

Министерство образования Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Златоустовский филиал
Кафедра физики № 3

53(07)
Б597

В.И. Биглер, А.И. Сопин, Н.М. Соколова

Ф И З И К А

Лабораторный практикум

Часть 1

2-е издание,
переработанное и дополненное

Челябинск
Издательство ЮУрГУ
2001

УДК 53 (07)

Биглер В.И., Сопин А.И., Соколова Н.М. Физика: Лабораторный практикум. — 2-е изд., перераб. и доп. — Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2001. — Ч.1. — 29 с.

Пособие является руководством при выполнении лабораторных работ по первой части курса общей физики. Содержит описание шести лабораторных работ по механике, молекулярной физике и термодинамике, поставленных в Златоустовском филиале Южно-Уральского государственного университета.

Ил. 10, табл. 11, список лит. — 2 назв.

Одобрено учебно-методической комиссией Златоустовского филиала.

Рецензент: В.С. Карманов

© Издательство ЮУрГУ, 2001.

ВВЕДЕНИЕ

Какова цель лабораторной практики в высшем учебном заведении? Таких целей несколько. Лабораторные работы позволяют:

- проиллюстрировать *теоретические* положения физики;
- познакомиться с *приборами*;
- приобрести опыт в проведении *экспериментов*.

Каждая из этих целей важна и сама по себе, но в целом лабораторный практикум может дать нечто большее. Он может дать представление о том, каков *общий метод физики*.

Физика — эта одна из наук, цель которых — познание природы. Когда физик сталкивается с каким-либо явлением природы, он старается выделить те особенности явления, которые ему кажутся самыми важными. Затем, обобщая то, что выделил, строит теорию, из которой следуют те или иные выводы. Выводы же проверяются путем эксперимента. Но теоретические выводы относятся к идеализированной или упрощенной ситуации. Чтобы их проверить, нужно создать такую упрощённую ситуацию в сложном, полном хаоса окружающем мире, что не всегда легко сделать.

На лекциях вам преподносят теорию. При этом рассматриваются те стороны реального мира, которые существующая теория считает самыми важными. Может получиться так, что ваше познание природы ограничится только этими сторонами, и вы будете уверены, что это и есть весь реальный мир, а не отдельные его стороны. К тому же в такой картине мира всё столь хорошо увязано, что легко утратить представление о том, какие усилия потребовались человеческому гению для её создания. Самое лучшее лекарство от такой болезни — идти в лабораторию и там убедиться в сложности реального мира.

Занимаясь экспериментами, вы прежде всего узнаете, как трудно бывает проверить теорию, измерить именно то, что хотите, а не что-то иное, и научитесь преодолевать такие трудности. Но кроме всего прочего у вас появится взгляд на физику в целом, на взаимоотношение между теорией и экспериментом, которое составляет главное содержание предмета.

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Поскольку любой результат содержит погрешность, в задачу измерений входит не только нахождение самой измеряемой величины, но и оценка допущенной при измерении погрешности. Обычно рассматривают несколько случаев: однократные и многократные, прямые и косвенные измерения.

Точность каждого *однократного* измерения определяет приборная погрешность, или, иначе говоря, погрешность отсчета. Существует простое правило для определения *абсолютной погрешности приборов*: она принимается равной наименьшей цене деления шкалы. Например, для миллиметровой линейки абсолютная погрешность составляет 1 мм, для микрометра — 0,01 мм, для механического секундомера — 0,2 или 0,1 с. Измеряя, например, время падения

груза с одной и той же высоты, мы можем из-за случайных причин получить целый ряд различных значений: 8,3; 8,7; 8,4; 7,9 с и т.д.

Обратите внимание: результат каждого измерения записан с точностью, которая определяется прибором: 0,1 с. В случае, если время оказалось равным точно 8 секундам, нужно записать 8,0 с. При цене деления 0,01 с эти же измерения могут получиться такими: 8,31; 8,73; 8,37; 7,94 с и т.д. Результаты измерений заносят в таблицу наблюдений, образец которой даётся в описании каждой лабораторной работы. По этим данным вычисляют требуемую физическую величину, то есть получают конечный результат, ради которого выполнялась работа.

Приступая к вычислениям, следует помнить, что все числа, с которыми вы имеете дело — приближённые. А точность приближённых чисел принято характеризовать *числом значащих цифр*. Ими являются **все цифры числа, кроме впереди стоящих нулей, а также нулей, являющихся результатом округления**. Например:

0,08 — **одна** значащая цифра, 0,0058 — **две** значащих цифры,
785 — **три** значащих цифры, 7,04 — **три** значащих цифры.

При переходе от одной единицы измерения к другой точность измерения не меняется: 1,2 мм = 0,0012 м — измерения проведены с точностью до 0,1 мм. Если же в таблице встречается число, равное, например, 1,22 мм (три значащих цифры), то точность измерений больше: до 0,01 мм. Заполняя таблицу наблюдений, нужно внимательно следить, чтобы каждое число было записано с той точностью, которую дает используемый прибор. В рассмотренном нами примере измерение длины производилось сначала штангенциркулем (цена деления 0,1 мм), а затем — микрометром (цена деления 0,01 мм).

Для расчётов с требуемой точностью рациональнее всего использовать какую-либо вычислительную технику: логарифмическую линейку, калькулятор. Но прежде, чем ими воспользоваться, следует составить представление о порядке той величины, которую Вам нужно рассчитать. Для этого нужно округлить входящие в расчётную формулу числа до одной значащей цифры, все нули убрать в степень, если их более двух–трех, и в уме оценить ожидаемый результат. Вся эта операция называется *прикидкой*. Приведем пример: требуется вычислить, сколько секунд прошло с момента начала нашей эры до 1 января 2000 года:

$$1999 \text{ лет} \cdot 365 \text{ дней} \cdot 24 \text{ часа} \cdot 3600 \text{ с} = 2 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^2 \cdot 2 \cdot 10^1 \cdot 4 \cdot 10^3 = 64 \cdot 10^9 \text{ с.}$$

Счёт с точностью до трех значащих цифр дает $63,1 \cdot 10^9$ с, что при округлении совпадает с результатом прикидки. Сделав прикидку, приступайте к полному счету с помощью выбранной вами вычислительной техники, округляя каждый раз полученный результат. Число значащих цифр в нём определяется исходными данными, то есть таблицей наблюдений. Ориентироваться следует на то число, в котором значащих цифр меньше. Если же результат не окончательный, его следует записать с лишней (запасной) значащей цифрой.

Если для проведения измерений применяются достаточно точные приборы, то все измерения дают результаты, несколько отличающиеся друг от друга из-за случайных ошибок измерений. В этом случае следует найти *среднее значение измеряемой величины* и оценить, насколько оно отличается от отдельных значений, т.е. оценить *случайную ошибку измерений*.

Существует теория случайных ошибок, основу которой заложил Гаусс. Обработка результатов с помощью различных методов этой теории, оценка достоверности результатов — дело сложное, требующее знания основ математической статистики. Знакомиться с ней вы будете на следующих курсах и применять её там, где получено 10 и более значений измеряемой величины. Мы ограничимся простейшим методом обработки экспериментальных данных, когда число измерений невелико: 3, 4, 5. При случайных ошибках принято считать, что наиболее близким к истинному значению измеряемой величины a является среднее арифметическое от результатов измерений этой величины

$$\langle a \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i,$$

где n — число измерений. Результат конкретного измерения отличается от среднего на величину $\Delta a_i = \langle a \rangle - a_i$ — *абсолютную погрешность данного измерения*.

Абсолютная погрешность измерения, вычисленная для каждого опыта, заносится в таблицу обработки результатов, одинаковую для всех лабораторных работ. В качестве примера взята таблица обработки результатов измерения длины l стержня штангенциркулем (табл. 1).

Таблица 1

Таблица обработки результатов измерений

№ п.п.	l , мм	$(\langle l \rangle - l_i)$, мм	
		—	+
1	89,1	—	0,15
2	89,7	0,45	—
3	88,6	—	0,65
4	88,9	—	0,35
5	89,9	0,65	—
6	89,3	0,05	—
$\langle l \rangle = 89,25$ мм		1,15	1,15
$\langle \Delta l \rangle = (1,15 + 1,15)/6 = 0,38$ мм			
Результат:		$l = (89,3 \pm 0,4)$ мм	
Относит. погрешность		$\varepsilon = (0,4/89,3) \cdot 100\% = 0,5\%$	

В первую колонку табл. 1 заносят все значения измеряемой величины с точностью, которую позволяет прибор. Для каждого измерения определяется абсолютная ошибка опыта, которая заносится во 2-ю или 3-ю колонку таблицы в зависимости от ее знака (знак зависит от соотношения величин $\langle a \rangle$ и a_i). При

правильно вычисленном среднем значении сумма положительных абсолютных погрешностей равна сумме отрицательных.

Обратите внимание, что среднее значение $\langle l \rangle$ измеряемой величины и сумма абсолютных погрешностей указаны с большей точностью: взята одна запасная значащая цифра. Также с одной запасной значащей цифрой найдено *среднее значение абсолютной погрешности*

$$\langle \Delta a \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta a_i|.$$

Сумма берется без учёта знака. *Результат измерения* записывается в виде

$$a = \langle a \rangle \pm \langle \Delta a \rangle,$$

где $\langle \Delta a \rangle$ округляется, как правило, до одной значащей цифры.

Точность измерений определяет *относительная погрешность*: отношение средней абсолютной погрешности к среднему значению измеряемой величины, выражаемое обычно в процентах:

$$\varepsilon = \frac{\langle \Delta a \rangle}{\langle a \rangle} \cdot 100\% .$$

Мы рассмотрели *аналитический метод* обработки *прямых измерений*. Краткое изложение того, как определить погрешности *косвенных измерений*, приведено в Приложении (см. с. 27).

Очень часто обработку результатов производят *графическим способом*, который сразу дает наглядное представление о характере зависимости одной величины от другой. Обычно график представляет зависимость между двумя переменными. Выполняется график на миллиметровой бумаге. Сначала вычерчиваются координатные оси, на которые наносится масштаб. В конце оси указывается обозначение откладываемой величины, ее единица измерения, а также *порядок масштаба* (рис. 1 и 2). Порядок масштаба определяется числом нулей,

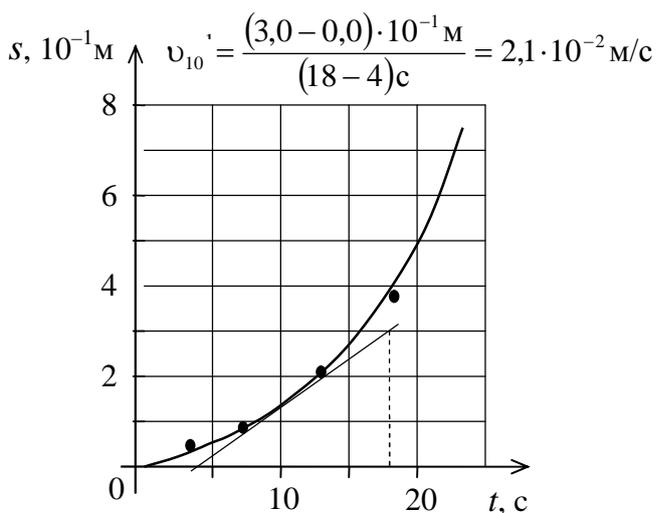


Рис. 1

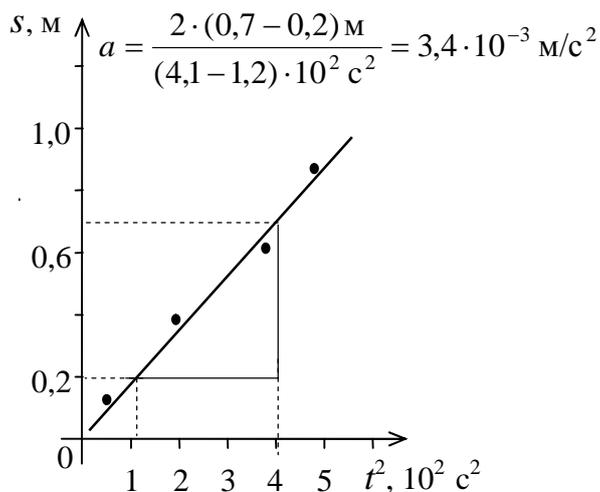


Рис. 2

стоящих либо перед, либо после значащих цифр. Масштаб содержит лишь значащие цифры. Если, например, сопротивление в опыте менялось от 0,0021 до

0,0086 Ом, в конце оси ставится множитель 10^{-3} или 10^{-4} Ом, а деления масштаба изменяются соответственно от 2,0 до 9,0 или от 20 до 90.

Масштаб наносится соответственно таблице наблюдений: первое деление масштаба на каждой оси определяется начальным числом таблицы, т.е. может не совпадать с нулем (если наличие начала координат необязательно). Конечное значение масштаба определяется наибольшим значением откладываемой величины.

Следует выполнять еще одно правило: график должен быть близок к квадрату, т. е. длины обеих осей должны быть примерно одинаковыми. Этого добиваются соответствующим подбором масштабов (см. рис. 2). Кроме того, выбранный Вами масштаб должен позволить нанести все точки из таблицы наблюдений с имеющейся там точностью: все значащие цифры из таблицы наблюдений должны легко определяться на соответствующих осях.

После того, как нанесены все точки, следует провести по ним плавную кривую (или прямую) так, чтобы сумма отклонений экспериментальных точек от графика была минимальной. При проведении прямых удобно пользоваться прозрачной линейкой.

Широко используется *метод графического дифференцирования*, то есть нахождение производной функции по ее графику. Он основан на том, что производная $y' = dy/dx$ какой-либо функции $y(x)$ геометрически есть тангенс угла наклона касательной к кривой, отображающей эту зависимость (точнее — угловой коэффициент этой касательной).

На рис. 1 изображен график функции $s = \frac{at^2}{2}$. Производная любой функции характеризует быстроту ее изменения, значит $s' = ds/dt$ есть быстрота изменения пути по времени, т.е. скорость тела. При неравномерном движении она различна в каждой точке пути. На рис. 1 показана процедура определения скорости для одной из точек кривой в момент времени $t = 10$ с. Известно, что геометрически производная равна тангенсу угла наклона касательной, следовательно, скорость v может быть найдена как отношение катетов $\Delta s/\Delta t$. Длины их определяются по разности координат. Обратите внимание на точность, с которой выполнены приведенные на рис. 1 и 2 вычисления.

Прямая — частный случай кривой. Для нее касательная в каждой точке совпадает с самой прямой, угловой коэффициент ее одинаков во всех точках. На рис. 2 изображена та же зависимость $s = at^2/2$, но в координатах s и t^2 . Это прямая вида $y = kx$, где за x принято t^2 , а угловой коэффициент этой прямой равен $a/2$. В этом случае по графику можно найти ускорение тела, точнее — среднее значение ускорения, что и показано на рис. 2.

Добавим, что для графической обработки данных совсем не обязательно аналитическое задание функции. Так, измеряя температуру T нагретого тела при его остывании через определенные промежутки времени, можно построить график $T = f(t)$, то есть задать зависимость $T(t)$ графически и по этому графику

найти скорость охлаждения dT/dt при любой температуре методом графического дифференцирования (см. описание лабораторной работы № 5).

Контрольные вопросы

1. Чем определяется точность числовых данных в таблице наблюдений?
2. С какой точностью следует производить расчёты?
3. Как определяется число значащих цифр?
4. Как проводится кривая (прямая) на графике?
5. Каким требованиям должен отвечать масштаб, нанесенный на осях координат при графической обработке данных?
6. С какой точностью указываются координаты катетов при определении "тангенса угла наклона"?
7. Размерная или безразмерная величина этот "тангенс"?

РАБОТА № 1

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАЯТНИКА ОБЕРБЕКА

Цель работы: определить характер движения, момент инерции маятника Обербека и момент сил трения, проверить закон сохранения энергии.

Оборудование: прибор Обербека, грузы для приведения крестовины во вращение, стойка с делениями, секундомер.

Теория метода и описание установки

Маятник Обербека, с помощью которого исследуется зависимость между величинами, входящими в выражение основного закона динамики вращательного движения, представляет собой крестовину (рис. 3), вращающуюся вокруг горизонтальной оси. На шкив наматывается нить, к концу которой прикреплен груз массой m .

При опускании груза сила натяжения нити приводит во вращение крестовину. На стержнях крестовины с помощью винтов на равных расстояниях от оси вращения укрепляют четыре одинаковых груза, размеры которых малы по сравнению с их расстоянием от оси вращения.

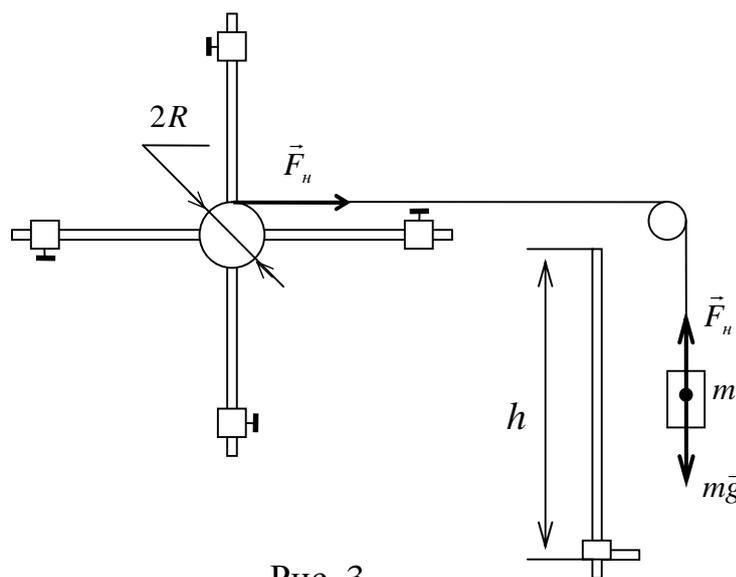


Рис. 3

Во время движения крестовина вращается под действием момента \vec{M}_n силы натяжения нити \vec{F}_n , который определяется соотношением

$$\vec{M}_n = \vec{R} \times \vec{F}_n, \quad (1)$$

где R — радиус шкива, на который намотана нить.

Второй закон Ньютона для вращательного движения твёрдого тела вокруг закрепленной оси определяет зависимость углового ускорения $\vec{\epsilon}$ маятника от суммарного момента \vec{M} действующих на него сил:

$$\vec{M} = I\vec{\epsilon}. \quad (2)$$

Здесь I — *момент инерции* маятника Обербека относительно оси вращения.

Момент инерции тела играет ту же роль, что и масса тела при поступательном движении, т.е. является *мерой инертности* тела. Его величина зависит не только от массы тела, но и от того, как эта масса распределена относительно оси вращения. Момент инерции можно найти из закона движения (2) или вычислить по распределению масс:

$$I = \sum m_i r_i^2, \text{ а для сплошного тела } I = \int r^2 dm.$$

В рассматриваемом случае на крестовину действует не только сила натяжения, но и различные силы трения. Поэтому основной закон динамики вращательного движения (2) должен включать в себя и момент сил трения, т.е.

$$\vec{M}_n + \vec{M}_{\text{тр}} = I\vec{\epsilon}. \quad (3)$$

Величину вращающего момента легко найти, зная силу натяжения нити и радиус R шкива, на который наматывается нить. Из второго закона Ньютона для груза m и из выражения (1) получаем

$$M_n = mR(g - a). \quad (4)$$

Ускорение a груза одновременно является тангенциальным ускорением a_τ точек вращающегося шкива, поэтому угловое ускорение крестовины

$$\epsilon = \frac{a}{R}. \quad (5)$$

Ускорение груза, и, следовательно, угловое ускорение можно найти экспериментально. Однако в уравнении движения (3) остаются две неизвестные величины: момент сил трения $M_{\text{тр}}$ и момент инерции крестовины I , и однозначное решение его при неизменном значении массы груза m невозможно. Однако графически найти и момент инерции, и момент сил трения нетрудно. Для этого следует записать уравнение (3) в проекции на ось вращения и привести к известному виду линейной функции $y = c + bx$. По графику этой функции легко найти постоянные c и b . В нашем случае это будет уравнение

$$M_n = M_{\text{тр}} + I\epsilon. \quad (6)$$

Начертив по данным измерений график зависимости M_n от ϵ , можно найти по нему обе искомые величины I и $M_{\text{тр}}$.

Задание 1. Определение характера движения и ускорения груза

Если измерить время t опускания груза с определенной высоты h , то среднее ускорение груза легко находится из кинематического уравнения равноускоренного движения:

$$h = v_0 t + \frac{at^2}{2}. \quad (7)$$

Чтобы использовать уравнение (7), необходимо убедиться, что ускорение постоянно. Для этого, меняя высоту падения одного и того же груза, следует измерять время его опускания. Если a — постоянная величина, то $a/2$ будет угловым коэффициентом прямой в координатах h и t^2 . Измерения проводят, опуская груз с 5–7 разных высот. Данные заносят в табл. 1.1. Измерения проводят сначала с грузами на концах, а затем с грузами, сдвинутыми к оси вращения.

Таблица 1.1

№ п.п	Грузы на концах			Грузы у оси		
	h	t	t^2	h	t	t^2
1						
2						
...						
...						
...						

По данным из этой таблицы постройте графики $h(t^2)$ и определите по ним ускорения. Сравните ускорения a_1 и a_2 , найденные из графиков. В каком случае ускорение больше и почему?

Задание 2. Определение момента инерции и момента силы трения

Для решения поставленной задачи используется уравнение (6). Чтобы получить данные для построения графиков, нужно измерить время опускания грузов разной массы с одной и той же высоты. Число разных масс от 4 до 6. Данные занесите в табл. 1.2. и по ним проведите соответствующие расчёты.

Таблица 1.2

Грузы у оси						Грузы на концах					
$h =$			$R =$			$h =$			$R =$		
m	t	t^2	a	ε	M_H	m	t	t^2	a	ε	M_H
...											
...											
...											
...											

Опыты проводят для двух случаев:

- грузы находятся у оси крестовины;
- грузы находятся на её концах.

Постройте по этим данным графики $M_H(\varepsilon)$ и определите по ним по два значения *момента инерции* крестовины и *обобщённого момента сил трения*.

Задание 3. Проверка закона сохранения энергии

- На основании данных, полученных при выполнении задания 2, проверьте закон сохранения энергии.
- Сравните потери энергии с работой, совершённой моментом сил трения во время опускания груза.

Контрольные вопросы

1. Каковы физический смысл и размерность момента инерции и момента силы? Дайте определения этих величин.
2. Каково направление векторов \vec{M} и $\vec{\varepsilon}$?
3. За счет чего может меняться ускорение? Сила натяжения?
4. Пренебрегая трением, получите из 2 закона Ньютона формулу для определения момента инерции маятника Обербека по известным массе m и ускорению a опускающегося на нити груза.
5. Изобразите график $M_H = f(\varepsilon)$. Покажите, как по нему найти момент инерции I и момент силы трения $M_{тр}$.
6. Как вычисляются работа и кинетическая энергия при вращении?
7. Запишите формулы, связывающие угловые и линейные величины.

РАБОТА № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ТЕЛ МЕТОДОМ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: ознакомиться с одним из экспериментальных методов определения моментов инерции тел и практически определить момент инерции тела произвольной формы относительно двух разных осей.

Оборудование: стойка с подвесом, набор тел, штангенциркуль, секундомер.

Теория метода и описание установки

Одним из экспериментальных методов определения моментов инерции тел является метод крутильных колебаний. Этим методом можно определить момент инерции любого тела, имеющего не только правильную, но и неправильную форму, момент инерции которого рассчитать трудно (зубчатое колесо с отверстиями, отливка и др.).

Крутильные колебания возникают, если тело, подвешенное на упругой проволоке (рис. 4), повернуть на некоторый угол φ и отпустить. В проволоке появляются упругие силы, направленные в сторону, противоположную углу поворота. Возникает момент сил, пропорциональный углу поворота и стремящийся вернуть тело в положение равновесия:

$$M = -k\varphi, \quad (1)$$

где k — коэффициент упругости подвеса.

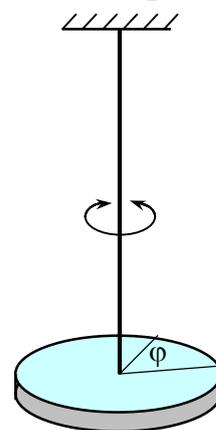


Рис. 4

Если пренебречь силами трения, то из основного закона динамики вращения (см. лабораторную работу № 1) будем иметь

$$-k\varphi = I\varepsilon, \quad (2)$$

где I — момент инерции подвешенного тела относительно оси крутильных колебаний.

В случае колебательного движения угол поворота φ будет периодической функцией времени, то есть

$$\varphi = \varphi_m \cos(\omega t - \alpha_0), \quad (3)$$

где φ_m — амплитуда колебаний, т.е. максимальное значение угла поворота φ ; α_0 — начальная фаза колебаний; ω — угловая частота колебаний, связанная с периодом соотношением

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \quad (4)$$

Угловое ускорение тела, как известно, может быть определено как вторая производная от угла поворота по времени: $\varepsilon = \ddot{\varphi}$.

Произведя двойное дифференцирование выражения (3) и подставив значения φ и ε в (2), можно получить связь между угловой частотой крутильных колебаний тела и коэффициентом упругости подвеса:

$$k = I_0 \omega_0^2. \quad (6)$$

В уравнение (6) нетрудно ввести период колебаний T_0 и, измеряя его, определить момент инерции подвешенного тела, если известен коэффициент упругости k .

Если же значение коэффициента упругости неизвестно, его можно исключить из выражения (6), написав аналогичное уравнение для другого тела — правильной формы, момент инерции I которого легко рассчитать:

$$k = I\omega^2. \quad (7)$$

Здесь k имеет то же значение, что и в выражении (6), если тело с моментом инерции I подвешено на том же подвесе.

Приравнявая правые части выражений (6) и (7), легко получить уравнение, дающее возможность найти момент инерции тела любой формы по рассчитанному значению I и двум периодам колебаний T_0 и T , которые определяются измерениями. В качестве тела с известным моментом инерции в нашей работе взято кольцо, момент инерции которого рассчитывается по его массе m и размерам:

$$I = \frac{m(R_1^2 + R_2^2)}{2}, \quad (8)$$

где R_1 — внешний радиус, а R_2 — внутренний радиус кольца.

Задание 1. Определение момента инерции тела произвольной формы

Для проведения измерений нужно расположить тело на подвеске горизонтально, а затем повернуть его на любой угол в пределах от 90° до 180° вокруг вертикальной оси и отпустить. Секундомер следует включать не сразу, а в любой момент, когда тело займет положение максимального поворота. Измерения времени проводят трижды, беря разное число N колебаний. Данные заносят в табл. 2.1.

Затем вместо исследуемого тела подвешивают поочередно два кольца с разными размерами и массами и проводят аналогичные измерения. Результаты измерений также заносят в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Исследуемое тело				1-е кольцо				2-е кольцо			
N_0	t_0	T_0	$\langle T_0 \rangle$	N_1	t_1	T_1	$\langle T_1 \rangle$	N_2	t_2	T_2	$\langle T_2 \rangle$
Горизонтально											
...				...							
...				...							
...				...							
Вертикально											
...											
...											
...											

После этого штангенциркулем измеряют диаметры колец, определяют их радиусы и заносят в табл. 2.2. В эту же таблицу записывают массы колец и рассчитанные с необходимой точностью значения их моментов инерции.

Таблица 2.2

Исслед. тело		1-е кольцо					2-е кольцо				
$\langle T_0 \rangle$	I_0	$\langle T_1 \rangle$	m_1	R_1	R_2	I_1	$\langle T_2 \rangle$	m_2	R_3	R_4	I_2
Горизонтально											
...											
...											
Вертикально											
...											
...											

По рассчитанным значениям моментов инерции колец I_1 , I_2 и соответствующим периодам T_1 и T_2 дважды рассчитывают значения момента инерции I_0 для горизонтального положения исследуемого тела. По этим двум значениям I_0 заполняют таблицу обработки результатов измерений.

Задание 2. Определение момента инерции тела относительно оси, перпендикулярной первой

Задание выполняется по вышеизложенной методике при вертикальном расположении этого же тела на подвеске.

Контрольные вопросы

1. В каких единицах измеряется и от чего зависит момент инерции тела или системы тел? Каков его физический смысл?
2. Получите конечную формулу для определения момента инерции любого тела описанным методом.
3. Найдите первую, а затем вторую производную от φ по уравнению (3). Каков их физический смысл?
4. Как направлены векторы \vec{M} и $\vec{\epsilon}$ при крутильных колебаниях?
5. Получите уравнение (6).
6. Выведите формулу (8), считая кольцо сплошным однородным телом.
7. Подумайте, как повлияет учёт момента инерции подвески на получаемое значение измеряемой величины.

РАБОТА № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УПРУГОСТИ ПРУЖИНЫ

Цель работы: ознакомиться с методами определения коэффициента упругости пружин, определить его.

Оборудование: стойка с пружиной, грузы, секундомер, линейка.

Теория метода и описание установки

Лабораторная установка представляет собой стойку с кронштейном, к которому подвешены две пружины различной жесткости (рис. 5). К нижним концам пружин прикреплены подвески для помещения на них грузов. Удлинение пружин можно измерять по линейкам, вертикально закрепленным на поворачивающемся кронштейне.

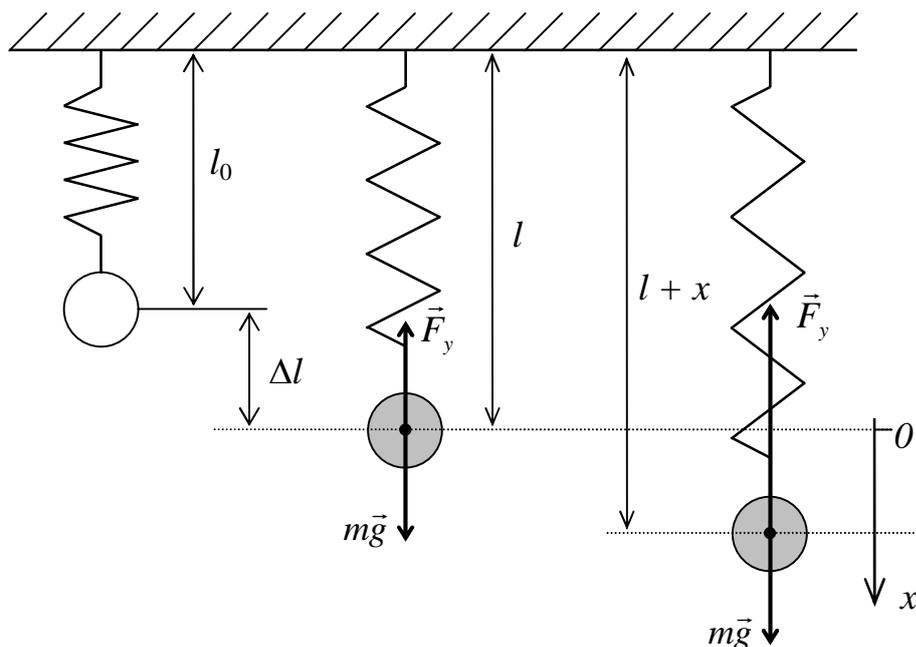


Рис. 5

На тело, подвешенное на пружине, действуют сила упругости \vec{F}_y и сила тяжести $m\vec{g}$ (см. рис. 5), которые в общем случае сообщают телу ускорение в соответствии со вторым законом Ньютона

$$\vec{F}_y + m\vec{g} = m\vec{a}. \quad (1)$$

Используя этот закон, можно определить коэффициент упругости пружины двумя способами.

Задание 1. Определение коэффициента упругости пружины статическим методом

В случае покоящегося груза силы тяжести и упругости равны по величине:

$$F_y = mg. \quad (2)$$

Величина упругой силы, по закону Гука, пропорциональна удлинению Δl пружины, т.е.

$$F_y = k\Delta l. \quad (3)$$

Равенства (2) и (3) позволяют найти коэффициент упругости пружины по измеренному удлинению, вызванному грузом известной массы:

$$k = \frac{mg}{\Delta l}. \quad (4)$$

Измерения удлинения проводят для одной из двух пружин (по указанию преподавателя), для чего на подвеску помещают грузы различной массы. Сначала на подвеску кладут самый большой груз, измеряют удлинение. Затем на первый груз помещают любой другой груз, снова замеряют удлинение и т.д., до 5 грузов. Результаты измерений заносят в табл. 3.1, где l_0 — координата подвески без груза, l — с грузом. (Подумайте, нужно ли здесь учитывать массу подвески).

Таблица 3.1.

№ п.п.	l ₀	m	l	Δl	k _c
1					
...					

После проведения расчётов запишите *результат измерений*, выбирая подходящий метод обработки экспериментальных данных.

Задание 2. Определение коэффициента упругости пружины динамическим методом

Этот метод основан на законах колебательного движения груза массы m возле положения равновесия. Основным признаком колебательного движения — периодичность. Следовательно, *смещение* x груза из положения равновесия можно записать в виде периодической функции времени:

$$x = A\cos(\omega t + \varphi_0), \quad (5)$$

где A — амплитуда; $\omega = 2\pi/T$ — циклическая частота, обратно пропорциональная периоду колебаний T ; φ_0 — начальная фаза колебаний.

При смещении x величина силы упругости будет определяться полным удлинением пружины, равным сумме Δl и x (см. рис. 5):

$$F_y = k(\Delta l + x). \quad (6)$$

Записав второй закон Ньютона (1) в проекциях на ось x , и учтя выражения (4) и (6), нетрудно получить уравнение свободных колебаний подвешенного на пружине тела:

$$-kx = m\ddot{x}, \quad (7)$$

где $\ddot{x} = a_x$ — проекция ускорения груза на ось x .

После подстановки значений \ddot{x} и x в уравнение (7) получим

$$m\omega^2 = k. \quad (8)$$

Зная частоту колебаний ω и колеблющуюся массу m , можно определить значение коэффициента упругости k . Нетрудно также показать, что квадрат периода колебаний груза на пружине прямо пропорционален его массе:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{k} m. \quad (9)$$

Из последнего равенства видно, что период определяется только свойствами системы (m и k) и не зависит от амплитуды колебаний.

Уравнение (9) позволяет графически обработать результаты измерений периода: откладывая по осям соответствующие переменные, можно свести равенство (9) к виду $y = c + bx$ и получить при построении графика прямую, по угловому коэффициенту которой можно найти коэффициент упругости k . Подумайте, что следует принять за y , и что за x , чтобы свести уравнение (9) к указанной линейной зависимости.

Измерения проводят в следующем порядке.

1. Помещают на подвеску сразу 5 грузов.
2. Определяют координату положения равновесия и общую массу грузов.
3. Нажимая двумя пальцами на верхнюю плоскость груза, оттягивают его на 1 см вниз и быстро убирают пальцы вверх.
4. Измеряют время 10 любых полных колебаний по электронному секундомеру и останавливают груз. Данные всех измерений (A , m , N , t) записывают в табл. 3.2.
5. Аналогичным способом оттягивают груз на 1,5 см, отпускают и измеряют время 15 полных колебаний, а затем, оттягивая груз на 2 см, измеряют время 20 полных колебаний.
6. Снимают верхний груз и проводят такие же измерения (1, 1,5, 2 см и 10, 15, 20 колебаний).
7. Снимают еще один груз, проводят измерения с тремя оставшимися, затем с двумя, и, наконец, с одним, самым тяжёлым грузом. Все показания приборов записывают в табл. 3.2.

Внимание! Последним рекомендуют оставлять самый большой груз. Почему?

Таблица 3.2

№ п.п.	m	A	N	t	T	$\langle T \rangle$	$\langle T \rangle^2$
1

Обработка результатов измерений

- Найти среднее значение периода $\langle T \rangle$ из трех измерений для каждой массы, а затем — квадрат этого значения.
- Построить график зависимости $\langle T \rangle^2(m)$, найти угловой коэффициент b .
- Определить по нему, используя формулу (9), коэффициент упругости k_d .
- Сравнить статический k_c и динамический k_d коэффициенты упругости, сформулировать вывод.

Контрольные вопросы

1. Каковы единица измерения и размерность коэффициента упругости?
2. Найдите скорость колеблющегося тела и его ускорение. Будет ли движение тела равноускоренным? Как направлено ускорение относительно смещения?
3. Какая из величин, входящих в кинематическое уравнение (5), определяется расстоянием, на которое оттягивают груз?
4. Проанализируйте, что следует понимать под m в уравнении (4). Только ли массу груза или суммарную массу этого груза и платформы, на которую он положен? Аналогичны ли m в уравнениях (4) и (9)?
5. Выведите формулы (7), (8), (9).
6. Проведя опыт, легко убедиться в том, что при достаточно большой амплитуде груз будет “подпрыгивать” на подвеске. Попробуйте объяснить это явление. Найдите амплитуду, при превышении которой происходит отрыв массы m от невесомой платформы, подвешенной на пружине с жесткостью k .

РАБОТА № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ МЕТОДОМ КЛЕМАНА — ДЕЗОРМА

Цель работы: ознакомиться с газовыми процессами, определить показатель адиабаты и число степеней свободы молекул воздуха.

Оборудование: специальная установка с насосом и манометром.

Теория метода и описание установки

Применяемый в данной работе прибор Клемана — Дезорма схематически изображен на рис. 6. Он представляет собой стеклянный баллон, плотно закрытый пробкой. Через пробку пропущены трубки. Одна из трубок имеет кран K_2 ,

позволяющий устанавливать и прерывать сообщение баллона с атмосферой. Другая трубка соединена с водяным U-образным манометром с одной стороны и с ручным воздушным насосом с другой. Нагнетая насосом воздух в баллон и быстро выпуская его, можно осуществить *адиабатический процесс*, проходящий, по определению, без обмена теплом с окружающей средой.

Как известно, изменение объема связано с изменением давления. В случае адиабатического процесса эта зависимость называется уравнением Пуассона:

$$PV^\gamma = \text{const.} \quad (1)$$

Показатель адиабаты γ является важной термодинамической величиной, характеристикой газа. Он равен отношению теплоёмкости газа при постоянном давлении C_p к теплоёмкости этого же газа при постоянном объеме C_v , то есть

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}. \quad (2)$$

Теплоёмкостью называется количество теплоты, необходимое для нагревания тела или системы на один градус:

$$C = \frac{dQ}{dT}. \quad (3)$$

Величина теплоёмкости газа зависит от условий, при которых происходит нагревание. Если нагревать газ *при постоянном объеме*, то всё тепло, сообщаемое газу извне, полностью идёт на увеличение внутренней энергии. Если же нагревать его *при постоянном давлении*, то газ расширяется, при этом сообщаемое газу тепло идёт не только на увеличение внутренней энергии, но и на совершение работы изобарического расширения. Поэтому теплоёмкость газов при постоянном давлении больше, чем при постоянном объеме. Для *идеального газа* справедливо следующее соотношение между *молярными* теплоёмкостями:

$$C_p^\mu = C_v^\mu + R, \quad (4)$$

причем теплоёмкость пропорциональна числу степеней свободы молекул газа i :

$$C_v^\mu = \frac{i}{2} R, \quad (5)$$

где R — универсальная газовая постоянная.

Показатель адиабаты можно определить экспериментально, если осуществить ряд газовых процессов в воздухе, заключенном в сосуде. Очевидно, как следует из выражений (2), (4) и (5), по измеренному значению γ можно также найти число степеней свободы молекул газа.

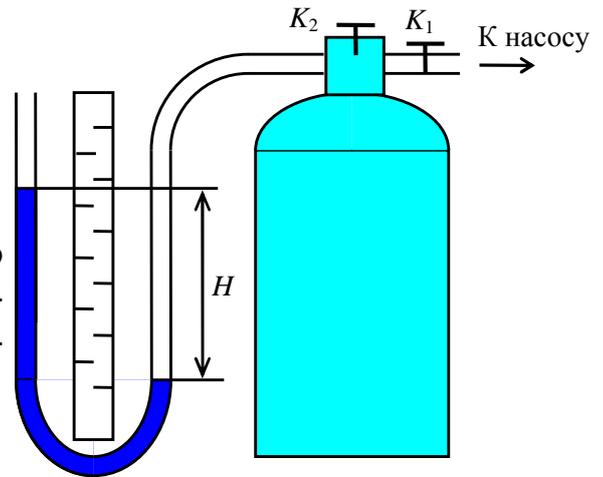


Рис. 6

Известно, что любое *состояние газа* характеризуется определенными значениями параметров P , V и T . *Процесс* — это переход из одного состояния в другое, т.е. изменение параметров. Покажем, что показатель адиабаты γ можно определить, осуществив три состояния газа (рис. 7) и записав последовательно уравнения процессов.

1. Газ в состоянии 1, полученном после нагнетания воздуха в сосуд и установления температуры T_1 , равной комнатной, имеет параметры: $P_1 = P_{\text{ат}} + H$, где H — избыточное давление в сосуде над атмосферным давлением $P_{\text{ат}}$ (см. рис. 7); V_1 — объем единицы массы воздуха в сосуде. На графике (см. рис. 7) этому состоянию соответствует точка 1.

2. Если теперь на короткое время соединить сосуд с атмосферой, открыв кран K_2 , то воздух в баллоне расширится и перейдет в состояние 2 с давлением $P_2 = P_{\text{ат}}$. Единица массы газа займет объем $V_2 > V_1$, температура понизится до некоторого значения $T_2 < T_1$ (см. рис. 7, точка 2). Переход газа из состояния 1 в состояние 2 можно считать *адиабатическим процессом*, поскольку за время расширения газ в сосуде не успевает обменяться теплом с окружающей средой.

Для адиабатического перехода из состояния 1 в состояние 2 справедливо уравнение Пуассона (1):

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma. \quad (6)$$

3. Воздух, оставшийся в сосуде, сохраняя объем постоянным ($V_3 = V_2$), постепенно нагревается до комнатной температуры ($T_3 = T_1$) и давление повышается до значения $P_3 = P_{\text{ат}} + h$ (точка 3 на рис. 7).

Газ в состояниях 3 и 1 имеет одну и ту же комнатную температуру. Значит, эти состояния можно связать уравнением Бойля — Мариотта:

$$P_1 V_1 = P_3 V_3. \quad (7)$$

Из уравнений (6) и (7) легко получить связь между давлениями

$$\left(\frac{P_1}{P_3}\right)^\gamma = \frac{P_1}{P_2}, \quad (8)$$

и, логарифмируя последнее равенство, определить показатель степени

$$\gamma = \frac{\ln P_1 - \ln P_2}{\ln P_1 - \ln P_3} = \frac{\ln(P_{\text{ат}} + H) - \ln P_{\text{ат}}}{\ln(P_{\text{ат}} + H) - \ln(P_{\text{ат}} + h)}. \quad (9)$$

Учитывая, что H и h много меньше $P_{\text{ат}}$ (\approx в 100 раз), и используя формулу приближенных вычислений: $\ln(1+x) \approx x$ (при $x \ll 1$), можно получить расчётную формулу для показателя адиабаты

$$\gamma = \frac{H}{H - h}. \quad (10)$$

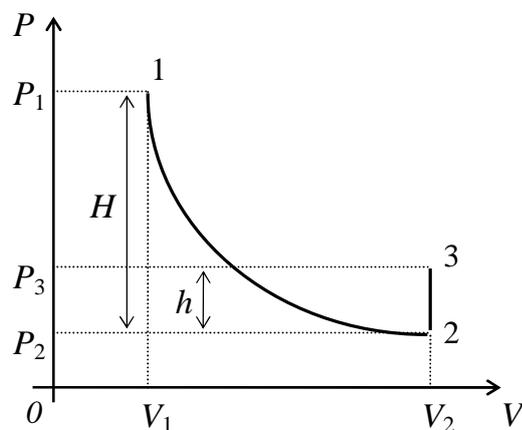


Рис.7

Задание 1. Определение показателя адиабаты атмосферного воздуха

Для выполнения задания нужно осуществить в сосуде последовательно три состояния, описанные выше.

1. Чтобы получить первое состояние газа с повышенным давлением, открывают кран K_1 (см. рис. 6) и закачивают насосом воздух в баллон. Закачивание следует производить медленно, следя за тем, чтобы жидкость в U-образном манометре не поднималась выше красной отметки на его шкале. Закрывают кран K_2 и ожидают некоторое время (2–3 мин), пока температура в баллоне не сравняется с комнатной и разность уровней жидкости в обоих коленах манометра не установится постоянной. Отсчитывают разность H уровней жидкости в коленах манометра и записывают ее в табл. 4.1.

2. Открывают полностью кран K_2 , устанавливая сообщение баллона с атмосферой и сразу закрывают его. Часть воздуха из баллона выходит в комнату — идет процесс расширения. Расширение быстрое, то есть практически адиабатическое. Газ переходит в состояние 2 с пониженной температурой.

3. Выжидают 2–3 мин, пока температура воздуха в баллоне не сравняется с комнатной (состояние 3), о чем можно судить по тому, что разность уровней жидкостей в коленах манометра перестаёт изменяться.

Отсчитывают эту разность h и заносят в таблицу. Опыт повторяют 7–10 раз, меняя величину H .

Таблица 4.1

№ п.п.	H	h	$H - h$	γ
1				
2				
3				
...				
...				

Задание 2. Определение числа степеней свободы

По полученному значению показателя адиабаты найти среднее значение числа i степеней свободы молекул воздуха, сравнить с теоретическим значением и оценить погрешность определения i .

Контрольные вопросы

1. Дайте определения моля и молярной теплоёмкости.
2. Почему теплоёмкость газа зависит от условий передачи тепла газу?
3. Чему равны молярные теплоёмкости идеального газа при $P = const$ и при $V = const$?
4. Какова связь между теплоёмкостями при постоянном давлении и при постоянном объеме?
5. Опишите диаграмму на рис. 7.

6. Выведите формулы (8), (9) и (10).
7. Дайте определение адиабатического процесса и запишите его уравнение. Сравните графики изотермического и адиабатического процессов.
8. Как изменяются температура и внутренняя энергия при адиабатическом процессе?
9. Что называется числом степеней свободы? Чему равно это число для газов с различным числом атомов в молекуле?

РАБОТА № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОЁМКОСТИ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ОХЛАЖДЕНИЯ И ПРОВЕРКА ЗАКОНА ДЮЛОНГА И ПТИ

Цель работы: ознакомиться с одним из методов определения теплоёмкости, определить удельную и молярную теплоёмкости некоторых металлов. Проверить закон Дюлонга и Пти.

Оборудование: электропечь, набор образцов с термопарами, секундомер, милливольтметр.

Теория метода и описание установки

Определение теплоёмкостей металлов производится на установке, изображенной на рис. 8. Образец 1 нагревается в электропечи 4 и по достижении им заданной температуры вынимается из печи для охлаждения. При этом температура образца непрерывно измеряется с помощью термопары 2, концы которой подключены к милливольтметру 3 со шкалой, проградуированной в градусах Цельсия.

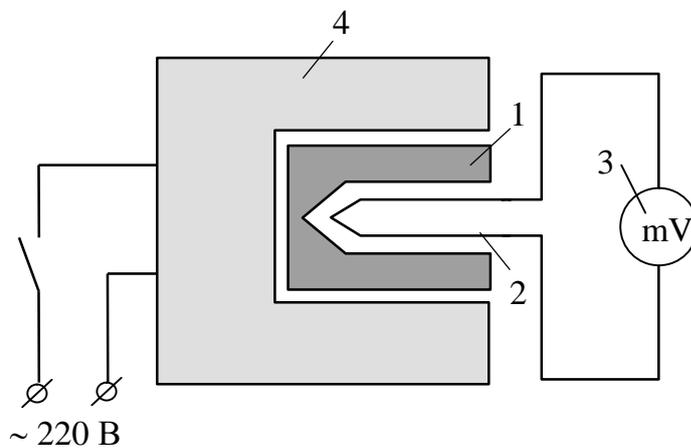
Данный метод определения теплоёмкости основан на сопоставлении двух уравнений, выражающих количество теплоты, отдаваемой или поглощаемой телом. Количество теплоты dQ_1 , полученной телом массой m при бесконечно малом изменении температуры dT может быть найдено по известному выражению

$$dQ_1 = cmdT, \quad (1)$$

где c — удельная теплоёмкость вещества.

При охлаждении тела количество отданного тепла dQ_2 пропорционально площади S поверхности тела, разности температур поверхности тела T и окружающей среды T_0 и времени охлаждения dt :

$$dQ_2 = \alpha(T - T_0) S dt. \quad (2)$$



Этот опытный факт был впервые установлен И. Ньютоном и носит его имя. В уравнении (2) α — коэффициент теплоотдачи, значение которого определяется лишь условиями охлаждения (форма, размеры, перепад температуры, скорость воздуха и др.) и не зависит от материала образца. При малых размерах образца его температуру можно принять одинаковой для всего образца.

Приравнявая выражения (1) и (2), получим

$$cm \frac{dT}{dt} = \alpha(T - T_0)S, \quad (3)$$

где $\frac{dT}{dt}$ — скорость охлаждения образца. Записав уравнение (3) для двух образцов одинаковой формы и размеров, нагретых до одной и той же температуры, но изготовленных из различных металлов, можно получить расчётную формулу

$$c_1 = c_2 \frac{\rho_2 \left(\frac{dT}{dt} \right)_2}{\rho_1 \left(\frac{dT}{dt} \right)_1}, \quad (4)$$

где ρ_1 и ρ_2 — плотности образцов.

Если известна удельная теплоёмкость какого-либо металла, принимаемого за эталон, то по формуле (4) можно найти теплоёмкость другого металла, экспериментально определив соответствующие скорости охлаждения. Они находятся *графическим дифференцированием* экспериментальных кривых охлаждения исследуемых металлов (см. рис. 1, с. 6), поскольку $\frac{dT}{dt}$ — это производная от функции зависимости температуры образца от времени.

Производные $\left(\frac{dT}{dt} \right)_1$ и $\left(\frac{dT}{dt} \right)_2$ нужно находить при одинаковых температурах, например, при температуре 200°C , для которой указана удельная теплоёмкость эталона. В качестве эталона здесь используем медь (Cu). Её удельная теплоёмкость при $T = 200^\circ\text{C}$ равна $0,406$ Дж/(г·К).

Определив удельную теплоёмкость c , можно вычислить и молярную теплоёмкость C^μ . Связь последней с удельной теплоёмкостью можно получить из определения этих величин:

$$c = \frac{dQ}{dTm}; \quad C^\mu = \frac{dQ}{dT\nu}. \quad (5)$$

В первом случае теплоёмкость тела dQ/dT делят на число килограммов или граммов m , во втором — на число молей $\nu = m/\mu$, где μ — молярная масса вещества. Её округлённое значение находят из таблицы Менделеева: *моль вещества содержит столько граммов, сколько углеродных единиц составляет масса одной молекулы этого вещества.*

Задание 1. Определение удельных теплоёмкостей алюминия и железа

Выполняя задание, нужно следить, чтобы образец при нагревании в печи не касался её стенок и был помещен в печь полностью. Образец нужно нагреть до 320...350 °С, а затем вынуть его из печи для остывания. Замеры температуры при охлаждении нужно производить через 10 секунд, начиная с 300°С и продолжая до 100°С. Результаты замеров записываются в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Время t , с	Температура T , °С		
	Cu	Al	Fe
0	300	300	300
...			
...			

По данным табл. 5.1 строят три графика зависимости температуры образца от времени охлаждения. По графикам определяют скорости охлаждения при температуре 200°С и записывают в табл. 5.2. Там же помещают значения μ , ρ и вычисленные значения c и C^{μ} в единицах СИ.

Таблица 5.2

Металл	μ	ρ	dT/dt	c	C^{μ}
Cu					
Al					
Fe					

Обработка результатов измерений

Заполнив табл. 5.2, проанализируйте, во сколько раз отличаются друг от друга *удельные* теплоёмкости разных металлов, и во сколько раз — *молярные*. Последние, согласно экспериментальному *закону Дюлонга и Пти*, должны быть примерно одинаковы для всех твёрдых тел и равны приблизительно $3R$. Проверьте это!

Задание 2. Сравнение теплоёмкостей металлов и диэлектриков

Теоретически молярная теплоёмкость идеального газа пропорциональна числу степеней свободы его молекул (см. выражение (5) в работе № 4).

- Покажите, что теплоёмкость кристаллических тел совпадает с вычисленной по этому выражению, если число степеней свободы атомов $i = 6$.

Опытный закон Дюлонга и Пти справедлив для всех твёрдых тел — металлов и диэлектриков. Но, согласно теории, теплоёмкости металлов и диэлектриков должны существенно отличаться из-за вклада свободных электронов.

- Попытайтесь вычислить и сравнить молярные теплоёмкости *металлов* и *диэлектриков*, учитывая, что металлы проводят электрический ток, а диэлектрики не проводят.

Контрольные вопросы

1. Каковы размерность и физический смысл отношения m/μ ?
2. Дайте определение моля вещества, установите единицу измерения молярной массы, определите молярные массы меди, железа и алюминия.
3. Найдите связь между c и C^m , установите их размерности.
4. Сформулируйте закон Дюлонга и Пти. Каково приблизительное значение молярной теплоёмкости твёрдых тел?
5. Выведите расчётную формулу (4).
6. Почему можно приравнять значения dQ_1 и dQ_2 ?

РАБОТА № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ ПО МЕТОДУ СТОКСА

Цель работы: изучение сопротивления движению тела в жидкости и определение вязкости жидкости по методу Стокса.

Оборудование: стеклянный цилиндр с жидкостью, микрометр, секундомер, стальные шарики.

Теория метода и описание установки

Установка для определения вязкости методом Стокса представляет собой вертикально расположенный цилиндр с исследуемой жидкостью (рис. 9 и 10). В цилиндр опускается шарик известного радиуса R и по скорости его равномерного движения определяется вязкость жидкости.

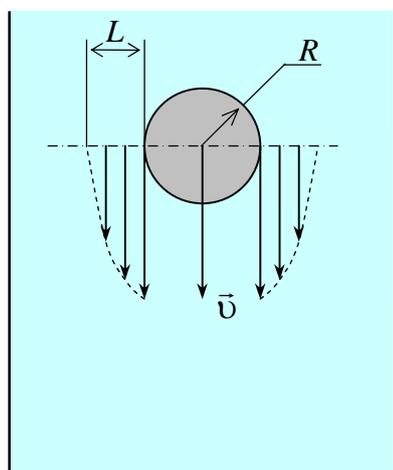


Рис. 9

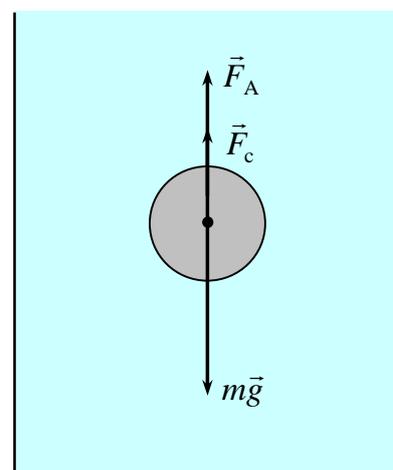


Рис. 10

При движении тела в жидкости или газе на него действует сила сопротивления \vec{F}_c , зависящая от скорости тела и обусловленная межмолекулярными силами трения между слоями жидкости, движущимися с различными скоростями. И. Ньютон показал, что величина силы внутреннего трения между слоями жидкости пропорциональна площади S соприкосновения слоев и *градиенту скорости* $d\nu/dx$, который показывает, насколько убывает скорость слоев жидкости

при перемещении на единицу длины в перпендикулярном к скорости направлении x :

$$F_c = \eta S \frac{dv}{dx}. \quad (1)$$

Здесь η — коэффициент пропорциональности, характеризующий вязкость жидкости и называемый *коэффициентом динамической вязкости* (в отличие от *кинематической вязкости* $\nu = \eta/\rho$, где ρ — плотность жидкости). Шарик радиусом R , падающий в жидкости, обволакивается ею, и вместе с прилегающим к его поверхности слоем движется со скоростью v . Прилипший слой приводит в движение соседние слои жидкости, скорость которых постепенно уменьшается по мере удаления от оси движения шарика, (профиль скоростей показан на рис. 9 штриховой кривой). Г. Стокс показал, что при малых скоростях и размерах (*ламинарное течение*) скорость слоев жидкости становится равной нулю на расстоянии $L = 2R/3$ от поверхности шарика. Точнее, это имеет место при малых значениях безразмерного критерия Рейнольдса

$$Re = \frac{vD}{\nu}, \quad (2)$$

где D — диаметр шарика.

Следовательно, если выполняется условие ламинарности течения $Re \ll 1$, то градиент скорости

$$\frac{dv}{dx} = \frac{v-0}{L} = \frac{3v}{2R}. \quad (3)$$

Поскольку площадь поверхности шарика $S = 4\pi R^2$, то модуль силы сопротивления в случае медленного движения шарика

$$F_c = 6\pi\eta Rv. \quad (4)$$

Кроме силы сопротивления на шарик, падающий в жидкости, действуют также сила тяжести

$$mg = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_1 g \quad (5)$$

и сила Архимеда (см. рис. 10)

$$F_A = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_2 g. \quad (6)$$

В выражениях (5) и (6) g — ускорение свободного падения, ρ_1 — плотность шарика, ρ_2 — плотность жидкости. Если начальная скорость шарика равна нулю, то $F_c = 0$, и шарик вначале будет двигаться ускоренно. Но по мере увеличения скорости шарика будет возрастать и сила сопротивления, и наступит такой момент, когда сумма приложенных к шарика сил станет равной нулю:

$$m\vec{g} + \vec{F}_A + \vec{F}_c = 0, \quad (7)$$

и дальнейшее движение шарика будет равномерным со скоростью $v = v_{\text{равн}}$.

Записывая второй закон Ньютона (7) в проекции на направление скорости и используя выражения (4), (5), (6), можно получить расчётную формулу для определения коэффициента динамической вязкости:

$$\eta = \frac{(\rho_1 - \rho_2)gD^2}{18\nu}. \quad (8)$$

Задание 1. Определение вязкости глицерина при комнатной температуре

Измерения проводят в следующем порядке.

1. Измерить диаметр шарика с помощью микрометра или стойки с индикатором и записать в табл. 6.1.
2. Установить метки в определенных точках по шкале, расположенной вблизи цилиндра, например: 5, 20, 40, 60 см.
3. Подготовить секундомер к пуску и опустить шарик в цилиндр с глицерином как можно ближе к его оси.
4. В тот момент, когда шарик будет проходить самую *верхнюю* метку, нужно включить секундомер и в момент прохождения шариком *второй* метки записать мелом показания секундомера, *не останавливая* его. Шарик продолжает медленно падать, и в момент прохождения им *третьей* метки так же считывают и записывают показания секундомера *без его выключения*. В момент прохождения шариком *последней* метки секундомер выключают и записывают с него в табл. 6.1 время прохождения шариком расстояния между первой и последней метками. Предыдущие два замера также переписывают в табл. 6.1.
5. Повторить измерения с другим шариком. Всего получается шесть измерений времени с двумя шариками.
6. Измерить и записать температуру глицерина по шкале термометра, расположенного рядом с установкой.

Таблица 6.1

№ п.п.	D	l	t	ν	η
...					
...					

Обработка результатов измерений

- Определить и записать в табл. 6.1 отрезки пути l , пройденные шариком за соответствующие промежутки времени.
- Вычислить скорость равномерного движения шарика $\nu = l/t$ и записать в таблицу.
- Для каждого из шести измерений вычислить вязкость глицерина по формуле (8), записать в табл. 6.1.

Примечание. Рекомендуем предварительно вычислить постоянный множитель $C = g(\rho_1 - \rho_2)/18$. Плотность шариков и глицерина соответственно: $7,8 \text{ г/см}^3$ и $1,2 \text{ г/см}^3$. Ускорение свободного падения $9,8 \text{ м/с}^2$.

- Заполнить таблицу обработки результатов измерений по всем значениям η .
- Сравнить полученное значение коэффициента вязкости с табличным значением для глицерина, выявить возможные причины несоответствия.

Задание 2. Определение характера течения

- Вычислить среднее значение кинематической вязкости жидкости в трубке.
- По результатам измерений вычислить критерий Рейнольдса (2), определить характер течения при движении шариков и оценить правомерность использования метода Стокса.
- Определить, при каком наибольшем диаметре *алюминиевых* шариков их падение в *воде* можно считать соответствующим закону Стокса ($Re < 0,1$). Кинематическая вязкость воды при комнатной температуре около $1 \text{ мм}^2/\text{с}^2$.

Контрольные вопросы

1. Определите размерности коэффициентов динамической и кинематической вязкости. Как называются единицы их измерения в системах СИ и СГС?
2. От каких величин зависит сила сопротивления движению тела в жидкости? Какова зависимость силы сопротивления от скорости для случаев медленного и быстрого движений?
3. Какая физическая величина называется градиентом скорости? Каковы его физический смысл и размерность?
4. Какой критерий подобия определяет характер течения? Запишите его формулу, проверьте размерность.
5. Какие силы действуют на шарик, падающий в жидкости? Почему, начиная с некоторого момента времени, шарик движется равномерно?
6. Как коэффициенты вязкости зависят от температуры?
7. Выведите формулу (4) и расчётную формулу (8).
8. Изобразите в виде графика зависимость скорости шарика от времени при начальной скорости $v_0 = 0$; $v_0 > v_{\text{равн}}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И. В. Курс общей физики.— М.: Наука, 1992. — Т.1.
2. Соколова Н.М., Биглер В.И. Физика: Конспект лекций. — Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 1999. — Ч.1.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Погрешности косвенных измерений

Если искомая величина y вычисляется по результатам измерений нескольких величин x_1, x_2, x_3 : $y = f(x_1, x_2, x_3)$, то её абсолютную погрешность Δy можно найти, применяя операцию дифференцирования:

$$\Delta y = \frac{\partial y}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial y}{\partial x_3} \Delta x_3, \quad (\text{П-1})$$

где Δx_i — абсолютная погрешность измеряемой величины x_i .

Например, для величины $y = 3x^2$, абсолютная погрешность будет в 6х раз больше, чем для величины x , полученной прямыми измерениями:

$$\Delta y = (3x^2)' \cdot \Delta x = 6x \cdot \Delta x. \quad (\text{П-2})$$

Относительная погрешность расчётной величины y для этого случая

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta y}{y} = \frac{6x \Delta x}{3x^2} = 2 \frac{\Delta x}{x} = 2\varepsilon_x, \quad (\text{П-3})$$

т.е. в два раза больше, чем относительная погрешность величины x .

Ещё пример: $c = 3a^2 + b^3$; $\Delta c = 6a \Delta a + 3b^2 \Delta b$.

Приведём таблицу погрешностей (табл. П.1) наиболее часто встречающихся функций.

Таблица П.1

Функция	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
$C = A \pm B$	$\Delta C = \Delta A + \Delta B$	$\varepsilon_c = \frac{\Delta a + \Delta b}{a \pm b}$
$C = AB$	$\Delta C = A \Delta A + B \Delta B$	$\varepsilon_c = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$
$C = \frac{A}{B}$	$\Delta C = \frac{B \Delta A + A \Delta B}{B^2}$	$\varepsilon_c = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$
$C = A^n$	$\Delta C = n(A^{n-1}) \Delta A$	$\varepsilon_c = n \frac{\Delta A}{A}$
$C = \sqrt[n]{A}$	$\Delta C = \frac{1}{n} A^{\frac{1}{n}-1} \Delta A$	$\varepsilon_c = \frac{\Delta A}{nA}$
$C = \sin A$	$\Delta C = (\cos A) \Delta A$	$\varepsilon_c = (\text{ctg } A) \Delta A$
$C = \text{tg } A$	$\Delta C = \frac{\Delta A}{\cos^2 A}$	$\varepsilon_c = \frac{\Delta A}{\sin A \cos A}$