Х. Б. ЗЕМБАТОВ, Н. М. МКРТЫЧЕВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ
«МЕХАНИКА», «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА»

ВЛАДИКАВКАЗ 2021

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ, ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

И ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

СЕВЕРО-ОСЕТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

им. К. Л. ХЕТАГУРОВА

Х. Б. ЗЕМБАТОВ, Н. М. МКРТЫЧЕВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ
«МЕХАНИКА», «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА»

ВЛАДИКАВКАЗ **2021**

ББК 22.2я73

З 51

УДК 531 (075.8)

Зембатов Х. Б., Мкртычева Н. М.

З 51 Физический практикум. Механика. Молекулярная физика.: Учеб. пос.

Сев.-Осет. гос. ун-т Владикавказ: Изд-во СОГУ, 2021. 76 с.

ISBN 5-230-15434-9

Предлагаемое учебное пособие призвано служить эффективным средством активизации самостоятельной работы студентов над освоением теоретического материала и применения полученных знаний к ряду практических явлений и задач. Пособие составлено с учетом материальной базы кафедры общей физики СОГУ. Компактное изложение авторами теоретического материала, приводимые справочные данные способствуют наиболее эффективному проведению двухчасовых лабораторных занятий, формируют у студентов кроме традиционных сборочно-монтажных, вычислительных и измерительных умений — контрольно-поисковые, наладочные и профессионально-педагогические.

Пособие предназначено для преподавателей и студентов физических специальностей педагогических институтов и университетов.

Научный редактор доц. кафедры общей физики СОГУ, канд. пед. наук **З. К. Каргиева**

Рецензенты: зав. кафедрой СОГМИ, канд. физ.-мат. наук, доц. **А. Х. Кцоев**;

ст. препод, кафедры физики СОГМИ, канд. техн. наук

Т. С. Катаев

Печатается по решению редакционного совета Издательства Северо-Осетинского государственного университета им. К. Л. Хетагурова в качестве учебного пособия.

З 1603030000-62 **55-92**

М 190 (03)-91 **-**

ISBN 5-230-15434-9 ББК 22.2я73

Лабораторная работа № 1.

Теория погрешностей.

Физика является одной из точных наук. Как опытная наука она представляет одну из важнейших отраслей естествознания.

Наблюдения позволяют сделать первые шаги для установления закономерностей физических явлений. Однако научное наблюдение представляет собой сложную задачу. При изучении какого- либо физического явления надо уметь выделять наиболее важные его элементы с учетом условий, в которых протекает явление. Это позволяет перейти от простого наблюдения к эксперименту. Установление количественных законов, показывающих, как изменяются одни из измеряемых величин при изменении других, является одной из важнейших задач экспериментальной физической науки. В процессе эксперимента крайне важно найти количественные поддающиеся измерению те или иные характеристики явления, установить, каким образом и с помощью каких приборов мы будем измерять те или иные характеристики при устранении законов.

Эксперимент- как необходимая часть всего процесса научного познания состоит из трех основных частей:

1) **Восприятия,** т.е. первичного изучения исследуемого явления при помощи наблюдения.
2) **Обобщения** т.е. создания гипотезы, связывающей отдельные результаты наблюдений между собой и с ранее известными факторами и устанавливающей между ними количественные соотношения.
3) **Проверка истинности гипотезы на практике или в реальных условиях**. В случае положительного ответа эта проверка возводит гипотезу в ранг теории и устанавливаемые ею соотношения- в ранг законов.

Эксперимент должен по возможности становиться так, чтобы не допускать не только ошибок, но и неоднозначного истолкования его результатов. Физический эксперимент имеет громадное значение в качестве орудия исследования в целом ряде смежных с физикой естественных дисциплин, особенно в механике, математике, химии, биологии и т. д.

Занятия в физической лаборатории имеют в виду две цели: во –первых дать возможность студентам познакомиться с приборами и овладеть основными методами точных физических измерений, во-вторых дать возможность более подробно ознакомиться с некоторыми явлениями и законами природы.

В процессе проведения физических опытов неизбежны погрешности измерений, которые обусловлены несовершенством измерительных приборов, а также несовершенствам наших органов чувств. Поэтому все измерения можно делать только с известной степенью точности, т. е. результаты измерений дают нам не истинное значение измеряемой величины, а лишь приближенное.

Для того чтобы повысить точность окончательного результата, всякое физическое измерение надо делать несколько раз при одинаковых условиях опята. В дальнейшем рассмотрим краткую теорию погрешностей (ошибок) и обработку результатов проведенных измерений.

Опыт считается наиболее ответственной формой физического исследования, поэтому к физическому опыту предъявляются строгие требования. В связи с тем, что на выполнение лабораторных работ студентам отводится ограниченное время, а также учитывая учебно-методический характер занятий, эти требования несколько смягчаются. Поэтому основными задачами учебного опыта можно считать:

1. Формирование у студентов представления о физическом законе в действии, объективном характере физических законов.
2. Формирование у студентов представления о точности физических законов.
3. Приобретение студентами навыков по использованию методов измерений.
4. Ознакомление студентов с измерительными приборами и с принципами их действия.
5. Приобретение студентами навыков в обработке полученных опытных данных.
6. Совершенствование навыков в самостоятельной работе студентами над рекомендованной литературой.
7. Отыскание студентами наилучших решений для элементарных опытов.

Основные виды и источники ошибок.

Для получения надежных результатов при выполнении практической работы важным условиям является выполнение всех требуемых измерений с максимальной тщательностью, использование в полной мере точности и чувствительности применяемой измерительной аппаратуры. Однако благодаря несовершенству измерительных приборов, которыми мы пользуемся, и наших органов чувств во всяком измерении содержится некоторая неточность, погрешность, характер и причины которой могут быть различны.

Принято разделять погрешности или ошибки на **систематические, случайные и промахи.**

Систематические ошибки, исходя из их названия, всегда действуют в одну сторону- либо увеличивая, либо уменьшая результат измерений. Такие погрешности можно учесть, а поэтому и устранить. Например, шкала измерительной линейки неравномерна, капилляр термометра имеет на разных участках различный диаметр, стрелка амперметра при отсутствии тока не стоит на нуле и т. д. Систематические погрешности в большинстве случаев можно устранить, либо учитывая их в виде поправок к показаниям приборов (считать деление, на котором стоит стрелка амперметра при отсутствии тока, нулевым, каждый раз вычитая его из показаний прибора), либо проверив данные приборы по эталоновым приборам). Систематических ошибок можно избежать лишь при критическом отношении к методам исследования.

Случайные погрешности, напротив, с одинаковой вероятностью могут давать отклонение от истинного значения измеряемой величины, как в сторону его увеличения, так и в сторону уменьшения. Такие ошибки можно снести к минимуму, но полностью устранить их невозможно. Случайные погрешности зависят от неточности измерительных приборов, от несовершенства наших органов чувств и от непрерывного действия внешних условий (изменение температуры, давления, влажности и .т.д.).

Промахи- это очевидные ошибочные измерения или наблюдения, возникающие в результате небрежности отсчета по прибору, неправильного включения прибора или неразборчивости записи показаний.

Рассмотрим наиболее существенные источники возможных погрешностей при выполнении измерений.

1.Ошибки метода. Они имеют характер систематических и возникают вследствие недостаточно полного учета факторов, влияющих на измеряемую величину. Например, работая с простейшим калориметром, имеющим несовершенную тепловую изоляцию, невозможно учесть потери тепла на изучение в окружающее пространство. При работе с таким калориметром в результате измерения входит систематическая погрешность в сторону уменьшения количества тепла, сообщенного находившегося в калориметре жидкости при ее нагревании от опущенного в жидкость сильно нагретого тела (если температура жидкости в калориметре выше температуры окружающей среды).

2.Ошибка прибора или инструмента. Систематическая ошибка может иметь место также в результате неверных показаний приборов. Например, неправильная градуировка шкалы или смещение ее нулевой точки в измерительном приборе будет давать, в зависимости от знака смещения, уменьшение или увеличение значения измеряемой физической величины. Обнаружение и устранение систематических погрешностей достигается, таким образом, в результате тщательного изучения метода измерения и применяемых приборов, их проверкой и исправлением, а также введением поправок в результаты измерений.

3. Случайные ошибки, зависящие от аппаратуры. Этот вид погрешностей присущ всякому измерительному прибору даже весьма высокого качества и связан с тем, что любой прибор всегда обладает определенной точностью или чувствительностью. Поэтому он может реагировать лишь на такие изменения измеряемой величины, которые лежат в пределах точности разбивки его шкалы. Таким образом, в показаниях измерительного прибора скрыта погрешность, соответствующая его классу точности.

4.Ошибки наблюдателя или экспериментатора. Эти ошибки целиком зависят от экспериментатора - его внимания, тщательности выполнения измерений, опытности, обусловлены в общем ограниченностью органов чувств человека. Как правило, они являются случайными, так как с одинаковой вероятностью могут влиять на результат измерений, как в сторону его увеличения, так и в сторону уменьшения. Например, измеряется секундомером время падения шарика с одной и той же высоты. Многократно проводя эти простейшие измерения, мы получили различные результаты. Причиной этому могут быть: неправильное расположение глаза наблюдателя по отношению к конечным точкам проходимого шариком пути; запуск и остановка секундомера раньше или позже нужного момента, так как человеческие реакции на внешние сигналы не мгновенны.

Случайные ошибки подчиняются законам вероятности, а это значит, что если при каком-либо измерении результат получится больше истинного, то при одном из последующих измерений столь же вероятно может получиться результат меньше истинного. Совершенно очевидно, в таком случае, что многократное повторение одного и того же измерения уменьшит влияние этих случайных ошибок, так как нет основания считать отклонение от истинного значения в одну сторону более вероятным, чем в другую.

В дальнейшем мы будем считать систематические ошибки и промахи устраненными, и рассматривать только случайные ошибки.

Краткая теория ошибок и обработка результатов измерений.

Любое отдельное измерение какой-либо величины, а следовательно, и результат серии многократных ее измерений неизбежно содержит некоторую погрешность. Поэтому результаты подсчета по данным эксперимента не могут дать истинное значение измеряемой величины, а являются лишь приближенными. Истинное значение лежит в пределах, определяемых погрешностью, которая имела место в измерениях. Так, если найдено, что погрешность в серии прямых измерений длины l какого-либо предмета составляет 0,5 мм, а среднее значение длины лежит между 23,5-0,5 и 23,5+0,5, т.е.

$$22{,}9 \text{ мм} < l < 23{,}9 \text{ мм, то}$$

результат измерения принято записывать в виде:

$$l = (23{,}4 \pm 0{,}5) \text{ мм.}$$

Пределы, в которых заключено истинное значение измеряемой величины, определяют точность ее измерения.

Пусть в результате измерений получено n разных значений измеряемой величины $a_1, a_2, a_3,...., a_n$. При обработке полученных результатов возникает два вопроса:

-чему равно наиболее вероятное значение измеряемой величины?

-чему равна ожидаемая ошибка измерений?

Ответы на эти вопросы дает теория вероятности. Приведем ее без выводов.

Наиболее вероятное значение $\bar{a}$ измеряемой величины a равно среднему арифметическому значений, найденных в результате измерений:

$$\bar{a} = \frac{1}{n}(a_1 + a_2 + ... + a_n) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} a_i \quad (1)$$

Абсолютная погрешность показывает насколько найденное значение измеряемой величины может отличаться от истинного его значения. Она измеряется в тех же единицах, что и измеряемая величина и для каждого конкретного измерения определяется разностью между $\bar{a}$ и $\grave{a}_i$, т.е.

$$\Delta\grave{a}_1 = |\ \bar{\grave{a}} - \grave{a}_1\ |\ ,\ \ \Delta\grave{a}_2 = |\ \bar{\grave{a}} - \grave{a}_2\ |\ \ ,....,\ \Delta\grave{a}_n = |\ \bar{\grave{a}} - \grave{a}_n\ |\ \ (2)$$

Легко видеть, что $\Delta\grave{a}_i$ может быть как положительным, так и отрицательным.

Средней абсолютной погрешностью отдельного измерения называется среднее арифметическое из всех величин абсолютных погрешностей, взятых по модулю, т.е.

$$\Delta\tilde{a} = \frac{|\Delta a_1| + |\Delta a_2| + \cdots + |\Delta a_n|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} |\Delta a_n|}{n} \ (3)$$

Относительная погрешность. Однако абсолютная погрешность не характеризует точности измерений. Пусть, например, с помощью микрометра найдено, что толщина некоторой пластины d=(2,54±0,01) мм, а в другом опыте по измерению скорости распространения света *c* получено значение *c*=(299705±50) км/с. Несмотря на то, что абсолютная погрешность в первом случае во много раз меньше, чем во втором, можно показать, что значение скорости *c* определено с большей точностью, чем толщина пластины d. Для полной характеристики точности измерений, наряду с абсолютной погрешностью, вводится относительная погрешность, показывающая, какую долю измеренной величины составляет средняя абсолютная погрешность. Относительная погрешность- безразмерная величина. Она определяется как отношение средней абсолютной погрешности к наиболее вероятному значению измеренной величины:

$$\AA = \frac{\Delta\bar{\grave{a}}}{\bar{\grave{a}}}, \text{ откуда } \Delta\tilde{a} = \mathrm{E}\cdot\tilde{a} \quad (4)$$

Относительную погрешность часто выражают в процентах:

$$\AA = \frac{\Delta\bar{\grave{a}}}{\bar{\grave{a}}}\cdot 100\,\% \quad (4а)$$

В приведенных выше примерах при измерения толщины пластинки d и скорости света *c* относительная погрешность в каждом случае соответственно равна:

$$\frac{\Delta d}{d}\cdot 100\,\% = \frac{0{,}01}{2{,}54}\cdot 100\,\% = 0{,}4\,\% \quad (5)$$

$$\frac{\Delta\tilde{n}}{\tilde{n}}\cdot 100\,\% = \frac{50}{299705}\cdot 100\,\% = 0{,}02\,\% \quad (6)$$

В качестве примера приведем образец обработки результатов полученных измерений при измерении длины стержня *l* в десяти опытах по данным таблицы 1.

Таблица 1.

№ п/п	Длина l,(мм)	$\bar{l}$ (мм)	$\pm\Delta l_i$	$\Delta\bar{l}$ (мм)	Е (%)
1	18,4	18,5 мм	0,1	0,2 мм	1,08 %
2	18,7		-0,2		
3	18,3		0,2		
4	18,6		-0,1		
5	18,7		-0,2		
6	18,3		0,2		
7	18,4		0,1		
8	18,1		0,4		
9	18,8		-0,3		
10	18,6		-0,1		

1. $\bar{l} = \frac{18{,}4+18{,}7+18{,}3+18{,}6+18{,}7+18{,}3+18{,}4+18{,}1+18{,}8+18{,}6}{10} = 18{,}5$ мм;

2. $\Delta\bar{l} = \frac{\sum_{i=1}^{n}|\Delta l_i|}{n} = \frac{1{,}9}{10} = 0{,}19 \approx 0{,}2$ мм;

3. $\text{Å} = \frac{\Delta \bar{l}}{\bar{l}} \cdot 100\,\% = \frac{0{,}2}{18{,}5} \cdot 100\,\% = 1{,}08\ \%$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1.Каковы основные задачи физического учебного опыта – основной формы физического исследования ?
2.Каковы основные источники погрешности измерений ?
3.Какие погрешности называются абсолютными и относительными ? Что они характеризуют ?

Погрешности косвенных измерений .

1.Рассмотрим в начале нахождение абсолютных погрешностей. В тех случаях, когда физическая величина не может быть измерена непосредственно или ее непосредственное измерение затруднительно, прибегают к косвенным измерениям. Например, объем прямоугольного бруска $V = abc$ можно вычислить, измерив длину a, ширину b и высоту c. При измерении величин a , b и c допускаются ошибки Δa , Δb и Δc . Возникает вопрос, как скажутся ошибки отдельных измерений на конечном результате? На этот вопрос можно ответить , доказав предварительно ряд теорем.

Теорема 1. Абсолютная погрешность сумма равна сумме абсолютных погрешностей слагаемых.

Пусть $x = a + b$ (1)

измерив значения a и b, вычислим среднее значение $\bar{a}$ и среднее значение $\bar{b}$

Чтобы получить среднее значение суммы необходимо подставить в формулу (1) среднее значение слагаемых, т.е.

$$x = \bar{a} + \bar{b} \tag{2}$$

В свою очередь

$$a = \bar{a} \pm \Delta a \ ; \ b = \bar{b} \pm \Delta b \ ; \quad x = \bar{x} \pm \Delta x$$

Подставляя их в формулу (1), получим :

$$\bar{x} \pm \Delta x = \bar{a} \pm \Delta a + \bar{b} \pm \Delta b \tag{3}$$

Вычитая из (3) уравнение (2), найдем

$$\pm \Delta x = \pm \Delta a \pm \Delta b$$

Так как в результате обработки неизвестно в какую сторону допущены ошибки

Δa и Δb ,то рассматривают наименее выгодный случай , т.е. знаки выбирают

таким образом, чтобы абсолютная величина Δx была максимальной

$$\Delta x = \pm \Delta a \pm \Delta b$$

Этим правилом следует руководствоваться во всех случаях при выводе формул погрешностей.

Теорема 2. Абсолютная погрешность разности равна сумме абсолютных погрешностей уменьшаемого и вычитаемого .Эта теорема доказывается аналогично. Обе теоремы легко распространить на любое число слагаемых.

Теорема 3. Абсолютная погрешность произведения двух сомножителей равна сумме произведений первого множителя на абсолютную погрешность второго и второго множителя абсолютную погрешность первого.

Пусть $x = a \cdot b$ и $\bar{x} = \bar{a} \cdot \bar{b}$ (4)

Тогда

$$\bar{x} \pm \Delta x = \left(\bar{a} \pm \Delta a\right) \cdot \left(\bar{b} \pm \Delta b\right) = \bar{a} \cdot \bar{b} \pm \Delta b \cdot \bar{a} \pm \bar{b} \cdot \Delta a \pm \Delta a \cdot \Delta b$$

Пренебрегая членом $\Delta a \cdot \Delta b$ второго порядка малости , получим

$$\bar{x} \pm \Delta x = \bar{a} \cdot \bar{b} \pm (\bar{a} \cdot \Delta b + \bar{b} \cdot \Delta a) \qquad (5)$$

Вычисляя из равенства (5) выражение (4) ,имеем :

$$\Delta x = a \cdot \Delta b - b \cdot \Delta a \quad ,$$

что и требовалось доказать .

<u>Следствие 1.</u> Теорема 3 может быть обобщена для случая n множителей , т.е. если

$x = a_1, a_2, \ldots, a_n$,то $\Delta x = a_1 \cdot a_2 \cdot \ldots \cdot a_{n-1} \cdot \Delta a_n + \ldots + a_2 \cdot a_3 \cdot \ldots \cdot a_n \cdot \Delta a_1 + a_1 \cdot a_3 \cdot \ldots \cdot a_n \cdot \Delta a_2$

Предлагаем доказательство сделать самостоятельно, используя метод математической индукции.

<u>Следствие 2.</u> Абсолютная погрешность степени.

Пусть $x = a^n$, тогда

$$\Delta x = n \cdot a^{n-1} \cdot \Delta a$$

Следствие 2 получается из следствия 1 ,если положить $a_1 = a_2 = \ldots = a_n = a$.

Например ,

$$x = a^4; \; \Delta x = 4 \cdot a^3 \cdot \Delta a$$

Следствие 2 оказывается справедливым для любых n .

Теорема 4. Абсолютная погрешность дроби равна сумме произведений знаменателя на абсолютную погрешность числителя и числителя на абсолютную погрешность знаменателя , деленной на квадрат знаменателя .

Если $x = \frac{a}{b}$, то $\Delta x = \frac{b \cdot \Delta a + a \cdot \Delta b}{b^2}$

Доказательство .Пусть x $= \frac{a}{b} = a \cdot b^{-1}$.По теореме 3 имеем

$$\Delta x = \Delta\left[a \cdot \left(b^{-1}\right)\right] = a \cdot \Delta\left(b^{-1}\right) + \left(b^{-1}\right) \cdot \Delta a .$$

Согласно следствию 2 теоремы 3 имеем $\Delta\left(b^{-1}\right) = -1 \cdot b^{-2} \cdot \Delta b$.Подставляя это значение в выражение для Δx ,получим

$$\Delta x = \frac{b \cdot \Delta a + a \cdot \Delta b}{b^2}$$

Из доказанных теорем можно сделать вывод ,что средние абсолютные ошибки

можно находить по правилам дифференцирования ,заменив значок дифференцирования d значком ошибки Δ и выбирая знаки таким образом , чтобы абсолютная величина ошибки была максимальной.

Пример : $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$; $dT = 2\pi\left(\frac{dl}{2g\sqrt{\frac{l}{g}}} - \frac{ldg}{2g^2\sqrt{\frac{l}{g}}}\right)$;

$$\Delta T = \frac{\pi}{g\sqrt{\frac{l}{g}}}\left(\Delta l + \frac{l}{g}\Delta g\right).$$

2.Перейдем к нахождению относительных погрешностей .По определению относительная погрешность равна:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\bar{x}}.$$

С другой стороны

$$d(\ln x) = \frac{dx}{x} \qquad (6)\,, \qquad \text{или}$$

$$d(\ln \bar{x}) = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \qquad (7).$$

Из сопоставления выражений (6) и (7) следует ,что относительную погрешность результата можно найти путем логарифмирования и последующего дифференцирования с заменой значков дифференциала значками ошибки и выбором знаков , таким образом ,чтобы абсолютная величина получаемой относительной ошибки была максимальной.

Пример : $g = \dfrac{4\pi^2 l}{T^2}$; $\ln g = \ln 4 + 2\ln\pi + \ln l - 2\ln T$; $\dfrac{\Delta g}{g} = 2\dfrac{\Delta\pi}{\pi} + \dfrac{\Delta l}{l} + 2\dfrac{\Delta T}{t}$.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Измерение линейных размеров тел штангенциркулем и микрометром

Принадлежности: штангенциркуль, микрометр, металлические пластинки, трубки.

1. **Нониус**. Нониусом называется специальная шкала, дополняющая обычный масштаб и позволяющая повысить точность измерений в 10—20 раз. Линейный нониус представляет собой небольшую линейку, скользящую вдоль основной шкалы (рисунок 1).

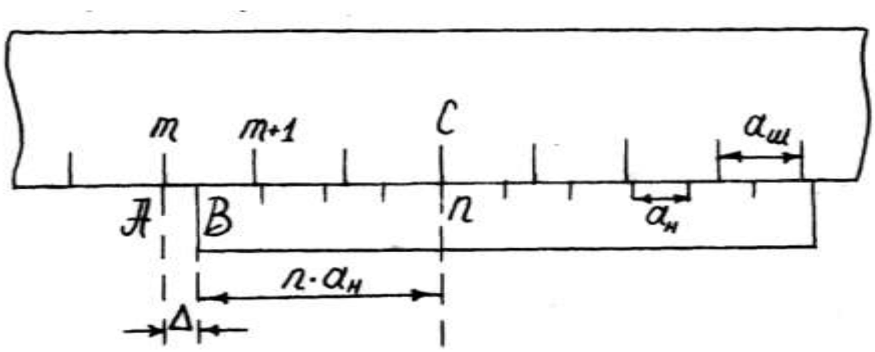


Рис. 1. Устройство нониуса.

Пусть число делений шкалы нониусной линейки равно N, длина одного деления нониуса равна $a_н$, а длина одного деления основной шкалы равна $a_ш$. Нониусы изготавливаются таким образом, чтобы длина N делений нониуса была равна длине kN -1 делений шкалы, где к — целое число, т. е.

$$Na_н = (kN - 1) \cdot a_ш.$$

Измерим длину какого либо предмета с помощью масштабной линейки с нониусом. Пусть начало его совпадает с нулем основной шкалы, а конец находится между m иm + 1 делениями ее, причем n-ое деление нониуса совпадает с каким-то делением шкалы. Длина предмета $l = m \cdot a_ш + \Delta$, где $\Delta = AB$— величина, которую необходимо определить. Из рисунка 1 следует, что отрезок АС, содержащий целое число делений шкалы, равен $AC = n \cdot a_H + \Delta$. Подставим в это выражение значение $a_н$ из уравнения (1), тогда

$$т.\ к.\ a_н = k \cdot a_ш - \frac{a_ш}{N},\ то\ AC = nk \cdot a_ш + \left(\Delta - \frac{n}{N} a_ш\right). \qquad (2)$$

В этом выражении величины n и k — целые числа, значит и величина $n \cdot k \cdot a_ш$ содержит целое число

делений шкалы. Так как n< N,то и $\frac{n}{N} \cdot a_ш > a_ш$. Величина Δ также меньше одного деления, т.е. $\Delta > a_ш$.

Следовательно, и разность $\left(\Delta - \frac{n}{N} \cdot a_ш\right) > a_ш$ также меньше одного деления шкалы. Но, поскольку величина АС, как следует из рисунка, содержит целое число делений $a_ш$,то разность $\Delta - \frac{n}{N} \cdot a_ш$ в уравнении (2) должна быть равна нулю. Тогда $\Delta = \frac{n}{N} \cdot a_ш$. Таким образом, длина предмета

$$l = m \cdot a_ш + \frac{n}{N} \cdot a_ш.$$

Положим m = 0, n = 0, тогда

$$l_0 = \frac{a_ш}{N},\ где$$

l_0 — представляет собой наименьшую величину, которую можно измерить с помощью масштаба с нониусом, и называется величиной отсчета по нониусу или ценой деления нониуса. Из уравнения (4) следует правило пользования линейкой с нониусом.

Измеряемый предмет помещается между нулевыми делениями шкалы и нониуса. Длина предмета равна числу целых делений шкалы, расположенных слева от нулевого деления нониуса, плюс величина отсчета по нониусу, умноженная на номер деления нониуса, совпадающего с некоторым делением шкалы. Погрешность нониуса равна l_0 .

2. **Штангенциркуль**. Штангенциркуль служит для линейных измерений, не требующих высокой точности. Отсчетным приспособлением у всех конструкций штангенциркуля (рисунок 2) служат штанги и линейный нониус. Цена деления основной шкалы штанги (LM) равна обычно 1 мм. Шкала нониуса содержит, как правило, 10 или 20 делений, что позволяет вести замеры с точностью до 0,1 мм и 0,05 мм. Нониус укреплен в подвижной рамке, скользящей вдоль основной шкалы штанги. При нулевом показании инструмента нуль нониуса совпадает с нулевым штрихом

основной шкалы.

3. **Измерение.** Для определения размера тела, губки штангенциркуля АВ раздвигают, помещают между 'ними тело, передвигают подвижную губку В до полного зажатия тела между губками А и В. Против нулевого деления нониуса отсчитывают число целых делений по основной шкале т в мм (помним, что цена деления по основной шкале $a_ш$). Десятые (сотые) доли мм считывают по шкале нониус против того деления n, которое наиболее точно совпадает с произвольным делением основной шкалы (помним, что цена деления

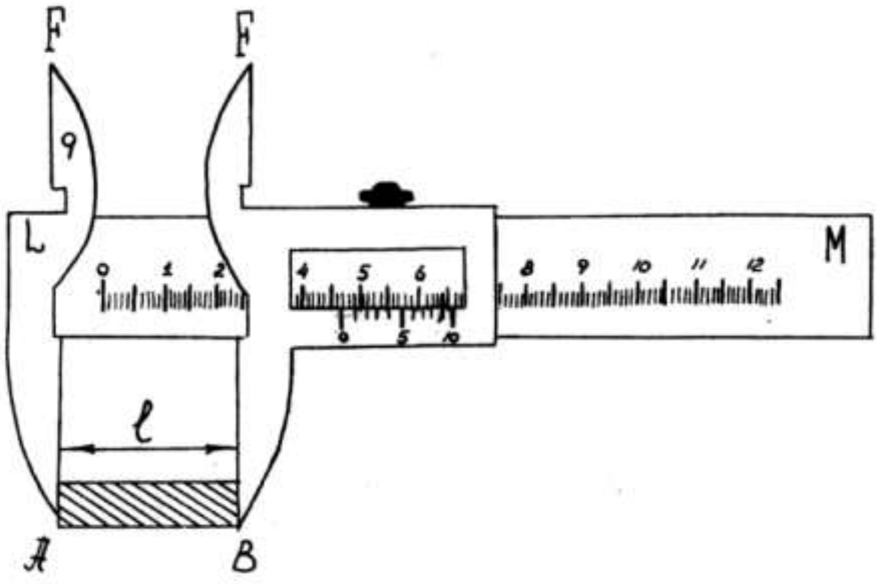


Рис. 2. Штангенциркуль.

нониуса $\frac{a_ш}{N}$, где N—полное число делений нониуса), тогда длина предмета может быть определена по формуле (3). Например, согласно рисунку 2 размер тела, зажатого между губками штангенциркуля может быть определен следующим образом:

$$a_ш = 1 \text{ мм}, \; m = 42, \; \underset{n=8}{N = 10}, \text{ тогда } l = 42 \cdot 1 + 8\frac{1}{10} = 42{,}8 \text{ (мм)}.$$

Рассмотренный пример относится к измерению наружных размеров тела. Для измерения, например, внутреннего диаметра кольца, трубки или внутренних размеров коробки используются верхние части рабочих губок F и F_1. Они раздвигаются до полного прилегания к внутренним стенкам измеряемого объекта, а затем, вышеуказанным путем снимаются показания штангенциркуля со следующей поправкой. На одной из губок инструмента имеется числе 9 (может быть и другое). Это расстояние l_1 между рабочими поверхностями верхних губок штангенциркуля при зажатых до упора бок. Именно эту поправку следует учитывать, прибавляя l_1 к целым миллиметрам в формуле (3), т. е. $l = (m \cdot a_ш + l_1) + n \cdot \frac{a_ш}{N}$ 4.

Микрометр. Микрометр (рисунок 3) состоит из скобы 1, в муфтах которой находятся упор 2 слева и микрометрический винт 3 справа. Винт проходит внутри неподвижной трубки и скреплен с неподвижной трубкой 4, левый срез которой представляет барабанную шкалу , имеющую 50 делений.

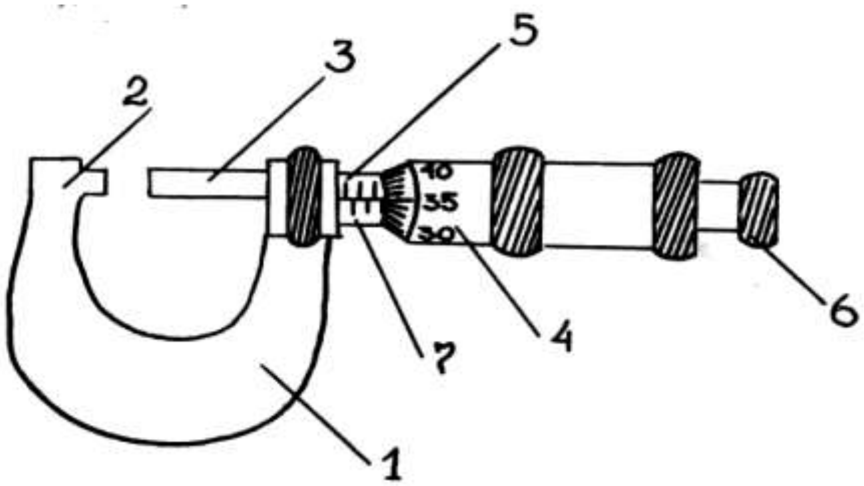


Рис. 3. Микрометр.

5. **Измерения**. При измерении линейных размеров тела, оно зажимается между неподвижным стержнем 2 и подвижным торцом 3 микрометрического винта. Микровинт вращают, держась за трещетку 6, вместе с микровинтом вращается корпус барабана, перемещаясь при этом поступательно относительно стержня. Отсчет ведется по горизонтальной шкале и по шкале барабана. Горизонтальная шкала стержня представляет собой двойную шкалу (5,7)' с ценой деления 0,5 мм , нанесенную по обе стороны продольной черты таким образом, что верхняя 5 сдвинута относительно нижней 7 на половину деления. Цена деления барабана может быть установлена следующим

образом: пусть число делений круговой шкалы барабана равно 50. Шаг микровинта 0,5 мм. Следовательно, одному полному обороту микровинта (и барабана) соответствует линейное перемещение края барабана на 0,5 мм. Цена деления круговой

шкалы $a = \frac{h}{n} = \frac{0{,}5мм}{50} = 0{,}01мм.$

Отсчет производится следующим образом: по горизонтальной шкале стержня отсчитывается размер измеряемого предмета с точностью до 0,5 мм. Сотые доли миллиметра отсчитываются по круговой шкале барабана. Полученные результаты складываются. Число сотых долей соответствует делению шкалы, расположенному против продольной черты на стержне. Пользуясь данной инструкцией ,можно с точностью до 0,01 мм измерять размеры тел, зажатых между 2 и 3. Момент нажатия фиксируется слабым треском в головке (трещетке) 6. После треска вращение 6 бесполезно, а вращение барабана 4 недопустимо, так как это приведет не только к искажению показаний микрометра, но и к его неисправности. .

6. **Выполнение работы**. Объектом измерений в работе является предложенная деталь, предмет правильной геометрической формы и т. д. По указанию преподавателя или по вашему выбору следует измерить микрометром или штангенциркулем многократно один и тот же параметр (внешний или внутренний размер детали, толщину проволоки и т. д.). Полученные результаты занесите в таблицы1 и 2 и произведите математическую обработку их, с целью оценки точности проведенных измерений.

Таблица 1

№№ п/п	D_i(ìì .)	$\overline{D}$(ìì .)	ΔD_i(ìì .)	$\Delta\overline{D}$(ìì .)	Е(%)
1					
2					
…					
10					

Таблица 2

№№ п/п	d_i(*мм.*)	$\bar{d}$(ìì .)	Δd_i(*мм.*)	$\Delta\bar{d}$(ìì .)	E(%)
1					
2					
…					
10					

Контрольные вопросы

1. Что называется нониусом?
2. Как определить цену деления линейного нониуса?
3. Как сконструировать нониус, позволяющий повысить точность измерений с данным масштабом в n+1раз?
4. В каких случаях следует вести измерения штангенциркулем, в каких — микрометром?
5. Какие приборы, снабженные нониусом вы знаете, их назначение?

Лабораторная работа № 3.

Проверка основного уравнения динамики вращательного движения

Принадлежности: маятник Обербека, набор грузов, секундомер, масштабная линейка, штангенциркуль.

1. **Краткая теория**. Вращательное движение характеризуется угловым перемещением точек тела φ, угловой скоростью ω и угловым ускорением β. При вращательном движении все точки тела имеют одинаковую угловую скорость и одинаковое угловое ускорение. Выражая угловое перемещение точки тела за время Δt по дуге ΔS окружности через Δφ и обозначая через r радиус окружности, получим:

$$\Delta S = r \cdot \Delta\varphi.$$

При очень малом угловом перемещении точки тела dφ можно заменить на весьма малую дугу, пройденную точкой, прямолинейным отрезком dS. Тогда

$$dS = r \cdot d\varphi \qquad (1)$$

Это равенство устанавливает связь между линейными и угловыми перемещениями точек вращающего тела. Линейная (υ) и угловая (ω) скорости, линейное (a) и угловое (β) ускорения точек связаны друг с другом соотношениями:

$$\upsilon = \omega \cdot r \qquad a = \beta \cdot r \quad (2)$$

В векторной форме (2) имеют вид:

$$\vec{v} = [\vec{\omega} \cdot \vec{r}], \quad \vec{a} = [\vec{\beta} \cdot \vec{r}].$$

Для определения направления угловой скорости удобно пользоваться правилом правого буравчика. Вектор угловой скорости $\vec{\omega}$ направлен по оси вращения в сторону поступательного движения острия буравчика, когда рукоятку его вращают в направлении вращения тела. Когда направление оси вращения тела остается неизменным, вектор углового ускорения $\vec{\beta}$ при увеличении угловой скорости совпадает с направлением вектора $\vec{\omega}$, а при уменьшении ее вектор направлен в противоположную сторону. Причиной тому следующее. Так как $\beta = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$, то при изменении направления оси

вращения тела вектор $d\vec{\omega}$ не будет совпадать по направлению с вектором. $\vec{\omega}$. Изменение скорости вращательного движения твердого тела, имеющего закрепленную ось вращения, обуславливается лежащей в плоскости, перпендикулярной к оси вращения, тангенциальной составляющей силы, действующей на тело (рисунок 4). При этом угловое ускорение зависит не только от величины этой составляющей силы f_T, но и от кратчайшего расстояния *l* от оси вращения до линии, вдоль которой она действует, т. е. от плеча силы. Поэтому в динамике вращательного движения вместо силы рассматривают момент силы относительно

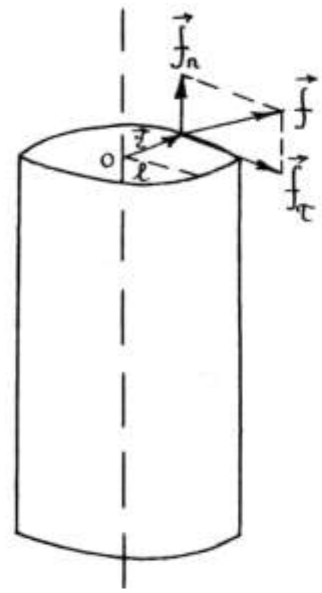


Рис. 4.

оси вращения.

Моментом силы М относительно оси вращения называется вектор, длина которого (т. е. его модуль) численно равна произведению силы на плечо: $M = f \cdot l$. Направление же вектора момента силы определяется по правилу правого буравчика. Если вместо плеча силы *l* воспользоваться радиусом вектора $\vec{r}$ точки приложения силы относительно оси вращения (рисунок 4), то вектор момента силы можно представить в виде векторного произведения:

$$\vec{M} = [\vec{r} \cdot \vec{f}].$$

Угловое ускорение вращающегося тела зависит не только от массы вращающегося тела, но и от распределения массы относительно оси вращения. Поэтому в динамике вращательного движения вместо массы рассматривают момент инерции тела относительно оси вращения.

Моментом инерции материальной точки относительно оси вращения называется скалярная величина $\Delta m_i r_i^2$, равная произведению массы материальной точки на квадрат расстояния ее от оси вращения. Сумму моментов инерции всех точек тела относительно оси вращения называют моментом инерции тела относительно этой же оси: $I = \sum \Delta m_i r_i^2$.Таким образом, если основной закон динамики поступательного движения — второй закон Ньютона: $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$,то по аналогии с ним и на основании выше изложенного можно записать:

$$\vec{M} = I \cdot \vec{\beta}.$$

Это и есть формула, выражающая основной закон динамики вращательного движения тела.

2. **Описание установки и контрольные формулы**. Маятник Обербека схематически изображен на рисунке 5. Он состоит из четырех стержней и двух шкивов различного радиуса R_i и R_2, укрепленных на одной горизонтальной оси. По стержням могут перемещаться и закрепляться в нужном положении четыре груза одинаковой массы. При помощи грузов различной массы, прикрепляемых к концу намотанной на тот или иной шкив нити, маятник может приводиться во вращение. Пренебрегая силами трения, можем записать уравнение вращательного движения маятника

$$I \cdot \beta = M = RT \quad (5)$$

и уравнение поступательного движения (опускания) груза:

$$m\text{-}a = mg—T, \qquad (6)$$

а также уравнение, связывающее ускорения движений

$$a = \beta \cdot R \qquad (7)$$

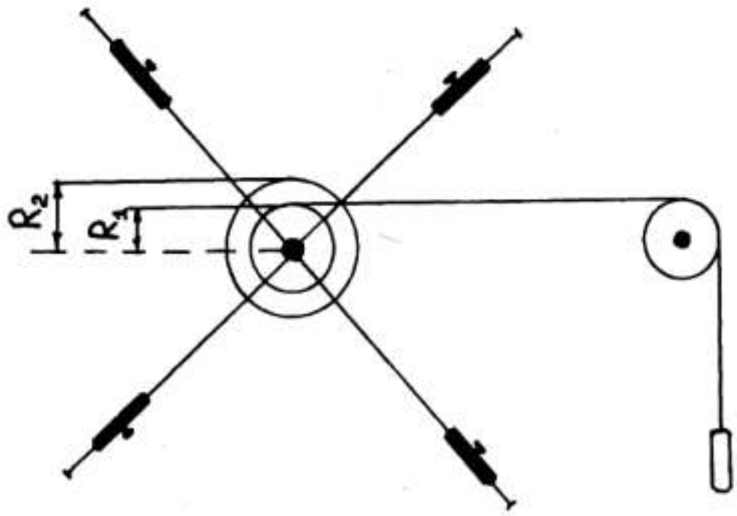


Рис. 5.

В этих формулах R — радиус шкива, T — сила натяжения нити, a — ускорение движения груза на нити, m - масса груза, подвешенного на нити. Из этих уравнений легко получить значение для ускорения

$a = \dfrac{mR^2}{I + mR^2} \cdot g$. Это же ускорение может быть найдено из закона

равноускоренного движения

$$a = \frac{2h}{t^2}\,. \qquad (8)$$

где h — расстояние, проходимое грузом за время t. Для проверки закона (4) рассмотрим следующее условие. Пусть момент инерции I постоянен, а моменты сил различны. Из уравнения (4) имеем

$$\frac{M_1}{\beta_1} = \frac{M_2}{\beta_2} = I. \qquad (9)$$

Уравнения (5—7), (8—9) дают (вывести самостоятельно):

$$m_i R_i^2 (gt_1^2 - 2h) = m_2 R_2^2 (gt_2^2 - 2h) \quad (10)$$

Выполнение этого равенства при подстановке значений физических величин, определяемых экспериментально, доказывает и справедливость закона (4) в пределах ошибок измерений.

3. **Выполнение работы**. **А**. Измерить выбранную высоту опускания платформы с грузами метровой линейкой с точностью до 1 см; **Б**. Измерить радиусы R_1 и R_2 шкивов штангенциркулем , с точностью до 0,1 мм; **В**. Закрепить грузы на стержнях так, чтобы маятник находился в безразличном равновесии или был сбалансирован.

На платформу для грузов кладут грузы массой m_i = 300 — 350 г, нить намотана на шкив меньшего радиуса R_1. Пользуясь секундомером ,измеряют время t_1 опускания платформы с грузом m_1. Время t_1 измеряют не менее пяти раз. Из полученных значений t_{11}, t_{12} ,t_{13}, t_{14}, t_{15} находят среднее арифметическое $\bar{t}_{1cp}$

Нить перебрасывают на другой шкив (большего радиуса R_2), на платформу кладут грузы массой 200 - 250 г и аналогично первому случаю определяют пять раз время опускания платформы с высоты h. Из полученных значений t_{21}, t_{22} ,t_{23}, t_{24}, t_{25} находят среднее арифметическое $\bar{t}_{2cp}$.. Значения $\bar{t}_{1cp}$ и $\bar{t}_{2cp}$ подставляют в уравнение (10) соответственно вместо t_1 и t_2.

Контрольные вопросы и задания.

1. Какие физические величины называются: угловой скоростью и угловым ускорением, моментом силы, моментом инерции тела? Единицы их измерения.

2. Как определить момент инерции тела относительно произвольной оси, если известен момент инерции относительно оси симметрии, параллельной произвольной оси?

3. Вывести соотношение (10).

Литература

Савельев И. В. Курс общей физики. Механика. Молекулярная физика. М.: Наука, 1989. Т. 1. Гл. IV. С. 94—112.

Лабораторная работа №4.

Определение ускорения земного поля тяготения методами математического и физического маятников.

I. Метод математического маятника.

Принадлежности: математический маятник, секундомер.

1. **Краткая теория**. Известно, что положение тела в пространстве можно определить только по отношению к другим телам. Абсолютно твердое тело, с которым жестко связана система координат, снабженная часами и используемая для определения положения в пространстве исследуемых тел в различные моменты времени, называется системой отсчета. Система отсчета, по отношению к которой материальная точка, свободная от внешних воздействий, покоится или движется равномерно и прямолинейно, называется инерциальной системой отсчета. Нарушение этого условия делает систему неинерциальной.

Лабораторная система отсчета, оси координат которой жестко связаны с Землей, неинерциальна из-за суточного вращения Земли. Однако, Земля вращается столь медленно, что максимальное нормальное ускорение точек ее поверхности в суточном вращении не превосходит значения 0,034 м/с^2. Поэтому в большинстве практических задач лабораторную систему отсчета можно считать инерциальной.

Силой тяжести тела называется сила Р, приложенная к телу и равная геометрической сумме силы $F_{тяг}$, тяготения тела к центру Земли и центробежной силы инерции $F_{Ц}$ обусловленной суточным вращением Земли вокруг своей оси (рисунок 6). Величина $F_{тяг}$

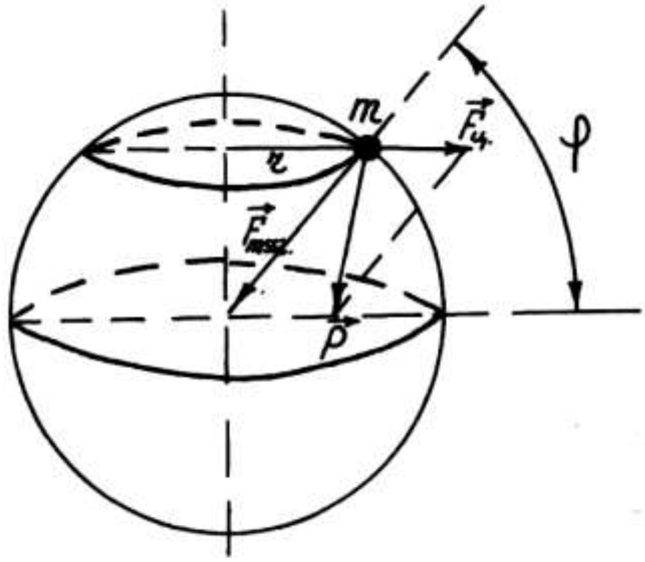


Рис. 6.

определяется из закона всемирного тяготения, а $F_ц = m \cdot r \cdot \omega^2$, где m— масса тела, r — его расстояние от земной оси, ω — угловая скорость вращения Земли. Сила тяжести тела совпадает с силой его тяготения только на полюсах Земли, так как там $F_{цб} = 0$ (потому что r = 0). Наибольшее отличие P от $F_{тяг}$ наблюдается на экваторе, где $F_ц$ — максимальна (так как $r = R_З = max$) и направлена в сторону, противоположную $F_{тяг}$.

Сила тяжести тела почти не зависит от скорости его относительного движения, она пропорциональна массе тела и может быть представлена в виде:

$$\vec{P} = m \cdot \vec{g},$$

где g — ускорение силы тяжести, обусловленное полем тяготения Земли. Величина g изменяется с широтой φ местности так же, как и сила тяжести P. Ускорение g вблизи поверхности Земли изменяется от значения 9,78 м/с2 на экваторе до значения 9,83 м/с2 на полюсах. Это объясняется, кроме суточного вращения Земли вокруг своей оси, еще и сплюснутостью земного шара вдоль оси вращения (полярный радиус Земли равен $R_{пол}$ = 6357 км, а экваториальный $R_{экв.}$= 6378(км). Однако, вклад последнего фактора незначителен. Одним из способов экспериментального определения значения g является метод математического маятника. Прежде рассмотрим некоторые теоретические положения.

Математическим маятником называется материальная точка, подвешенная на нерастяжимой нити и совершающая колебания в вертикальной плоскости под действием силы тяжести (рисунок 7). Когда маятник находится в положении равновесия, сила тяжести Р уравновешивается силой натяжения нити. В отклоненном же положении сила Р и сила натяжения нити действуют на тело под углом друг к другу. Равнодействующая этих сил будет, возвращающая шарик в положение равновесия сила F_B величина которой зависит от угла α . При малых отклонениях маятника движение шарика можем считать прямолинейным. Из рисунка 7 видно, что

$$F_B = P \cdot \sin\alpha$$

Обозначив смещение шарика из положения равновесия через x можем записать $\frac{x}{y} = \sin\alpha$, где l — длина

маятника. Тогда (2) запишется в виде $F_B = \frac{P}{l} \cdot x$. Так как Р и l не изменяются, а сила F_B по направлению всегда противоположна смещению, то можно записать:

$$F_в = -kx = -P \cdot \sin\alpha, \text{ где } k = \frac{P}{l}.$$

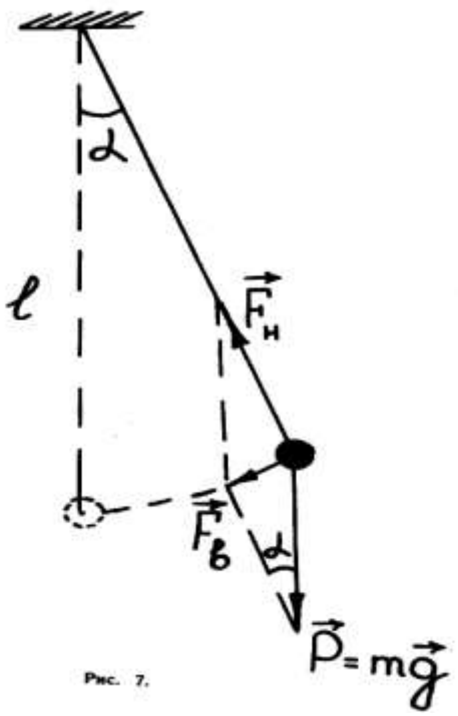


Рис. 7.

Условие (3) говорит о том, что при малых амплитудах колебания маятника являются гармоническими (следует отметить, что ошибка, вызванная допущением равенства $\frac{x}{l} = \sin\alpha$, при значениях α≤ 5°

не превышает 10 $^{-3}$).

Известно, что при гармонических колебаниях отклонение в момент времени t определяется уравнением:

$$x = x_0 \sin\alpha = x_0 \sin\omega t,$$

где x_o — амплитуда колебания, α — фаза колебания, равная углу отклонения на рисунке 8. ω — циклическая частота, выражаемая формулой

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T},$$

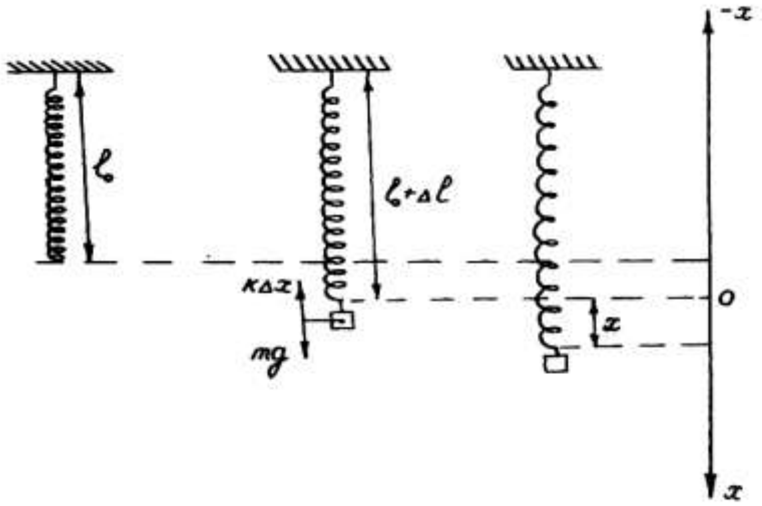
где υ — частота, а Т-период колебания маятника.

Ускорение движения шарика можно определить путем двойного дифференцирования уравнения (4). В результате этого мы будем иметь:

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 x_0 \sin\omega t.$$

Уравнения (4) и (6) дают совместно выражение

$\alpha = -\omega^2 \cdot x$ или, согласно (5), $\alpha = -\frac{4\pi^2}{T^2} \cdot x.$



Согласно второму закону Ньютона

$$F_в = m \cdot a = -m\omega^2 \cdot x = -4\pi^2 m \frac{x}{T^2}.$$

С другой стороны, из (3) имеем:

$$F_в = -kx = -\frac{P}{l} \cdot x = -\frac{mg}{l} \cdot x.$$

Приравнивая правые части (8) и (9), получим формулу для периода колебаний математического маятника

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad ,$$

откуда видно, что период (частота) колебаний математического маятника не зависит от его массы.

2. **Выполнение работы**. Привести маятник в движение, отклонив шар на угол, не превышающий 5°. Колебания должны совершаться в одной плоскости. Пользуясь секундомером определить время /,в течение которого маятник сделает n полных колебаний. Опыт повторить 5 раз так, чтобы число n в каждом опыте составляло от 20 до 100 полных колебаний. Период колебаний T в каждом опыте вычислять из соотношения $T = \frac{t}{n}$ и, согласно (10), получить значение g из окончательной расчетной формулы:

$$g = \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot l.$$

Длина маятника *l* измерена предварительно и значение ее имеется в лаборатории. Экспериментальные данные занести в таблицу и провести математическую обработку результатов, полученных в ходе эксперимента.

№№ п/п	n_i	t_i (с)	T_i (с)	g_i (м/с^2)	$g_{ср}$ (м/с^2)	$\pm g_i$ (м/с^2)	$\Delta g_{ср}$ (м/с^2)	E%

Контрольные вопросы

1. Какая система отсчета называется инерциальной?

2. Объясните зависимость ускорения силы тяжести от географической широты местности.

3. Выведите формулу для периода колебаний математического маятника.

4. Почему угловая амплитуда колебаний маятника не должна превышать 5°?

5. Что называется физическим маятником? Запишите период колебания физического маятника. Что называется приведенной длиной физического маятника?

Литература

Савельев И. В. Курс физики. Механика. Молекулярная физика. М.: Наука, 1989. Т. 1. Гл. 8. §§ 11, 12. С. 44—47, 187—193.

Мякишев Г. Я., Буховцев Б. Б. Курс физики. Учебник для 10 класса средней школы.— М.: Просвещение, 1987. Гл. 1. Механические колебания и волны.

II. Метод физического маятника (метод Бесселя).

Данный метод основан на свойстве сопряженности центра качания и точки подвеса (рис.10): в каждом физическом маятнике существуют две точки, при последовательном подвешивании за которые маятник совершает колебания с одним и тем же периодом. Расстояние между этими точками определяет длину данного маятника.

Если амплитуда колебания маятника мала, то период его колебания может быть определен по формуле:

$$T=2\pi\sqrt{\frac{I}{mga}}\,.$$

По теореме Гюйгенса-Штейнера о переносе осей имеем:

$$I=I_0+ma^2\,,$$

где I_0- момент инерции относительно оси, проходящей через центр масс и параллельной оси качания, I- момент инерции маятника относительно произвольной оси, a- расстояние от данной оси до центра масс. На основании этого можно записать:

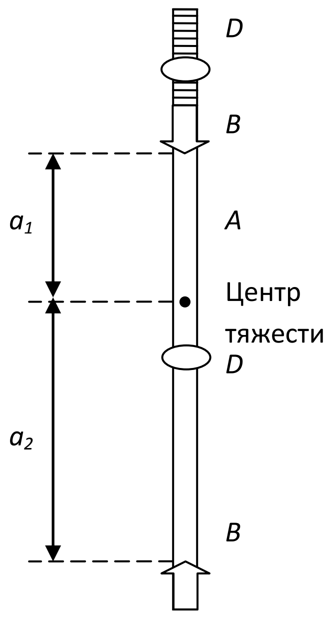


Рис.11. Общий вид физического (оборотного) маятника

$$T_1=2\pi\sqrt{\frac{I_0+ma_1^2}{mga_1}} \quad \text{и} \quad T_1=2\pi\sqrt{\frac{I_0+ma_2^2}{mga_2}}$$

Из этих уравнений   имеем:

$T_1^2 g a_1$-$T_2^2 g a_2$=4 π² $(a_1^2 - a_2^2)$

Преобразование последней формулы позволяет получить:

g=4$\pi^2(a_1^2 - a_2^2)$/ $T_1^2 a_1$-$T_2^2 a_2$

При равенстве периодов (T_1= T_2) данное уравнение можно переписать в виде:

g=4π^2L/T^2,

где L=a_1+a_2-приведенная длина физического маятника.

Описание прибора.

Общий вид оборотного (физического) маятника представлен на рис. 11. Он состоит из металлического стержня А длиной порядка 1 м, на поверхность которого нанесены миллиметровые деления. Опорные призмы В закреплены жестко на данном стержне. Чечевица Д находится на конце стержня (не между призмами) и может перемещаться вдоль стержня по миллиметровой шкале. Расстояние между призмами В постоянно и выбито на стержне.

1. пользуясь секундомером, определите периоды колебания данного маятника при различных положениях чечевицы Д на шкале (от 7-го до 12-го деления.) В предложенном интервале периоды колебания маятника определите, перемещая чечевицу Д (шаг 5 мм). Вы получите 11 значений периода колебания маятника. Период колебания определяется из расчета, что за определенное время маятник совершил 100 колебаний.
2. Полученные данные занесите в таблицу.
3. Переверните маятник, заставьте его совершать колебания относительно второй опорной призмы В. В тех же пределах, с таким же шагом определите периоды колебаний маятника (из расчета 100 колебаний).
4. Полученные данные занесите в таблицу.
5. В одних координатных осях постройте графики зависимости периода колебания Т от положения чечевицы на миллиметровой шкале

стержня(в случае, когда колебания происходят относительно одной и другой опорных призм). Графики должны пересечься в одной точке.

6. Зная координаты этой точки, определите еще раз периоды колебания маятника, в случае, когда он совершает колебания относительно одной, а затем второй опорной призм В. Находят его среднее арифметическое значение.
7. Зная период колебания Т, длину $L=a_1+a_2$, определите ускорение свободного падения g.
8. Сравните результаты, полученные в ходе эксперимента (случай 1 и 2).

Литература:

Савельев И.В. Курс физики. Механика. Молекулярная физика.-М.:Наука,1989.Т.1.Гл.8.-С.44-47,187-193.

Лабораторная работа №10.

Определение коэффициента объемного расширения керосина Дюлонга и Пти.

Принадлежности: лабораторная установка, электрическая плитка, колба, термометр.

Метод Дюлонга и Пти, усовершенствованный Ренью, основан на использовании равновесия двух столбов жидкости, в сообщающихся сосудах. В этом случае высоты столбов жидкости обратно пропорциональны плотностям жидкости в них (вывести самостоятельно).

Для определения коэффициента объемного расширения керосина воспользуемся следующей лабораторной установкой (см. рис. 15).

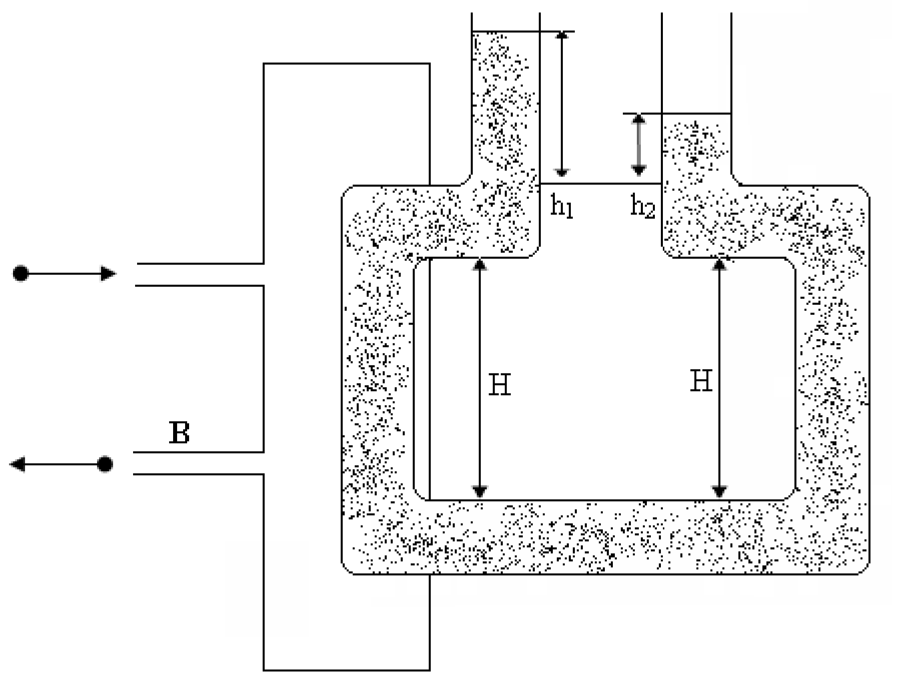


Рис. 15 Лабораторная установка.

Керосин заполняет сообщающиеся сосуды, открытые концы которых для удобства отсчета разности уровней в них жидкости сведены вместе. Одно из вертикальных колен установки помещено в термостат В, а другое находится при комнатной температуре. Через термостат пропускается вода заданной температуры, благодаря чему в сообщающихся сосудах изменяется плотность керосина и устанавливается определенная разность его уровней в коленах. Подсчитаем разность давлений в вертикальных коленах лабораторной установки, она равна

$\Delta P = H(\rho_2 - \rho_1)g$,

где ρ_2- плотность жидкости в более теплом колене,

ρ_1- плотность жидкости в холодном колене.

Данная разность давлений ΔP уравновешивается разностью уровней (h_1-h_2) и равна

$\Delta P = H(h_1 - h_2)\rho_2 g$,

Можно записать следующее равенство:

$H(\rho_2 - \rho_1)g = (h_1 - h_2)\rho_2 g$.

Так как объем жидкости V_t при некоторой температуре t связан с объемом той же жидкости V_0 при температуре t_0 известным соотношением

$V_1 = V_0(1+\alpha\Delta t)$,

где $\Delta t = t - t_0$-разность температур,

α- коэффициент теплового расширения жидкости, то подобное равенство можно переписать в виде:

$V_1 / V_0 = (1+\alpha\Delta t)$,

где Δt-разность температур в вертикальных коленах установки, или

$\rho_2 / \rho_1 = (1+\alpha\Delta t)$.

Подставим полученный результат в исходное равенство:

$H(\rho_2 - \rho_1)g = (h_1 - h_2)\rho_2 g$

и получим:

$H\alpha\Delta t = (h_1 - h_2)(1+\alpha\Delta t)$.

Из последнего равенства легко получить следующую расчетную формулу:

$\alpha=(h_1-h_2)/[H-(h_1-h_2)]\ \Delta t.$

Ход выполнения работы.

Для определения коэффициента объемного расширения керосина α необходимо измерить разность уровней (h_1-h_2) жидкости в обоих коленах, высоту вертикального колена H и разность температур жидкости в обоих коленах Δ t.Результаты измерений занести в таблицу и произвести их соответствующую математическую обработку.

Литература:

Савельев И.В. Курс физики. Механика. молекулярная физика.-М.:Наука,1989. Т.1.Гл.10.-С.276-250.

Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика.-М.:Наука,1976.Гл.VII, С.308-316.

Лабораторная работа № 9.

Определение отношения Cp/Cv.

I метод Клемана и Дезорма.

Принадлежности: экспериментальная установка.

1. Краткая теория. Удельной теплоемкостью вещества С называется количество теплоты, необходимое для изменения температуры единицы массы этого вещества на один градус. Согласно этому определению

$$C=\frac{\Delta Q}{m\cdot\Delta t}\left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{к}}\right] \quad (1)$$

Когда веществом является газ, то изменение его температуры может происходить при постоянном давлении (p=const), а также при постоянном объеме (V= const). При этом различают удельные теплоемкости этого газа: Cp- при постоянном давлении, Cv-при постоянном объеме. Отношение этих параметров является важной термодинамической характеристикой. В частности, оно входит (как мы покажем ниже) в уравнении Пуассона, которое описывает адиабатическое расширение (сжатие) газа.

Рассмотрим основные определения и положения термодинамики к идеальному газу. Газ называется идеальным, если он удовлетворяет следующим условиям: а) молекулы имеют исчезающее малые размеры (по сравнению с расстояниями между ними); б) при взаимных столкновениях и соударениях со стенками сосуда молекулы ведут себя как абсолютно упругие шарики; в) силы взаимодействия между молекулами пренебрежимо малы, так как они проявляются лишь в моменты столкновений, а число последних очень незначительно. Воздух, в первом приближении, можно считать идеальным газом при температурах близких к комнатной, низких давлениях (порядка 760 мм/рт/ст) и незначительной влажности.

Термодинамическое состояние газа определяется тремя величинами: давлением P, объемом V и температурой T, называемыми основными параметрами состояния. Изменение двух или сразу всех трех параметров состояния системы называется термодинамическим процессом. Различают изобарический, изотермический, изохорический, адиабатный и политропный процессы.

Все термодинамические процессы сопровождаются обменом или превращением энергии. При этом всегда выполняется первый закон термодинамики, который в применении к замкнутой системе гласит: тепловая энергия Q, подведенная к системе, расходуется на повышение ее внутренней энергии ΔU и на работу A, производимую системой против внешних сил:

$$\Delta Q=\Delta U+A \quad (2)$$

или в дифференциальной форме:

$$dQ=dU+dA \quad (3)$$

первый закон термодинамики для случая идеального газа имеет следующий вид:

$$\Delta Q=\Delta U+P\Delta V \quad (4)$$

или в дифференциальной форме:

$$dQ=dU+PdV, \quad (5)$$

откуда

$$Q=\Delta U+\int_{V1}^{V2} PdV \quad (6)$$

Применение первого закона термодинамики к изопроцессам.

Внутренняя энергия системы состоит из суммы кинетической энергии и потенциальной ее молекул. Изменение внутренней энергии равно количеству теплоты, полученному в результате теплообмена, если газ не затрачивает работы на расширение, т. е. если процесс изохорический (объем остается постоянным), то Cv=const и, следовательно, имеем:

$$\Delta Q=\Delta U= Cv\ m \cdot\Delta T \text{ или } \Delta U= Cv\ m\ \Delta T \quad (7)$$

где Cv-удельная теплоемкость газа при постоянном объеме. Для изобарического процесса будем иметь:

$$\Delta Q= Cp\ m \cdot\Delta T \quad (8)$$

Совершенная при расширении газа работа (с учетом уравнения состояния $PV=\frac{m}{\mu}RT$) равна

$$A=\int_{V1}^{V2} PdV$$

или, поскольку P=const, то

$$A=P\int_{V1}^{V2} PdV$$

и, следовательно,

$$A=P\Delta V=\frac{m}{\mu}R\Delta T. \quad (9)$$

Из вышеизложенного можно получить выражения, связывающие Cp и Cv: именно выражения (7,8,9) позволяют записать первый закон термодинамики в виде:

$$Cp\ m\ \Delta T = Cv\ m\ \Delta T +\frac{m}{\mu}R\Delta T, \text{ или, т.к. } Cp^{/}=Cp\cdot\mu;\ Cv^{/}= Cv\cdot\mu. \text{ то}$$

$$Cp^{/}\frac{m}{\mu}\Delta T= Cv^{/}\frac{m}{\mu}\Delta T+\frac{m}{\mu}R\Delta T \text{ или } Cp^{/}= Cv^{/}+R;\ Cp^{/}- Cv^{/}=R \quad (10)$$

При постоянной температуре происходит изотермическое изменение состояния, которое описывается законом Бойля-Мариотта:

$PV= const,$ (11)

$P\sim\frac{1}{V}$. Так как T= const, то внутренняя энергия газа U=Cv mT остается постоянной и первый закон термодинамики сводится к соотношению dQ=dA=PdV, интегрирование которого дает:

$$A=\int_{V1}^{V2} PdV$$

С учетом уравнения состояния идеального газа $PV=\frac{m}{\mu}RT$ получим:

$A=\frac{m}{\mu}RT\int_{V1}^{V2}\frac{dV}{V}$. Результат интегрирования запишется в виде:

$$A=\frac{m}{\mu}RTl_n\frac{V_2}{V_1}. \quad (12)$$

Из (11) следует справедливость следующих выражений:

$$A_1=P_1V_1l_n\frac{V_2}{V_1}; \quad A_2=P_2V_2l_n\frac{V_2}{V_1}. \quad (13)$$

Заменяя в (11) отношение объемов отношением давлений, получим:

$$A_1=P_1V_1l_n\frac{P_2}{P_1}; \quad A_2=P_2V_2l_n\frac{P_2}{P_1}. \quad (14)$$

Подробнее рассмотрим адиабатический процесс, который протекает без теплообмена с окружающей средой, т. е. при полной теплоизоляции, dQ=0. В этом случае первый закон термодинамики запишется в виде: O=dU+PdV. Поскольку dU= Cv m dT (согласно 7), P=$\frac{m}{\mu}\ \frac{\mathrm{RT}}{V}$ (уравнение состояния), то в результате подстановки получим – Cv m dT=$\frac{m}{\mu}\ \frac{\mathrm{RT}dV}{v}$. Подставляя значение R из (10), после преобразования получаем

– Cv m $\frac{\mathrm{dT}}{\mathrm{T}}$=(Cp$^{/}$- Cv$^{/}$)$\frac{dV}{V}$. Интегрирование дает

$$-Cv^{/}\int_{T_1}^{T_2}\frac{dT}{T}=(Cp^{/}-Cv^{/})\int_{T_1}^{T_2}\frac{dV}{V}$$

$$\text{или}\quad -Cv^{/}\ln\frac{T_2}{T_1}=(Cp^{/}-Cv^{/})\ln\frac{V_2}{V_1}$$

Это можно переписать в виде:

$$\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{C_v^{/}}=\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{C_p^{/}-C_v^{/}}\ \text{или}\ \frac{T_1}{T_2}=\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{C_p^{/}-C_v^{/}}.$$

Если P_1,T_1,V_1- параметры начального состояния газа,

P_2,T_2,V_2-параметры конечного состояния, а $\gamma=\frac{C_p^{/}}{C_v^{/}}$ - показатель адиабаты, то получаем выражение:

$$\frac{T_1}{T_2}=\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1}\ \text{или}\ TV^{\gamma-1}=\mathrm{const},\qquad (15)$$

являющееся уравнением Пуассона. На основании вышеизложенного, выражение (15) можно представить и в другом виде (используя уравнение состояния):

$$\frac{T_1}{T_2}=\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\text{или}\ T^{\gamma}P^{1-\gamma}=\mathrm{const}.\qquad (16)$$

Приравнивая правые части (15) и (16), получим:

$$\frac{P_1}{P_2}=\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma}\ \text{или}\ PV^{\gamma}=\mathrm{const},\qquad (17)$$

Теперь несложно выразить работу, совершенную при адиабатическом расширении газа, применив первое начало термодинамики:

A=-ΔU; ΔU= Cv m (T_2-T_1);

$$A = -\,Cv\,m(T_2\text{-}T_1) = -\,Cv\,m(T_1\text{-}T_2) = \frac{C_p^/ - C_v^/}{C_p^/ - C_v^/} \cdot Cv\,m(T_1\text{-}T_2).$$

Учитывая, что $C_p^/ - C_v^/ = R$ и $\frac{C_p^/}{C_v^/} = \gamma$, получаем: ($C_v^/ = Cv\,\mu$)

$$A = R\frac{C_v}{C_p^/ - C_v^/}\,m(T_1\text{-}T_2) = \frac{R}{\gamma-1}\frac{m}{\mu}\cdot(T_1\text{-}T_2)$$

и, следовательно,

$$A = \frac{mR}{(\gamma-1)\mu}(T_1\text{-}T_2). \qquad (18)$$

Итак, если возможен беспрепятственный теплообмен системы с окружающей средой, т.е. Δ T=0, то протекающий процесс называется изотермическим. Если теплообмен с окружающей средой отсутствует т. е. ΔQ=0, то процесс называется адиабатическим. Процессы, занимающие промежуточное положение между этими крайними случаями, не существующими на практике, называются политропными. Это процессы, при которых происходит частичный теплообмен с окружающей средой.

Если законы изотермического и адиабатического процессов изображаются формулами (11) и (17) соответственно, то закон политропного процесса имеет вид:

где $1<n<\gamma$ $\quad PV^n=const, \qquad (19)$

Изотермический и адиабатический процессы можно рассматривать как частные случаи политропного процесса, для которых $n=1$ и $n=\gamma$. Проанализировав выражения для изохорического (16) и изобарического (15) законов можно легко убедиться в том, что и они также являются частными случаями политропного процесса, а именно они справедливы при значениях показателя политропны $n=\infty$(для изохорического) и $n=0$ (для изобарического).

2.Описание экспериментальной установки и термодинамических процессов.

Описание экспериментальной установки . Установка (см.рисунок 11) состоит из стеклянного баллона *А,* соединенных с ним трехходового крана *К* и водяного манометра *В.* Сосуд *А* через кран *К* присоединен к резиновой груше *С*. Кран *К*, в зависимости от его положения, позволяет:

- нагнетать воздух в сосуд (положение 1),

- изолировать сосуд от поступления воздуха (положение 2),

- осуществлять сообщение полости сосуда с атмосферой (положение 3).

В данной работе необходимо определить значение $\gamma = C_p / C_v$ для воздуха методом, который предложили Клеман и Дезорм в 1819 г. В стеклянный баллон *А* грушей *С* через кран *К*, установленный в положении 1, нагнетается некоторое количество воздуха до давления превышающего атмосферное P_o. Это избыточное давление h измеряется манометром *В*. При этом в баллоне *А* исследуемый воздух находится при комнатной температуре T_1 и давлении $P_1 = Po + h$.

Откроем кран *К* (положение 3). Давление газа начнет сравниваться с атмосферным давлением, а его температура сначала несколько понизится из-за быстрого (адиабатического) расширения, а затем снова начнет приближаться к комнатной температуре. Ввиду того, что теплопроводность стенок баллона *А* (стекла) мала, а диаметр трубки, соединяющей при помощи крана *К* полость баллона с атмосферой, велик, то равновесие по давлению устанавливается значительно быстрее, чем по температуре, т. е. $\Delta t_p << \Delta t_T$, где через Δt_p, Δt_T обозначены соответственно времена выравнивания давления и температуры.

Пусть кран *К* был открыт в течение промежутка времени Δt такого, что $\Delta t_T >> \Delta t >> \Delta t_p$. В этом случае процесс расширения воздуха оказывается почти адиабатическим, подчиняющимся закону Пуассона: $PV^{\gamma} = const.$(17) Переходя в данном уравнении к переменным Р и Т (с помощью уравнения состояния), найдем, что для адиабатического процесса

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{j-1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\gamma} \quad (16)$$

В конце адиабатического расширения давление P_2 равно атмосферному Po, а температура T_2 оказывается несколько ниже комнатной

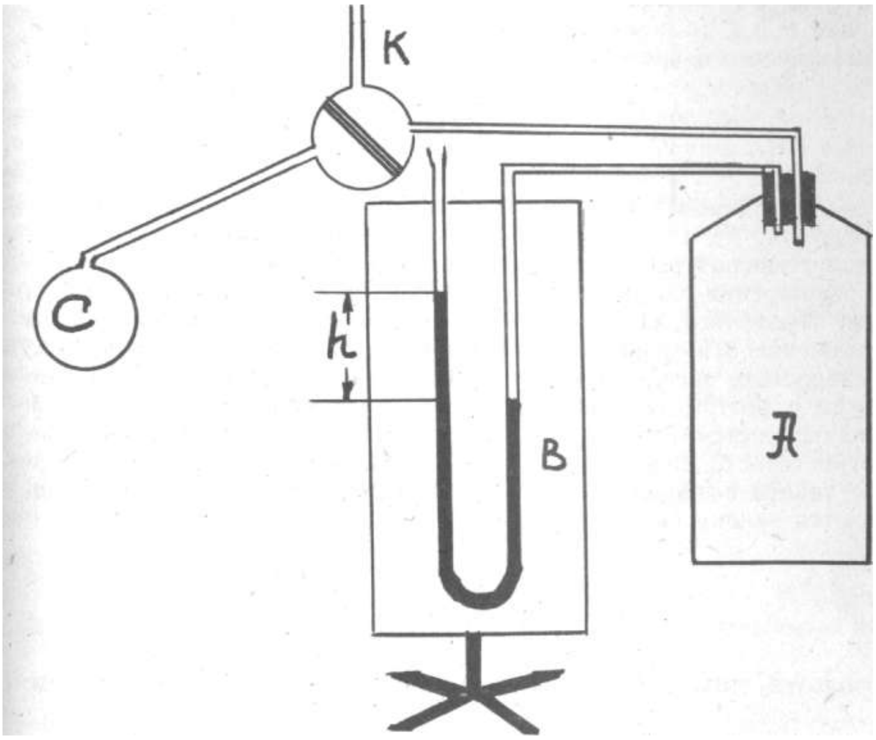


Рис.13. Лабораторная установка.

температуры T_1 (температура газа понижается, так как работа расширения совершается за счет убыли внутренней энергии газа). После того, как кран *К* вновь отключает баллон от атмосферы (положение 2), происходит медленное изохорное нагревание газа со скоростью, определяемой теплопроводностью стеклянных стенок. Вместе с ростом температуры растет и давление газа. За время $\Delta\tau \approx \Delta t$, система достигает равновесия и установившаяся температура газа T_3 становится равной комнатной температуре T_1. Процесс такого выравнивания температуры пр закрытом кране подчиняется закону Гей-Люссака:

$$\frac{P_2}{T_2}=\frac{P_3}{T_3}=\frac{P_3}{T_1}.$$

Используя этот закон, отношение температур $\frac{T_1}{T_2}$ из (16), найдем:

$$\left(\frac{P_3}{P_2}\right)^{\gamma} ==\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\gamma-1}.$$

Решим это уравнение относительно γ:

$$\gamma=\left(l_n\frac{P_1}{P_2}\right)/\left(l_n\frac{P_1}{P_3}\right)=\left(l_n\frac{P_1}{P_0}\right)/\left(l_n\frac{P_1}{P_3}\right).$$

В нашем случае давления P_1 и P_2 отличаются от P_0 и последнее выражение (20) можно существенно упростить. Введем обозначения

$P_1=P_0+h_1$; $P_3=P_0+h_2$.

Разлагая логарифмы в ряд и пренебрегая членами второго порядка малости, получим:

$\gamma=[l_n\frac{P_{1+h_1}}{P_0}]/[l_n(P_0+h_1)- l_n(P_0+h_2)]= [l_n(1+\frac{h_1}{P_0})]/[l_n(1+\frac{h_1}{P_0})- l_n(1+\frac{h_2}{P_0})=h_1/h_1-h_2$. (21)

Выполнение работы. Ознакомиться с устройством крана *К* .. Поставив кран в положение «1», осторожно вдувают в сосуд *А* воздух. Когда разность уровней воды в манометре достигнет 15—25 см, кран переводят в положение «2». После этого, когда давление установится, производят первый отсчет разности уровней в манометре h_1. Поворотом крана в положение «3» дают возможность сообщаться полости сосуда с атмосферой в течение короткого промежутка времени (1-2 с), при этом происходит выравнивание уровней в коленах манометра. Вновь переводят кран в положение «2». Через некоторое время $\Delta\tau \approx \Delta t$ установится разность уровней в коленах манометра h_2. Значения h_1 и h_2 заносят в таблицу. Опыт следует повторить не менее 8—10 раз, каждый раз несколько изменяя величину h_1. Для каждой пары значений h_1 и h_2 по формуле

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}$$

определяют величину γ и проводят математическую обработку результатов в соответствии с теорией ошибок.

№ п/п	h_1 (м)	h_2 (м)	$\gamma_i=C_p/C_v$	$\pm\Delta\gamma_i$	E%
1. … 10.					

2. Метод стоячей звуковой волны.

Принадлежности: лабораторная установка.

Для определения отношения C_p/C_v воспользуемся следующей установкой (см. рис. 15).

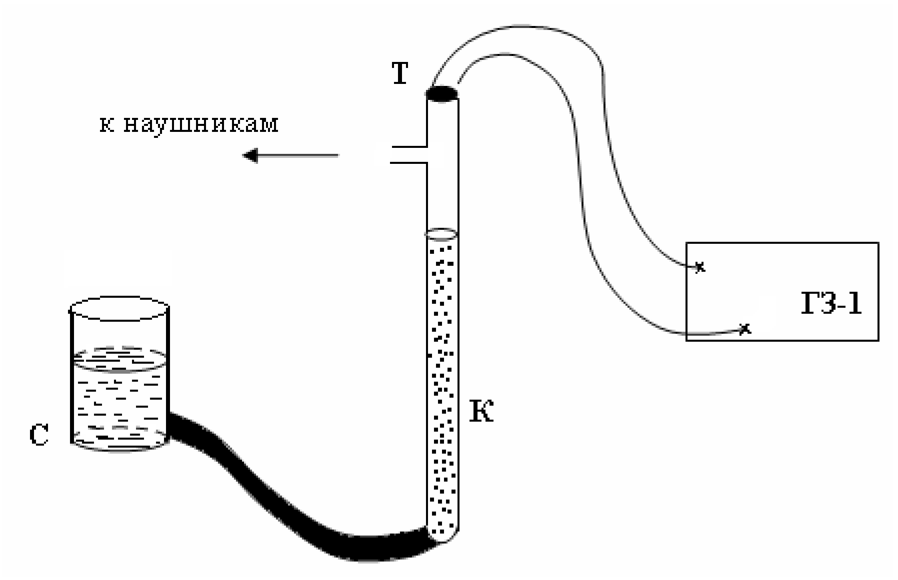


Рис. 14. Лабораторная установка.

Здесь **К** – длинная трубка с водой с миллиметровой шкалой, сообщающаяся резиновым шлангом с сосудом **С**, к верхнему торцу которой прикреплен микрофон, обращенный к трубке мембраной **Т**. Трубка соединена с наушниками. Катушка электромагнита микрофона **Т** соединена со звуковым генератором **ЗГ.**

Когда возбужденный генератором ток протекает через катушку микрофона, его мембрана начинает совершать вынужденные колебания. Воздушные звуковые волны, распространяясь в трубке **К**, отражаются от поверхности воды. Изменяя уровень воды в сосуде (путем его перемещения вниз или вверх) добиваемся максимального звучания (резонанса). Длину звуковой волны **λ** вычислим через замер расстояния **Ŀ**, на которое должен переместиться столб воды в трубке, при переходе от одной точки максимального звучания к другой:

$$Ŀ = \lambda/2,$$

где λ – длина звуковой волны. Так как скорость распространения звуковой волны

$$\upsilon = 2\,\pi\nu,$$

где ν – частота звуковой волны, то по следующей формуле можно определить показатель адиабаты $\gamma = C_p / C_v$:

$$C_p / C_v = \gamma = \upsilon^2\ \mu / RT,$$

где μ – молярная масса воздуха, μ = 0,029 кг/моль,

R – универсальная газовая постоянная, R = 8,31 Дж/моль К,

T – температура в лаборатории по шкале Кельвина.

Результаты измерений занести в таблицу, провести математическую обработку полученных результатов.

Сравнить результаты определения отношения теплоемкостей C_p / C_v , полученные двумя способами и сделать вывод.

Контрольные вопросы и задания.

1. Что называется теплоемкостью вещества?
2. Что называется удельной теплоемкостью вещества? Ее разновидности, их физический смысл, единицы измерения.
3. Какой газ называется идеальным? При каких условиях реализуется модель идеального газа?
4. Описать термодинамические процессы (изопроцессы, адиабатический и политропный). Графики этих процессов.
5. Уравнение состояния, уравнение Менделеева-Клайперона.
6. Первый закон термодинамики и его применение к изопроцессам.
7. Показать, что изотермический, изобарический, изохорический и адиабатический процессы являются частными случаями политропного процесса.
8. С какими процессами мы имеем дело при выполнении данной лабораторной работы?
9. Выведите формулу (21).

Литература.

Савельев И.В. Курс физики. Механика. Молекулярная физика. М.; Наука, 1989. Т.1, гл. 10. с.227-250.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6.

Определение влажности воздуха при помощи психрометра.

Принадлежности: психрометр Ассмана, барометр, лупа.

Окружающий нас атмосферный воздух вследствие испарения воды с поверхности водоемов и растительных покровов всегда содержит в себе водяные пары. Испарение с открытой поверхности жидкости происходит до тех пор, пока вся жидкость не испарится.

Представим себе теперь, что жидкость находится в закрытом сосуде. В таком сосуде одновременно с процессом парообразования происходит и обратный процесс — превращение пара в жидкость. Часть молекул пара вследствие теплового движения, приблизившись к поверхности жидкости, возвращается в жидкость. Однако вначале число молекул, вылетающих из жидкости, будет больше, чем число молекул, возвращающихся обратно в жидкость. Поэтому плотность пара в сосуде будет постепенно увеличиваться. С увеличением плотности пара увеличится и число его молекул, попадающих обратно в жидкость. Наконец наступит такой момент, начиная с которого число молекул, вылетающих из жидкости в единицу времени, окажется равным числу молекул, возвращающихся обратно в жидкость. С этого момента число молекул пара над жидкостью становится постоянным. Наступает так называемое динамическое (подвижное) равновесие между паром и жидкостью. Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называется насыщающим или насыщенным паром.

Насыщенный пар обладает следующими свойствами:

- давление насыщенного пара возрастает с увеличением его температуры;
- давление насыщенного пара данной жидкости при данной температуре есть величина постоянная.

Если в пространстве, содержащем пары какой-либо жидкости, может происходить испарение этой жидкости, то пар в этом пространстве называется ненасыщенным.

На основании сказанного в атмосфере практически всегда содержится ненасыщенный водяной пар. Чем больше водяных паров находится в определенном объеме воздуха, тем ближе пар к состоянию насыщения. С другой стороны, чем выше температура воздуха, тем большее количество водяных паров потребуется для его насыщения. В зависимости от количества паров, находящихся при данной температуре в атмосфере, воздух бывает различной степени влажности. Определение влажности имеет огромное значение при исследовании различных явлений в атмосфере для некоторых видов производства, соблюдения гигиены, хранения товаров и т. д. Для оценки степени влажности вводятся следующие ее характеристики:

Максимальная влажность. Максимальное количество водяного пара, которое может находиться в 1 м^3 воздуха при определенной температуре, называется максимальной влажностью или количеством насыщенного пара φ_{max}.

$$\varphi_{max}=\frac{\text{Максимальная возможная масса водяного пара в воздухе}}{\text{Объем влажного воздуха}}$$

Абсолютная влажность — это количество водяного пара, фактически содержащееся в 1 м^3.

$$\varphi=\frac{\text{Масса содержащегося в воздухе водяного пара}}{\text{Объем влажного воздуха}}$$

Единицей измерения φ_{max} и φ является в системе «СИ» кг/м^3, но обычно используется единица г/см^3.

Относительная влажность — это отношение абсолютной влажности φ к максимальной φ_{max}, измеряется в процентах (%).

$$r=\frac{\text{Абсолютная влажность}}{\text{Максимальная влажность}}\cdot 100\%=\frac{\varphi}{\varphi_{max}}\cdot 100\% \quad (1)$$

Точкой росы называется такая температура, при охлаждении до которой начинается конденсация воды, содержащейся во влажном воздухе (образование росы). Конденсирующийся пар выступает в виде росы на поверхности твердых тел. Если таковых недостаточно, то в присутствии центров конденсации (пыли) образуется туман.

Так как максимальная влажность φ_{max} зависит от температуры, то относительная влажность меняется при изменении температуры, даже если абсолютная влажность остается неизменной. При охлаждении до точки росы относительная влажность достигает 100%.

Абсолютную влажность модно характеризовать иначе, указывая парциальное давление водяного пара, содержащегося в воздухе, часто называемое упругостью пара и выражаемое в мм. рт. ст. Ее можно рассчитать из следующих рассуждений.

Масса 1 м^3 сухого воздуха про 0°С при давлении 760 мм. рт. ст. равна 1293 г. На основании уравнения Клайперона масса 1 м^3 воздуха при температуре t° C при давлении P мм. рт. ст. будет равна $\frac{1293}{1+\alpha t}\cdot\frac{P}{760}$ г, где 1/273 грод$^{-1}$ коэффициент расширения воздуха. Подсчитано, что плотность водяного пара по отношению к плотности воздуха при одинаковых давлениях и температуре равна 0,622. Применяя и к водяному пару уравнение Клайперона (что справедливо лишь для паров далеких от насыщения), получим для 1 м^3 водяного пара

$$\varphi=\frac{1293\cdot 0{,}622}{760}\cdot\frac{P}{1+\alpha t}=1{,}06\frac{P}{1+\alpha t} \quad (2)$$

Пользуясь этим выражением можно определить абсолютную влажность воздуха. Значение упругости (парциального давления) P паров воды можно взять из таблицы 5 для комнатной температуры t.

Определение влажности воздуха производится обычно(с использованием табличных данных) методом определения точки россы или психометрическим методом. Рассмотрим метод психрометра, используемый в данной работе.

Пусть два одинаковых термометра находятся в одинаковых потоках воздуха. Показания этих термометров, естественно, должны быть одинаковыми. Если же ртутный баллончик одного из термометров будет все время смочен, например, обернут мокрым батистом, то показания термометров окажутся различными. Благодаря испарению воды с батиста, так называемый «мокрый» термометр показывает температуру более низкую, чем сухой термометр. Чем меньше влажность окружающего воздуха, тем интенсивнее будет испарение и тем ниже показания мокро термометра. Отсчеты по двум температурам дадут разность температур, которая и будет характеризовать влажность воздуха. При установившемся режиме испарения, когда температура мокрого термометра уже установится, приток тепла Q_1 на испарение воды с поверхности термометра.

По закону Ньютона за единицу времени имеем

$$Q_1 = \alpha\,(t - t_1)\cdot S_1,$$

где $(t - t_1)$ – наибольшая разность температур сухого и влажного термометров,

S_1 – поверхность баллончика влажного термометра,

α - коэффициент пропорциональности.

По закону Дальтона (о парциальном давлении) испарение в единицу времени определяется выражением

$$M = c\, S_2\, (P_н - P) / H\ ,$$

где H – атмосферное давление,

$P_н$ – давление насыщенного водяного пара при температуре испаряющейся жидкости (температуре влажного термометра),

P – давление водяного пара, находящегося в воздухе,

c – коэффициент пропорциональности, зависящий от скорости воздушного потока в приборе,

S_2 – площадь поверхности сухого термометра.

Приток тепла извне при этом можно записать

$$Q_2 = M\, Ŀ = c\, Ŀ\, S_2\, (P_н - P) / H, \text{ где}$$

Ŀ – удельная теплота испарения воды.

При $Q_1 = Q_2$ и $S_1 = S_2$ получаем

$$c\, Ŀ\, (P_н - P) / H = \alpha\, (t - t_1)\text{, откуда}$$

$$P = P_н - A(t - t_1)H,$$

где $A = \alpha / c\,Ŀ$ – постоянная применяемого прибора. Для стандартного аспирационного психрометра значение этой величины определяется экспериментально, оно равно $A = 0{,}000662$. В связи с этим последнее уравнение принимает вид:

$$P = P_н - 6{,}62\ 10^{-4}\ (t - t_1)H.$$

По данной формуле можно посчитать значение абсолютной влажности воздуха в лаборатории. Величину $P_н$ берут из таблицы «Давление и плотность насыщенных паров воды» (таблица 5, Приложение), атмосферное давление Н определяют с помощью барометра, установленного в лаборатории.

Выполнение работы. Учебным прибором для определения относительной влажности является аспирационный (продуваемый) психрометр Ассмана, применяемый в настоящей работе. Он состоит из двух никелированных трубок, защищающих от нагревания лучистой энергией сухой и смоченный термометры, помещенные внутри них. Сквозь трубки при помощи вентилятора, помещенного в верхней части прибора, просасывается с определенной скоростью струя воздуха. До начала опыта куском смоченного в воде батиста плотно обматывается ртутный баллончик одного из термометров психрометра. Эту операцию несложно выполнить, открутив втулку в нижнем конце никелированной трубки. Закрутив втулку, заводят пружинный вентилятор ключом, расположенным в верхней части психрометра (до отказа, но так, чтобы не порвать пружину заводного механизма). Когда показания влажного и сухого термометров установятся (через 4-5 минут), их записывают в таблицу. Вентилятор при этом должен работать полным ходом. При отсчете показаний термометров до десятых долей градуса рекомендуется пользоваться лупой.

В лаборатории имеется «психрометрический график» (номограмма) при помощи которого определяется сразу величина относительной влажности r в процентах. Делается это следующим образом. В верхнем горизонтальном ряду чисел необходимо найти число, дающее температуру t сухого термометра и число, дающего температуру t_1 влажного термометра. Относительная влажность по этой номограмме определяется как точка пересечения вертикальных и наклонных прямых.

Пример: Показания сухого термометра 20°С, а влажного 17°С, т. е. t=20°С, t_1=17°С. На пересечении вертикальной прямой, идущей от числа «20» и наклонной прямой, идущей от числа «17», находим точку соответствующую относительной влажности 74%.

Полученное значение r в % заносят в соответствующую графу таблицы.

Чтобы не пачкать номограмму, рекомендуем:

- пользоваться линейкой или прямолинейным краем листа бумаги;
- не наносить на график точек и других пометок (особенно ручкой) в местах пересечения линий.

Дата	Показания сухого термометра	Показания мокрого термометра	Относительная влажность воздуха в комнате	Абсолютная влажность в комнате
	t°C	**t_1°C**	**r %**	**φ мм рт. ст.**

Для определения абсолютной влажности φ используется формула (4). Величину $P_н$ следует взять из таблицы 5 при температуре t_1. Значение Н берут из показаний барометра. Разность ($t - t_1$) берется из выше расположенной таблицы. Полученный результат записывается в последнюю графу данной таблицы (т.к. P=φ). Если теперь из таблицы 5 величину давления $P_н$ насыщенного пара при температуре окружающего воздуха (по покащаниям сухого термометра) t, то согласно формуле (1), легко получить значение относительной влажности r:

$$r=\frac{\varphi}{\varphi_{max}}\cdot 100\%=\frac{\varphi}{P_H}\cdot 100\% \quad (5)$$

Вычисление по формуле (5) значение r выразить в процентах и сравнить со значением относительной влажности, полученной с помощью номограммы.

Контрольные вопросы и задания.

1. Каким является водяной пар, находящийся в воздухе, при температуре выше точки росы? При температуре ниже точки росы?
2. Оба термометра Ассмана показывают одинаковую температуру. Какова относительная влажность воздуха (в %)?
3. По формуле (2) вычислите абсолютную влажность воздуха, используя данные, полученные в ходе выполнения лабораторной работы. Сравните полученный результат со значением φ, вычисленным по формуле (4).

Литература.

1.Буховцев Б.Б.,Климонтович Ю.Л., Мякишев Г.Я. Физика. Физика: Учебник для 9 класса средней школы.-М.:Просвещение,1986. Гл.5.С.76-85.

2.Физика: Учебник для 10 класса школы с углубленным изучением физики / О.Ф.Кабардин, В.А.Орлов, Э.Е.Эвенчик и др.; Под ред. А.А.Пинского.- 7 изд.-М.: Просвещение, 2002.- 415с.

Лабораторная работа № 5.

Определение коэффициента внутреннего трения жидкости по методу Стокса.

Принадлежности: стеклянный цилиндр с жидкостью (глицерин) и передвигающимися метками на наружной поверхности, стальные шарики малого диаметра, секундомер, масштабная линейка, штангенциркуль, микрометр, магнит на нити.

1. **Краткая теория.** Вязкость или внутреннее трение-это свойство газов и жидкостей оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой. Вязкость твердых тел обладает рядом специфических особенностей и рассматривается обычно отдельно.

Течение жидкостей при наличии внутреннего трения, но не сопровождающееся образованием вихрей, называется ламинарным. Внутреннее трение возникает в жидкости вследствие взаимодействия молекул. В жидкости молекула может проникнуть слой лишь при образовании в нем полости, достаточной для перескакивания туда молекулы. На образование полости (на «рыхление» жидкости) расходуется так называемая энергия активации вязкого течения. Эта энергия уменьшается с ростом температуры и понижения давления. Строгой теории вязкости жидкостей еще нет. На практике широко применяют ряд эмпирических и полуэмпирических формул, достаточно хорошо отражающих зависимость вязкости отдельных классов жидкостей и растворов от температуры и химического состава. Если в вязкую жидкость опустить твердую пластинку и медленно ее вытягивать, то можно наблюдать картину, изображенную на рисунке 10. Прилегающая к пластине часть жидкости прилипает к ней и движется с той же скоростью υ, что и пластина. Следующие части жидкости тоже приводятся в движение, но скорости их тем меньше, чем дальше они находятся от пластины. Область в объеме жидкости, на которую распространяется возмущение, называется пограничным слоем D.

Основной закон вязкого течения был установлен И. Ньютоном в 1687 году:

$$F=\eta\frac{\Delta \upsilon}{\Delta x}S,$$

где F-сила, вызывающая сдвиг слоев жидкости, равная по величине, но противоположная по направлению, силе сопротивления $F_{т.р.}$,

$\frac{\Delta \upsilon}{\Delta x}$ -градиент скорости в области рассматриваемой части пограничного слоя, S-поверхность пластины (с обеих сторон) контактирующая с жидкостью. Коэффициент пропорциональности η называется динамической вязкостью. Величина, обратная ей, $\alpha=1/\eta$, называется текучестью. Наряду с динамической вязкостью рассматривают еще кинематическую вязкость, как отношение $\eta/\rho=\gamma$, где ρ- плотность вещества (жидкости).

Слоистое движение имеет место в пограничном слое, созданном внутренним трением. Но его можно получить лишь при достаточно малых скоростях. При больших скоростях движение в пограничном слое становится турбулентным. Турбулентностью называется сильно завихряющееся перемешивание пограничного слоя. Турбулентность увеличивает вязкость жидкости и значение силы сопротивления.

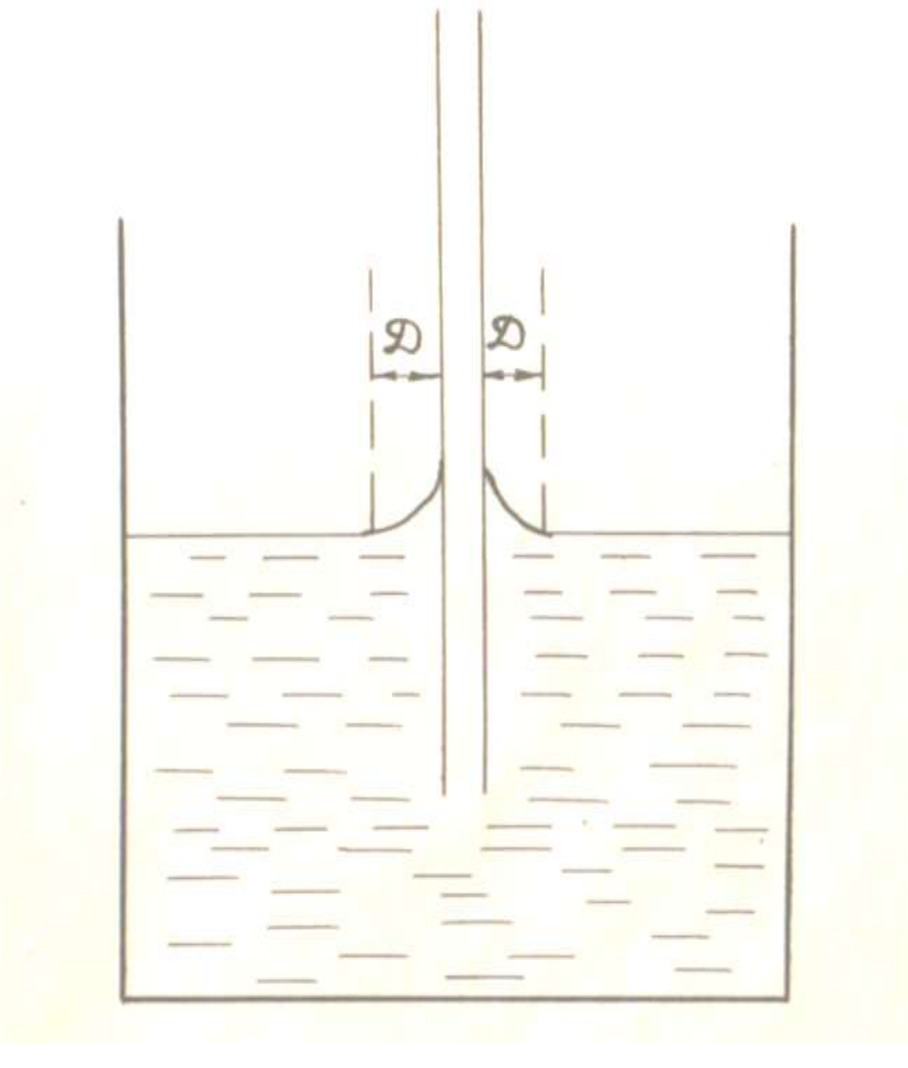


Рис. 10.

Переход от ламинарного течения к турбулентному в пограничном слое определяется «критическим» значением отношения

$$R_e=\frac{\text{работа ускорения}}{\text{работа трения}}=\frac{l\upsilon\rho}{\eta}, \quad (2)$$

где -длина, определяющая размер тела(например, радиус трубы или поперечный размер обтекаемого тела), υ- среднее значение скорости потока относительно твердого тела, ρ- плотность жидкости, η-коэффициент вязкости. Число R_e введено английским физиком Рейнольдсом в 1883 году и называется числом Рейнольдса. Малые числа Рейнольдса соответствуют преобладанию работы трения, большие-преобладанию работы ускорения. Идеальной жидкости без трения соответствует $R_e=\infty$. «Критические» значения R_e, вызывающие турбулентность можно определить только экспериментально. В гладких трубах R_e больше 1160. Для случая движения сферического тела в безграничной среде при малых значениях числа Рейнольдса ($R_e<<1$) английский физик Стокс теоретически вычислил значение силы сопротивления

$$F_{тр.}=6\pi r\eta\upsilon, \quad (3)$$

где r-радиус тела (шарика). Для измерения значения коэффициента вязкости η Стокс предложил использовать изменение скорости равномерно падающего в среде тела. Пусть небольшой шарик падает в столбе жидкости. На шарик действуют три силы: сила тяжести, равная $\frac{4}{3}\pi r^3\rho g$, Архимедова сила $\frac{4}{3}\pi r^3\rho_0 g$ и сила сопротивления $F_{тр.}$ Уравнение движения шарика запишется в виде:

$$m\frac{dv}{dt}=\frac{4}{3}\pi r^3(\rho-\rho_0)g-6\pi r\eta\upsilon. \quad (4)$$

Первое время шарик движется ускоренно. Но первый член в правой части равенства (4) остается постоянным, а второй увеличивается с ростом скорости. Благодаря этому разность между ними при некотором значении υ обращается в нуль. Далее шарик падает равномерно со скоростью υ. При таком движении

$$\frac{4}{3}\pi r^3(\rho-\rho_0)g-6\pi r\eta\upsilon=0, \quad (5)$$

$$\text{тогда } \eta=\frac{2}{9}\ \frac{\rho-\rho_0}{v}\, g\, r^2. \quad (6)$$

Таким образом, зная скорость установившегося движения v , плотность шарика и плотность жидкости (соответственно ρ и ρ_0), радиус шарика r и ускорение свободного падения g в данном месте, можно по формуле (6) определить значение коэффициента вязкости жидкости.

Следует отметить, что формула (6) является не совсем точной, так как при ее выводе не было учтено то обстоятельство, что шарик падая вниз, вытесняет жидкость. Вследствие этого создается поток жидкости вверх и возникает дополнительная сила. При учете этой силы формула (6) для цилиндрического сосуда принимает вид:

$$\eta=\frac{2}{9}\ \frac{\rho-s_0}{v}\cdot\frac{g\,r^2}{1+2{,}4\,r/R}, \quad (7)$$

где R-внутренний радиус сосуда с жидкостью. При соотношении $r/R\approx 0{,}1$ различие в значениях η полученных по формулам (6) и (7), составляет около 25 %. В реальных условиях рекомендуется проводить вычисления по формуле (7), так как отношение r/R от 0,05 до 0,1.

2. Выполнение работы.

Прибор для определения вязкости по методу Стокса представляет собой стеклянный сосуд с испытываемой жидкостью (цилиндр). На цилиндре имеются метки. Верхняя метка означает начало равномерного движения шарика (рисунок 11). Рекомендуется следующий порядок проведения работы.

1. Измерить диаметры применяемых шариков микрометром (3-5 шариков).
2. Измерить штангенциркулем внутренний диаметр R цилиндра с жидкостью. Из таблицы взять значения ρ и ρ_0 для материалов шарика и жидкости.
3. Определить и измерить расстояния l_1,l_2, … масштабной линейкой. Эти размеры и значения времен t_1, t_2, … их прохождения шариком занести в таблицу.
4. Опыт проводить вдвоем. Один опускает шарик при помощи пинцета в цилиндр как можно ближе к его оси. Второй (наблюдатель) располагает глаз напротив верхней метки, чтобы она сливалась в одну прямую. В момент прохождения шариком через данную метку наблюдатель пускает в ход секундомер и располагает глаз напротив второй, выбранной заранее метки. В момент прохождения шарика через нее останавливает секундомер.
5. Для удобства формулу (7) представим в виде:

$$\eta=\left[\frac{2}{9}(\rho-\rho_0)g\right]\cdot\left[\frac{r^2}{1+2{,}4\,r/R}\right]\cdot\frac{12}{v}, \qquad (7^{//})$$

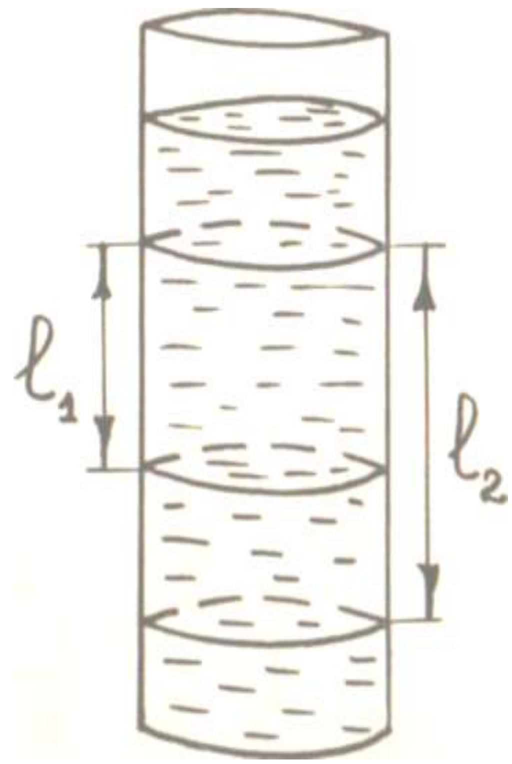


Рис.11.

где значение первого множителя в правой части от опыта к опыту не меняется. Тогда, учитывая, что

$$\frac{2}{9}(\rho-\rho_0)g=a=const, \quad (8)$$

можно (7°) записать в виде:

$$\eta=a\cdot\frac{r^2}{1+2{,}4\,r/R}\cdot\frac{t}{l}, \qquad (9)$$

Если опыты выполняются с шариками одинакового диаметра, то в (7°) от опыта к опыту остается неизменным и значение второго множителя, т.е.

$$\frac{r^2}{1+2{,}4\,r/R}=b=const. \qquad (10)$$

С учетом этого (9) перепишется в виде:

$$\eta= a\cdot b\cdot\frac{t}{l}. \quad (11)$$

Итак, имея значения ρ, ρ_0 и g – взятые из справочных таблиц, и r и R-измеренные экспериментально по формулам (8) и (10) рассчитывают значения a и b в единицах одной системы («СИ») и заносят в таблицу 1. Вычислив не менее трех значений η проводят математическую обработку полученных результатов.

№ п/п	**a**	**b**	**l(м)**	**t(с)**	**$\eta(\frac{Н\cdot с}{м^2})$**	**$\pm\Delta\eta(\frac{Н\cdot с}{м^2})$**
1						
2						
3						

$\eta_{ср}$= $\Delta\eta_{\ ср}$= E=

Примечание 1.При проведении опытов с различными по диаметру шариками значение η рассчитывать по формуле (9).

2.При необходимости повторить опыт с одним и тем же шариком, последний можно достать со дна сосуда при помощи магнита, привязанного к нити и находящегося внутри сосуда с жидкостью.

3. Вычисление значения η соответствуют комнатной температуре.

Контрольные вопросы и задания.

1. Чем обусловлены внутреннее и внешнее трения в жидкостях?
2. Что такое пограничный слой, градиент скорости? Записать и объяснить формулу, выражающую основной закон вязкого трения.
3. Что такое динамическая и кинематическая вязкости?
4. Каков смысл числа Рейнольдса?
5. С учетом сил, действующих на шарик, вывести формулу для расчета коэффициента вязкости жидкости.
6. Как изменится η с изменением температуры, почему?

Литература

Савельев И.В. Курс физики. Механика. Молекулярная физика.- М.:Наука, 1989. С.38-39,131-147.

Лабораторная работа № 7.

Определение коэффициента линейного расширения твердых тел.

Принадлежности: нагревательный прибор со стрелочным микрометром, штангенциркуль, стержни из различных материалов (сталь, латунь, медь, алюминий, стекло), комнатный термометр, пинцет, стеклянные пробирки, вода комнатной температуры в колбе.

1.Краткая теория. Изменение размеров твердых, жидких и газообразных тел при нагревании связано с проявлением сил взаимодействия между структурными частицами тела. Из молекулярно-кинетической теории (МКТ) строения вещества вытекают следующие основные выводы:

—все тела природы состоят из колоссального числа атомов и молекул, находящихся в состоянии беспрестанного хаотического движения;

—между атомами и молекулами действуют силы притяжения и отталкивания;

—средняя величина кинетической энергии хаотически движущихся атомов и молекул определяет температуру тела. Повышение температуры означает увеличение средней скорости хаотического движения частиц, понижение температуры, наоборот,— уменьшение средней скорости этого движения, а, следовательно, и кинетической энергии атомов и молекул.

Эти частицы обладают также потенциальной энергией, зависящей от их взаимного расположения. В первом приближении можно считать, что кинетическая энергия движения частиц, из которых состоит тело, вместе с потенциальной энергией их взаимодействия составляет внутреннюю энергию тела.

Газы. В газах частицы находятся на сравнительно более далеких друг от друга расстояниях, чем в телах твердых и жидких. Следовательно, силы молекулярного взаимодействия в них чрезвычайно малы, поэтому молекулы газа участвуют в поступательном движении. Этим объясняется свойство газа занимать весь предоставленный ему объем. Известно, что молекулы состоят из атомов, в состав которых входят положительно и отрицательно заряженные частички -протоны и электроны. Взаимодействием и движением этих частичек и обусловлены в основном силы молекулярного взаимодействия.

Жидкости. В жидкостях силы притяжения между молекулами вследствие большой близости их весьма значительны. Наличием этих сил объясняется тот факт, что две капли жидкости при соприкосновении сливаются в одну каплю. Связь между молекулами позволяет еще отдельным молекулам «скользить» друг относительно друга. Поэтому жидкость легко меняет свою форму при переливании ее из одного сосуда в другой. Это свойство жидкости называется текучестью. Газы и жидкости (кроме «кристаллических» жидкостей) относятся к изотропным (с одинаковыми физическими свойствами в каждой точке занимаемого объема) и однородным средам.

Твердые тела. В твердых телах молекулы сильно сближены между собой, поэтому силы притяжения между ними очень велики. Этим объясняется факт сохранения своей формы и объема твердым телом. Для изменения же формы и объема твердого тела необходимо приложить к нему значительную силу. Но и в твердых телах частицы не неподвижны: они беспорядочно колеблются около некоторых средних положений. Связь между частицами в твердых телах похожа на связь между шариками при помощи пружинок (рисунок 12). Пружины сопротивляются как растяжению, так и сжатию. Конечно, в действительности никаких пружинок нет, но эта модель связи дает возможность приблизительно верно объяснить результаты опытов.

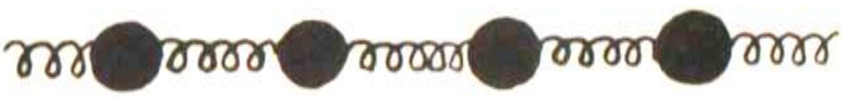


Рис.12.

Осколки стекла нельзя срастить, прикладывая их друг к другу, так как из-за неровности не удается их сблизить на то расстояние, на котором начинают проявляться силы молекулярного притяжения. Но если размягчить стекло нагреванием, то различные стыки можно тесно сблизить друг с другом и стекло спаивается. При нагревании твердого тела увеличивается средняя скорость колебательного движения частиц. При этом увеличиваются средние расстояния между частицами, что приводит к увеличению линейных размеров, а следовательно, и объема тела.

Однако, существуют некоторые анизотропные кристаллы, в которых для определенных направлений замечаются обратные явления, т. е. происходит сокращение линейных размеров тела в этом направлении.

Рассмотрение данного вопроса выходит за рамки учебной программы. Рассмотрим количественные законы изменения размеров твердого тела с изменением его температуры.

Увеличение линейных размеров тела при его нагревании называется тепловым линейным расширением. Опыт показывает, что одно и то же тело расширяется при различных температурах по-разному: при высоких температурах обычно сильнее, чем при низких. Но это различие в расширении столь невелико, что при сравнительно небольших изменениях температуры им можно пренебречь и считать, что изменение размеров тела пропорционально температуре. Различные вещества расширяются по-разному при нагревании: одни сильнее, другие слабее. Железо, например, расширяется сильнее стекла и слабее меди. Для количественной характеристики этого важного теплового свойства тел вводится особая величина**, называемая коэффициентом линейного расширения.**

Пусть твердое тело (проволока, стержень) при температуре O° C имеет длинуl_0, а при температуре t° C его длина становится l_t. Значит, при изменении температуры на t° C длина тела увеличивается на l_t- l_0. Предполагая, что увеличение длины при нагревании на каждый градус идет равномерно, находим, что при нагревании на 1° C вся длина тела увеличилась на $\frac{l_t - l_0}{t}$, а каждая единица длины на величину $\alpha = \frac{l_t - l_0}{l_0 \cdot t}$ (1). где α— коэффициент линейного расширения. Из (1) ясен физический смысл α: коэффициент линейного расширения численно равен удлинению, которое получает при нагревании на 1°C стержень, имевший при 0° C длину, равную единице длины. Измеряется α в град$^{-1}$. Запишем (1) в виде:

$$l_t = l_0(1 + \alpha t) \qquad (2)$$

По этому выражению легко определить длину тела при любой температуре, если известны его первоначальная длина и коэффициент линейного расширения. В таблице 6 приложения приведены коэффициенты линейного расширения некоторых веществ, определенные опытным путем.

Аналогично α, для характеристики объемного расширения вводится коэффициент объемного расширения β:

$$\beta = \frac{V_t - V_0}{V_0 \cdot t}, \quad (3)$$

где V_0-объем тела при 0°C,

V_t-объем при температуре $t°$ C.

Запишем (3) в виде:

$$V_t= V_0(1+\beta t) \quad (4)$$

и установим связь между α и β.

Пусть имеется кубик, ребро которого при 0°С равно 1 см. При нагревании на 1 °С ребро станет равным $(1+\alpha)$ см, а объем кубика увеличивается на β см^3. Можно записать следующее равенство:

$$1+\beta=(1+\alpha)^3, \text{ но } (1+\alpha)^3=1+3\alpha+3\alpha^2+\alpha^3.$$

В последнем выражении слагаемыми α^2 и α^3 можно пренебречь ввиду их малости по сравнению с 1. Тогда будем иметь

$$1+\beta\approx1+3\alpha \text{ или } \beta\approx3\alpha.$$

Таким образом, коэффициент объемного расширения твердого тела равен утроенному коэффициенту линейного расширения.

Из таблицы 6 видно, что коэффициенты расширения твердых тел очень малы. Однако, самые незначительные изменения размеров тел при изменении температуры вызывают появление огромных сил. Например, чтобы увеличить длину Стального стержня сечением в 1 см^2 приблизительно на 0,0005 его первоначальной длины, необходимо приложить силу приблизительно в 10 кН. Но такое же расширение этого стержня получается при нагревании его на 50°С.Поэтому ясно, что расширяясь при нагревании (или сжимаясь при охлаждении) на 50°С, стержень будет оказывать давление около 10 кН/см^2 на те тела, которые будут препятствовать его расширению (сжатию).

2.Выполнение работы. Измерить штангенциркулем длину стержня $l_к$ при комнатной температуре $t_к$ ° С.Погрузить стержень в воду комнатной температуры налитую в пробирку. Опустить пробирку со стержнем в полость электронагревательного прибора. Установить ножку стрелочного манометра в центре верхнего торца стержня и , вращая наружный ободок микрометра, совместить стрелку с нулевым делением шкалы. Убедившись в достаточной вертикальности стержня и устойчивости собранной системы, включить прибор нажатием кнопки на его корпусе. При этом должна загореться индикаторная лампочка. Начиная с этого момента, идет нагревание стержня, а, следовательно, его удлинение, которое четко регистрирует микрометр. Через некоторое время вода в пробирке закипит, и стрелка должна установиться на делении, соответствующем максимальному значению абсолютного удлинения стержня Δl. Убедившись, что стрелка микрометра дальше не движется, нажатием кнопки выключают нагреватель. Температуру стержня t° С, находящегося в кипящей воде находят, зная показания барометра, из таблицы зависимости температуры кипения жидкости от атмосферного давления, а его длине - l_t= $l_к$ +Δl.Имеющиеся данные заносят в таблицу (в строку, соответствующую материалу стержня).

№ п/п	Вещество стержня	$l_к$ мм	$t_к$ ° С	Δl мм	t ° С	l_t= $l_к$ +Δl мм	α град$^{-1}$
1.	сталь						
2.	стекло						
3.	медь						
4.	латунь						
5.	алюминий						

Для получения расчетной формулы запишем выражение (2) для длины l_t, $l_к$ при комнатной температуре и при температуре кипения воды:
$l_к = l_0(1+\alpha\ t_к)$, $l_t = l_0(1+\alpha\ t)$

Разделив эти равенства почленно, исключим длину l_0 стержня при
0° С: $\frac{l_k}{l_t}=\frac{1+\alpha t_к}{1+\alpha t}$.
Решая это уравнение относительно α с учетом того, что l_t- $l_к$ =Δt, получим:
$\alpha=\frac{\Delta l}{l_k \cdot t - l_t \cdot l_k}$ (5)
данная формула и является расчетной. Имея в наличии два — три нагревательных прибора, за короткое время можно измерить значения для нескольких стержней. Когда нет такой возможности, то для того, чтобы не ждать остывания установки рекомендуем:
1. Убрать из нагревателя при помощи пинцета или сухой салфетки горячую пробирку со стержнем.
2. Опустить на ее место другую, заранее подготовленную пробирку с водой, в которую погружен следующий стержень, с предварительным замером его длины.
3. Как можно быстрее и аккуратнее установить микрометр в необходимом исходном рабочем положении и повторить выше описанный опыт.
Полученные в ходе выполнения лабораторной работы результаты сравнить с данными, приведенными в таблице 6 приложения.

Контрольные вопросы и задания

1. Какова природа теплового расширения с точки зрения МКТ строения вещества?

2. Каков физический смысл коэффициентов α и β?
3. Единицы измерения коэффициентов α и β и связь между ними.
4. Объясните особенности теплового расширения воды и ответьте на вопрос: почему лопаются стеклянные сосуды с замерзшей в них водой?
5. Как учитывается тепловое расширение тел в технике, быту? Приведите примеры.

Литература

Грабовский Р. И. Курс физики. М.: ВШ, 1970. С. 174—179, 183—184.

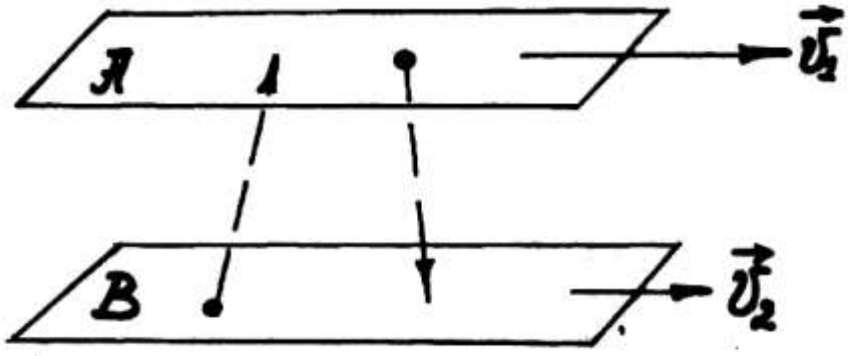
Лабораторная работа № 9.

Определение коэффициента внутреннего трения и длины свободного пробега молекул воздуха

Принадлежности: экспериментальная установка, химический стакан, мензурка, секундомер.

I. Краткая теория. Обычно газ всегда находится в потенциальном поле тяготения Земли. Если бы этого поля не было, то атмосферный воздух рассеялся во Вселенной. С другой стороны, если бы не было теплового движения, то молекулы атмосферного воздуха упали бы на Землю. Тяготение и тепловое движение приводят к стационарному состоянию газа, при котором происходит убыль концентрации и давления газа с возрастанием высоты над Землей. Молекулы газа имеют конечные размеры порядка $d \approx 10^{-10}$ м и при тепловом движении соударяются друг с другом. Между двумя последовательными соударениями молекулы, двигаясь равномерно и прямолинейно, проходят некоторое расстояние, называемое длиной свободного пробега λ. Средней длиной свободного пробега называется среднее расстояние, которое молекула проходит без столкновения. Эта величина λ является характеристикой всей совокупности молекул газа при данных значениях давления P и температуры T.

Как и в жидкостях между слоями газа, движущимися относительно друг друга параллельно и с разными по величине скоростями, проявляются силы трения. Слой, движущийся быстрее, действует с ускоряющей силой на более медленно движущийся слой. Наоборот, медленно движущийся слой тормозит более быстро движущийся слой газа. Причиной вязкости (внутреннего трения) является наложение упорядоченного движения слоев газа с различными скоростями $\acute{\upsilon}$ и теплового хаотического движения молекул со скоростями, зависящими от температуры. Хаотическое движение молекул переносит их из слоя B, движущегося со скоростью $\acute{\upsilon}_2$, в слой A, движущийся со скоростью $\acute{\upsilon}_1$ (рисунок 13). При этом происходит перенос импульсов $m\acute{\upsilon}$ упорядоченного движения молекул. Если $\acute{\upsilon}_1 > \acute{\upsilon}_2$, то



молекулы, раньше бывшие в слое В, оказавшись в слое А, при столкновениях с его молекулами, ускоряют свое упорядоченное движение, а упорядоченно движущиеся молекулы слоя А замедляются. Наоборот, при переходе молекул из быстро движущегося слоя А в слой В, они переносят большие импульсы m $\acute{\upsilon}_1$, и межмолекулярные соударения в слое В ускоряют движение молекул этого слоя. Явление внутреннего трения описывается законом Ньютона:

$$F=\eta\frac{dv}{dx}\cdot S,$$

где F — сила трения,

η — коэффициент внутреннего трения или коэффициент динамической вязкости,

S — площадь соприкасающихся слоев,

$\frac{dv}{dx}$ -градиент скорости.

Коэффициент ηможет быть выражен формулой:

$$\eta=\frac{F}{\frac{dv}{dx}\cdot S},\ (2)$$

т. е. он численно равен силе внутреннего трения, возникающей между двумя слоями жидкости или газа, имеющими площадь соприкосновения, равную единице, при градиенте скорости, равном единице. В системе СИ коэффициент внутреннего трения η измеряется в Н·с/м^2.

Для определения коэффициента внутреннего трения (динамической вязкости) воздуха можно воспользоваться методом истечения воздуха через капилляр. Экспериментальная установка, на которой реализуется этот метод, изображена на рисунке 14.

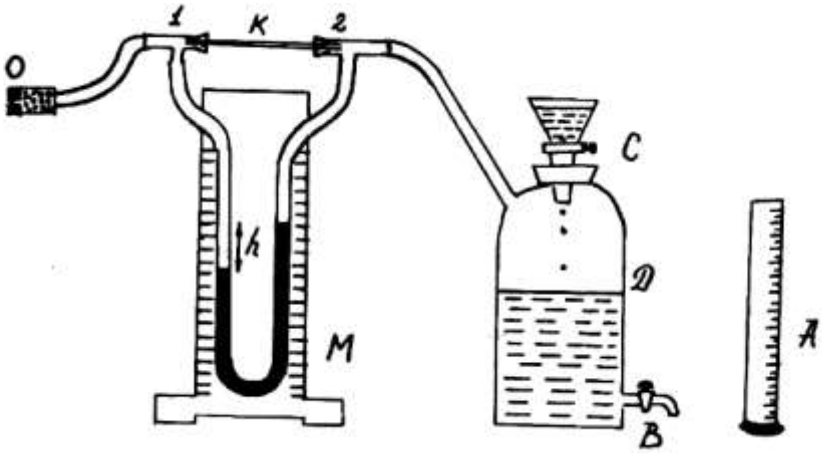


Рис. 14.

2. Описание экспериментальной установки. Один конец капилляра К, через который протекает воздух, с помощью тройника 1 соединяется с осушительной склянкой О и левым коленом манометра М. Склянка О наполнена хлористым кальцием, поглощающим пары воды из протекающего через нее воздуха. Склянка закрыта резиновой пробкой, в которой имеется небольшое отверстие. Если при закрытом кране С воронки открыть кран В, то вследствие вытекания воды, давление в баллоне будет уменьшаться и в него будет засасываться воздух, который пройдет через осушитель и капилляр. Скорости движения бесконечно тонких цилиндрических слоев воздуха, расположенных на различных расстояниях от оси капилляра, будут различны. В случае, если установившееся течение является ламинарным, скорости по сечению капилляра будут распределены по параболическому закону. Если считать, что для слоя, прилегающего к стенкам капилляра, имеет место явление прилипания, то скорость этого слоя равна нулю. Наибольшая скорость будет на осевой линии капилляра. Вследствие наличия градиента скоростей между слоями возникнут силы внутреннего трения. На концах капилляра при протекании через него воздуха будет существовать разность давлений (давление P_1 на входе будет больше давления P_2 на выходе). При установившемся движении воздуха разность давлений будет неизменной, так как в этом случае параметры, характеризующие течение (скорость, давление в различных точках потока), не меняются с течением времени и являются функциями только координат.

Для случая установившегося ламинарного течения вязкой, но несжимаемой жидкости по капилляру радиусом r справедлива формула Гагена-Пуазейля:

$$V_0=\frac{\pi r^4(P_1+P_2)}{8\eta l}\ , \qquad (3)$$

где V_0 — объем жидкости, протекающей через сечение капилляра

за единицу времени,

η— коэффициент динамической вязкости,, P_1 P_2— разность давлений в начале и в конце капилляра,

l — длина капилляра.

Так как в отличие от жидкостей, практически несжимаемых, газы обладают значительной сжимаемостью, закон Гагена-Пуазейля в такой форме записи, строго говоря, неприменим к газам. Лишь при малых разностях давлений, когда P_1-P_2<<P_2 (и соответственно малых скоростях течения газов), сжимаемость газов ничтожно мала и ею можно пренебречь. В этом случае к газам можно применить формулу Гагена-Пуазейля. В данной работе измерения производятся при небольших разностях давлений на концах капилляра, поэтому для расчетов можно пользоваться формулой (3). Объем воздуха, протекающего через сечение капилляра за время τ будет равен:

$$V= V_0\tau=\frac{\pi r^4(P_1+P_2)\cdot\tau}{8\eta l}, \text{ откуда}$$

$$\eta=\frac{\pi r^4(P_1+P_2)\cdot\tau}{8Vl}. \qquad (4)$$

3. Выполнение работы. Убедившись, что в баллоне D имеется вода в количестве примерно 2/3 объема, перекрыть кран C. Подставить под кран B химический стакан и отрегулировать скорость вытекания воды таким образом, чтобы разность уровней спирта в коленах манометра h не превышала 2÷2,5 см и оставалась постоянной. Добившись такого установившегося течения воздуха через капилляр, убрать стакан, а вместо него быстро подставить пустую мензурку A и одновременно включить секундомер. Определить время τ, за которое из баллона вытекло в мензурку 300 $см^3$ (объем V можно выбрать и другим — 200 $см^3$ или 400 $см^3$). При той же разности уровней h спирта в коленах манометра (h — регулируется краником B) измеряют еще два раза время, за которое из баллона вытекает вода объемом 300 $см^3$.

Итак, у экспериментатора имеются следующие данные, входящие в формулу (4): π = 3,14..., r — радиус капилляра, l — его длина (эти размеры указаны на корпусе установки). Значения τ_i определяются по показаниям секундомера (τ_1 , τ_2 и τ_3), из них находится $\tau_{ср}$, значение которого и подставляется в (4).

Разность давлений P_1 -P_2=$p_c gh$, где p_c=0,79-10^3 кг/м^3 (плотность спирта), g = 9,8 м/с^2.

Для сокращения количества арифметических операций на занятиях рациональнее представить (4) уже в виде:

$$\eta=\frac{3{,}14\cdot 0{,}79\cdot 10^3\cdot 9{,}8}{8}\cdot\frac{r^4\cdot h\tau_{\text{ср}}}{Vl}. \quad (5)$$

Подставив значения r , h, l в м, V — в м^3, $\tau_{ср}$ —в с, значение η получится в Н·с/м^2

Для конкретных выбранных значений V (5) можно записать:

1. V =300 см^3= 3·10^{-4} м^3, тогда

$$\eta\approx 10^7\,\frac{r^4\cdot h\tau_{\text{ср}}}{l} \quad (6а)$$

2. V =200 см^3= 2·10^{-4} м^3, тогда

$$\eta\approx 1{,}52\cdot 10^7\,\frac{r^4\cdot h\tau_{\text{ср}}}{l} \quad (6б)$$

3. V =500 см^3= 5·10^{-4} м^3, тогда

$$\eta\approx 0{,}61\cdot 10^7\,\frac{r^4\cdot h\tau_{\text{ср}}}{l} \quad (6в)$$

Важным параметром для газов является длина свободного пробега их молекул λ. Значение ее определяется из формулы:

$$\lambda=\frac{3\eta}{\rho_{\text{в}} v}, \quad (7)$$

где $\rho_{\text{в}}$ = 1,29 кг/м^3 — плотность воздуха при температуре 0° С и давлении 10^5 Па, v — средняя квадратичная скорость теплового движения молекул воздуха, которая определяется по формуле:

$$v=\sqrt{\frac{3RT}{\mu}}. \quad (8)$$

Подставляя в (8) значение температуры воздуха в комнате Т и взятые из таблиц значения универсальной газовой постоянной R==8,31 Дж/моль К молярной массы воздуха ($\mu=29\cdot10^{-3}$ кг/моль, получим значение средней квадратичной скорости теплового движения молекул. Затем по формуле (7) можно вычислить значение средней длины свободного пробега молекул воздуха. Для сверки ниже приводятся табличные данные η и λ соответствующие условиям, близким к нормальным:

$$\eta\approx2\cdot10^{-5}\frac{Н\cdot с}{м^2},\ \lambda=10^{-7}\ м.$$

Контрольные вопросы и задания

1. Чем обусловлена динамическая вязкость газа? Каков физический смысл η и какова зависимость η от температуры?

2. Что называется средней длиной свободного пробега молекул газа? От каких параметров она зависит?

3. Что называется коэффициентом кинематической вязкости?

4. Объясните параболический закон распределения скорости по сечению капилляра и применение к такому течению закона Ньютона.

5. Объясните явления переноса (диффузия, теплопроводность, внутреннее трение) в газах по формуле, описывающим эти явления.

Литература

Савельев И. В. Курс физики. Механика. Молекулярная физика.—М.: Наука, 1989. Т. 1. С. 269—279.

СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ

Таблица 1

Основные единицы измерения физических величин в системе СИ

Длина	Метр (м)
Масса	Килограмм (*кг*)
Время	Секунда (с)
Сила электрического тока	Ампер (А)
Термодинамическая температура	Кельвин (К)
Количество вещества	Моль (моль)

Таблица 2

Основные физические постоянные

Скорость света в вакууме	$C = 3\ 10^{8}$ м / с
Постоянная Планка	$h = 6.63\ 10^{-34}$ Дж с
Постоянная Больцмана	$k = 1{,}38\ 10^{-23}$Дж/К
Число Авагадро	$N_A = 6.03\ 10^{23}$1/моль

Газовая постоянная	R = 8.31 Дж/моль К
Гравитационная постоянная	γ = 6,67 10^{-11}Н $м^2/кг^2$
Ускорение свободного падения	g = 9,82 $м/с^2$ (для Владикавказа)

Таблица 3

Плотности некоторых веществ при температуре 18^oC

Алюминий	2,7 $10^3кг/м^3$	Вода	$10^3кг/м^3$
Железо	7.8 $10^3кг/м^3$	Глицерин	1.26 $10^3кг/м^3$
Медь	8,9 $10^3кг/м^3$	Спирт этиловый	0,78 $10^3кг/м^3$
Свинец	11,35 $10^3кг/м^3$	Касторовое масло	0,97 $10^3кг/м^3$
Сталь	7,8 $10^3кг/м^3$	Керосин	0,8 $10^3кг/м^3$

Таблица 4

Вязкость некоторых жидкостей при температуре 18^0C

Вода	0,15 10^{-2}Н с / $м^2$	Касторовое масло	120 10^{-2}Н с / $м^2$
Глицерин	139,3 10^{-2}Н с / $м^2$	Ртуть	0.159 10^{-2}Н с / $м^2$

Таблица 5

Давление и плотность насыщенных паров воды

t^0, C	P, мм рт ст	$P_н$, мм рт ст	t^0, C	P, мм рт ст	$P_н$, мм рт ст
-5	3,01	3,25	12	10,51	10,67
-4	3,28	3,53	13	11,23	11,36
-3	3,47	3,83	14	11,98	12,08
-2	3,88	4,14	15	12,78	12,84

-1	4,22	4,49	16	13,63	13,65
0	4,58	4,85	17	14,53	14,50
1	4,92	5,20	18	15,47	15,39
2	5,59	5,57	19	16,47	16,32
3	5,68	5,96	20	17,53	17,32
4	6,10	6,37	21	18,65	18,35
5	6,54	6,80	22	19,82	19,44
6	7,01	7,27	23	21,07	20,60
7	7,54	7,79	24	22,38	21,81
8	8.04	8,28	25	23,76	23,07
9	8,61	8,83	26	25,21	24,40
10	9,20	9,41	27	26,74	25,79
11	9,84	10,02	28	28,35	27,26

Таблица 6

Коэффициенты линейного расширения твердых тел

Сталь	1,1 10^{-5} 1/К	Стекло	0.9 10^{-5} 1/К
Медь	1,7 10^{-5} 1/К	Латунь	1,8 10^{-5} 1/К
Алюминий	2,4 10^{-5} 1/К	Железо	1,2 10^{-5} 1/К

Средняя квадратичная скорость

газовых молекул воздуха при $t^0 = 18^0$ C 500 м/с

Длина свободного пробега

молекул воздуха при $t^0 = 18^0$ C 10^{-7}м

Коэффициент внутреннего трения

молекул воздуха при $t^0 = 18^0$ C 2 10^{-5}
Пуаз