

**МЕХАНИКА.
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА**

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

МОСКВА • 2008

**МЕХАНИКА.
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ФИЗИКЕ**

Учебное пособие для студентов
ФАКУЛЬТЕТА ТЕХНОЛОГИИ И ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСТВА

МОСКВА • 2008

ББК 22.33

*Печатается по решению кафедры общей и
экспериментальной физики МПГУ*

Составители:

В.Н.АЛЕКСАНДРОВ, М.С.КАМЕНЕЦКАЯ, О.Н. ПОЛЯКОВА

Предназначается в качестве учебного пособия студентам I курса факультета технологии и предпринимательства МПГУ для лабораторного практикума по физике (разделы “Механика”, “Молекулярная физика”). Настоящее издание выполнено в форме рабочей тетради, содержащей описания заданий, отчеты студента об их выполнении и контрольные вопросы.

Пособие поможет студентам при подготовке, выполнении и сдаче лабораторных работ.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.1

ИЗУЧЕНИЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАШИНЫ АТВУДА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

изучение прямолинейного ускоренного и равномерного движения. Определение мгновенной скорости и ускорения тела. Проверка основного уравнения динамики материальной точки – второго закона Ньютона.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:

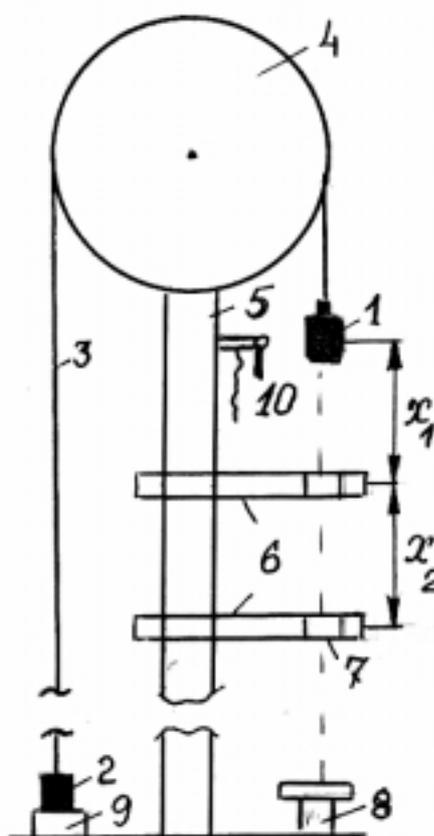
машина Атвуда, набор грузов и шайб, два электрических секундомера.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В работе определяются кинематические характеристики (скорость, ускорение) движения пробных тел (грузов) и проверяют динамические соотношения, вытекающие из второго закона Ньютона: зависимость между силой и ускорением при постоянной массе системы. Экспериментальная установка – так называемая машина Атвуда – позволяет получить равномерное и равноускоренное движение грузов.

Чтобы определить кинематические характеристики движения, нужно измерить пути, проходимые грузами, и промежутки времени, в течение которых эти пути пройдены.

Экспериментальная установка (рис.1) состоит из вертикальной рейки (5) с нанесенными на нее миллиметровыми делениями. На верхнем конце рейки закреплен легкий алюминиевый блок (4), вращающийся вокруг горизонтальной оси. Через блок перекинута нить (3), к концам которой прикреплены одинаковые грузы (1 и 2). Эти грузы имеют форму цилиндра с крепежной шейкой, обращенной вверх. На шейке грузов



могут помещаться перегрузки различного веса. Перегрузки имеют форму шайбы с прорезью, внешний диаметр которой равен диаметру груза. На шейке грузов могут также помещаться съемные перегрузки (шайбы) большего диаметра, чем грузы. На вертикальной рейке (5) находятся перемещаемые платформы (6) с указателем их положения на рейке и отверстиями (7) для прохождения грузов. Диаметр отверстий (7) немного больше диаметра грузов (1 и 2), но меньше диаметра съемной шайбы. Внутри платформ (6) расположено устройство, включающее и выключающее секундомеры при прохождении грузов через отверстия (7). Справа внизу рейки располагается магнитная ловушка (8), а слева вверху (на рис. 1 не показан) демпферы, которые служат для остановки грузов и смягчения ударов. Слева внизу имеется электромагнит (9) для удержания грузов в исходном положении. Справа на уровне груза (1)

расположен успокоитель (10), который представляет собой пластинку с V-образной прорезью, поднимаемую с помощью нити и служащую для успокоения поперечных колебаний груза (1) перед началом опыта. Рядом с установкой расположен вмонтированный в стену щиток с двумя электрическими секундомерами, пусковой кнопкой и тумблером включения (на рисунке не показан).

Внимание! Не останавливать грузы руками.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В исходном состоянии (см. рис. 1) правый груз (1) со съемной шайбой и лежащими на ней перегрузками находится сверху, а левый груз (2) – внизу, касаясь электромагнита (9). При включении тумблера (положение “ВКЛ.”) электромагнит притягивает левый груз и фиксирует положение грузов. Натягивая нить успокоителя (10), экспериментатор добивается неподвижности правого груза. Далее проводится сброс показаний секундомера, для чего, следует повернуть рычаг секундомера по часовой стрелке до упора.

При нажатии кнопки “ПУСК” отключается электромагнит, и под действием перегрузок правый груз начинает спускаться вниз, а левый поднимается с постоянным ускорением. В этот же момент времени включается первый секундомер.

Пройдя участок X_1 , правый груз попадает в отверстие верхней платформы (6). При этом происходит следующее:

- 1) выключается первый секундомер и включается второй;
- 2) благодаря тому, что съемная шайба имеет больший диаметр, она остается на верхней платформе и освобождает груз от перегрузок.

Пройдя участок X_2 , правый груз попадает в отверстие нижней платформы (7), выключает второй секундомер, фиксируя время прохождения участка равномерного движения.

В конце движения правый груз попадает в ловушку (8), а левый, ударяясь о демпфер, теряет свою скорость. Одновременно включается электромагнит ловушки (8).

Для приведения установки в исходное положение нужно: нажать на стопорное кольцо ловушки (8), освободив правый груз; опустить до соприкосновения с электромагнитом (9) левый груз; установить платформы в требуемом положении; положить съемную шайбу с необходимыми перегрузками на правый груз.

При выполнении работы используйте следующие расчетные формулы для определения:

- 1) экспериментального значения ускорения a_i на первом участке движения грузов (начальная скорость движения грузов равна нулю, длина участка X_1 , время движения t_1):

$$a_i = \frac{2X_1}{t_1^2}; \quad (1)$$

- 2) экспериментального значения мгновенной скорости $v_{\text{мгн}}$ движения грузов в конце первого участка (движение равноускоренное без начальной скорости, длина участка X_1 , время движения t_1):

$$v_{\text{мгн}} = \frac{2X_1}{t_1}; \quad (2)$$

- 3) экспериментального значения скорости $v_{\text{равн}}$ грузов на участке равномерного движения (длина участка X_2 , время движения t_2):

$$v_{\text{равн}} = \frac{X_2}{t_2}; \quad (3)$$

4) теоретического значения ускорения $a_{теор}$ грузов на первом участке пути, зная суммарную массу грузов с перегрузком $M=m_{np}+m_{лев}+\Delta m_{np}+\Delta m_{лев}$, $m_{np}=m_{лев}$, т.е. $M=2m_{сп}+\Delta m_{np}+\Delta m_{лев}$ и ускорение свободного падения g :

$$a_{теор} = \frac{\Delta m}{M} \cdot g, \quad (4)$$

где $\Delta m = \Delta m_{np} - \Delta m_{лев}$.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Экспериментальное определение ускорения и мгновенной скорости равноускоренного движения.

Установите платформы так, чтобы $X_1=X_2=0,5$ м. Положите перегрузок массой 15г на правый груз и определите из эксперимента t_1 и t_2 . Измерения повторите три раза, и полученные значения t_1 и t_2 занесите в таблицу 1. Вычислите значения a_i , $v_{мгн}$, $v_{равн}$ в каждой строке таблицы 1, а также значения $a_{иср}$, $v_{мгн\ ср}$, $v_{равн\ ср}$ по результатам этих измерений и вычислений занесите в таблицу 1.

Увеличьте расстояние X_1 до 1,0 м, не изменяя величину X_2 , проведите три опыта и соответствующие вычисления для этого случая, занесите результаты этих измерений и вычислений в таблицу 1.

Проведите соответствующие опыты для перегрузков 20 г и 25 г при $X_1=0,5$ м, $X_1=1$ м и $X_2=0,5$ м, а результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 1.

Таблица 1

Масса перегрузка (г)	Ускоренное движение						Равномерное движение			
	X_1 (м)	t_1 (с)	a_i (м/с ²)	$v_{мгн}$ (м/с)	$a_{иср}$ (м/с ²)	$v_{мгн\ ср}$ (м/с)	X_2 (м)	t_2 (с)	$v_{равн}$ (м/с)	$v_{равн\ ср}$ (м/с)
15	0,5						0,5			
	1,0						0,5			
20	0,5						0,5			
	1,0						0,5			
25	0,5						0,5			
	1,0						0,5			

Объясните практическое совпадение a_i и $v_{мгн\ ср}$ с $v_{равн\ ср}$ в соответствующих сериях измерений.

2. Определите зависимости ускорения грузов от массы перегрузков.

В этом опыте суммарная масса системы M должна оставаться неизменной, в то время как масса перегрузка изменяется. Это достигается следующим образом. Перегрузки кладутся как на съемную шайбу правого груза, так и на шейку левого груза без шайбы. Перекладывая перегрузки с шейки левого груза на съемную шайбу правого, можно менять разность масс Δm между правой и левой частями системы, оставляя неизменной полную массу системы.

Расположите платформы так, чтобы $X_1 = 1$ м. Вторую платформу следует расположить в 2 – 3 см от первой. Проведите измерения t_1 и вычислите $a_{\text{эксн}}$ для пяти разных величин перегрузков. Вычислите по приведенной ранее формуле значения $a_{\text{теор}}$ для этих перегрузков. Запишите результаты в таблицу 2.

$X_1 = 1$ м.

Таблица 2

№	Масса правого перегрузка, (г)	Масса левого перегрузка, (г)	$\Delta m/M$	t_1 , (с)	$a_{\text{эксн}}$, (м/с ²)	$a_{\text{теор}}$, (м/с ²)
1.	25	20				
2.	25+5=30	20-5=15				
3.	30+5=35	15-5=10				
4.	35+5=40	10-5=5				
5.	40+5=45	5-5=0				

Постройте на одном листе графики зависимостей $a_{\text{эксн}}$ и $a_{\text{теор}}$ от величины $\Delta m/M$ и объясните полученные результаты.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- Используя решение задачи 1.6 [1] выведите соотношения 1-4, которые Вы использовали при выполнении настоящей работы.
- Можно ли говорить о равномерном движении, если величина скорости остается постоянной?
- Как вычислить с помощью графика зависимости ускорения $a_{\text{эксн}}$ от $\Delta m/M$ ускорение свободного падения?
- Почему величины скорости и ускорения правого и левого грузов машины Атвуда в любой момент времени одинаковы?
- Как рассчитать натяжение нитей при движении грузов машины Атвуда на участке X_1 и на участке X_2 ?
- Как рассчитать давление перегрузка на груз при равноускоренном движении грузов машины Атвуда?
- Объясните расхождение зависимостей $a_{\text{эксн}}$ и $a_{\text{теор}}$ от величин $\Delta m/M$.
- Как рассчитать ускорение тела, соскальзывающего с наклонной плоскости, если а) трение отсутствует; б) коэффициент трения равен k ?
- Как изменится сила давления пассажира на пол лифта, если лифт начнет: а) подниматься с ускорением; б) опускаться с ускорением; в) тормозиться после равномерного подъема; г) тормозиться после равномерного спуска?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.2

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПУЛИ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

изучение кинематического и динамического методов измерения больших скоростей.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:

пневматическое ружье, пули, аналитические весы, транспортер, линейка, бумажные диски, электродвигатель, баллистический маятник.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В работе используются два метода измерения скорости полета пули: кинематический и динамический. Кинематический метод основан на косвенном измерении времени, в течение которого пуля пролетает известное расстояние. В динамическом методе законы сохранения механического импульса и энергии позволяют рассчитать скорость пули, изучая движение другого массивного тела после неупругого столкновения его с летящей пулей.

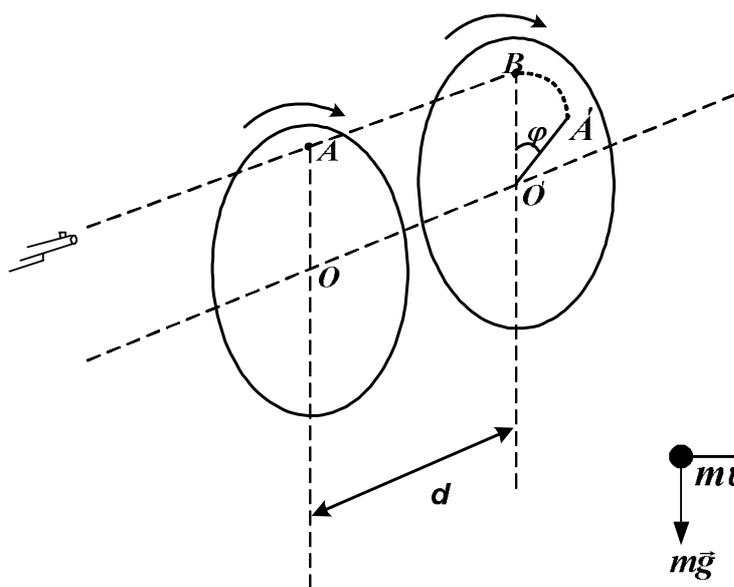


рис. 1

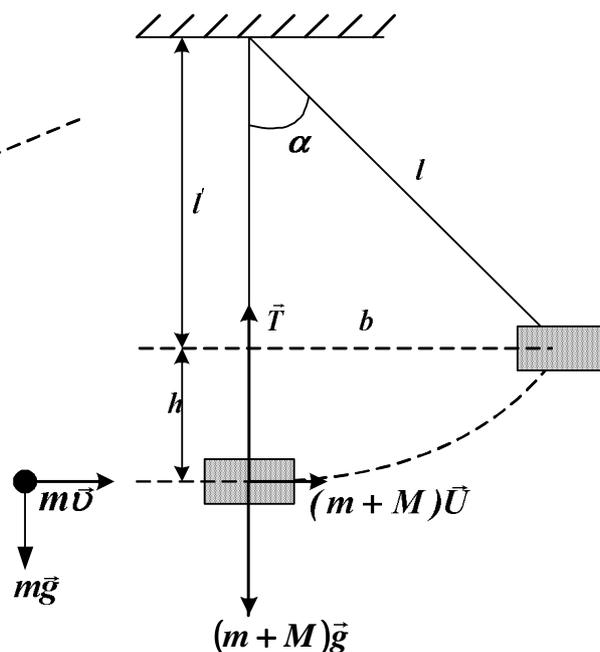


рис. 2

Установка состоит из закрепленного на подставке пневматического ружья, электродвигателя, на оси которого на расстоянии d друг от друга, закрепляются бумажные диски, и баллистического маятника – массивного цилиндра, наполненного пластилином и подвешенного на длинных нитях так, что его центр масс находится на линии прицела.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Установка позволяет определить скорость одной и той же пули двумя методами при одном выстреле. Оба метода рассмотрены в [1] на примерах решения задач 1.4 и 1.9, соответственно.

1. КИНЕМАТИЧЕСКИЙ МЕТОД. Вылетая из ствола, пуля пробивает бумажные диски, при неподвижных дисках пуля пробивала бы их в точках A и A' (рис. 1). В случае равномерно синхронно вращающихся дисков пуля пробьет второй диск не в точке A' , а в точке B , так как за время полета пули между дисками, второй диск повернется на угол φ . Измерив этот угол, а также расстояние d между дисками и зная угловую скорость вращения дисков ω ($\omega = 2\pi \cdot n$, где n дано в паспорте работы), можно (допустив, что пуля движется равномерно и прямолинейно) вычислить скорость пули v_k :

$$v_k = \frac{d}{t} = \frac{d \cdot \omega}{\varphi}. \quad (1)$$

2. ДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД. Пробив диски, пуля попадает в подвешенный на ее пути маятник и застревает в нем (рис.2). Приобретая механический импульс, маятник смещается по горизонтали на расстояние b , поднимаясь при этом на высоту h . Измерив b и используя закон сохранения механической энергии маятника, можно найти скорость маятника непосредственно после попадания в него пули u :

$$u = b \sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (2)$$

Затем, применив к системе “пуля – маятник” закон сохранения импульса (абсолютно неупругий удар), определяется искомая скорость пули v_d при условии, $m \ll M$:

$$v_d = \frac{Mu}{m} \approx \frac{M \cdot b}{m} \sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (3)$$

Необходимые для вычисления величины – масса маятника M и длина нити l – указаны в паспорте работы. Масса пули m измеряется на аналитических весах.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Приготовьте два бумажных диска, напишите на них номера I и II и закрепите их на оси двигателя так, чтобы обозначенные стороны были обращены к стволу ружья.

Взвесьте пулю с точностью до 1 мг и зарядите ружье.

ВНИМАНИЕ! Ружье заряжается только в присутствии преподавателя или инженера.

Включите двигатель и, произведя выстрел, измерьте смещение маятника. Снимите диски, измерьте угол φ .

Результаты измерений и параметры установки, необходимые для расчета скорости пули кинематическим методом внесите в таблицу 1 и рассчитайте скорость пули.

Таблица 1

d , (м)	n , (об/мин)	ω (рад/с)	ϕ , (рад)	$v_{к эксп}$ (м/с)

Результаты измерений и параметры установки, необходимые для расчета скорости пули динамическим методом внесите в таблицу 2.

Таблица 2

M , (кг)	l , (м)	m , (кг)	b , (м)	$v_{д эксп}$ (м/с)

Рассчитайте относительную погрешность каждого из методов определения скорости пули.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как направлено и чему равно ускорение материальной точки при ее движении по окружности с постоянной по величине скоростью? Является ли это движение равномерным или равноускоренным?
2. Можно ли считать равноускоренными движениями:
 - а) падение куска мела со стола?
 - б) падение листа с дерева на землю?
 - в) полет парашютиста до раскрытия парашюта?
 - г) полет парашютиста после раскрытия парашюта?
 - д) полет спутника по круговой орбите?
3. Какую скорость – среднюю или мгновенную – вы определяете с помощью установки лабораторной работы № 2 кинематическим методом и динамическим методом?
4. Как рассчитать, на какую максимальную высоту поднимется тело, брошенное вертикально вверх со скоростью v_0 ? Через какое время оно вернется обратно?
5. Является ли система “пуля – маятник” замкнутой? Как рассчитать скорость маятника после попадания в него пули?
6. Чему равно натяжение нити маятника до удара пули и непосредственно после удара?
7. Сохраняется ли механическая энергия системы “пуля – маятник” при ударе пули о маятник?
8. Сравните величины скорости пули v_k и v_d и укажите возможные причины расхождения результатов.
9. Выведите формулы для оценки максимальной погрешности определения скорости пули кинематическим и динамическим методами.
10. Рассчитайте, какая доля кинетической энергии пули переходит во внутреннюю энергию пули и маятника при их соударении.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.3

ИЗМЕРЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ВЕЛОСИПЕДНОГО КОЛЕСА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

экспериментальное определение момента инерции велосипедного колеса методом вращения и методом колебаний.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:

велосипедное колесо со шкивом и гнездами, набор гирь, металлический шарик, секундомер, миллиметровая линейка, штангенциркуль, весы.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка (рис. 1а) представляет из себя велосипедное колесо, способное свободно вращаться вокруг горизонтальной оси. На ступице закреплен шкив радиуса r , на который может наматываться нить с закрепленным на ее конце грузом массы m . Измерение времени движения груза m производится с помощью секундомера.

На ободе колеса (рис.1б) симметрично относительно оси установлены два гнезда, в один из которых помещают шарик массы m_1 и радиуса r_1 для нахождения момента инерции методом колебаний.

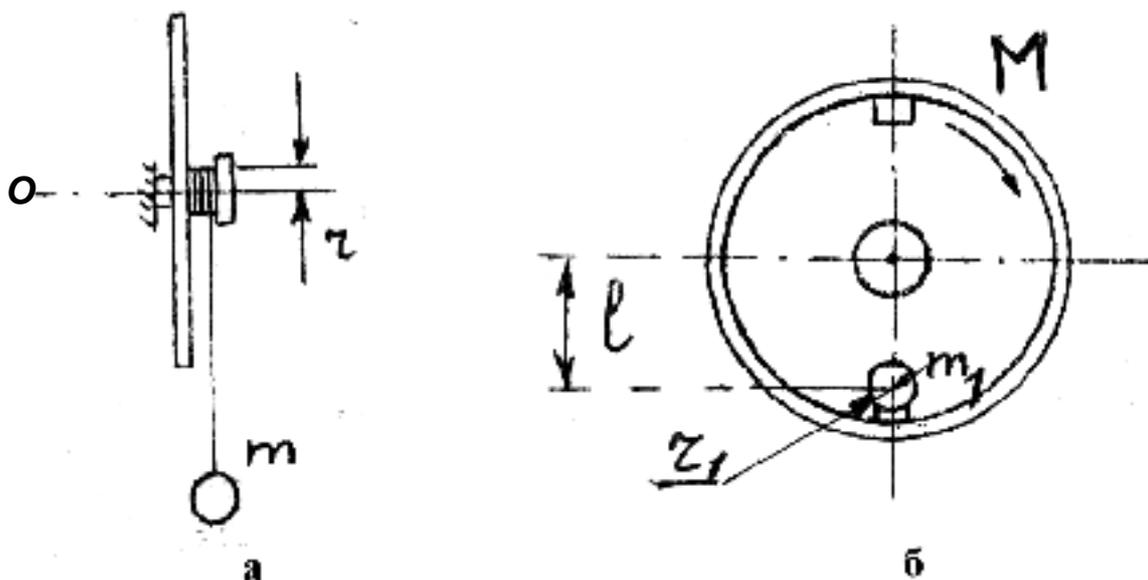


Рис. 1

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Установка позволяет экспериментально определить момент инерции велосипедного колеса двумя методами.

1. МЕТОД ВРАЩЕНИЯ.

При вращении тела вокруг неподвижной оси O , второй закон Ньютона для вращательного движения твердого тела имеет вид:

$$M_o = I_o \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

где M_o - проекция момента внешних сил на ось O , I_o - момент инерции тела относительно оси O ; ε - угловое ускорение.

Это уравнение можно использовать для нахождения момента инерции тела I_o методом вращения. Этот метод определения момента инерции рассмотрен в [1] на примере решения задачи 2.2.

Если к концу нити, намотанной на шкив велосипедного колеса, привязать груз массы m , то после его освобождения он движется вниз поступательно, а велосипедное колесо приходит во вращение (рис.1 а). Измерив путь h , который проходит груз и время его движения t , а также радиус шкива r , можно (пренебрегая сопротивлением воздуха и трением в оси шкива) вычислить момент инерции I_o данного велосипедного колеса:

$$I_o = \frac{M_o}{\varepsilon} = mr^2 \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right), \quad (2)$$

где I_o - момент инерции колеса относительно оси O ; m – масса груза, подвешенного к нити; r – радиус шкива, на который намотана нить; g – ускорение свободного падения; t – время ускоренного движения груза; h – расстояние, на которое опускается груз m .

2. МЕТОД КОЛЕБАНИЙ.

Если в одно из гнезд, закрепленных на ободе велосипедного колеса (рис. 1б), поместить металлический шарик массы m_1 , то велосипедное колесо можно рассматривать как физический маятник, ось качания которого совпадает с осью велосипедного колеса. Период T гармонических колебаний этого маятника можно вычислить по формуле (вывод формулы для периода T гармонических колебаний физического маятника подробно рассмотрен в задаче 3.3 [1]):

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{I}{mgl}}, \quad (3)$$

где l расстояние от оси вращения до центра шарика.

Следовательно, измерив экспериментально величину T , можно определить I – момент инерции физического маятника. Этот момент инерции равен сумме моментов инерции колеса I_o и шарика I_m относительно оси качаний. Момент инерции шарика относительно этой оси можно рассчитать по теореме Штейнера: $I_m = \frac{2}{5} m_1 r_1^2 + m_1 l^2$. Таким образом, мы сможем получить значение момента инерции непосредственно велосипедного колеса I_o :

$$I_o = \frac{m_1 g l T^2}{4\pi^2} - I_m. \quad (4)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

1. МЕТОД ВРАЩЕНИЯ. Измерьте штангенциркулем диаметр шкива в различных точках (не менее трех раз) и найдите среднее значение радиуса шкива r .

Взвесьте грузы (не менее двух грузов) и один из них привяжите к концу нити, намотанной на шкив велосипедного колеса.

Вращением колеса поднимите груз m на некоторую высоту от пола и, отпустив колесо, измерьте пройденный путь h и время движения груза t (с помощью секундомера). Измерения повторите, изменив массу груза и путь h .

Результаты измерений и параметры установки, необходимые для расчета I_o велосипедного колеса методом вращения, внесите в таблицу 1 и рассчитайте величины I_o и I_{cp} .

Таблица 1

№	r_{cp} (м)	m , (кг)	h , (м)	t , (с)	I_o , (кг·м ²)	I_{cp} , (кг·м ²)
1						
2						

2. МЕТОД КОЛЕБАНИЙ. Снимите груз m с нити. Возьмите металлический шарик, определите с помощью весов его массу m_1 и с помощью штангенциркуля его радиус r_1 .

Положите шарик в одно из гнезд велосипедного колеса и определите с помощью линейки расстояние l от центра шарика до оси колеса.

Выведите систему “велосипедное колесо и шарик” из положения равновесия, повернув на небольшой угол, и измерьте секундомером время 20 полных колебаний t . Определив период колебаний физического маятника T , рассчитайте момент инерции велосипедного колеса I_o .

Результаты измерений и параметры экспериментальной установки, необходимые для расчета I_o , внесите в таблицу 2.

Таблица 2

m_1 , (кг)	r_1 , (м)	l , (м)	t , (с)	T , (с)	I_o , (кг·м ²)

Сравните величины момента инерции велосипедного колеса I_o , полученные двумя разными способами и укажите возможные причины расхождения результатов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определения момента силы, момента импульса и момента инерции твердого тела относительно оси.
2. Сформулируйте основное уравнение динамики вращательного движения твердого тела.
3. Выведите формулу для расчета момента инерции велосипедного колеса в методе вращения.
4. Выведите формулу для расчета момента инерции велосипедного колеса в методе колебаний.
5. От чего зависит момент инерции I твердого тела. Приведите примеры расчета моментов инерции простейших тел.
6. При каких условиях можно считать колебания системы “велосипедное колесо + груз” гармоническими.
7. Выведите формулы для оценки относительной и абсолютной погрешностей определения I_o методом вращения и методом колебания.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. 4

ИЗУЧЕНИЕ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

проверка основного уравнения динамики вращательного движения твердого тела.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:

прибор Обербека, набор гирь, секундомер, штангенциркуль, линейка.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

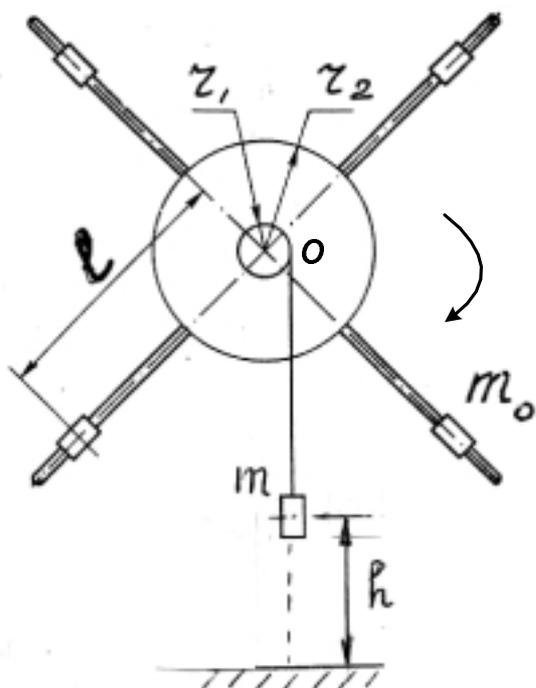


Рис. 1

Экспериментальную проверку уравнения (1) можно произвести с помощью прибора Обербека (рис.1). Он состоит из 4-х стержней, расположенных крестообразно и укрепленных на ступице, снабженной двумя шкивами радиуса r_1 и r_2 . Ось ступицы расположена горизонтально и может свободно вращаться в опорных подшипниках. На четырех стержнях крестовины симметрично относительно оси вращения могут быть закреплены грузы массой m_0 . Перемещая грузы по стержням, т.е. меняя величину l , можно менять момент инерции прибора.

На шкив намотана нить, на конце которой могут закрепляться грузы различной массы m . Натяжение нити, на которой подвешен груз m , создает вращающий момент, под действием которого крестовина с грузами начинает вращаться относительно оси O . Величину вращающего момента можно изменять, меняя массу груза или радиус шкива r .

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В случае вращения тела вокруг неподвижной оси O второй закон Ньютона для вращательного движения имеет вид:

$$M_o = I_o \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

где M_o - проекция момента внешних сил на ось O , I_o - момент инерции тела относительно оси O ; ε - угловое ускорение.

Экспериментальный метод определения момента инерции рассмотрен в задаче 2.2 [1].

Получено выражение для расчета экспериментального значения момента инерции $I_{\text{эксн}}$ прибора Обербека:

$$I_{\text{эксн.}} = \frac{M_0}{\epsilon} = mr^2 \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right), \quad (2)$$

где m - масса груза, подвешенного к нити; r - радиус шкива; h – расстояние, пройденное грузом m ; t - время за которое груз m прошел расстояние h ; g – ускорение свободного падения.

Перед началом измерений груз m , подвешенный на нити, устанавливают на высоте h от пола, а грузы m_0 на расстоянии l_1 от оси вращения O прибора. Затем отпускают груз m и одновременно включают секундомер. Под действием силы тяжести груз m начнет опускаться вниз, причем его движение будет равноускоренным. В момент касания грузом пола секундомер выключают, фиксируя тем самым время движения груза t .

Переместив четыре груза массами m_0 вдоль стержней на расстояние l_2 , можно экспериментально определить новое значение момента инерции крестовины с грузами. Полученные значения $I_{\text{эксн1}}$ и $I_{\text{эксн2}}$ позволяют вычислить разность $\Delta I_{\text{эксн}}$:

$$\Delta I_{\text{эксн}} = I_{\text{эксн1}} - I_{\text{эксн2}} .$$

Разность двух моментов инерции можно вычислить теоретически, используя свойство аддитивности величины момента инерции: момент инерции крестовины с грузами равен сумме моментов инерции непосредственно крестовины относительно оси вращения и четырех грузов m_0 относительно этой же оси. Выражение для разности $\Delta I_{\text{теор}}$ имеет следующий вид:

$$\Delta I_{\text{теор}} = 4m_0(l_1^2 - l_2^2) . \quad (3)$$

В работе сравниваются значения $\Delta I_{\text{эксн}}$ и $\Delta I_{\text{теор}}$ при разных расстояниях грузов m_0 от оси вращения.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Взвесьте грузы m и четыре груза m_0 . Закрепите грузы массы m_0 на концах стержней крестовины и проверьте, находится ли прибор в состоянии безразличного равновесия. Если нет, то добейтесь такого положения небольшим перемещением грузов вдоль стержней. Определите радиус шкива r и среднее расстояние 4-х грузов m_0 от оси вращения. Вращая крестовину, установите груз на некоторой высоте h от пола (эта величина выбирается произвольно в пределах 0,8–1,1 м). Отпустите груз m , измерьте его время падения t . Повторите эксперимент с другим грузом m . Все измерения внесите в таблицу.

2. Измените расстояние грузов m_0 от оси вращения, закрепите их на первой трети длины стержней и повторите предыдущий опыт. Результаты измерений также занесите в таблицу.

3. Рассчитайте $\Delta I_{\text{эксн}}$ и $\Delta I_{\text{теор}}$ и результаты вычислений занесите в таблицу.

Таблица

№	m_0 , (кг)	l , (м)	m , (кг)	r , (м)	h , (м)	t , (с)	$I_{\text{эксн}}$ (кг·м ²)	$\Delta I_{\text{эксн}}$ (кг·м ²)	$\Delta I_{\text{теор}}$ (кг·м ²)
1.									

2.									
3									
4									

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Куда направлены векторы угловой скорости и углового ускорения при вращении прибора Обербека под действием спускающего груза?
2. В каких приближениях вами получены соотношения для $\Delta I_{\text{эксп}}$ и $\Delta I_{\text{теор}}$?
3. Как рассчитать ускорение грузов машины Атвуда, если ее блок считать диском массы m и радиусом r ?
4. Как экспериментально определить момент инерции грузов m_0 в приборе Обербека?
5. Как рассчитать силу натяжения нити, к которой подвешен груз в приборе Обербека, при ускоренном движении груза?
6. Докажите, что линейное ускорение груза m и угловое ускорение крестовины прибора Обербека связаны соотношением $a = g$.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.5

СЛОЖЕНИЕ ВЗАИМНО ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫХ КОЛЕБАНИЙ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

изучение формы траектории материальной точки, участвующей в двух взаимно перпендикулярных колебаниях.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:

песочный маятник, секундомер, линейка, лист бумаги, песок.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка (рис.1) состоит из П-образной рамы и массивной конусообразной воронки с песком, подвешенной на двух нитях, длину которых можно менять с помощью винта (см. рис.1). Передвигая муфту вдоль нитей, можно изменять расстояния l_1 и l_2 , определяющие периоды колебаний воронки в двух плоскостях – в плоскости рамы и в плоскости, перпендикулярной раме. В основании рамы лежит лист бумаги. Высыпавшийся из воронки песок ложится на бумагу, образуя фигуру, соответствующую траектории движения воронки (маятника).

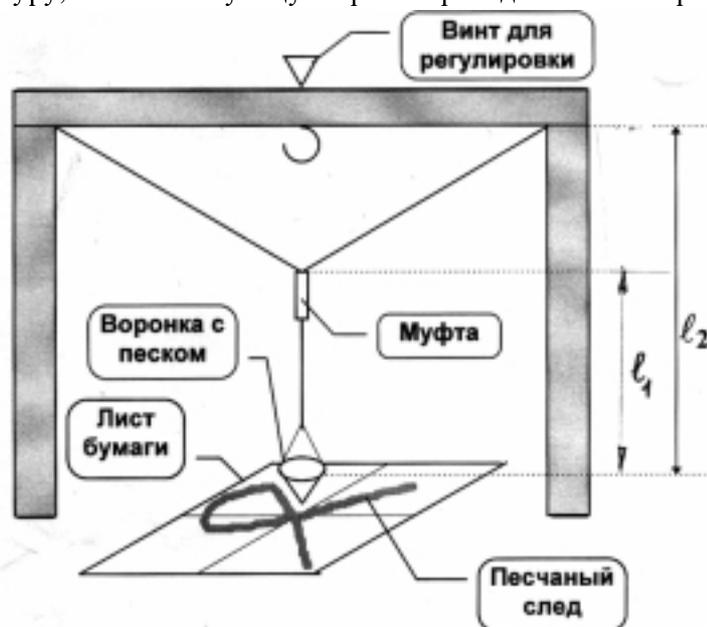


Рис.1

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Перемещая муфту по высоте, можно изменять период колебаний воронки в плоскости рамы T_2 при практически неизменном периоде колебаний воронки в перпендикулярной плоскости T_1 . Изменяя соотношение между периодами, можно наблюдать различные виды

траекторий. В случае кратных периодов T_1 и T_2 получаются замкнутые кривые, называемые фигурами Лиссажу. Если требуется получить равные периоды колебаний в обеих плоскостях, то муфту поднимают вверх до упора. В этом случае кривая наиболее проста: она имеет вид эллипса (рис.2), ориентация которого относительно координатных осей зависит от разности фаз φ складываемых колебаний (см. задачу 3.2 [1]). Амплитуды колебаний можно определить, проведя к эллипсу касательные, параллельные координатным осям.

Формулы, определяющие периоды колебания воронки в двух плоскостях через длины соответствующих подвесов, считая маятник математическим выглядят следующим образом:

$$T_i = 2\pi \cdot \sqrt{l_i/g} \quad (1)$$

Разности фаз колебаний в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (рис.2) определяются из соотношения:

$$\sin \varphi = X_0/a \quad (2)$$

ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ И НАБЛЮДЕНИЙ

1. Сложение колебаний равных частот.

Поднимите муфту до отказа вверх и закрепите ее на крючке перекладины рамы. Длину нитей отрегулируйте так, чтобы между воронкой и листом было не более 2-3 см. С помощью секундомера измерьте время t равное 30 полным колебаниям воронки, и определите период колебаний маятника. Угол начального отклонения маятника от положения равновесия не должен превышать 5° - 8° .

Отведите воронку с песком в сторону и отпустите ее, дав толчок в перпендикулярном направлении. Получите траекторию (маятника (песок оставляет след на листе бумаги) за один период и обведите карандашом полученную кривую. Проведите координатные оси X и Y , одна из которых должна лежать в плоскости рамы. Начало координат выберите в точке, соответствующей положению равновесия маятника. Определите амплитуды колебаний вдоль осей OX и OY .

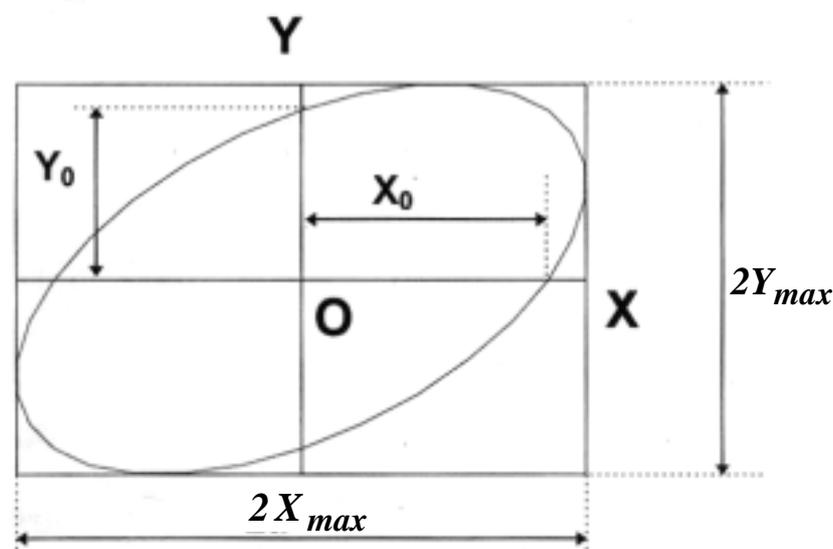


Рис. 2

Измерьте координаты точки пересечения эллипса с одной из координатных осей и определите разность фаз между колебаниями. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 1.

Таблица 1

$t, (с)$	$T, (с)$	$X_{max} (мм)$	$Y_{max} (мм)$	$X_0, (мм)$	$Y_0, (мм)$	$\varphi, (рад)$

Запишите уравнение движения воронки (см. задачу № 3.2 [1]).

2. Наблюдение фигур Лиссажу.

Используя формулу для периода колебаний математического маятника, рассчитайте, при каком соотношении длин подвеса маятника периоды колебания в двух перпендикулярных плоскостях будут относиться как 1:2. Передвиньте муфту в положение, удовлетворяющее найденному условию. Методом, описанным в п.1, определите периоды колебаний по осям ОХ и ОУ, а результаты измерений занесите в таблицу 2.

Таблица 2

l_1 , (см)	l_2 , (см)	T_1 , (с)	T_2 , (с)

Отклонив маятник в сторону, приведите его в движение, сообщив первоначальный толчок сначала в направлении оси ОХ, затем в направлении ОУ. Для обоих случаев нарисуйте фигуры, образованные песком за один период.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Выведите соотношения (1) и (2), используемые Вами в настоящей работе.
2. По какой траектории движется материальная точка, совершающая колебания в двух взаимно перпендикулярных направлениях, если:
 - а) частоты обоих колебаний одинаковы?
 - б) частоты колебаний кратны?
3. Как, зная законы, описывающие движение воронки, найти компоненты скорости, ускорения?
4. Как направлено и чему равно ускорение при движении материальной точки по эллипсу?
5. Как по виду фигуры Лиссажу определить отношение частот взаимно перпендикулярных колебаний? Нарисуйте фигуры Лиссажу, соответствующие отношению частот 1:2 и 2:3.
6. Почему в работе используется воронка большой массы? Что произойдет, если воронка будет очень легкой? Что будет, если воронка будет очень большой, с большим запасом песка?
7. Почему муфта должна быть очень легкой? По сравнению с массой какого тела масса муфты должна быть мала?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.6

ИЗУЧЕНИЕ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ ФИЗИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

экспериментальное определение периода свободных колебаний, добротности и логарифмического декремента затухания физического маятника.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:

физический маятник, измерительная шкала, осветительная лампа с оптической системой, пластина, секундомер.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Колебания маятника около положения равновесия, после сообщения ему энергии (кинетической – толчком, потенциальной – отклонением от положения равновесия), называются свободными колебаниями.

Свободные колебания являются затухающими, так как энергия, сообщенная системе, постепенно расходуется на преодоление трения (в точке подвеса и сопротивления воздуха).

На рис.1 представлена схема экспериментальной установки для изучения свободных колебаний физического маятника - стержня, на нижнем конце которого находится груз.

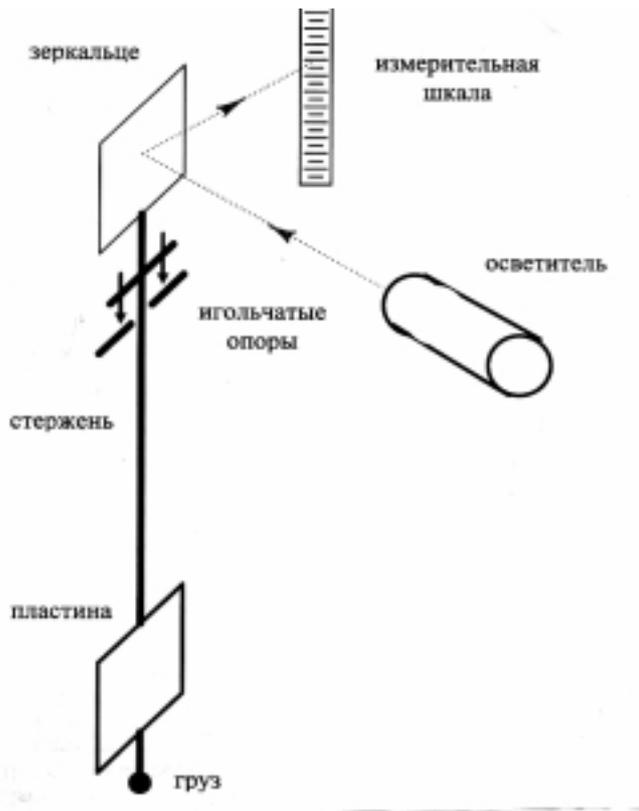


Рис.1

На верхней части стержня укреплены игольчатые опоры, позволяющие маятнику совершать колебание в вертикальной плоскости. К опорам прикреплено зеркальце, отражающее падающий на него свет от осветителя на вертикально закрепленную неподвижную шкалу. При колебаниях маятника световое пятно перемещается по шкале на расстояние, пропорциональное угловому смещению маятника. Для удобства отсчета на вертикальной шкале нанесены деления, а осветитель снабжен визирной нитью. Для увеличения затухания к стержню прикрепляется металлическая пластина. Располагая ее под различными углами к плоскости колебаний маятника, можно изменять действующую на маятник силу сопротивления воздуха и, тем самым, коэффициент затухания системы.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Закон убывания амплитуд зависит от характера сил трения, действующих на маятник. В настоящем эксперименте силу сопротивления и, следовательно, тормозящий момент M_{mp} можно считать пропорциональным угловой скорости, $M_{mp} = -r \frac{d\varphi}{dt} = -r\omega$,

где r – коэффициент трения, φ – угловое перемещение маятника.

Уравнение движения для малых колебаний маятника имеет вид:

$$I_z \cdot \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -r \frac{d\varphi}{dt} - mgl \cdot \varphi$$

или

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + 2\beta \frac{d\varphi}{dt} + \omega_0^2 \cdot \varphi = 0, \quad (1)$$

где m – масса маятника; I_z – момент инерции маятника относительно оси вращения;

l – расстояние от центра масс маятника до оси вращения; $\beta = \frac{r}{2I_z}$ – коэффициент

затухания; $\omega_0 = \sqrt{\frac{mgl}{I_z}}$ – собственная угловая частота колебаний маятника.

Решение уравнения (1) для случая $\beta^2 < \omega_0^2$ (малое сопротивление среды) имеет вид:

$$\varphi(t) = \varphi_0 \cdot e^{-\beta t} \cdot \cos(\omega_1 t + \alpha), \quad (2)$$

где $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ - угловая частота свободных колебаний; $\varphi_m = \varphi_0 \cdot e^{-\beta t}$ - мгновенная амплитуда затухающих колебаний; φ_0, α - соответственно начальная амплитуда и начальная фаза колебаний (при $t=0$).

Наряду с коэффициентом затухания β при анализе колебательной системы широко используется такой параметр системы, как добротность Q . Она определяется относительной убылью энергии колебаний за одно полное колебание:

$$Q = 2\pi \frac{E}{A_{mp}} = \frac{\omega_0^2}{2\beta\omega_1}, \quad (3)$$

где E – полный запас энергии системы; A_{mp} – энергия, теряемая за одно полное колебание.

При малых колебаниях с небольшим трением, когда $\omega_1 \approx \omega_0$, выражение для добротности принимает вид:

$$Q \approx \frac{\omega_1}{2\beta} \approx \frac{\omega_0}{2\beta} \quad (4)$$

По определению логарифмический декремент затухания равен:

$$\lambda = \beta \cdot T. \quad (5)$$

Период колебаний маятника T определяется по времени t , за которое совершается N полных колебаний маятника:

$$T = t/N. \quad (6)$$

Коэффициент затухания можно определить, зная зависимость амплитуды колебаний маятника от времени (2). Для этого маятнику сообщают начальное отклонение, несколько большее 15 делений шкалы. Затем включают секундомер в момент времени, когда амплитуда колебаний станет равной 15 делениям, и засекают моменты времени, когда амплитуда достигает значений 13, 11, 9, 7, 5 и 3 делений шкалы. По результатам эксперимента строят график в координатах $\left[\ln \frac{\varphi(0)}{\varphi(t)}, t \right]$, где $\varphi(0)=15$ дел., а $\varphi(t)$ – амплитуда в момент времени t .

По графику определяют коэффициент затухания $\beta = \frac{\ln(\varphi(0)/\varphi(t))}{t}$.

По полученным значениям β и T определяются по формуле (5) логарифмический декремент затухания λ и по формуле (4) добротность системы Q .

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Включите осветитель. Добейтесь такого положения зеркальца, чтобы в положении равновесия визирная нить совпадала с нулевым делением шкалы. Определите период колебаний маятника и результаты занесите в таблицу 1.

Таблица 1

N	$t, (c)$	$T, (c)$

2. Поставьте тормозящую пластину параллельно плоскости колебаний маятника и исследуйте зависимость амплитуды его колебаний от времени. Занесите результаты измерений и вычислений в таблицу 2

Таблица 2

Амплитуда колебаний $\varphi(t)$	15	13	11	9	7	5	3
Момент времени $t, (c)$	0						
$\ln \frac{\varphi(0)}{\varphi(t)}$	0						

3. Постройте график зависимости величины $\ln \frac{\varphi(0)}{\varphi(t)}$ от времени t .

4. Определите величину β_1 , а затем величины λ_1 и Q_1 .

5. Проведите аналогичные измерения, повернув пластину перпендикулярно плоскости колебаний маятника и занесите результаты измерений и вычислений в таблицу 3.

Таблица 3

Амплитуда колебаний $\varphi(t)$	15	13	11	9	7	5	3
Момент времени $t, (c)$	0						
$\ln \frac{\varphi(0)}{\varphi(t)}$	0						

6. Постройте график зависимости величины $\ln \frac{\varphi(0)}{\varphi(t)}$ от времени t .

7. Определите величину β_2 , а затем величины λ_2 и Q_2 .

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Запишите уравнение гармонических колебаний физического маятника. Какие величины при этом изменяются по гармоническому закону?
2. Чем определяется собственная частота гармонических колебаний физического маятника? Сравните с формулой, определяющей частоту колебаний математического маятника.
3. Запишите динамическое уравнение и закон, описывающий затухающие колебания физического маятника.
4. Дайте определения логарифмического декремента, добротности, времени релаксации.
5. Почему пластина тормозит движение маятника?
6. При каком положении пластины коэффициент затухания будет минимальным?
7. Почему пластина должна быть очень легкой по сравнению с маятником?
8. Почему период колебания маятника определяется не по одному полному колебанию, а по измерению времени нескольких колебаний?
9. Как меняется полная механическая энергия реально колеблющегося маятника?
10. Являются ли затухающие колебания гармоническими?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

измерение скорости распространения звуковых волн методом сложения взаимно перпендикулярных колебаний.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:

звуковой генератор, электронный осциллограф, микрофон, громкоговоритель, измерительная скамья.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Траектория движения материальной точки, участвующей в двух взаимно-перпендикулярных гармонических колебаниях с одинаковыми частотами:

$$x = x_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_1) \text{ и } y = y_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_2), \quad (1)$$

представляет собой эллипс, уравнение которого имеет вид:

$$\frac{x^2}{x_m^2} + \frac{y^2}{y_m^2} - \frac{2xy}{x_m y_m} \cdot \cos \varphi = \sin^2 \Delta \varphi. \quad (2)$$

Форма эллипса на плоскости (x, y) зависит от разности фаз $\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1$. В частом случае, когда $\varphi = 0$, эллипс превращается в прямую, проходящую в первом и третьем квадрантах. При $\varphi = \pi$ получается прямая, проходящая через второй и четвертый квадранты. При непрерывном изменении разности фаз форма эллипса также меняется непрерывно, повторяясь при изменении φ на 2π радиан.

Это свойство траектории результирующего колебания положено в основу используемого в работе метода определения скорости распространения звука в воздухе.

Схема установки изображена на рис.1. Источник звуковых волн (динамик) и приемник (микрофон) укреплены на измерительной скамье. Динамик питается синусоидальным напряжением от звукового генератора, которое также подается на вход X электронного осциллографа. Переменное напряжение, возникающее в цепи микрофона, подается на вход Y электронного осциллографа. В результате электронный луч на экране осциллографа описывает траекторию в виде эллипса, форма и положение которого зависит от разности фаз $\Delta \varphi$ между колебаниями напряжения в микрофоне и динамике. Значение $\Delta \varphi$ зависит от расстояния Δl между динамиком и микрофоном.

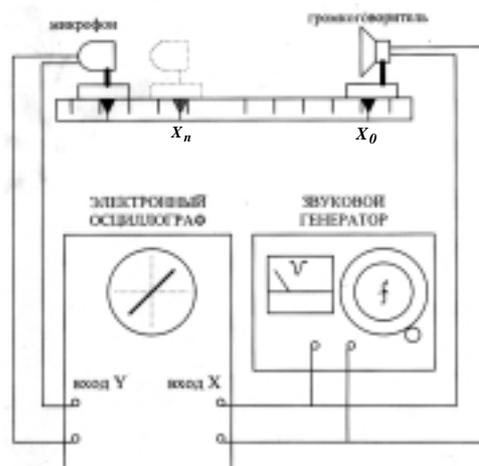


Рис.1

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

При перемещении микрофона вдоль скамьи на расстояние $\Delta \ell$ сдвиг фаз изменяется на величину $\Delta \varphi = 2 \cdot \pi \cdot \Delta \ell / \lambda$, где λ – длина волны звука в воздухе. При медленном перемещении микрофона вдоль измерительной скамьи на экране периодически появляется прямая линия, проходящая через I и III квадранты. В этих положениях микрофона разность фаз колебаний в цепи микрофона и динамика изменяется на 2π . Таким образом, если при перемещении микрофона на расстояние $\Delta \ell$ возникает n повторений картины на экране осциллографа, то длина волны звука в воздухе равна:

$$\lambda = \frac{\Delta \ell}{n}.$$

Скорость звука связана с длиной волны λ и частотой генератора f соотношением:

$$v_{зв} = \lambda \cdot f.$$

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Соберите электрическую часть установки, следуя схеме рис.1. Расположите динамик и микрофон у одного и того же края измерительной скамьи и включите питание звукового генератора и осциллографа. Медленно перемещая микрофон, отметьте координаты X_i тех положений микрофона на оптической скамье, при которых на экране осциллографа видна прямая линия, проходящая через I и III квадранты. Измерения проведите для двух значений частоты в диапазоне от 3000 до 6000 Гц, а их результаты занесите в таблицу 1

Таблица 1

Частота (Гц)	X_0 , (мм)	X_1 , (мм)	X_2 , (мм)	X_3 , (мм)	X_4 , (мм)	X_5 , (мм)

2. Определите перемещение микрофона $\Delta \ell = X_n - X_0$, при котором картина на экране осциллографа повторяется n раз. Рассчитайте длину волны и скорость звука в воздухе для двух значений частоты, а результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 2.

Таблица 2

Частота, (Гц)	n	$\Delta \ell$, (мм)	λ , (м)	$v_{зв}$, (м/с)

Оцените погрешность полученного в эксперименте значения скорости звука. Вычислите скорость звука по теоретической формуле:

$$v = v_0 \sqrt{\frac{273 + t}{273}},$$

где $v_0 = 331,46$ м/с – скорость звука в воздухе при 0°C , t – температура в комнате (в градусах Цельсия).

Сравните экспериментальное и теоретическое значение скорости звука в воздухе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое фаза волны? В чем принципиальная разница между фазой бегущей волны и фазой колебания?
2. Встречаясь в определенной точке, звуковые волны могут ослаблять друг друга почти до нуля. Не противоречит ли это закону сохранения энергии?
3. Влияет ли на точность Ваших измерений затухание звука в воздухе?
4. От чего зависит скорость распространения звуковых волн в воздухе?
5. В каком положении должен находиться переключатель развертки электронного осциллографа при выполнении данной работы?
6. Какими являются звуковые волны в воздухе: поперечными или продольными?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

экспериментальное определение скорости звука в стержне методом Кундта.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:

стеклянная труба, набор стержней, масштабная линейка, пробковые опилки, суконка с канифолью.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

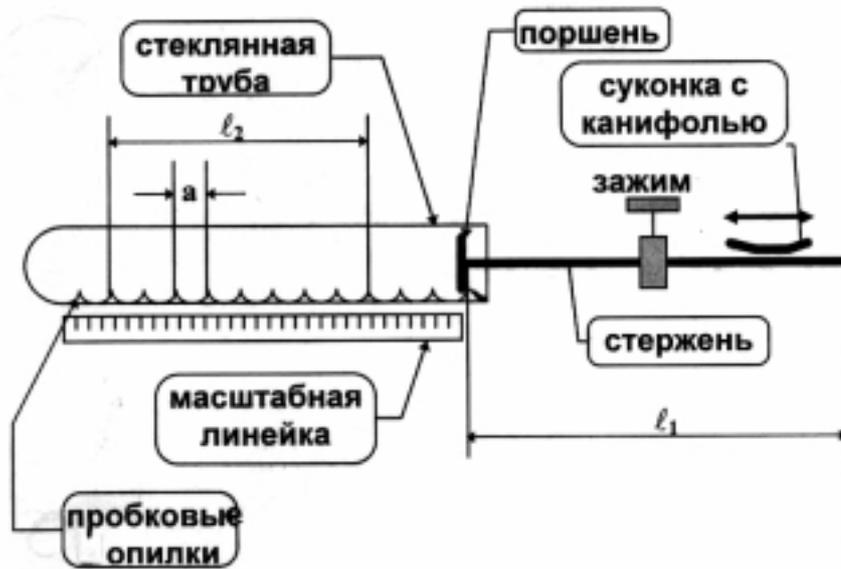


Рис.1

В методе Кундта используется стеклянная трубка, открытая с одного конца, и стержень с поршнем, который вставлен в открытый конец трубы, как показано на рис. 1. В стержне, закрепленном в середине с помощью зажима, при натирании его свободного конца суконкой с канифолью, возбуждаются упругие продольные колебания. Возникающие при этом вынужденные колебания воздушного столба между поршнем и закрытым концом трубы группируют пробковые опилки, первоначально насыпанные равномерным слоем внутри трубы, в периодическую структуру по толщине слоя.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Возникающие свободные колебания стержня имеют частоту (см. задачу 3.4 [1]):

$$f_1 = \frac{v}{2 \cdot l_1},$$

где v – скорость звука в материале стержня, а l_1 – его длина. Это же значение частоты звука можно определить по расстоянию a между узлами, где собираются опилки при возбуждении звука в трубе:

$$f_1 = \frac{v_{\text{воз}}}{2 \cdot a},$$

где $v_{\text{воз}}$ – скорость звука в воздухе.

Величину скорости звука в воздухе $v_{\text{воз}}$ можно рассчитать по формуле:

$$v_{\text{воз}} = 332 \times \sqrt{\frac{T}{273}} \text{ м/с},$$

где T температура воздуха в аудитории, выраженная в [К].

Отсюда, скорость звука в материале стержня равна:

$$v = \frac{\ell_1 \cdot v_{\text{воз}}}{a}.$$

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Измерьте длину стержня ℓ_1 с помощью масштабной линейки.
2. Натирая свободный конец стержня, получите отчетливую картину распределения опилок (трубу при этом следует немного смещать вдоль стержня). **Внимание: поршень должен входить в трубу с небольшим зазором, не касаясь стенок.**
3. Измерьте расстояние ℓ_2 между несколькими отчетливо выраженными узлами с помощью масштабной линейки и определите величину a .
4. Измерьте термометром температуру воздуха и вычислите скорость звука в воздухе.
5. Внесите данные измерений в таблицу и определите скорость звука в стержне:

Таблица

$\ell_1, (\text{см})$	$\ell_2, (\text{мм})$	$a, (\text{мм})$	$T, (\text{К})$	$v_{\text{воз}}, (\text{м/с})$	$v, (\text{м/с})$

6. Оцените погрешность полученного значения скорости звука в стержне.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Найти собственную частоту колебаний:
 - а) стержня, закрепленного посередине;
 - б) натянутой струны, закрепленной с обоих концов;
 - в) воздушного столба, заключенного в цилиндре, открытом с одной стороны.
2. Какие колебания – свободные или вынужденные – совершает воздушный столб в трубке Кундта?
3. Какие волны продольные или поперечные возбуждаются в приборе Кундта в стержне; в воздушном столбе?
4. Почему поршень стержня не должен касаться стеклянной трубы?
5. Объясните, зачем нужна канифоль при натирании стержня?
6. Что произойдет, если стержень зажать не посередине? Будет ли наблюдаться резонанс? Ответ обоснуйте.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1,9

ИЗУЧЕНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПО ТРУБЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

экспериментальная проверка применимости уравнения Бернулли для случая течения воды по горизонтальной трубке переменного сечения.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:

трубка Бернулли, секундомер, мерный сосуд.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка (рис.1) состоит из горизонтальной трубки переменного сечения. Один конец трубки соединен резиновым шлангом с водопроводным краном. Протекающая через трубку вода собирается в мерный сосуд. Широкие S_1 и узкие S_2 сечения трубки имеют манометрические отводки для измерения давления в соответствующих сечениях трубки.

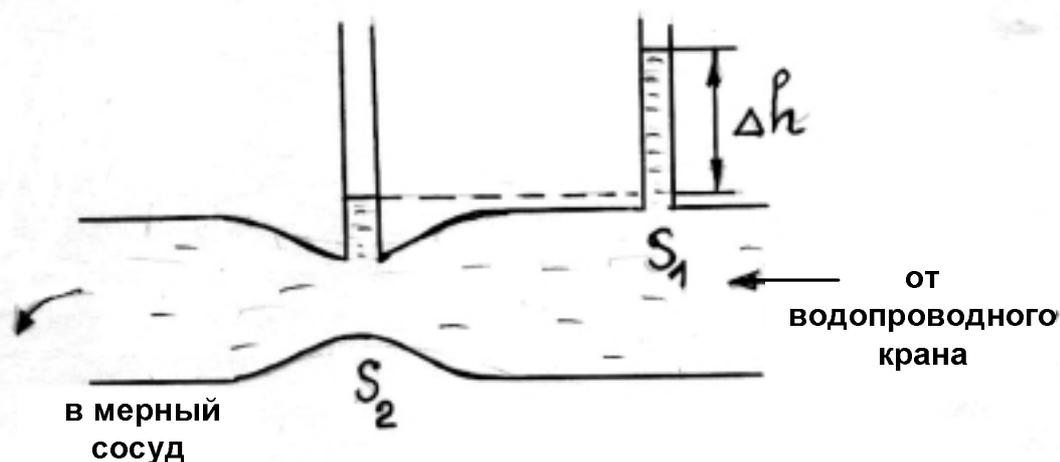


Рис.1

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В настоящей работе изучается движение воды по горизонтальной трубке переменного сечения. В стационарном режиме, при малых скоростях течения воды можно сделать допущение, что внутренняя поверхность трубы определяет трубку тока.

Если принять, что в данном случае вода – это идеальная жидкость и при ее течении по трубке выполняются условия стационарности потока, можно, используя уравнение Бернулли рассчитать объемный расход воды $Q_{теор}$ (Q объем жидкости, прошедший через любое сечение трубки в единицу времени).

В решении задачи 4.1 [1] получена расчетная формула для расхода воды:

$$Q_{теор} = \sqrt{\frac{2(P_2 - P_1)}{\left(\frac{1}{S_1^2} - \frac{1}{S_2^2}\right)\rho}}$$

Разность давлений воды $\Delta P = P_2 - P_1$ в сечениях S_1 и S_2 , можно найти зная величину Δh - разности уровней воды в манометре:

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot \Delta h .$$

Необходимые для вычисления расхода $Q_{теор}$ величины – плотность воды ρ , ускорение свободного падения g – указаны в справочной таблице; поперечные сечения трубки Бернулли S_1 и S_2 – в паспорте работы, а величину Δh – можно измерить с помощью линейки.

Экспериментальная установка позволяет непосредственно производить измерения расхода воды $Q_{экс}$.

Для этого необходимо измерить объем воды V , заполняющий мерный сосуд за время t :

$$Q_{экс} = \frac{V}{t} .$$

Полученные экспериментальные значения $Q_{экс}$ можно сравнить с рассчитанными по формуле $Q_{теор}$, проверив тем самым возможность применения уравнения Бернулли к рассматриваемому случаю.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Произведите не менее пяти измерений времени t наполнения фиксированного объема воды ($V=500$ мл) при различных значениях разности Δh уровней воды в манометрах. Изменяйте эту разность, регулируя скорости течения воды водопроводным краном. Вычислите $Q_{экс}$ и занесите в таблицу.

Для тех же значений Δh рассчитайте $Q_{теор}$. Результаты измерений и вычислений внесите в таблицу.

Оцените для каждого из пяти измерений относительное расхождение экспериментальных результатов с теорией

$$\varepsilon = \frac{Q_{теор} - Q_{экс}}{Q_{теор}} \cdot 100\% .$$

Таблица

№ измерения	$V, (м^3)$	$t, (с)$	$Q_{экс}, (м^3/с)$	Δh (см)	ΔP (Па)	$\sqrt{\Delta P},$ (Па ^{1/2})	$Q_{теор}, (м^3/с)$
1.							
2.							
3.							
4.							
5.							
6.							

Постройте по полученным данным экспериментальную зависимость $Q_{экс} = f(\sqrt{\Delta P})$. На тот же график нанесите теоретическую зависимость $Q_{теор} = f(\sqrt{\Delta P})$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как определяется и измеряется давление покоящейся жидкости на стенку сосуда?
2. Каких ограничений и допущений требует введение представления о течении идеальной жидкости?
3. В каких предположения о характере жидкости выводится уравнение Бернулли?
4. Объясните физический смысл уравнения Бернулли.
5. В каком сечении: узком или широком - статическое давление больше?
6. Как найти величину давления в паскалях, если известна высота столба жидкости h ?
7. Сравните экспериментальную кривую $Q_{\text{экс}} = f(\sqrt{\Delta P})$ и теоретическую зависимость $Q_{\text{теор}} = f(\sqrt{\Delta P})$, полученные в работе и сделайте вывод, можно ли считать воду идеальной жидкостью.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

экспериментальное определение динамического коэффициента вязкости глицерина.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:

стеклянный сосуд цилиндрической формы с глицерином, микрометр, секундомер, миллиметровая линейка, мелкие металлические шарики (свинцовая дробь).

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка (рис.1а) состоит из высокого стеклянного цилиндрического сосуда, заполненного вязкой жидкостью – глицерином и коробки с дробью. На цилиндр нанесены метки в виде колец (например, А и В).

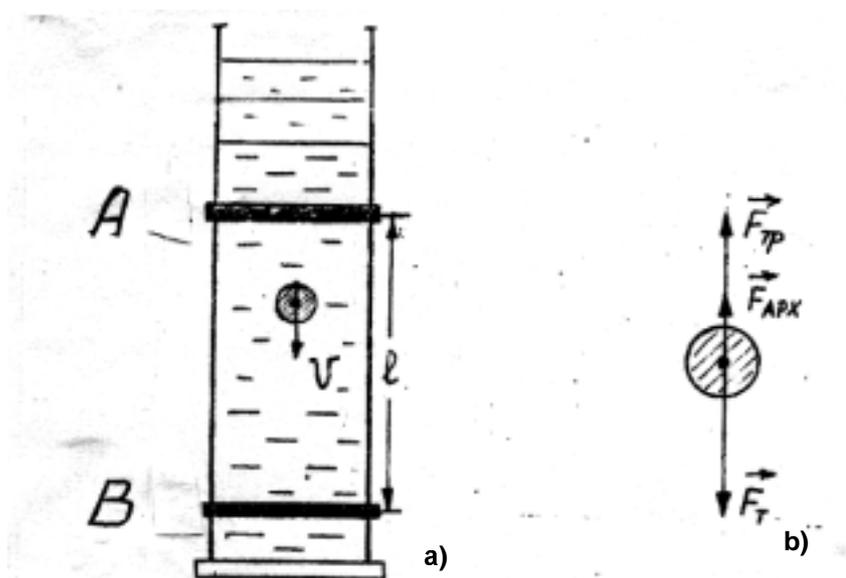


Рис.1

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Установка позволяет экспериментально определить коэффициент динамической вязкости η глицерина методом Стокса. Этот метод использует тот факт, что падение шарика в вязкой жидкости вначале является ускоренным, а затем становится равномерным. На шарик в глицерине действуют три силы – сила тяжести \vec{F}_T , сила Архимеда – $\vec{F}_{Арх}$, и сила вязкого трения – сила Стокса $\vec{F}_{Тр}$ (рис 1b). Так как \vec{F}_T и $\vec{F}_{Арх}$ являются постоянными, а сила $\vec{F}_{Тр}$ – прямо пропорциональна скорости шарика, то при некотором значении этой скорости сумма сил, действующих на шарик, должна обратиться в нуль, и поэтому дальнейшее движение шарика будет равномерным. Принимая, что расстояние l между двумя кольцами А и В ша-

рик проходит равномерно, скорость шарика V легко определить, измерив время t прохождения шариком отрезка пути l .

Определение величины η для вязкой жидкости методом Стокса подробно разбирается в задаче 4.2 [1].

Получена формула для расчета коэффициента вязкости жидкости:

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{g(\rho_{ш} - \rho_{ж})r^2}{v}. \quad (1)$$

Необходимые для вычисления η величины – плотность шарика $\rho_{ш}$, плотность глицерина $\rho_{ж}$, ускорение g – имеются в справочной таблице, радиус шарика r и его скорость v определяется экспериментально.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерьте диаметр нескольких дробинок d с помощью микрометра, а расстояние между кольцами l – линейкой.

Опустите одну дробинку в сосуд с глицерином.

ВНИМАНИЕ! Чтобы при погружении дробинок в глицерин к ней не прилипали пузырьки воздуха, ее следует предварительно смочить глицерином.

Измерьте время t прохождения дробиной расстояния l с помощью секундомера.

Проделайте опыт не менее **5 раз**.

Результаты измерений внесите в таблицу и рассчитайте коэффициент вязкости глицерина η .

Таблица

№	$d, (мм)$	$l, (см)$	$t, (с)$	$\eta_{эксп} (Па \cdot с)$	$\eta_{ср} (Па \cdot с)$

Оцените абсолютную погрешность $\Delta\eta$ по модулю максимального отклонения отдельного результата вычисления η относительно среднего значения $\eta_{ср}$.

Сравните полученное значение $\eta_{эксп}$ с указанным в справочной таблице:

$$\eta_{эксп} = \eta_{ср} \pm \Delta\eta.$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как рассчитать величину выталкивающей силы, действующей на погруженное в жидкость (газ) тело?
2. Можно ли говорить о проявлении закона Архимеда в условиях невесомости (в кабине орбитальной станции)?
3. Какие явления характерны для случая движения тела в вязкой жидкости?
4. Почему измерение времени падения шарика в глицерине следует начинать, спустя некоторое время от начала его движения?
5. Какие силы действуют на шарик при его движении в вязкой жидкости?
6. От чего (в первом приближении) зависит сила вязкого трения при движении тела в реальной (вязкой) жидкости?
7. Укажите возможные причины расхождения значения $\eta_{эксп}$, полученным в лабораторной работе, с указанным в справочной таблице.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ВОЗДУХА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

экспериментальное определение коэффициента внутреннего трения воздуха при течении воздуха через капилляр.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:

прибор для определения коэффициента внутреннего трения воздуха, секундомер, мензурка.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема прибора приведена на рис.1. Основная его часть - капилляр 1, через который протекает воздух из атмосферы в резервуар 2, частично заполненный водой и изолированный от атмосферы краном 4. К соединенному с резервуаром концу капилляра присоединено также колено наклонного спиртового манометра 3. Трубка наклонного манометра закреплена под углом $\alpha=30^\circ$ к горизонту, что дает возможность регистрировать небольшие изменения давлений на концах капилляра. При вытекании воды из резервуара через кран 5 на концах капилляра создается разность давлений ΔP , измеряемая манометром 3.

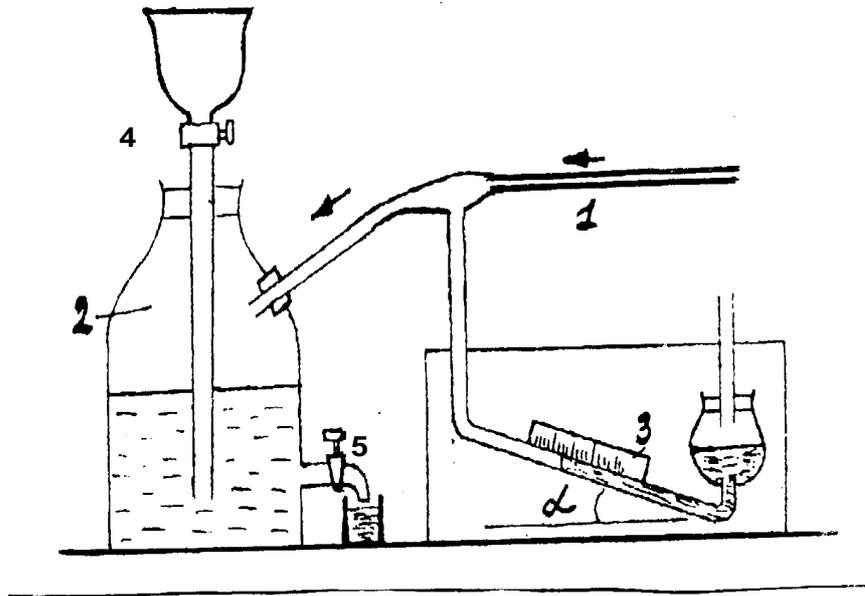


Рис.1

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для реальных жидкостей и газов характерно явление вязкого трения. При ламинарном течении воздуха через *горизонтальный* капилляр это явление приводит к возникновению давления на концах капилляра. Пуазейль показал, что объем жидкости (или газа) V , протекающий в этом случае за время τ через капиллярную трубку радиусом r и длиной l при разности давлений ΔP на концах капилляра, определяется выражением, получившим название формулы Пуазейля:

$$V = \frac{\pi^4 \Delta P \tau}{8\eta l}, \quad (1)$$

где η - коэффициент внутреннего трения воздуха.

Разность давлений на концах капилляра ΔP можно рассчитать, зная величину смещения уровня спирта Δh в наклонной трубке манометра 3 измеряемого по шкале и угол α – угол между трубкой манометра и горизонтом (рис.1):

$$\Delta P = \rho_{cn} g \Delta h \sin \alpha. \quad (2)$$

Исходя из формул (1) и (2), можно получить формулу для расчета коэффициента внутреннего трения воздуха:

$$\eta = \frac{\pi^4 \rho_{cn} g \Delta h \tau \sin \alpha}{8lV}. \quad (3)$$

Измерив величину смещения уровня спирта Δh в манометре, объем газа V , прошедший через него за время τ и, зная параметры капилляра - его радиус r и длину l , можно экспериментально определить η воздуха. Необходимые для вычисления η величины r , l , α указаны в паспорте работы, а плотность спирта ρ_{cn} - в справочной таблице.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Регулируя скорость вытекания воды из резервуара, добейтесь стационарного режима протекания воздуха через капилляр ($\Delta h = \text{const}$).
2. Измерьте объем воды V , вылившейся за время τ ($\tau \approx 3 \div 5$ мин) из резервуара, считая что он равен объему воздуха, прошедшего через капилляр за это время.
3. Повторите измерения при трех разных значениях Δh . Максимальное смещение уровней спирта в наклонной трубке манометра Δh не должно превышать 3 см.
4. Результаты измерения и параметры установки внесите в таблицу и рассчитайте коэффициент внутреннего трения воздуха η .

Таблица

№	r, (м)	l, (м)	α (град)	ρ _{сн} (кг/м ³)	Δh, (см)	ΔV, (мл)	τ (с)	η, (Па·с)	η _{ср} , (Па·с)
1									
2									
3									

5. Оцените абсолютную погрешность $\Delta\eta$ полученного значения η по модулю максимального отклонения отдельного результата относительно среднего значения и запишите результат эксперимента следующим образом:

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

Сравните полученное Вами экспериментальное значение $\eta_{\text{экс}}$ воздуха с указанным в справочной таблице.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое средняя длина свободного пробега молекул и от чего она зависит?
2. Как средняя скорость движения молекул зависит от температуры?
3. Как влияет на коэффициент вязкости изменение температуры жидкости, газа ($P=\text{const}$)?
4. Как изменяется коэффициент η при изменении давления газа ($T=\text{const}$)?
5. Если течение газа в трубке является ламинарным, по какому закону меняется скорость течения отдельных слоев газа (от стенки к оси капилляра)?
6. От чего (в первом приближении) зависит сила вязкого трения при движении тела в реальной (вязкой) жидкости?
7. Укажите возможные причины расхождения экспериментального значения коэффициента внутреннего трения воздуха с указанным в справочной таблице.
8. Объясните происхождение силы внутреннего трения, исходя из представлений молекулярно-кинетической теории.
9. Дайте определение коэффициента вязкого трения.
10. Что называют ламинарным течением жидкости (газа)?
11. Объясните, как рассчитать разность давлений на концах капилляра с помощью наклонного манометра.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ВОЗДУХА МЕТОДОМ АДИАБАТИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

экспериментальное определение отношения молярных теплоемкостей C_p/C_v воздуха методом адиабатического расширения и сравнение полученных результатов с выводами молекулярно-кинетической теории газов.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:

стеклянный сосуд с краном, ручной насос, манометр.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Тонкостенный сосуд 1 (рис.1) объемом 25 л (на его дне лежат гранулы поглощающего влагу вещества), соединен с открытым манометром 2 и насосом 3 и при помощи крана 4 может соединяться с атмосферой. Кран 5 позволяет изолировать насос 3 от сосуда 1.

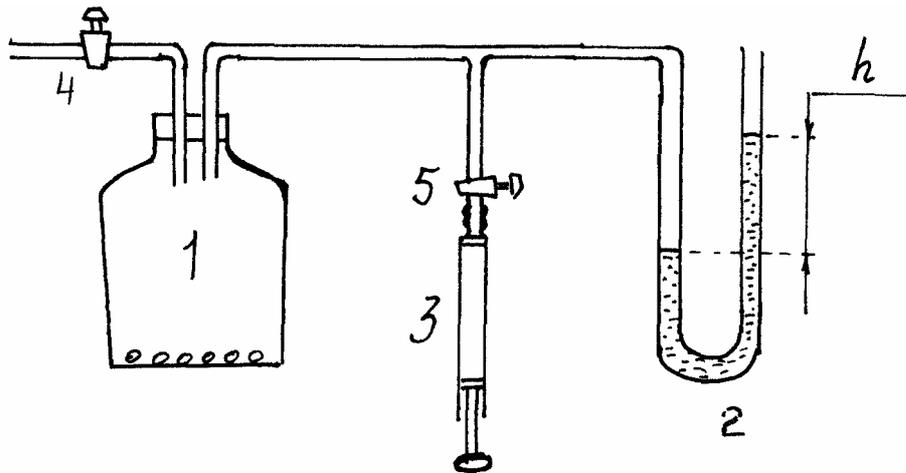


Рис.1

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Отношение молярных теплоемкостей $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ входит в уравнение Пуассона

$PV^\gamma = const$, описывающее адиабатический процесс для идеальных газов. Один из самых простых экспериментальных способов определения величины γ для газов является метод адиабатического расширения. Описание этого метода подробно разбирается в задаче 1.7 [1].

Ниже представлена формула для расчета γ :

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

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

1. При закрытом кране 4 *постепенно* увеличьте давление в сосуде с помощью насоса, после чего закройте кран 5. Давление в сосуде будет выше атмосферного, а температура останется комнатной.

2. Когда столбики жидкости в коленах манометра *перестанут перемещаться*, зафиксируйте избыточное давление воздуха в сосуде по разности уровней h_1 в манометре.

3. На *короткое время* откройте кран 4 и, как только уровни жидкости в манометре *сравняются*, быстро закройте его. Произойдет адиабатическое расширение оставшейся части воздуха в сосуде, так как за короткое время можно пренебречь теплообменом через стенки сосуда. Давление в нем станет атмосферным, а температура воздуха понизится и станет ниже комнатной.

4. С течением времени температура воздуха в закрытом сосуде вследствие теплообмена будет повышаться и достигнет комнатной, а давление при неизменном объеме повысится. Следите за изменением давления в сосуде по разности уровней в манометре. Как только столбики жидкости в коленах манометра перестанут перемещаться зафиксируйте избыточное давление h_2 .

5. Повторите эксперимент 10-12 раз. Результаты занесите в таблицу, рассчитайте в каждом опыте значение γ . Найдите среднее значение $\gamma_{\text{ср}}$.

Таблица

№ опыта	$h_1, (см)$	$h_2, (см)$	γ	$\gamma_{\text{ср}}$

6. Запишите теоретическое значение $\gamma_{\text{теор}}$ для воздуха, предсказываемое молекулярно-кинетической теорией газов.

7. Оцените абсолютную и относительную погрешность полученного экспериментального значения $\gamma_{\text{ср}}$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой процесс называют адиабатическим? Как на практике осуществить процесс, близкий к адиабатическому?
2. Что такое постоянная адиабаты γ ?
3. Выведите формулу (1) для расчета постоянной адиабаты.
4. Какой процесс называют: изохорическим? изобарическим? изотермическим?
5. Какие процессы будут осуществляться в данной работе с массой воздуха, находящейся в сосуде?
6. Каков газовый состав воздуха? Каково примерно процентное соотношение входящих в состав воздуха газов? Какова доля двухатомных газов среди них?
7. Каково значение постоянной адиабаты γ для одноатомных, двухатомных и многоатомных газов?
8. Запишите первое начало термодинамики и поясните его физический смысл. Можно ли

изменить внутреннюю энергию газа, не сообщая ему тепла?

9. Можно ли считать воздух при обычных условиях идеальным газом? Рассчитайте внутреннюю энергию одного моля воздуха при комнатной температуре.

10. Какова связь между молярными теплоемкостями C_p и C_v идеального газа?

11. Как меняется внутренняя энергия идеального газа при изотермическом расширении; изобарическом расширении; адиабатическом расширении?