Лабораторная работа 119

Определение коэффициента внутреннего трения жидкости по методу Стокса.

Цель работы: ознакомиться с понятием внутреннего трения и с теорией метода; измерить коэффициент вязкости касторового масла.

Прибора и принадлежности: стеклянный цилиндр на подставке; микрометр; секундомер; миллиметровая линейка; шарики.

Теория:

Понятие о внутреннем трении.

Между движущимися слоями при движении жидкости (или газа) возникают силы трения. Со стороны слоя, движущегося более быстро, на слой, движущийся медленнее, на более быстрый слой действует задерживающая сила. Эти силы, называемые силами внутреннего трения, направлены по касательной к поверхности слоёв. Возникновение этих сил в газах объясняется тем, что слои, движущиеся с разными скоростями, обмениваются молекулами. Молекулы из более быстрого слоя, переходя в более медленный слой, передают ему свой импульс, вследствие чего медленный слой начинает двигаться быстрее.
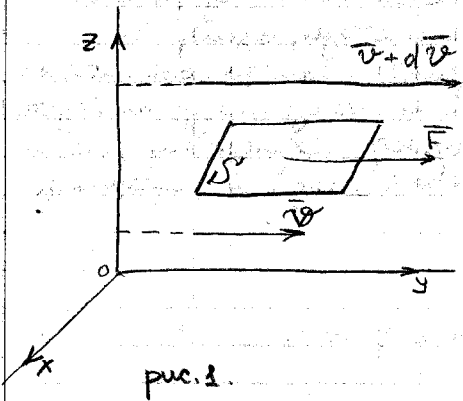
Молекулы, переходящие из медленного слоя в более быстрый слой, получают там некоторый импульс, вызывая его торможение.

Возникновение сил внутреннего трения в жидкостях объясняется, главным образом, наличием притягательных сил сцепления между молекулами жидкости.

В случае установившегося (ламинарного) течения жидкости (или газа) сила внутреннего трения F выражается формулой

$$F = -\eta \frac{dv}{dz} S \; ,$$

(1)

где S — площадь прикосновения слоёв; $\frac{dv}{dz}$ — изменение скорости движения слоёв на единицу длины z в направлении, перпендикулярном к направлению их движения — градиент скорости (рис. 1); η — коэф. внутреннего трения или коэф. динамической вязкости. Он численно равен силе внутреннего трения, кот. действует на единицу площади поверхности соприкосновения слоёв, движущихся один относительно другого с градиентом скорости, равным единице. Единица градиента скорости как в системе СИ, так и системе СГС равна $1\frac{1}{c}$. Единица коэф. динамической вязкости в системе СИ — $1\frac{H c}{m^2}$. Она равна вязкости такого вещества, в кот. на $1 м^2$ поверхности слоёв, движущихся

рис. 1.

относительно друг друга с градиентом скорости $1\cdot\frac{1}{c}$, действует сила, равная $1H$.

Единица коэф. динамической вязкости в системе СГС —

$1\cdot\frac{г H c}{cm^2} = 1\Pi = 0,1\frac{H\cdot c}{m^2}$. Часто применяется коэф. кинематической вязкости $\nu=\frac{\eta}{\rho}$, где ρ — плотность вещества. В системе СГС его единицей измерения является 1 Стокс ($1 Ст$) $=$

$= 1 см^2\cdot с^{-1}$, системе СИ — $1 м^2 с$. $1 Ст = 10^{-4} м^2 с$.

С ростом скорости движения жидкости или газа увеличивается градиент скорости и сила внутреннего трения. При больших скоростях движения течение жидкости или газа может стать турбулентным (образуются вихри) и формула (1) неприменима. Явление внутреннего трения имеет большое практическое значение. Смазка трущихся поверхностей деталей машин позволяет заменить сухое трение значительно меньшим внутренним трением в жидкости и значительно уменьшает износ деталей, непужные потери энергии.

Существует множество способов определения вязкости жидкостей и газов.

Метод Стокса. На тело, движущееся в какой-либо жидкой среде, действует сила трения, которая имеет место не
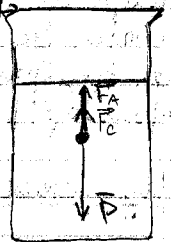
между телом и жидкостью, а между слоями жидкости. Слой, непосредственно прилегающий к поверхности тела, прилипает к ней и движется вместе с телом. Этот слой при движении увлекает соседние слои жидкости. Относительное движение слоёв жидкости при небольших скоростях движения тела является безвихревым, ламинарным и зависит от вязкости жидкости.

Стокс, рассмотрев движение шарика радиуса r с небольшой скоростью v в безграничной вязкой среде, получил следующую формулу для силы трения, испытываемой шариком:

$$F = 6\pi\eta r v. \qquad (2)$$

Рассмотрим падение небольшого шарика под действием силы тяжести в вязкой жидкости (рис. 2). При этом на шарик действуют три силы:

1. Сила тяжести $P = mg = \rho_ш g\cdot V$. $P = \frac{4}{3}\pi r^3\rho_ш g$, где $V=\frac{4}{3}\pi r^3$ — объём, $\rho_ш$ — плотность шарика.

2. Выталкивающая сила Архимеда. $F_A = \rho_ж V g = \frac{4}{3}\pi r^3\rho_ж g$ ($\rho_ж$ — плотность жидкости).

3. Сила внутреннего трения $F_c = 6\pi\eta r v$, по 2 закону Ньютона $P - F_A - F_c = ma$ или

$\frac{4}{3}\pi r^3\rho_ш g - \frac{4}{3}\pi r^3\rho_ж g - 6\pi\eta r v = ma, \qquad (3)$

где a — ускорение, m — масса шарика.

рис. 2.

В начале движения скорость шарика возрастает и $a=\frac{dv}{dt}>0$. Но с увеличением скорости движения шарика возрастает сила внутреннего трения $F_c = 6\pi\eta r v$ и наступает момент, когда сила тяжести уравновешивается суммой сил Архимеда и Стокса:

$$P = F_A + F_c$$

или

$$\frac{4}{3}\pi r^3\rho_ш g = \frac{4}{3}\pi r^3\rho_ж g + 6\pi\eta r v. \qquad (4)$$

С этого момента движение шарика становится равномерным ($a=0$) со скоростью $v=v_0$. Решая уравнение (4) относительно η, получим для коэф. внутреннего трения выражение

$$h = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho_ш - \rho_{же}}{v_0} \qquad (5)$$

Формула (5) справедлива для движения шарика в
безграничной среде. При практическом осуществлении
опыта по изучению движения шарика обычно берётся
цилиндрический сосуд. Учёт влияния стенок, дна сосуда
и верхней поверхности жидкости приводит к следующему
выражению для коэф. вязкости:

$$h = \frac{2}{9} g r^2 \cdot \frac{\rho_ш - \rho_{же}}{v_0 \left(1 + 2.4 \frac{r}{R}\right)\left(1 + 1.33 \frac{r}{h}\right)} \qquad (6)$$

где R-радиус сосуда, h-высота столбика жидкости.
Если радиус шарика значительно меньше радиуса ци-
линдра и высота столбика жидкости ($r \ll R$, $r \ll h$), то
поправки в знаменателе выражения (6) настолько
малы, что влиянием размеров сосуда можно
пренебречь.

Метод Стокса обычно применяется для измерения
коэф. внутреннего трения сравнительно вязких жидкостей,
например, масел.

Измерения и обработка результатов измерений:

№ шари-ка	d, см	t	ℓ, см	t°C	$\rho_ш$	$\rho_{же}$	$h_{расч}$, ТЗ	h, табл
1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	1 0,263							
	2 0,86	4,27	17,2	25	10,96	0,9564	10,003	~7
	3 0,78							
II	1 0,21							
	2 0,33	5,10	17,2	25	10,96	0,9564	8,642	~7
	3 0,40							
III	1 0,47							
	2 0,51	5,12	17,2	25	10,96	0,9564	9,652	~7
	3 0,34							
$d_{I cp}$	0,272							
$d_{II cp}$	0,231							
$d_{III cp}$	0,244							

$$h_I = \frac{1}{18} g d^2 \frac{(\rho_ш - \rho_{же}) t}{\ell} = \frac{1}{18} \cdot \frac{980}{17,2} \cdot (0,272)^2 \cdot \frac{(10,96 - 0,9564) \cdot 4,27}{17,2}$$

$$= 10,003$$

$$h_{II} = \frac{1}{18} \cdot 980 \cdot (0,231333)^2 \cdot \frac{10,0036 \cdot 5,1}{17,2} = 8,642$$

$$h_{III} = \frac{1}{18} \cdot 980 \cdot (0,244)^2 \cdot \frac{10,0036 \cdot 5,12}{17,2} = 9,652$$

Оценка погрешности определения вязкости:

а) $\overline{h} = 9,432$

б) $\Delta h_i = \overline{h} - h_i$
$\Delta h_I = 9,432 - 10,003 = -0,571$
$\Delta h_{II} = 9,432 - 8,642 = 0,79$
$\Delta h_{III} = 9,432 - 9,652 = -0,22$

в)
$$\Delta S_{\overline{h}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\Delta h_i)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{(-0,571)^2 + (0,79)^2 + (-0,22)^2}{3 \cdot 2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{0,326041 + 0,6241 + 0,484}{6}} = \sqrt{0,2390235} = 0,489$$

г) $\delta = 0,95$

д) $t_d = 4,3$

е) $\Delta h = t_d \cdot \Delta S_{\overline{h}} = 4,3 \cdot 0,489 = 2,103$

ж) $h = \overline{h} \pm \Delta h = 9,432 \pm 2,103$; $\delta = 0,95$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{\overline{h}} \cdot 100\% = \frac{2,103}{9,432} \cdot 100\% = 22,296\%$$

Лабораторная работа №3.

Изучение колебаний в связанных системах.

Цель работы: получение биений в сопряжённых маятниках и представление их через нормальные моды колебаний связанной системы.

Приборы и принадлежности: установка ФПМ-13

Теория:

В реальных системах тело нередко совершает сложное движение, складывающееся из нескольких колебаний. Особый интерес представляет случай, когда два складываемых гармонических колебания одинакового направления мало отличаются по частоте. Результирующее движение при этих условиях будет представлять биения.

Биения - периодическое изменение амплитуды результирующего колебания, возникающее при сложении двух гармонических колебаний одного направления с близкими частотами. Получим уравнение такого процесса.

Если амплитуда A обоих колебаний одинаковы, частота первого колебания ω, а второго $\omega + \Delta\omega$, то уравнения колебаний будут иметь вид:

$$X_1 = A\cos\omega t$$

$$X_2 = A\cos(\omega + \Delta\omega)t. \qquad (1)$$

Сложив эти выражения и применив формулу для суммы косинусов, получим

$$X = X_1 + X_2 = \left(2A\cos\frac{\Delta\omega}{2}t\right)\cos\left(\omega + \frac{\Delta\omega}{2}\right)t. \qquad (2)$$

Т.к. в случае биений $\Delta\omega \ll \omega$, то результирующее уравнение примет вид

$$X = \left(2A\cos\frac{\Delta\omega}{2}t\right)\cos\omega t \qquad (3)$$

Такое уравнение описывает гармоническое колебание со средней частотой ω и амплитудой $2A\cos\frac{\Delta\omega}{2}t$, меняющейся по некоторому периодическому закону (рис. 1а)
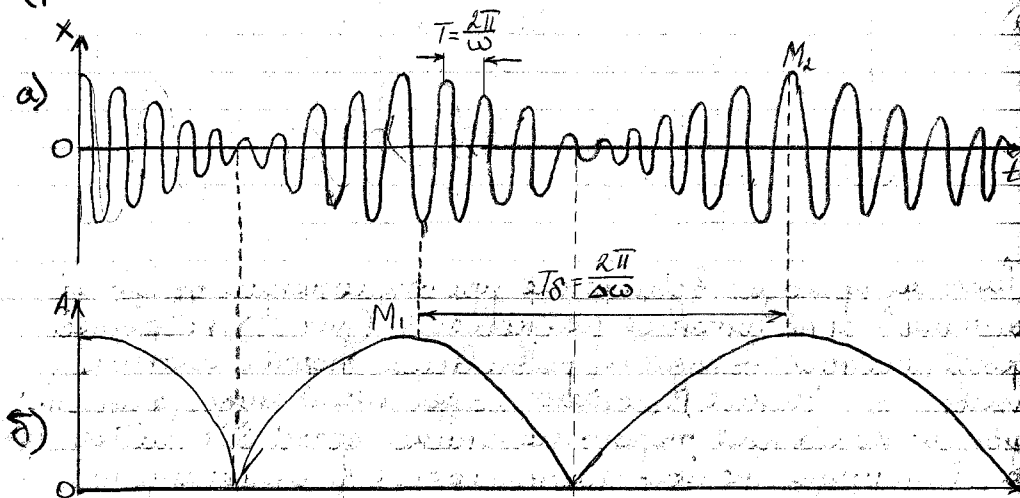

рис.1

Проанализируем данную функцию.

По определению амплитуда всегда положительная величина, поэтому её в формуле (3) следует рассчитывать по модулю, т.е. $\left|2A\cos\frac{\Delta\omega}{2}t\right|$.

Известно, что период изменения $|\cos\varphi|$ в два раза меньше периода функции $\cos\varphi$. Соответственно, частота изменения $|\cos\varphi|$ в 2 раза больше частоты изменения $\cos\varphi$. Таким образом, амплитуда функции (3) $\left|2A\cos\frac{\Delta\omega}{2}t\right|$ меняется во времени не с частотой $\frac{\Delta\omega}{2}$, а с частотой $\Delta\omega$ (рис. 1б)

Отметим, что первый множитель в функции (3) периодически меняет знак, поэтому он определяет не только амплитуду, но и фазу колебания. Последнее видно из рис 1а, где точки M_1 и M_2, соответствующие соседним максимумам амплитуд, имеют противоположные знаки.

Характерную картину биений можно наблюдать в результате сложения колебаний с близкими частотами в связанной

системах. Примером такой системы являются два маятника закрепленные на общей оси и связанные между собой с помощью пружины (рис. 2а)
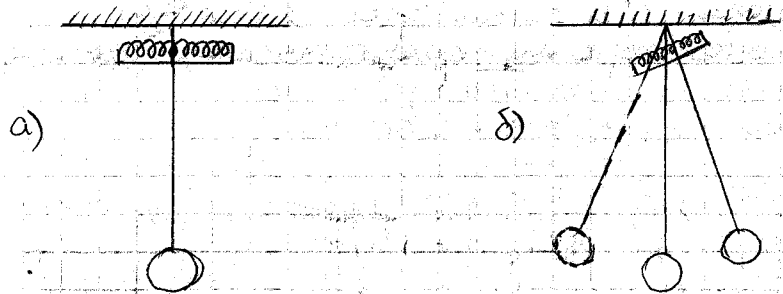

рис. 2

Система приходит в движение при отклонении одного из маятников от положения равновесия (рис. 2б). Колеблясь, первый маятник выводит из равновесия второй маятник и возбуждает его биение. В момент, когда амплитуда результирующего колебания второго маятника достигает максимума, амплитуда первого уменьшается до минимума. Затем колебание второго маятника вызывают биение первого, и процесс периодически повторяется. Амплитуда отклонения маятников от положения равновесия в такой системе по очереди изменяется от нуля до максимума, энергия периодически перекачивается из одного маятника в другой, и обратно. Период биений Тб может быть определен как промежуток времени между двумя очередными максимальными отклонениями маятника от положения равновесия, либо между двумя последовательными нулевыми отклонениями.
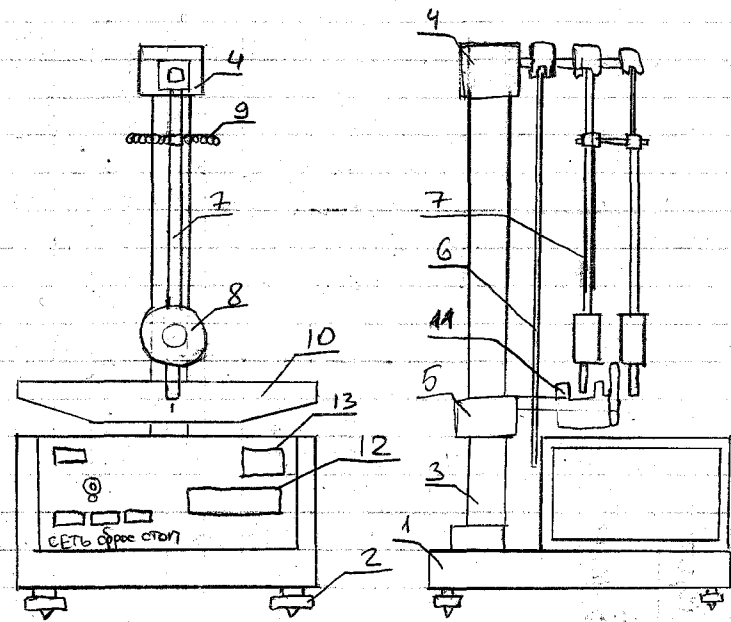
Описание установки:

рис. 3

Общий вид установки представлен на рис. 3. Основание 1 оснащено регулируемыми ножками 2, обеспечивающими выравнивание прибора. В основании закреплена колонка 3. На колонке закреплены втулка 4 и кронштейн 5. На стержне втулки 4 находятся три подвески, на которых посредством шариковых подшипников навешены два маятника и стержень 6. Маятник состоит из точного стержня 7 и перемещаемого груза 8. Маятники сопряжены друг с другом при помощи пружины 9, закрепленной в специальной С-образной обойме.

К нижнему кронштейну 5 прикреплена угловая шкала при помощи кот. определяется амплитуда колебаний маятников, фотоэлектрический датчик 11, световой поток которого пересекает стержень одного из совершающих колебания сопряженных маятников.

На лицевой панели блока управления и измерений находятся манипуляционные элементы: "сеть", "сброс", "стоп"

Решение:

i	T_δ, c	N	v_δ, c^{-1} эксп.	v, c^{-1} эксп.	t_1, c	v_1, c^{-1}	t_2, c	v_2, c^{-1}	$\bar{v}=\frac{v_1+v_2}{2}, c^{-1}$	$v_\delta=v_2-v_1, c^{-1}$
1	12,431	13	0,08	1,086	11,423	1,048	10,633	1,126	1,087	0,078
2	12,429				11,425		10,694			
3	12,422				11,502		10,655			
	$\bar{T_\delta}=12,427$				$\bar{t_1}=11,447$		$\bar{t_2}=10,661$			

$$\bar{T_\delta} = \frac{T_{\delta_1}+T_{\delta_2}+T_{\delta_3}}{3} = 12,427$$

$$v_\delta = \frac{\rho}{\bar{T_\delta}} = 0,08$$

$$v = \frac{N+\frac{1}{2}}{\bar{T_\delta}} = \frac{13+\frac{1}{2}}{12,427} = 1,086$$

$$v_1 = \frac{12}{11,447} = 1,048$$

$$v_2 = \frac{12}{10,661} = 1,126$$

$$v = \frac{v_1+v_2}{2} = \frac{1,048+1,126}{2} = 1,087$$

$$v_\delta = v_2 - v_1 = 1,126 - 1,048 = 0,078$$

фи3

Лабораторная работа №104.

Изучение законов динамики и кинематики поступательного движения на машине Атвуда.

Цель работы: проверка второго закона Ньютона и уравнения равноускоренного прямолинейного движения.

Приборы и принадлежности: автоматизированная машина Атвуда с грузами, снабженная фотоэлектрическими датчиками положения грузов, пусковым устройством, электронным секундомером, набор добавочных грузов.

Теория:

Механика — наука о простейших формах движения и силах, вызывающих это движение.

Мех. движением называется изменение с течением времени взаимного положения тел или частей тела друг относительно друга.

Механика делится на на 3 раздела: кинематику, динамику и статику.

Кинематика — это раздел физики, кот. изучает движение тел вне зависимости от причин, вызывающих это движение.

Динамика изучает з-на движения тел и причины, кот. вызывают или изменяют это движение.

Статика изучает з-ны равновесия системы тел.

Различают три вида мех. движения тел — поступательное, вращательное и колебательное.

Поступательное движение — движение, при кот. ♦ прямая, жестко связанная с движущимся телом, остается параллельной своему первоначальному положению при вращательном движении все точки тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной и той же прямой, называемой осью вращения. Колебательным движением называется процесс, при котором система многократно отклоняясь от своего состояния равновесия

каждый раз вновь возвращается к нему.

Динамика — раздел механики, кот. изучает движение совместно с причинами, вызывающими или изменяющими это движение. В основе динамики лежат три закона Исаака Ньютона.

Первый закон Ньютона: всякая материальная точка (тело) сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока взаимодействие со стороны других тел не заставит её изменить это состояние. Первый закон Ньютона называют также законом инерции.

Второй закон Ньютона: ускорение a, приобретаемое телом под действием силы F, прямо пропорционально этой силе и обратно пропорционально массе и направлено в сторону действия силы.

$$\bar{a} = \frac{\bar{F}}{m}$$

Второй закон Ньютона можно переписать в виде

$$\bar{F} = \bar{a}m = m\frac{d\bar{v}}{dt}$$

Третий закон Ньютона (закон действия и противодействия): два взаимодействующих тела действуют друг на друга с силами равными по значению и противоположными по направлению.

$$\bar{F_1} = -\bar{F_2}$$

Решение:

Упражнение I. Проверка второго з-на Ньютона.

№ опыта условие: $S = const$	$S, м$	$\Delta m, кг$	$\Delta mg, H$	t, c	$a = \dfrac{2S}{t^2}, \dfrac{м}{c^2}$	$F_{тр} = H$
I) $\Delta m_1 = (m_1 + m_2) - m_3$		$0,00588$	$0,057624$	$t_1 = 1,387$ $t_2 = 1,347$ $t_3 = 1,331$ $\bar{t} = 1,335$	$0,337$	
II) $\Delta m_2 = (m_1 + m_3) - m_2$	$0,3$	$0,00804$	$0,078792$	$t_1 = 1,122$ $t_2 = 1,120$ $t_3 = 1,151$ $\bar{t} = 1,131$	$0,469$	
III) $\Delta m_3 = (m_2 + m_3) - m_1$		$0,01162$	$0,113876$	$t_1 = 0,957$ $t_2 = 0,951$ $t_3 = 0,947$ $\bar{t} = 0,952$	$0,662$	
IV) $\Delta m_4 = m_1 + m_2 + m_3$		$0,02554$	$0,250292$	$t_1 = 0,627$ $t_2 = 0,645$ $t_3 = 0,632$ $\bar{t} = 0,635$	$1,489$	

$m_1 = 6,96\,г$
$m_2 = 8,75\,г$
$m_3 = 9,83$

$\Delta m_1 = (0,00696 + 0,00875) - 0,00983 = 0,00588\,г$

$\Delta m_2 = (0,00696 + 0,00983) - 0,00875 = 0,00804\,г$
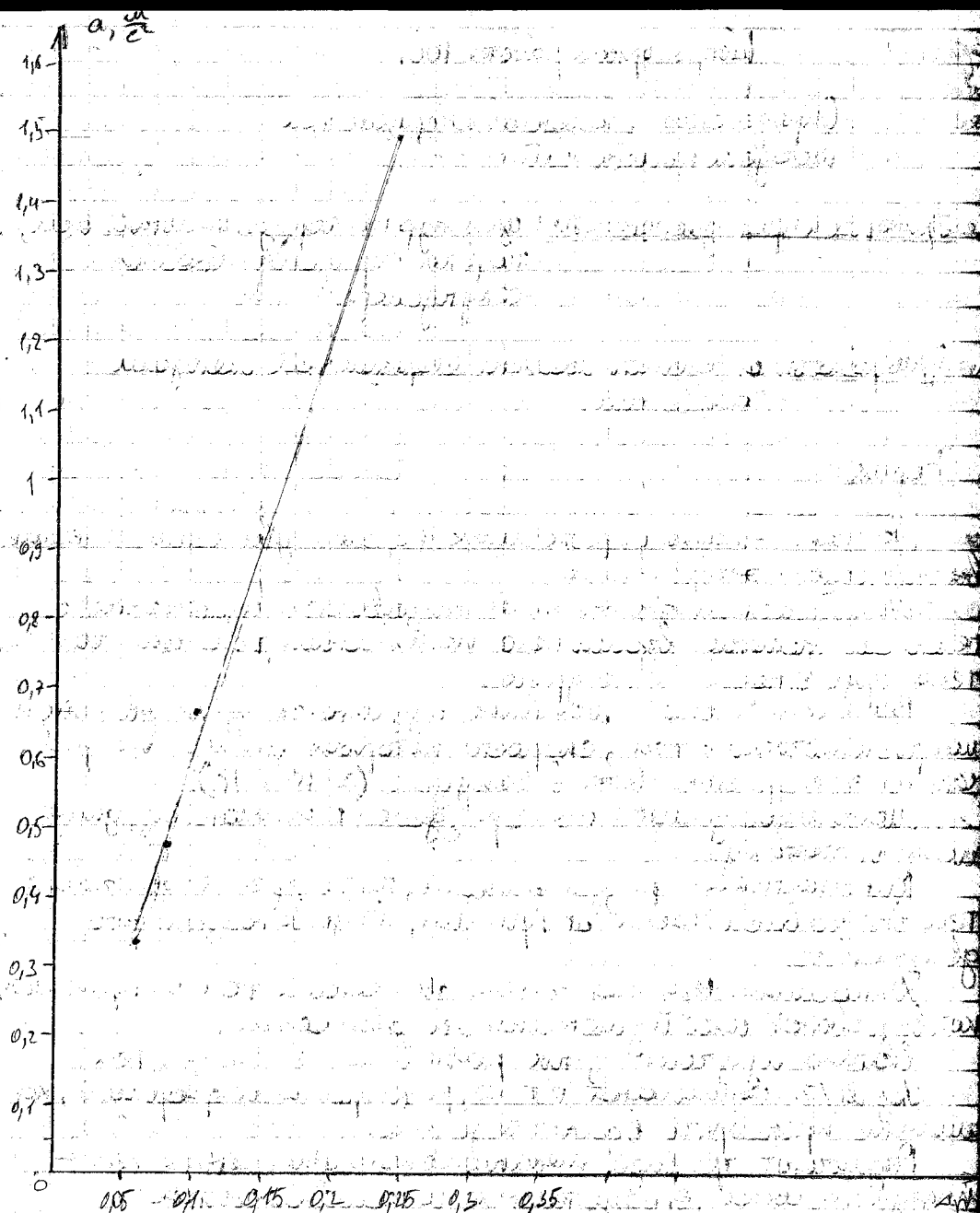
$\Delta m_3 = (0,00875 + 0,00983) - 0,00696 = 0,01162\,г$

$\Delta m_4 = (0,00696 + 0,00875 + 0,00983 = 0,02554\,г$

$a_1 = \dfrac{2 \cdot 0,3}{(1,335)^2} = \dfrac{0,6}{1,782225} = 0,337\,\dfrac{м}{c^2}$

$a_2 = \dfrac{0,6}{(1,131)^2} = \dfrac{0,6}{1,278161} = 0,469\,\dfrac{м}{c^2}$

$a_3 = \dfrac{0,6}{(0,952)^2} = \dfrac{0,6}{0,906304} = 0,662$

$a_4 = \dfrac{0,6}{0,403225} = 1,489$

Физ

Лабораторная работа 106.

Определение моментов инерции тел
методом колебаний.

Приборы и принадлежности: цилиндр на горизонтальной оси,
шар на горизонтальной оси,
секундомер.

Цель работы: определить момент инерции тел методом
колебаний.

Теория:

Механика — наука о простейших формах движения и самих
вызывающих это движение.

Механическим движением называется изменение с
течением времени взаимного положения тел или частей
тела друг относительно друга.

В классической механике изучаются з-ны движения
макроскопических тел, скорости которых малы по срав-
нению со скоростью света в вакууме (3·10⁸ м/с).

Механика делится на 3 раздела: кинематику, дина-
мику и статику.

Кинематика — раздел физики, кот. изучает движение
тел вне зависимости от причин, вызывающих это
движение.

Динамика изучает з-ны движение тел и причины,
кот. вызывают или изменяют это движение.

Статика изучает з-ны равновесия системы тел.

Под м/т понимают ∀ тело, размерами и формой, кот.
можно пренебречь в данной задаче.

Различают три вида механического движения тел —
поступательное, вращательное и колебательное.

Поступательное движение — это движение, при
кот. ∀ прямая, жестко связанная с движущимися телом,
остаётся параллельной своему первоначальному
положению. При вращательном движении все
точки тела движутся по окружностям, центр

которых лежат на одной и той же прямой, называемой
осью вращения. Колебательным движением называется
процесс, при котором система, многократно отклоняется
от своего состояние равновесия, и каждый раз вновь
возвращается к нему.

Динамика — раздел механики, кот. изучает движение
совместно с причинами, вызывающими или изменяю-
щими это движение. В основе динамики лежат три
закона Исаака Ньютона.

Первый з-н Ньютона (з-н инерции): всякая м/т (тело)
сохраняет состояние покоя или равномерного прямо-
линейного движения до тех пор, пока воздействие со
стороны других тел не заставит её изменить это
состояние.

Второй з-н Ньютона: Ускорение $\bar{a}$, приобретаемое телом
под действием силы F, прямо пропорционально этой
силе и обратно пропорционально массе и направлено
в сторону действия силы.

$$\bar{a} = \frac{\bar{F}}{m}$$

Третий з-н Ньютона (з-н действия и противодействия):
два взаимодействующих тела действуют друг на друга
с силами равными по значению и противоположными
по направлению.

$$\vec{F_1} = -\vec{F_2}$$

Момент инерции.

Момент инерции м/т относительно какой-либо оси
называется произведение массы этой точки на квадрат
расстояние от её оси:

$$J = mr^2$$

Момент инерции системы (тела) относительно
данной оси называется физ. величина, равная сумме
произведений массе n м/т системы на квадрат их
расстояний до рассматриваемой оси:

$$J = \sum_{i=1}^{n} m_i r_i^2$$

В случае непрерывного распределения масс эта сумма сводится к интегралу.

$$J = \int r^2 dm,$$

где интегрирование производится по всему объему тела. Величина r в этом случае есть функция положения точки с координатами x, y, z.

Если известен момент инерции тела относительно оси, проходящей ч/з его центр масс, то момент инерции относительно любой другой параллельной оси определяется теоремой Штейнера: момент инерции тела J относительно произвольной оси равен моменту его инерции Jc относительно параллельной оси, проходящей через центр масс c тела, сложенному с произведением массы m тела на квадрат расстояния a м/у осями:

$$J = J_c + ma^2$$

Решение:

$$t_{ср.ш.} = \frac{12,88 + 13,25 + 13,85}{3} = 13,3$$

$$t_{ср.ц.} = \frac{33,85 + 31,41 + 31,64}{3} = 32,3$$

$$T_{ш.} = \frac{13,3}{10} = 1,33$$

$$T_{ц.} = \frac{32,3}{10} = 3,23$$

$$J_{ц.} = \frac{T_ц^2 \cdot mga}{4\pi^2} = \frac{(32,3)^2 \cdot 2,568 \cdot 10 \cdot 1,118 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 3,14^2} = 7,5 \cdot 10^{-3}$$

$$J_{ш.} = \frac{T_ш \cdot mga}{4\pi^2} = \frac{1,33^2 \cdot 1,498 \cdot 10 \cdot 2,932}{4 \cdot 3,14^2} = 1,97 \cdot 10^{-?}$$

Исследуемое тело	Время десяти колебаний, t,с	T, с	J_1 кг·м²	J кг·м²	J_r кг·м²	$\frac{J-J_r}{J_r} \cdot 100\%$
Цилиндр	$t_1=33,35$					
	$t_2=31,41$	3,23	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$7,335 \cdot 10^{-3}$	$5,97329 \cdot 10^{-3}$	33,18
	$t_3=31,64$					
	$t_{ср}=32,3$					
Шар	$t_1=12,88$					
	$t_2=13,25$	1,33	$1,97 \cdot 10^{-3}$	$1,720 \cdot 10^{-3}$	$1,39076 \cdot 10^{-3}$	93,35
	$t_3=13,85$					
	$t_{ср}=13,31$					

Лабораторная работа №0

Определение характеристик затухания камертона.

<u>Цель работы</u>: изучить затухающие колебания и определить основные параметры затухания камертона.

<u>Приборы и принадлежности</u>: камертон, укрепленный неподвижно на подставке, индикатор колебаний — электронный осциллограф, секундомер, резиновый молоток, поролоновый демпфер.

Теория:

Колебанием называются процесс, в той или иной степени повторяющиеся во времени. При периодических колебаниях изменение наблюдаемой величины в точности повторяется ч/з совершенно определенное время - период. Они описываются периодической функцией времени.

$$f(t+nT) = f(t),$$

где T — период функции, n — произвольное целое число.

Система, выведенная из положения равновесия и предоставленная самой себе, совершает свободные (или собственные) колебания. Если при этом энергия системы не изменяется, то её колебания будут собственными незатухающими. Колебания, совершаемые системой под воздействием внешней периодически изменяющейся силы, называются вынужденными.

Среди разнообразных колебаний, встречающихся в природе, основную и очень важную роль играют гармонические колебания (рис. 1) представляют периодический процесс в котором изменение наблюдаемой величины описывается функцией синуса (или косинуса):

$X = A \sin(\omega t + \varphi')$ или $X = A\cos(\omega t + \varphi)$, $\varphi' = \varphi + \frac{\pi}{2}$

Здесь X отклонение (смещение) механической системы от положения равновесия. Наибольшее смещение A называется амплитудой колебаний. Аргумент синуса или косинуса $(\omega t + \varphi)$ определяет смещение в любой момент времени и называется фазой колебаний; φ — начальная фаза (в момент $t=0$). Величина ω, равная числу колебаний за 2π единиц времени, называется циклической (или круговой) частотой. Она в 2π раз больше обычной частоты.

$$\omega = 2\pi \nu, \quad \text{или} \quad \omega = \frac{2\pi}{T}, \text{ рад} \cdot c^{-1}$$

Амплитуда A и начальная фаза φ определяются начальными условиями, т.е. смещением X_0 и скоростью V_0 в момент времени $t=0$.

Описание метода и приборов.

В данной работе предлагается по времени относительно изменению амплитуды колебаний камертона известной частоты определить основные характеристики его затухания: коэффициент затухания β, время релаксации τ, логарифмический декремент затухания λ и добротность Q.

Степень убывания амплитуды затухающих колебаний определяется коэффициентом затухания β

$$A(t) = A_0 e^{-\beta t}, \tag{1}$$

где A_0 — амплитуда колебаний в начале отсчёта времени при $t=0$.

Время релаксации τ характеризует время одного колебания. За время

$$\tau = \frac{1}{\beta} \tag{2}$$

амплитуда уменьшается в $e \approx 2,72$ раза.

Скорость уменьшения амплитуды характеризуется логарифмическим декрементом затухания

$$\lambda = \beta T, \qquad (3)$$

где T – период колебаний.

Если известна частота колебаний камертона ν, то период колебаний

$$T = \frac{1}{\nu} \qquad (4)$$

Добротность колебательной системы характеризует скорость уменьшения энергии и может быть выражена формулой

$$Q = \frac{\pi}{\lambda} \qquad (5)$$

Если решить уравнение (1) относительно β, то получится

$$\beta = \frac{1}{t} \ln \frac{A}{A(t)} \qquad (6)$$

Пусть амплитуда колебаний за время t убывает в два раза. Тогда

$$\beta = \frac{\ln 2}{t} = \frac{0,693}{t} \qquad (6а)$$

Значит для определения β достаточно измерить время, в течении которого амплитуда колебаний убывает вдвое.

Измерение амплитуд колебаний камертона в данной работе производится с помощью электронно-лучевого индикатора (осциллографа). На рисунке приведена схема установки, где приняты следующие условные обозначения: 1 – камертон, 2 – датчик, 3 – осциллограф. Датчик

представляет собой катушку с большим числом витков, которая надета на незамкнутый сердечник из трансформаторного железа. Концы обмотки подключаются на вход усилителя осциллографа.

Ветви камертона слабо намагничены. Если его заставить колебаться, то магнитный поток, пронизывающий датчик, становится переменным, вследствие чего в обмотках датчика возникает ЭДС индукции, частота и амплитуда которой соответствует частоте и амплитуде колебаний камертона. Переменное синусоидальное напряжение увеличивается усилителем осциллографа и подаётся на вертикально отклоняющиеся пластины электронно-лучевой трубки. Особенностью усилителя является его линейность, т.е. изменение амплитуды ЭДС передаётся без искажений. Таким образом, на экране осциллографа наблюдаются затухающие колебания, соответствующие колебаниям камертона.

Ход работы:

$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{1}{340 \, \text{Гц}} = 0,003 \, \text{с} \qquad \bar{t} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3} = \frac{13,11 \text{с} + 13,24 \text{с} + 13,91 \text{с}}{3} = 13,42 \text{с}$$

$$\nu = 340 \, \text{Гц}$$

$$\beta = \frac{\ln 2}{t} = \frac{0,693}{13,42 \text{с}} = 0,0516 \, \frac{1}{\text{с}}$$

$$\bar{\tau} = \frac{1}{\beta} = \frac{1}{0,0516 \frac{1}{\text{с}}} = 19,3798 \text{ с}$$

$$\bar{\lambda} = \beta \cdot T = 0,0516 \frac{1}{\text{с}} \cdot 0,003 \, \text{Гц} = 0,00015 \, \frac{\text{Гц}}{\text{с}}$$

$$\bar{Q} = \frac{\pi}{\lambda} = \frac{3,14}{0,00015 \frac{\text{Гц}}{\text{с}}} = 20933,33 \, \frac{\text{с}}{\text{Гц}}$$

Таблица (левая часть)

i	2A₀, mm	2A(t), tᵢ, c mm	β̄, c⁻¹	τ̄, c	λ̄	Q̄	t', c	Q̄'	δ=ΔQ/Q·100%
1		13,11					6,79		
2		13,24	0,0516	19,37.98	0,00045	20933,33	7,31	10466,66	50%
3		13,91					7,27		
		t̄=13,42					7,12		

Вычисления (левая часть)

$$\Delta t = \sqrt{t^2_{\beta(n)}S^2_t + t^2_{\beta(\infty)}\left(\frac{\Delta - б_{пр}}{3}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{4,3^2 \cdot 0,2479^2 + 1,96^2 \cdot 0,0011} =$$

$$= \sqrt{18,49 \cdot 0,0036996 + 3,8416 \cdot 0,0011}$$

$$= \sqrt{0,0739} = 1,0379$$

$$S_t = \sqrt{\frac{\sum_1^n (t_i - \bar{t})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{(13,11-13,42)^2 + (13,21-13,42)^2}{6}}$$

$$+ (13,91 - 13,42)^2 = \sqrt{\frac{0,0961 + 0,0324 + 0,2401}{6}}$$

$$= 0,2479$$

$$\Delta\beta = \frac{0,693 \Delta t}{t^2} = \frac{0,693 \cdot 1,0679}{13,42^2} =$$

$$= 0,0041 \ \frac{1}{c}$$

$$t = 13,42 \pm 1,0679, \quad \varepsilon = 7,9575\% \ при \ n=3, \beta=0,995$$

$$\beta = 0,0516 \pm 0,0041, \quad \varepsilon = 7,9457\%, \ при \ n=3, \beta=0,995$$

$$\gamma = \frac{\bar{Q} - \bar{Q}'}{\bar{Q}} \cdot 100\% = \frac{20933,33 - 10466}{20933,33} = 50\%$$

$$\bar{Q}' = \frac{\bar{\pi}}{\bar{\lambda}} = \frac{3,14}{0,0003} = 10466,67$$

$$\bar{\lambda}' = \bar{\beta}' \cdot T' = 0,0973 \cdot 0,003 = 0,0003$$

$$\bar{\beta}' = \frac{0,693}{7,12 c} = 0,0973 \ \frac{1}{c}$$

Лабораторная работа №117.

Определение отношения теплоемкостей Cp/Cv методом Клемана-Дезорма.

Цель работы: Определить отношение теплоемкостей Cp/Cv для воздуха и сравнить полученный результат с выводами молекулярно-кинетической теории газов.

Приборы и принадлежности: стеклянный баллон с краном, U-образный открытый жидкостной манометр, насос, соединительные трубки и зажимы.

Теория:

Удельной теплоемкостью какого-либо вещества называется количество теплоты, необходимое для нагревания единицы массы этого вещества на 1 К при данном процессе:

$$C = \frac{1}{m} \cdot \frac{dQ}{dT} \qquad (1)$$

Если теплоемкость относят к одному молю в-ва, то её назов. молярной теплоемкостью C:

$$C = M \cdot c = \frac{M}{m} \cdot \frac{dQ}{dT}, \qquad (2)$$

где M - молярная масса, m - масса в-ва.
Теплоемкость газа зависит от условий нагревания. Выясним эту зависимость, воспользовавшись ур-м Менделеева - Клапейрона состояния идеального газа.

$$PV_м = RT \qquad (3)$$

и первым началом термодинамики

$$dQ = dU_м + dA. \qquad (4)$$

где P - давление, V_м - объем одного моля газа, T - абсолютная температура, R - молярная газовая постоянная.

Согласно первому началу термодинамики, кол-во теплоты dQ, переданное сист., затрачивается на увеличение её внутренней энергии dU_m и на работу расширения dA, совершаемую системой против внешних сил. Поскольку $dA = pdV_m$ зависит от вида термодинамического процесса и только U_m явл-ся функцией состояния сист., dQ, а значит и теплоёмкость C, также зависит от вида процесса.

В случае нагревания газа при постоянном объёме (изохорический процесс) сообщаемое ему тепло целиком идёт на увеличение внутренней энергии газа, так как при неизменном объёме ($dV_m = 0$) внешняя работа не совершается. Теплоёмкость в этом процессе назов. теплоёмкостью C_V при постоянном объёме и может быть найдена из ур-й (2) и (4):

$$C_V = \frac{dQ_V}{dT} = \frac{dU_m}{dT} \qquad (5)$$

Здесь индекс V означает изохорический процесс.

Если газ нагревать при постоянном давлении (изобарический процесс), то изм-ся не только его внутр. энергия, но, расширяясь, газ совершает ещё работу против сил внешнего давления. Теплоёмкость в таком процессе, очевидно, больше теплоёмкости при постоянном объёме, и она назов. теплоёмкостью при постоянном давлении:

$$C_p = \frac{dQ_p}{dT} = \frac{dU_m}{dT} + \frac{pdV_m}{dT} \qquad (6)$$

Из ур-я (5) при постоянном давлении имеем

$$PdV_m = RdT \qquad (7)$$

Подставив (7) в ур-е (6) с учётом (5), получим ур-е Майера:

$$C_p = C_V + R \qquad (8)$$

Следовательно, разность молярных теплоёмкостей численно равна работе расширения одного моля идеального газа при нагревании его на один градус Кельвина при постоянном давлении. В этом утверждении заключается физический смысл молярной газовой постоянной R.

Для идеального газа расчёт теплоёмкостей C_p и C_V можно провести теоретически. Внутренняя энергия одного моля идеального газа зависит от числа степеней свободы i молекулы и температуры T:

$$U_m = \frac{i}{2} RT \qquad (9)$$

Отсюда

$$C_V = \frac{dU_m}{dT} = \frac{i}{2} R \qquad (10)$$

$$C_p = C_V + R = \frac{i+2}{2} R \qquad (11)$$

В ряде практических и теоретических вопросов физики большое значение имеет отношение теплоёмкостей:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i} \qquad (12)$$

В частности, для идеальных газов так называемый коэффициент γ входит в ур-е Пуассона:

$$pV^\gamma = const \qquad (13)$$

Адиабатический процесс совершается без теплообмена с окружающей средой, поэтому для его осуществления систему теплоизолируют или ведут процесс так быстро, чтобы теплообмен не успел произойти. При адиабатическом сжатии идеального газа температура его повышается, а при расширении понижается.

Left column — calculations and table

$\Delta V_1 = 1{,}2 - 1{,}2006 = 0{,}006$

$\Delta V_2 = 1{,}17 - 1{,}206 = -0{,}036$

$\Delta V_3 = 1{,}25 - 1{,}206 = 0{,}044$

$S_{\bar{\jmath}} = \sqrt{\dfrac{\sum(\Delta V)^2}{(n-1)}}$; $S_{\bar{\jmath}} = \sqrt{\dfrac{0{,}006^2 + 0{,}036^2 + 0{,}044^2}{6}} =$

$= 0{,}0245$

$\delta = 0{,}95$; $n = 3$; $t = 4{,}3$

$\Delta V = t \cdot S_{cn} \cdot S_{\delta}$

$\Delta V \cdot S_{\bar{\jmath}} = 4{,}3 \cdot 0{,}105\,35$

$\varepsilon = \dfrac{\Delta V}{V} \cdot 100\%$

$\varepsilon = \dfrac{0{,}10535}{1{,}206} \cdot 100\% = 8{,}74\%$

N	обозначения элементов прибора λ₂	h₁	положение потенциометра α₁	α₂	h₂	V̄ᵢ	V̄
1	14	−14	29	3	−2	5	1,2
2	14	−13	27	3	−1	4	1,17	1,206
3	14	−12	25	3	−2	5	1,25

Right column

Лабораторная работа №111

Изучение образования стоячих волн в натянутой струне.

<u>Цель работы:</u> изучить образование стоячих волн в натянутой струне и определить её линейную плотность.

<u>Приборы и принадлежности:</u> однородная струна с возбудителем колебаний и подсветкой, генератор гармонических колебаний ЗГ-10, набор разновесов (нагрузок).

<u>Теория:</u>

В натянутой струне с закрепленными концами при возбуждении поперечных колебаний возникают стоячие волны. В местах закрепления струна образуется узлы. В струне с достаточно большой интенсивностью возбуждаются только такие колебания, половина длины волн которых укладывается на длине струны целое число раз λ. Следовательно, условие образования стоячих волн имеет вид

$$l = n\frac{\lambda}{2} \qquad (n = 1, 2, 3 \ldots) \tag{1}$$

или

$$\lambda_n = \frac{2l}{n},\ \text{где } l - \text{длина струны.}$$

Длинам волн λ_n соответствуют собственные частоты колебаний

$$\nu_n = \frac{V}{\lambda} = \frac{V}{2l}\,n \tag{2}$$

где V - скорость распространения волн в струне
Собственные частоты колебаний кратна основной частоте (или тону): $\nu_1 = V/2l$. Частоты, соответствующие $n = 2, 3 \ldots$ называются обертонами.
Скорость распространения волн V вдоль струны зависит от её силы натяжения F и линейной плотности

материала струны ρ (линейная плотность струны численно равна массе металла, приходящейся на единицу длины этой струны $\rho = dm/dl$, где dm — масса элемента струны длиною dl):
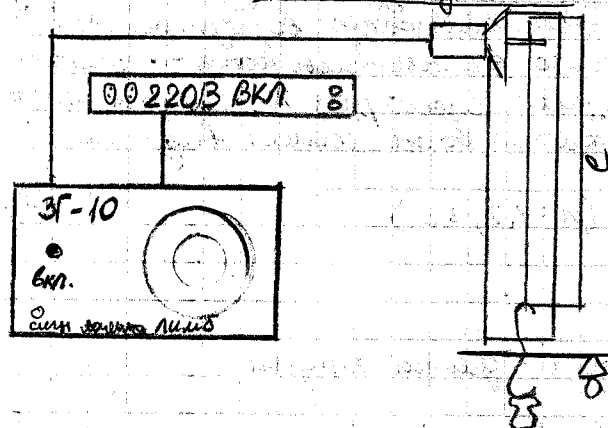
$$V = \sqrt{\frac{F}{\rho}}$$

Подставив полученное выражение в формулу (2), получим

$$V_n = \frac{n}{2\ell}\sqrt{\frac{F}{\rho}} \qquad (3)$$

Из этого ур-я можно вычислить линейную плотность струны:

$$\rho = \frac{n^2 F}{4 V_n^2 \ell^2} \qquad (4)$$

Описание установки

На вертикальной стойке с подсветкой натянута стальная струна. Верхний конец её прикреплен к осциллятору, колебание кот. возбуждаются с помощью звукового генератора ЗГ-10, писком к рычагу, имеющему возможность вращаться вокруг оси О. Кроме того, к этому концу может быть подвешен груз, предназначенной для изменения натяжение нити F. Частота колебаний осциллятора задаётся звуковым генератором и отсчитывается по круглому лимбу прибора.

N	m, кг	V_{n1}, Гц ($n=1$)	V_{n2}, Гц ($n=2$)	V_n, Гц ($n=3$)	ρ, $\frac{кг}{м}$
1		28	56	86	
2	0,5	27,5	56	86	
3		28	57	88	
средн		$\overline{V_{11}}=27,8$	$\overline{V_{12}}=56,3$	$\overline{V_{13}}=86,7$	
1		37	74	116	
2	1	43	76	116	
3		39	76	118	
средн		$\overline{V_{21}}=39,7$	$\overline{V_{22}}=75,3$	$\overline{V_{23}}=116,7$	
1		44	90	140	
2	1,5	46	92	144	
3		45	94	148	
средн		$\overline{V_{31}}=45$	$\overline{V_{32}}=92$	$\overline{V_{33}}=144$	

$$\rho = \frac{9 \cdot 1,5 \cdot 10}{4 \cdot 144 \cdot 1,81^2} = \frac{135}{1887} = 0,0715$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta\rho}{\rho} = \sqrt{\left(\frac{\Delta F}{F}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta\ell}{\ell}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0,001}{15}\right)^2 + 2\cdot\left(\frac{5}{144}\right)}$$

$$+ 2\cdot\left(\frac{0,005}{1,81}\right)^2 = \sqrt{0,000036 + 2\cdot 0,0012 + 2\cdot 7,631} = 3,907$$

$$\Delta\rho = \varepsilon\cdot\rho = 3,907 \cdot 144 = 562,608$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{562,608}{144}$$

Лабораторная работа 208.

Градуировка термоэлемента.
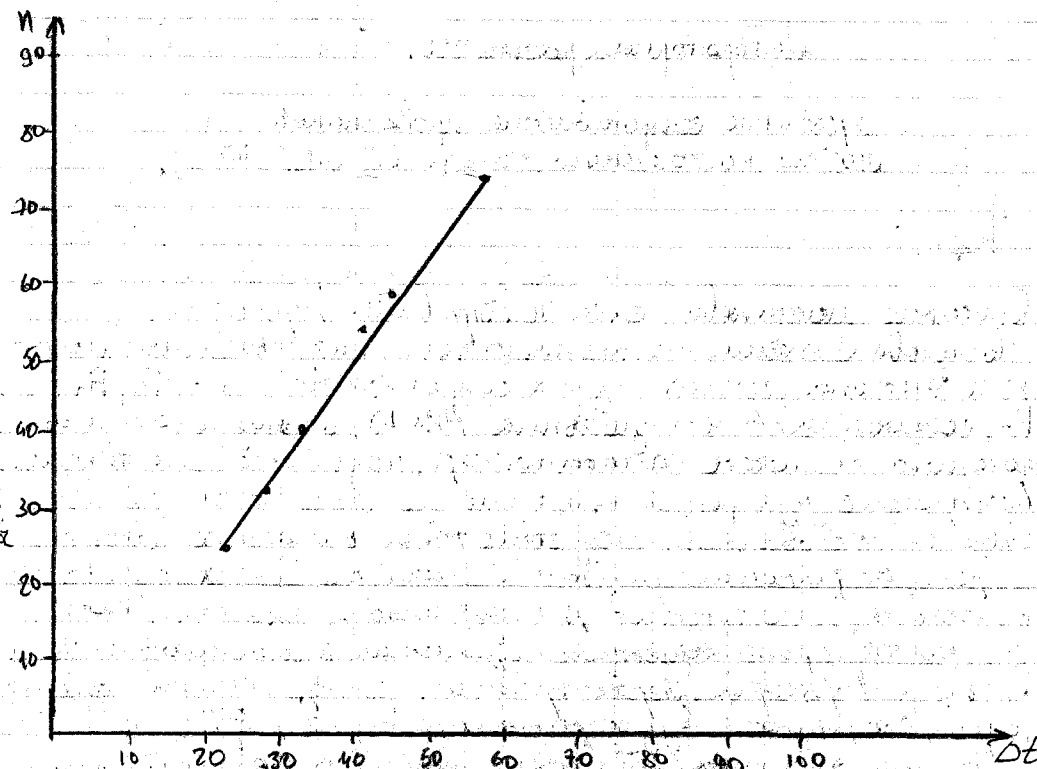
<u>Цель работы:</u> проградуировать термоэлемент.

<u>Теория:</u>

<u>Работа выхода электрона из металла.</u> Эл-ны проводимости в металле находятся в беспорядочном тепловом движении. Наиболее быстро движущиеся электроны, обладающие достаточно большой кинетической энергией, могут вырваться из металла в окружающее пространство. При этом они совершают работу как против сил притяжения со стороны избыточного положительного заряда, возникающего в металле в рез-те их вылета, так и против сил отталкивания со стороны ранее вылетевших электронов, образующих вблизи пов-ти проводника эл-ное „облако". М/у электронным газом в ме-ле и эл-ным „облаком" существует динамическое равновесие.

Работу, которую нужно совершить для удаления электрона из металла в безвоздушное пространство, назов. работой выхода. Работа выхода совершается электронами за счёт уменьшения их кинетической энергии. Поэтому понятно, что медленно движущиеся электроны вырваться из металла не могут.

Недостаток электронов в металлическом проводнике и их избыток в окружающем пространстве, образовавшийся в результате выхода части электронов из металлов, проявл-ся только в очень тонком слое по обе стороны от пов-ти проводника. Толщина этого слоя овна несколькими межатомным расстоянием в металле.

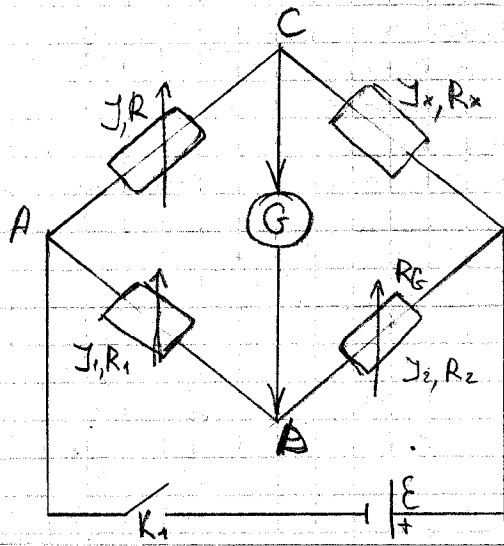| N	$t_0^\circ C$	$t_i^\circ C$	$\Delta T_i (t_i - t_0)^\circ C$	н делений
1	23	80	57	74,5
2	23	68	45	58
3	23	64	41	59
4	23	56	33	41
5	23	51	28	33
6	23	46	23	25

Лабораторная работа 22б.

Определение сопротивление проводников
мостом постоянного тока типа МВЛ-47

Теория:

1. Описание мостиковой схемы. Правила Кирхгофа.
Мостиковая схема постоянного тока, называемая мостиком Уитстона, состоит из 4-х сопротивлений R_x, R, R_1, R_2, соединенных в 4-х угольник $ABCD$, в одну диагональ которого включен гальванометр, называется мостиком. Весь процесс измерений при помощи мостиковой схемы связан с требованием отсутствие тока в мостике, отсюда и распространение названия мост на всю схему. Если в мостике ток отсутствует, то мостиковая схема (мост) считается уравновешенной. Применим к мостиковой схеме правила Кирхгофа. Первое правило: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле равна нулю, т.е $\sum J_k = 0$
Узлом электрической схемы принято называть точку схемы, в которой сходится более чем два проводника. В мостиковой схеме четыре узла: A, C, D и B. При записи первого правила Кирхгофа придерживаются следующего правила знаков; ток, текущий к узлу имеет знак плюс, а ток, текущий от узла, имеет знак минус.

Первое правило Кирхгофа для узла C:

$$J_x - J - J_G = 0$$
или
$$J_x = J$$
(1)

если мост уравновешен $(J_G = 0)$.

Первое правило Кирхгофа для узла D: $J_2 - J_1 - J_G = 0$

или $J_2 = J_1$ если $J_G = 0$
(2)

При записи второго з-на Кирхгофа придерживаются следующего правила: знаков: токи, текущие вдоль выбранного направления обхода в контуре (например, против часовой стрелки), имеют знак плюс; а токи, текущие против направления обхода, имеют знак минус. Соответственно этому ЭДС, которые действуют по выбранному направлению обхода в контуре, считают положительными, а против направления обхода отрицательными. При этом за направление действия ЭДС источника тока в контуре принимается направление от положительного полюса. Второе правило Кирхгофа для контура $BCDB$ (обход в контуре против часовой стрелки)
$$J_x R_x + J_G R_G - J_2 R_2 = 0$$
или

$$J_x R_x = + J_2 R_2 \text{ если } J_G = 0$$
(3)

Второе правило Кирхгофа для контура $CADC$:
$$JR - J_1 R_1 - J_G R_G = 0$$
или

$$JR = + J_1 R_1 \text{ если } J_G = 0$$
(4)

Деление равенства (3) на (4) с учетом равенства (1) и (2), дает следующее соотношение м/у сопротивлениями уравновешенного моста, составляющими так называемые плечи моста

$$\frac{R_x}{R} = \frac{R_2}{R_1} \tag{5}$$

Соотношение (5), являющееся условием равновесия моста, позволяет определить любое из четырех сопротивлений, включенных в плечи моста, если известны три других сопротивления. Например,

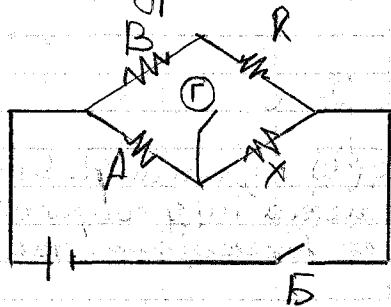$$R_x = R \frac{R_2}{R_1} \tag{6}$$

Описание прибора

Мост постоянного тока типа МВЛ-47 представляет собой измерительный прибор, который в принципе ничем не отличается от моста Уитстона. Принципиальная схема моста состоит из 4-х сопротивлений: A, X, B и R. Сопротивления A и B составляют так называемые "плечи отношения" моста, а сопротивление R - "плечо сравнения". В противоположные вершины схемы включается: источник тока Б и гальванометр Г - указатель равновесия моста. Условием равновесия моста (условием отсутствие тока ч/з гальванометр) служит выполнение следующего равенства:

$$\frac{A}{B} = \frac{X}{R} \tag{1}$$

или $\quad x = \frac{A}{B} \cdot R$

что позволяет определить одно из 4-х сопротивлений, если известны 3др-х.

На лицевой панели прибора, электрическая схема которой изображена на рис 2. смонтированы:

1. Пять декадных переключателей роторного магазина, образующего "плечо сравнения" моста. На четырех переключателях (под панелью) установлено по 9 катушек, каждая сопротивлением 1, 10, 100, 1000 Ом на пятом переключателе - 10 спиралей, сопротивлением 0,1 Ома каждая.

2. Контактные пластины и 10 контактов, на которых (под панелью) установлены два комплекта катушек сопротивлением 1, 10, 100, 1000, 10000 Ом, образующих "штепсельные магазины" и плеч отношения моста А и В.

3. Кнопки Б и Г - для включения источника тока (Б) и гальванометра (Г)

4. Зажимы "X" - для подключения измеряемого сопротивления

5. Зажимы "Г" - для подключения гальванометра.

6. Зажимы "Б" - для подключения источника тока.

№ измерен	Обозначение сопротивлений	A Ом	B Ом	R Ом	X Ом
1	X_1	1000	1000	8861	
2	X_2				
3	Последователь. соединение X'				
4	Параллельное соединение X''				

Лабораторная работа №220.

Определение отношения $\frac{e}{m}$ электрона
методом магнитного отклонения

При накаливании металла, находящегося в слабом
электрическом поле, можно наблюдать поток отрицательного
электричества, источником которого является поверхность
металла. Если металл не накаливается, но находится
под воздействием сильного эл. поля (10^6 В/см), то из
него могут быть вырваны отрицательные заряды. Этот
ток представляет собой поток электронов, каждый из
них несет отрицательный заряд, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ к.

При помощи ряда методов было доказано, что электроны
обладают одним и тем же отношением заряда к массе,
если скорости их не слишком велики. Изменение этого
отношения при больших скоростях объясняется релятивист-
ским изменением массы.

$$m = m_0 / \sqrt{1-\beta^2},$$
(1)

где m – масса покоя частицы; $\beta = \frac{V}{c}$ (V – скорость частицы,
c – скорость света в вакууме)

Масса электрона на столько мала, что непосредственное
измерение её представляет большие трудности. Существу-
ют косвенные методы определения массы электрона.
Если известен заряд электрона и если мы можем
измерить отношение заряда к массе, то можно вычис-
лить и массу электрона. Во многих физических явлениях
отношение заряда частицы к её массе q/m играет большую
роль, чем сами заряд и масса. Отношение q/m получило
название удельного заряда частицы. Эту величину экспери-
ментально определить легче, чем заряд и массу электрона
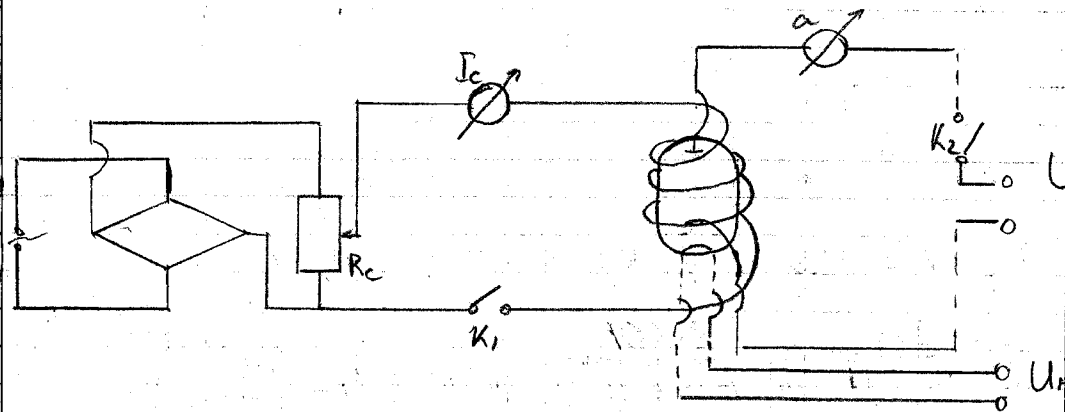в отдельности.

Описание установки:

В данной работе для определения удельного заряда
электрона используется в качестве манетрона диод 2Ц2С
(кенотрон). У диода 2Ц2С радиус катода $a = 0,9$ мм $= 9 \cdot 10^{-4}$ м,
радиус анода $b = 0,96$ см $= 96 \cdot 10^{-4}$ м. Диод помещается внутри
соленоида L, имеющего 3450 витков медного провода сечением
1 мм. Оси анода и катода совпадают с осью соленоида.
Соленоид включается в цепь постоянного тока.

Величина тока в соленоиде регулируется потенциометром
Rc и регистрируется миллиамперметром Ic.

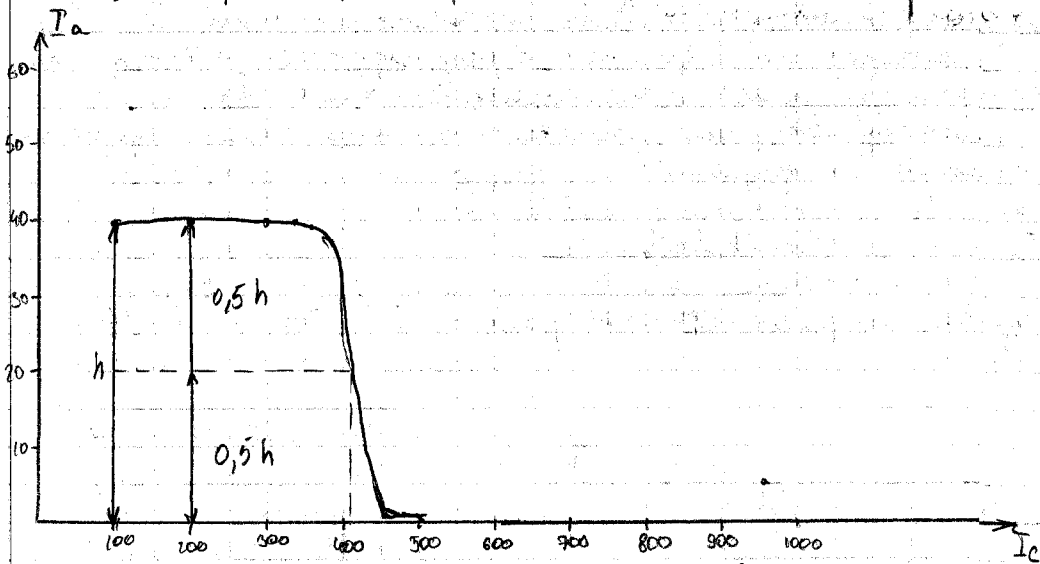Величину индукции магнитного поля соленоида можно
вычислить по формуле:

$$B = k \cdot I_c,$$

где k – коэфф., вел-на кот. равна: $k = 1,38 \cdot 10^{-2}$ Тл/А

Из схемы очевидно, что установка состоит из трех электрических
цепей: 1- цепь соленоида, 2- цепь накала (Uн), 3- цепь анода (Ua)
Питание всех цепей производится от общего источника питания.

I_c (μA)	100	200	300	340	360	380	400	420	440
I_a (дел)	40	40	40	40	39	37	31	20	8
I (μA)	460	480	500	600	700	800	1000		
I (дел)	1,2	1	1	0,8	0,6	0,5			

$$B_{\varphi} = k \cdot I_c = 1,38 \cdot 10^{-2} \frac{T}{A} \cdot 420 \cdot 10^{-3} A = 579,6 \cdot 10^{-5} \, T$$

$$\frac{e}{m} = \frac{8 U_a}{B_{\varphi}^2 \cdot \ell^2 \left(1 - \frac{a^2}{\ell^2}\right)} = \frac{8 \cdot 60 B}{(579,6 \cdot 10^{-5})^2 \cdot (96 \cdot 10^{-4})^2 \left(1 - \frac{(9 \cdot 10^{-3})^2}{(96 \cdot 10^{-4})^2}\right)} =$$

$$= \frac{480 B}{335,94 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{-10} \cdot 9,2 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-8} \left(1 - \frac{81 \cdot 10^{-8}}{9,2 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-8}}\right)} =$$

$$= \frac{480 B}{3,359 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{-5} \left(1 - \frac{81}{9210}\right)} = \frac{480 B}{3,33 \cdot 10^{-10}} = \frac{144 B}{10^{-10}} = 1,44 \cdot 10^{12}$$

$$\frac{e}{m} = \frac{8 U_a}{B^2 \cdot \ell^2 \left(1 - \frac{a^2}{\ell^2}\right)} = \frac{8 \cdot 60 B}{(5,79)^2 \cdot 10^{-10} \, T \cdot 96^2 \cdot 10^{-8} \, m^2 \left(1 - \frac{81 \cdot 10^{-8} \, m^2}{96^2 \cdot 10^{-8} m^2}\right)} =$$

$$= \frac{480 B}{33,52 \cdot 10^{-10} \, T \cdot 9,216 \cdot 10^{3} \cdot 10^{-8} m^2 \left(1 - \frac{81}{9216}\right)} = \frac{480 B}{308,92 \cdot 10^{-15} \, T \cdot m^2}$$

$$\frac{}{\cdot 0,991} = \frac{480 B}{306,14 \cdot 10^{-15} \, T \cdot m^2} = \frac{480 B}{3,06 \cdot 10^{-13} \, T \cdot m^2} = 1,56 \cdot 10^{11} \frac{B}{T \cdot m^2}$$

Лабораторная работа 108.

Определение коэффициента
восстановления и времени
соударения упругих шаров.

При центральном абсолютно упругом ударе относительная скорость шаров меняет свое направление на противоположное, оставаясь неизменной по величине. В момент столкновения шары деформируются, затем разлетаются в противоположные стороны, деформация исчезает, т.е. кинетическая энергия шаров не расходуется на деформацию и остается неизменной по величине.

В случае, когда удар шаров неупругий, часть кинетической энергии шаров переходит в энергию их остаточной деформации.

Тогда:

$$\frac{mV_1^2}{2} + \frac{mV_2^2}{2} = \frac{mU_1^2}{2} + \frac{mU_2^2}{2} + 2W$$

$$m_1V_1^2 + m_2V_2^2 > m_1U_1^2 + m_2U_2^2 \quad \text{и} \quad V_1 - V_2 > -(U_1 - U_2)$$

При неупругом ударе шаров относительная скорость их меняет свое направление на противоположное, уменьшаясь по абсолютной величине. Взяв модули относительной скорости, можно записать: $|V_1 - V_2| > |U_1 - U_2|$

Для количественной оценки уменьшения относительной скорости шаров вводится коэффициент восстановления:

$$K = \frac{|\overline{U_1} - \overline{U_2}|}{|\overline{V_1} - \overline{V_2}|}$$

В условиях опыта можно считать K зависящим только от материала шаров; посредством K можно характеризовать упругие св-ва материала. Для реальных тел всегда $K < 1$.

Время соударения τ зависит от относительной скорости шаров, их массы, упругих свойств материала и т.д.

Если шары соединить в эл. цепь и подать на них напряжение, то за время их соударения в цепи возникает электрический ток. Время соударения шаров τ может быть отождествлено со временем длительности возникающего прямоугольного электрического импульса. Если включить в цепь электронный осциллограф и подать на один из его входов возникающий импульс при соударении шаров, то на экране осциллографа можно наблюдать данный импульс. Пользуясь шкалой меток осциллографа и зная цену деления каждой метки τ по времени, можно по числу меток z на импульс определить длительность импульса τ шаров: $\tau = z \cdot \tau$.

Зная время соударения шаров, можно рассчитать среднюю силу упругого удара.

На основании второго з-на Ньютона: $\overline{F_y}\,dt = md\overline{V}$, где $\overline{F_y}$ — сила упругого удара, действующего на шар.

Описание установки

На установке два сталкивающихся шара расположены на металлических бифилярных подвесах. Шары удерживаются в отклоненном положении двумя электромагнитами ЭМ1 и ЭМ2, как могут перемещаться. Угол отклонения шаров отсчитывается по шкале в градусах. Общее питание установки включается тумблером K_1, питание электромагнитов включается тумблером K_2, при включении K_2 ток в цепи электромагнитов выключается, шары освобождаются и начинают двигаться друг к другу. При соударении шаров замыкается электрическая цепь, в которую они включены. Поэтому время соударения шаров будет равно длительности электрического импульса, возникающего при их взаимодействии. Напряжение импульса с сопротивления R_2 подается на вход осциллографа. Длительность электрического импульса определяется по экрану осциллографа, работающего в ждущем режиме, с учетом калибровки по длительности по шкале меток электронного осциллографа.

N оп	N сред	L_0	$L_{iн}$	$\bar{k}$	$\tau_{iн},с$	W, Дж	F, Н
1	10	25	19	0,99	10^{-4}	$0,14 \cdot 10^{-2}$	2895
2	10	25	20	0,99	10^{-4}	$0,14 \cdot 10^{-2}$	2895
3	10	25	20	0,99	10^{-4}	$0,14 \cdot 10^{-2}$	2895

Лабораторная работа № 232

Определение диэлектрической проницаемости жидкости методом двухпроводной линии.

Цель работы: а) ознакомиться с основами теории Максвелла, свойствами электромагнитных волн и механизмом распространения электромагнитных волн в двухпроводной линии;

б) измерить диэлектрическую проницаемость касторового масла.

Теория

Переменное электрическое поле обуславливает возникновение магнитного поля, а переменное магнитное поле — возникновение вихревого электрического поля. Таким образом, переменные электрические и магнитные поля тесно взаимосвязаны, они образуют единое электромагнитное поле. Связь между характеристиками электромагнитного поля определяется системой уравнений Максвелла:

$$\oint (\vec{E} d\vec{l}) = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S B_n \cdot dS \qquad (1)$$

$$\oint (\vec{H} d\vec{l}) = \sum I_j + \frac{\partial}{\partial t} \int_S D_n \cdot dS \qquad (2)$$

$$\oint_S D_n \, dS = \sum q_i \qquad (3)$$

$$\oint_S B_n \, dS = 0 \qquad (4)$$

дополняемой так называемыми уравнениями связи:

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E} \qquad (5)$$

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H} \qquad (6)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \qquad (7)$$

которые содержат характеристики вещества: электрическую ε и магнитную μ проницаемости и проводимость σ.

Первое уравнение представляет обобщение закона электромагнитной индукции на случай любого, не обязательно проводящего контура и читается так: циркуляция вектора напряжённости электрического поля E по произвольному замкнутому контуру L равна взятой с обратным знаком скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную этим контуром.

Второе уравнение — закон полного тока, записанный с учётом токов смещения. Максвелл предположил, что подобно токам, связанных с упорядоченным движением зарядов, источником магнитного поля является переменное электрическое поле. При этом скорость изменения вектора электрического смещения D в данной точке пространства является плотностью тока смещения, $j_{смещ} = \partial D/\partial t$, а током смещения сквозь произвольную поверхность назовём физическая величина, численно равная потоку вектора плотности тока смещения сквозь эту поверхность:

$$I_{смещ} = \int_S j_{смещ} \cdot dS = \frac{\partial}{\partial t} \int_S D_n \cdot dS \qquad (8)$$

Второе уравнение Максвелла читается так: циркуляция вектора напряжённости H магнитного поля по замкнутому контуру L равна полному току, пронизывающему поверхность, ограниченную этим контуром. Третье уравнение Максвелла выражает теорему Остроградского-Гаусса для электрического поля: поток вектора электрического смещения D сквозь произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме электрических зарядов, охватываемых этой поверхностью. Четвёртое уравнение выражает теорему Остроградского-Гаусса для магнитного поля: поток вектора магнитной индукции (магнитный поток) сквозь произвольную замкнутую поверхность равен нулю.

Сопоставляя первое с второе уравнение, можно сделать вывод, что между электрическими и магнитными полями существует тесная взаимная связь: изменение

во времени электрического поля вызывает появление магнитного поля, а переменное магнитное поле является источником вихревого электрического поля. Таким образом, если возбудить с помощью колеблющихся зарядов переменное электромагнитное поле, то в окружающем пространстве возникнет последовательность взаимных превращений электрического и магнитного полей, распространяющихся от точки к точке. Этот процесс будет будет периодическим во времени и в пространстве и, следовательно, он представляет собой волну.

Электромагнитные волны - волна поперечная. Это означает, что колебания векторов напряжённостей электрического E и магнитного H полей происходят перпендикулярно к направлению распространения волны. Более того, векторы E и H взаимно перпендикулярны и колеблются в одной фазе (синфазно).

Электромагнитная волна, как и всякий волновой процесс, характеризуется длиной волны λ, которая равна расстоянию, проходимому волной за время, равное периоду колебаний T, т.е.

$$\lambda = V \cdot T \qquad (9)$$

или

$$\lambda = 2\pi \frac{V}{\omega} = \frac{V}{\omega} \qquad (10)$$

где V - скорость распространения волны; ω - круговая или циклическая частота; V - частота колебаний.

Из уравнений Максвелла следует, что фазовая скорость электромагнитной волны равна

$$V = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}} \qquad (11)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с - скорость света в вакууме.

Электромагнитные волны от одного и того же источника в различных средах имеют одинаковую частоту колебаний, но различные скорости и, соответственно, различные длины волн. Из формул (10) и (11) следует, что

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}} \qquad (12)$$

где λ - длина волны в данной среде; λ_0 - длина волны в вакууме (воздухе).

В диамагнетиках и парамагнетиках $\mu \approx 1$, и

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon}} \qquad (13)$$

Электромагнитные волны излучаются изменяющимися во времени электрическими токами, а также отдельными движущимися зарядами, ускорения которых отличны от нуля. Если изменение тока или движение заряда происходит по гармоническому закону, то излучаемая электромагнитная волна является монохроматической, и её частота равна частоте колебаний тока или заряда. В устройствах для получения электромагнитных волн радиодиапазона используются колебания токов или макрозарядов, которое происходит, например, в колебательном контуре Томсона, вибраторе Герца. Колебания электронов в атомах и молекулах дают электромагнитные волны оптического и рентгеновского диапазона; в процессах внутриядерных колебаний нуклонов излучаются гамма-лучи.
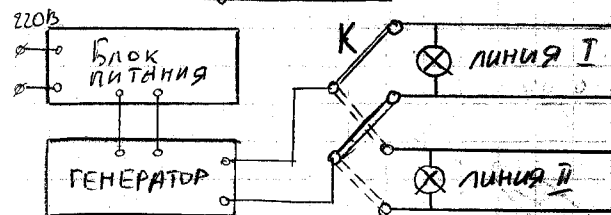
Проводящая среда, например, металл, сильно поглощает электромагнитные волны. Поглощение обусловлено наличием свободных носителей заряда, в частности, электронов проводимости. Однако электромагнитные волны могут распространяться в пустоте как диэлектрической среде, окружающей металлические проводники, при этом проводники будут играть роль направляющих. Длинная двухпроводная линия, или система Лехера, состоит из двух параллельных проводов, расстояние между которыми много меньше длины волны. Длина проводов велика по сравнению с длиной волны λ в двухпроводной линии в некоторый момент времени. Наряду с электромагнитной волной, существующей в пространстве около проводов системы Лехера, в самих проводах возникают периодические колебания электронов проводимости около их равновесных

положений, т.е. в проводах линии возникает волна тока.

Волна, распространяющаяся от генератора, называется падающей волной. При наличии отраженной волны в линии возникает стоячая волна, являющаяся результатом интерференции падающей и отраженной волны. Амплитуда стоячей волны меняется вдоль линии от максимальных значений в пучностях до минимальных значений в узлах стоячей волны. В длинной двухпроводной линии в режиме стоячей волны возникают пучности для как стоячей волны тока, так и стоячих волн напряженностей электрического и магнитного полей. Расстояние между соседними пучностями, также как и между соседними узлами, равно $\lambda/2$. Линия Лехера может быть использована для измерения диэлектрической проницаемости среды ε. В данной работе определяется ε касторового масла. Для этого по расстоянию Δl между пучностями напряженности электрического поля определяет длину электромагнитной волны в воздухе λ_0 и в касторовом масле λ. Затем, используя формулу (13), находят диэлектрическую проницаемость масла по формуле

$$\varepsilon = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2 \qquad (14)$$

Описание установки

Установка состоит из генератора электромагнитных волн, источника питания и двух линий Лехера. Линия I расположена в воздухе, линия II в ванночке с касторовым маслом. Электромагнитные волны от генератора подаются на ту или иную линию Лехера с помощью коаксиальных кабелей связи, коммутируемых переключателем К. Лампочки, содержащие лампочки накаливания, могут перемещаться вдоль

„длинных" линии и служат для визуального наблюдения пучностей и узлов напряженности поля в линиях. В пучностях напряженности электрического поля лампа горит наиболее ярко.

№ измерения	линия I			линия II		
	l_1	l_2	l_3	l_1	l_2	l_3
1	37	86	137	6	10	27
2	38	87	138	7	11	28
3	39	88	139	8	12	29
среднее	$\overline{l_1}=38$	$\overline{l_2}=87$	$\overline{l_3}=138$	$\overline{l_1}=7$	$\overline{l_2}=11$	$\overline{l_3}=28$

Расстояние между пучностями	линия I	линия II
$\Delta l = l_2 - l_1$	38	14
$\Delta l = l_3 - l_2$	51	26
$\Delta l = \frac{1}{2}(\Delta l_1 + \Delta l_2)$	44,6	20

$$\varepsilon = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{\frac{44,6}{2}}{10}\right)^2 = 4,97$$