газов, как кислород и азот, подчиняются уравнению

$$\frac{pV}{T} = b \quad (1)$$

где b – константа, пропорциональная массе газа.

Согласно закону Авогадро при нормальных условиях, то есть при температуре 0°C (273,15 К) и давлении 1 атм ($1,013 \cdot 10^5$ Па), 1 моль любого газа занимает объем

$$22,4 \text{ л} = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Следовательно, при количестве газа равного 1 моль, константа b в уравнении (1) будет одинаковой для всех газов. Обозначив константу для одного моля буквой R , запишем уравнение состояния идеального газа

$$pV_M = RT, \quad (2)$$

где V_M – молярный объем. Константа R называется молярной газовой постоянной.

Чтобы получить уравнение состояния для произвольной массы m идеального газа, умножим обе части уравнения (2) на отношение $\frac{m}{M}$, где M – молярная масса газа:

$$p \frac{mV_M}{M} = \frac{m}{M} RT.$$

При одинаковых p и T , газ массы m будет занимать объем V , в $\frac{m}{M}$ раз больший, чем V_M . Тогда отношение $\frac{V_M}{M} = V$. Таким образом, приходим к уравнению

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (3)$$

Это уравнение состояния для массы m идеального газа, называемое также уравнением Клапейрона-Менделеева. Поскольку количество вещества определяется как $\nu = \frac{m}{M}$, уравнение (3) можно переписать в виде:

$$pV = \nu RT.$$

Часто пользуются несколько иной формой уравнения состояния идеального газа, вводя постоянную Больцмана:

$$k = R/N_A = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}.$$

Исходя из этого уравнение состояния (3) запишем в виде:

$$p = RT/V_m = kN_A T/V_m = nkT,$$

где $N_A/V_m = n$ – концентрация молекул (число молекул в единице объема). Таким образом, из уравнения

$$p = nkT \quad (4)$$

Следует, что давление идеального газа при данной температуре прямо пропорционально концентрации его молекул (или плотности газа).

Данная работа заключается в нахождении молярной газовой постоянной R методом откачки воздуха, находящегося при небольшом давлении и комнатной температуре в колбе.

Считая, что в начальный момент колба с воздухом имеет массу m_1 и давление внутри колбы p_1 , запишем уравнение (3) для данного состояния

$$p_1 V = \frac{m_1}{M} RT$$

После откачки части воздуха, масса колбы будет m_2 и давление в колбе изменится на некоторую величину и будет составлять p_2 , тогда уравнение состояния

$$p_2 V = \frac{m_2}{M} RT$$

Изменение давления за счет изменения массы воздуха равно

$$\Delta p = p_1 - p_2$$

$$\Delta p = m_1 \frac{RT}{MV} - m_2 \frac{RT}{MV}.$$

Отсюда

$$R = \frac{p_1 - p_2}{m_1 - m_2} \cdot \frac{MV}{T}. \quad (5)$$

Описание установки.

Установка ФПТ-1-12 (рис.1) представляет собой конструкцию настольного типа, состоящую из трех узлов:

1. Измерительный блок (1) представляет собой конструкцию, в которую входит вакуумметр (6), термометр для измерения температуры воздуха (7);
 2. Колба (4), установленная на весах (3);
 3. Стойка (5) является конструкцией с горизонтальным основанием для вакуумного насоса (2) и измерительного блока.
- Соединение вакуумного насоса со штуцером измерительного блока осуществляется с помощью вакуумной трубки.

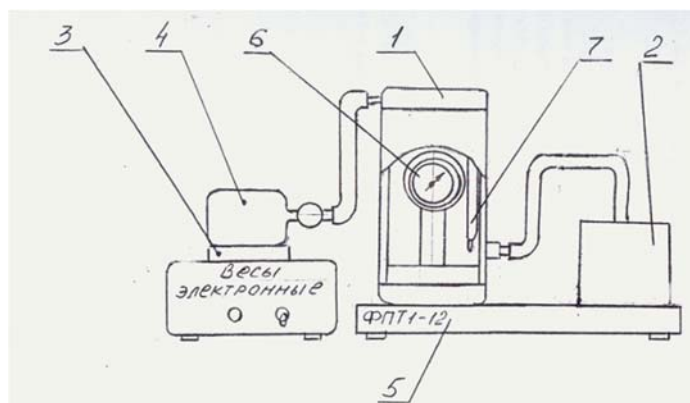


Рисунок 1. Установка ФПТ-1-12.

1. измерительный блок, 2. компрессор, 3. весы электронные,
4. колба, 5. стойка, 6. вакуумметр, 7. термометр

Порядок выполнения работы.

1. Взвесить колбу.
2. Снять показания термометра.
3. Снять показания вакуумметра.
4. Открыть кран колбы и вращая маховик по часовой стрелке откачивать воздух из колбы. Взвешивать колбу при каждом фиксированном показании вакуумметра (не менее 10 показаний). По окончании работы закрыть вакуумный кран и снять вакуумную трубку.
5. Данные занести в таблицу. Построить график зависимости $p(m)$.
6. Вычислить молярную газовую постоянную по формуле (5). Вычислить абсолютную и относительную ошибки измерений.

Таблица

$p, \text{Па}$								
$m, \text{кг}$								

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ГАЗОВ МЕТОДОМ АДИАБАТИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ

Цель работы: Определить отношение удельных теплоемкостей газов при постоянном давлении и при постоянном объеме методом адиабатического расширения.

Оборудование: закрытый стеклянный баллон с краном, манометр и поршневой насос.

Краткая теория.

Теплоемкостью тела называется физическая величина численно равная количеству теплоты, которое нужно сообщить телу, чтобы повысить его температуру на один кельвин:

$$C_{\text{тела}} = \frac{dQ}{dT}.$$

Теплоемкость тела измеряется в Дж/К. Удельной теплоемкостью газа называется теплоемкость единицы массы вещества. Удельная теплоемкость измеряется в системе СИ в Дж/(кг·К). Если количество теплоты измеряется в калориях, то удельная теплоемкость измеряется в кал/(г·К). Очевидно, что

$$1 \text{ кал}/(\text{г}\cdot\text{К}) = 4186,8 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Теплоемкость зависит от условий, при которых происходит нагревание тела. Если нагревание происходит в условиях при постоянном объеме, то тело не совершает работы над внешними телами и, следовательно, вся теплота идет на приращение его внутренней энергии $dQ = dU$. Соответствующая теплоемкость называется теплоемкостью при постоянном объеме или изохорической теплоемкостью и обозначается C_V :

$$C_V = \left(\frac{dQ}{dT}\right)_V.$$

Если при нагревании постоянным остается давление, то теплоемкость называется теплоемкостью при постоянном давлении C_p /изобарической теплоемкостью/

$$C_p = \left(\frac{dQ}{dT}\right)_p.$$

Для газов удельная теплоемкость при постоянном давлении C_p больше, чем удельная теплоемкость при постоянном объеме C_v .

Этот факт объясняется тем, что в первом случае подводимое тепло тратится как на увеличение температуры газа, так и на совершение газом работы (см. теорию в лабораторной работе №23). От величины отношения удельных теплоемкостей газов $\frac{C_p}{C_v}$ зависит скорость распространения звука в газах, течение газов по трубам со звуковыми скоростями и достижение сверхзвуковых скоростей в расширяющихся трубах.

В данной работе отношение удельных теплоемкостей газов определяется методом адиабатического расширения. Процесс, при котором газ не обменивается теплом с окружающей средой, называется адиабатическим. Всякое быстрое изменение объема газа можно с определенной точностью считать процессом адиабатическим. Это позволяет использовать при расчете уравнения адиабаты и найти отношение удельных теплоемкостей $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ для исследуемого газа.

Если при помощи насоса в баллон, соединенный с манометром, быстро накачать небольшое количество воздуха и закрыть кран, соединяющий баллон с атмосферой, то давление в баллоне увеличится, а температура воздуха в баллоне станет выше комнатной, так как на сжатие воздуха была затрачена работа. Строго адиабатическим этот процесс назвать нельзя, потому что нагнетание воздуха занимает некоторое время. Через 3-4 минуты в манометре установится разность уровней h_1 , за это время температура воздуха внутри баллона благодаря теплопроводности стенок станет опять равна температуре окружающей среды. Состояние газа в баллоне можно характеризовать параметрами p_1, V_1, T_1 , где $p_1 = p_0 + h_1$ – давление газа внутри баллона; p_0 – атмосферное давление; T_1 – абсолютная температура окружающего воздуха; V_1 – объем баллона с воздухом. Это первое [1] состояние газа.

Если теперь быстро открыть кран, соединяющий баллон с атмосферой, то часть воздуха из баллона выйдет, давление внутри баллона станет равно атмосферному p_0 , а температура

воздуха в баллоне понизится до температуры T_2 вследствие его расширения.

Строго адиабатическим этот процесс расширения назвать тоже нельзя, так как на расширение воздуха потребовалось какое-то конечное время. Однако, вследствие быстроты расширения, процесс обмена теплом с окружающей средой будет невелик, и мы можем им пренебречь. Состояние воздуха в конце процесса его адиабатического расширения описывается параметрами p_2 , V_2 , T_2 . Назовем его вторым [2] состоянием газа, причем

$$V_2 > V_1, \quad p_2 = p_0, \quad T_2 < T_1$$

Адиабатический процесс длится 0,5-1 секунду. В конце процесса кран перекрывается. После этого в течение двух-трех минут происходит нагревание газа в баллоне, пока его температура не сравняется с комнатной. Вследствие этого давление внутри сосуда начнет возрастать. Это новое установившееся состояние назовем третьим [3] состоянием, характеризуемым параметрами p_3 , V_3 , T_3 , причем

$$V_3 = V_2, \quad T_3 = T_1 \quad \text{и} \quad p_3 = p_0 + h_2$$

где h_2 – разность уровней в манометре, соответствующая этому состоянию.

К процессу адиабатического расширения газа (переход из состояния 1 в состояние 2) применяем уравнение Пауссона

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma,$$

где

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}.$$

Это уравнение удобнее записать в виде

$$\frac{p_1^{\gamma-1}}{T_1^\gamma} = \frac{p_2^{\gamma-1}}{T_2^\gamma} \quad (1)$$

Учитывая, что

$$p_1 = p_0 + h_1, \quad p_2 = p_0,$$

уравнение (1) можно переписать следующим образом:

$$\left(\frac{p_0 + h_1}{p_0} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^\gamma$$

или

$$\left(1 + \frac{h_1}{p_0} \right)^{\gamma-1} = \left(1 + \frac{T_1 - T_2}{T_2} \right)^\gamma.$$

Величины $\frac{h_1}{p_0}$ и $\frac{T_1-T_2}{T_2} \ll 1$. Поэтому, разложив оба двучлена по формуле бинома Ньютона $(1+x)^m = 1 + mx + \frac{m(m-1)}{2!}x^2 + \dots$ и ограничиваясь членами первого порядка малости, получим

$$1 + (\gamma - 1) \frac{h_1}{p_0} = 1 + \gamma \frac{T_1 - T_2}{T_2}$$

или

$$p_0 \frac{T_1 - T_2}{T_2} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} h_1. \quad (2)$$

Переход из состояния 2 к состоянию 3 произошел без изменения объема, поэтому здесь можно применить закон Шарля

$$\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_3}{T_3}. \quad (3)$$

Учитывая, что $p_2 = p_0$, $p_3 = p_0 + h_2$, $T_3 = T_1$ получаем

$$\frac{p_0}{T_2} = \frac{p_0 + h_2}{T_1},$$

и решаем его относительно h_2

$$h_2 = p_0 \frac{T_1 - T_2}{T_2}. \quad (4)$$

Сравнивая уравнения (2) и (4) можно записать

$$h_2 = \frac{\gamma - 1}{\gamma} h_1. \quad (5)$$

Отсюда находим значение отношения удельных теплоемкостей

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (6)$$

Отношение теплоемкостей газов $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ играет важную роль в теории идеальных газов, так как оно определяет число степеней свободы молекул. Если сложная частица имеет i степеней свободы, то ее средняя энергия равна $\frac{i}{2}kT$. В моле газа имеется N_A частиц и, следовательно, внутренняя энергия моля идеального газа равна

$$U = \frac{i}{2} N_A k T = \frac{i}{2} R T.$$

Тогда, учитывая определение изохорической теплоемкости и уравнение Майера, получаем

$$C_V = \left(\frac{dU}{dT} \right)_V = \frac{i}{2} R,$$

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

Отсюда имеем

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{i+2}{i}. \quad (7)$$

Перед выполнением работы рекомендуется найти значение γ по формуле (7).

Порядок выполнения работы

Для работы необходимы следующие приборы и принадлежности: закрытый стеклянный баллон А с краном Д, манометр С и поршневой насос. Схема установки изображена на рис.1.

1. Закрывают кран Д и насосом осторожно нагнетают воздух в сосуд А. Необходимо внимательно следить за тем, чтобы из манометра при этом не была выброшена вода. Когда разность уровней в манометре достигает 30-40 см, накачивание воздуха следует прекратить.

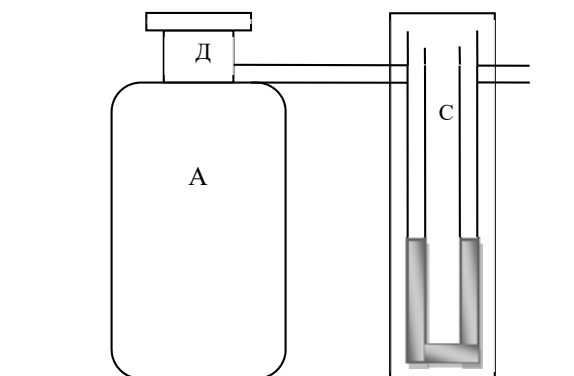


Рисунок 1

2. Через 2-3 минуты, когда состояние газа внутри сосуда окончательно установится, записывают по шкале манометра уровни правой и левой трубок. Это позволит нам найти h_1 .
3. Быстро открывают и через 0,5-1 сек. закрывают кран Д.
4. Выждав 3-5 минут, пока температура в баллоне не сравняется с комнатной, отсчитывают по шкале положение жидкости в трубках манометра, определяя, таким образом h_2 .

Весь опыт проделывают не менее десяти раз и заносят его результаты в таблицу.

По формуле (6) вычисляют значение γ , затем определяют абсолютную и относительную ошибки измерения γ . Результат сравнить со значением, полученным по формуле (7).

Таблица

h_1 , дел							
h_2 , дел							
γ							

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Цель работы: Построение графического изображения электростатических полей различной конфигурации с помощью модели – электролитической ванны.

Оборудование: электролитическая ванна, вода, электроды разной формы, вольтметр, источник питания, зонд, соединительные провода, миллиметровая бумага.

Краткая теория.

Электростатическое поле характеризуется в каждой точке пространства значением вектора напряженности поля \vec{E} и значением электростатического потенциала U . Направление вектора напряженности поля в каждой точке поля и распределение потенциалов в поле можно сделать наглядным, пользуясь понятиями о силовых линиях и о поверхностях равного потенциала – эквипотенциальных поверхностях.

Силовые линии всегда нормальны к поверхности равного потенциала, например, к поверхности проводников, находящихся в электрическом поле. Поэтому, зная расположение силовых линий поля, можно начертить систему эквипотенциальных поверхностей, и наоборот, найдя положение поверхностей равного потенциала, можно построить силовые линии поля.

Как правило, легче вести расчет потенциалов, чем расчет напряженностей поля; потенциал величина скалярная, а напряженность – векторная. Экспериментально измерение потенциалов также оказываются проще, чем измерения напряженностей поля, так как большинство приборов, пригодных для изучения полей, измеряют разности потенциалов, а не напряженности поля.

Поэтому в данной задаче экспериментально изучается распределение потенциала в поле, а не напряженностей этого поля. Линии сил изучаемых полей строятся уже потом как ортогональные кривые к экспериментально найденным поверхностям равного потенциала.

Для измерения потенциала в различных точках поля используют проводник – зонд, который помещают в эти точки.

Зонд не должен искажать распределение потенциала. Зонд соединяется проводником с прибором, измеряющим приобретенный зондом потенциал. При этом необходимо, чтобы этот зонд принял потенциал той точки поля, в которую он помещен. Только тогда показания прибора, соединенного с зондом, будут давать правильную картину распределения потенциалов в исследуемом поле. Оказывается, что при некоторых условиях распределение потенциалов в среде по которому течет ток между установленными в ней электродами, может быть сделано тождественным с распределением потенциалов между теми же электродами, когда между ними имеется электростатическое поле. Другими словами, одинаковые уравнения могут описывать разные процессы, что является основой моделирования. Мы можем рассматривать проводящую среду с распределением токов в ней, как модель электростатического поля. Измерение распределение потенциалов в проводящей среде, по которой течет ток, сравнительно легкая экспериментальная задача.

Приведем пример. Пусть имеются две концентрические металлические сферы. Если эти сферы заряжены, то в разделяющем их шаровом слое существует электрическое поле, задаваемое зарядом только внутренней сферы. Поверхности равного потенциала в этом случае – концентрические сферы, силовые линии направлены радиально, напряженность поля убывает как $1/r^2$. Пусть теперь шаровой слой между сферами заполняется однородным проводящим веществом. Пусть к внешней и внутренним сферам подведены провода от батареи, поддерживающей между сферами ту же разность потенциалов, которая была между сферами в первом случае. В шаровом слое будет идти постоянный ток.

Поле \vec{E} в однородной проводящей среде **при наличии тока совпадает с электростатическим полем $\vec{E}_{ст}$** , которое существовало бы между данными электродами, если бы к ним было приложено то же напряжение, что и при наличии тока, а вместо проводящей среды был бы вакуум.

Действительно, при прохождении постоянного тока через однородную проводящую среду в ней не образуются объемные

заряды, подобно тому, как нет объемных зарядов в пространстве между статически заряженными электродами в вакууме. Кроме того, постоянный ток не создает переменного магнитного поля, а, следовательно, не возникает вихревое электрическое поле, то есть электрическое поле \vec{E} при наличии тока потенциально. Электрическое поле $\vec{E}_{\text{ст}}$ также потенциально.

Чтобы показать, что поле \vec{E} при наличии тока и электрическое поле $\vec{E}_{\text{ст}}$ тождественны, необходимо еще доказать, что для обоих полей одинаковы условия на границе «среда – электрод». А в общем случае эти граничные условия различны, так как $\vec{E}_{\text{ст}}$ всегда перпендикулярно к поверхности проводника, а поле \vec{E} тока может этому условию и не удовлетворять. Однако поле \vec{E} всегда перпендикулярно к поверхности электродов любой формы, если проводимость среды намного меньше проводимости вещества электродов, так как в этом случае потенциал во всех точках электродов практически одинаков.

Таким образом, можно заменить изучение электростатического поля между системой заряженных проводников изучением электрического поля постоянного тока между той же системой проводников, если потенциалы проводников поддерживаются постоянными и выполняется необходимое соотношение между проводимостью среды и проводимостью электродов.

Указанная замена изучения поля дает большие экспериментальные преимущества:

1. вводя в проводящую среду в качестве зондов простые металлические электроды, мы получаем выравнивание потенциалов зонда и той точки поля, в которую введен зонд;
2. зонды в этом случае могут быть соединены с токоизмерительными приборами, а не с электростатической аппаратурой, которая всегда гораздо сложнее и менее надежна в работе, чем токовые приборы.

Надо иметь в виду, что электрическая цепь зонда должна обладать большим сопротивлением проводящих слоев вещества между точкой, в которую помещен зонд, и ближайшим

электродом. В противном случае включение зонда исказит распределение потенциалов в исследуемом поле.

Практическое осуществление описанного приема изучения электростатического поля будет ясно из объяснения устройства применяемой для этой цели простейшей установки.

Описание установки.

Установка представляет собой прямоугольный сосуд из материала с хорошими электроизолирующими свойствами (например, плексиглас). В нем помещаются металлические электроды *A* и *B*, между которыми изучается поле (рис.1). Электроды могут быть различной формы. Ванна заполняется электролитом, проводимость которого мала по сравнению с проводимостью металла. Для заполнения ванны можно использовать воду. Ее проводимость порядка $10^{-5} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1} \div 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, а проводимость электродов порядка $10^5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Электроды *A* и *B* опираются на дно ванны и возвышаются над поверхностью воды.

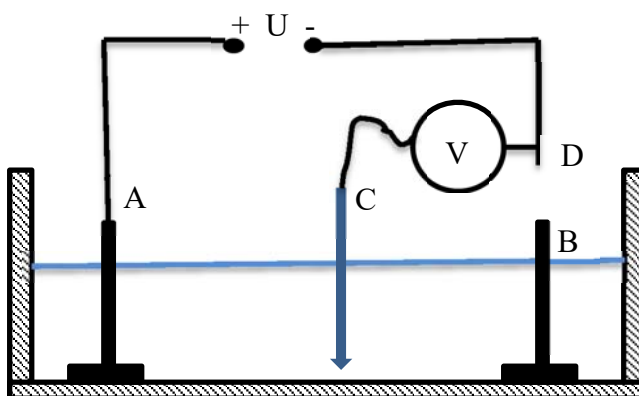


Рисунок.1 Схема установки.

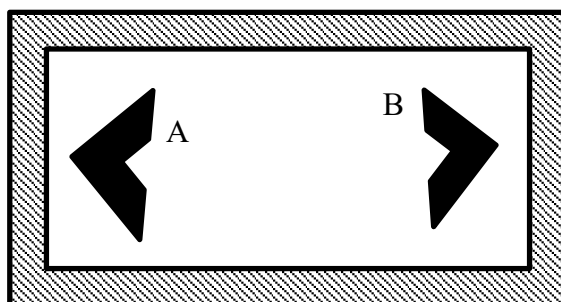


Рисунок 2. Схема установки. Вид сверху.

Между электродами *A* и *B* поддерживается постоянный ток. Источником напряжения *U* служит выпрямитель.

Для изучения распределения потенциалов в поле берут острый металлический зонд *C* и зажим *D*, соединенные с вольтметром. Зажим укрепляют на одном из электродов, зонд помещают в исследуемую точку поля. Отмечают показания вольтметра. Находят ряд точек, которые соответствуют одинаковым показаниям вольтметра. ***Тем самым определяют линии равного потенциала или эквипотенциальные линии.***

Указанным способом можно получить семейство эквипотенциальных кривых. ***Так как эквипотенциальные кривые и силовые линии взаимно перпендикулярны,*** то нетрудно ***графически построить систему силовых линий.*** В результате получается картина электростатического поля.

Порядок выполнения работы.

1. Собрать схему, изображенную на рис.1. На листе миллиметровой бумаги начертить в натуральную величину горизонтальные проекции электродов.
2. Поместить зонд *C* на расстоянии 1 см от электрода и зафиксировать разность потенциалов. Передвинуть зонд по ванне и найти точки, где показания вольтметра не меняются. Положение этих точек отметить на листе бумаги. Зонд следует вести по всей ширине ванны, непрерывно отмечая показания вольтметра. Число отмеченных точек при этом должно быть не

менее 10. Эти точки соединяются, и получается эквипотенциальная линия.

3. Аналогично вычертить 5-7 эквипотенциальных линий. Лучше всего по три эквипотенциальные линии возле каждого электрода и одну-две посередине. Это нужно сделать потому, что особый интерес представляет структура поля вблизи электродов.

4. Те же операции провести с другими электродами (или другим расположением электродов друг относительно друга). Зарисовать эквипотенциальные линии для каждой пары электродов.

5. По полученным системам эквипотенциальных линий строят для всех изученных полей картины силовых линий.

6. Рассчитать по графику несколько значений напряженности электрического поля.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ МОСТА УИТСТОНА

Цель работы: Ознакомление с классическим методом измерения сопротивлений при помощи моста постоянного тока (моста Уитстона).

Оборудование: источник питания, гальванометр, ключ, реохорд, магазин сопротивлений, неизвестные сопротивления, мост Р-333.

Краткая теория.

Мост Уитстона состоит из четырех сопротивлений R_x , R_0 , R_1 и R_2 , образующих замкнутый четырехугольник. В одну из его диагоналей включен чувствительный гальванометр G , в другую – источник электродвижущей силы \mathcal{E} (рис. 1).

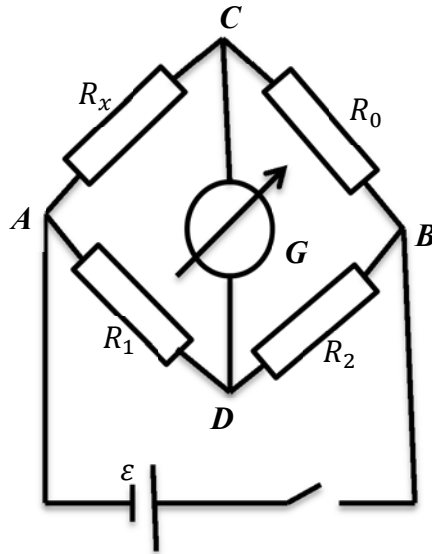


Рисунок 1. Схема моста Уитстона.

Величина тока, протекающего через гальванометр, зависит от сопротивлений R_x , R_0 , R_1 и R_2 . При одном определенном соотношении между этими сопротивлениями ток через гальванометр равен нулю. В этом случае мост называется