

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный технический университет»
(ТвГТУ)

Кафедра прикладной физики

Физический практикум. Механика и молекулярная физика

*Методические указания
к лабораторным работам*

Тверь 2021

УДК 531/534(057.8)
ББК 22.2+22.3я7

Рецензент – доцент кафедры технологии металлов и материаловедения ТвГТУ, к. ф.-м. н., доцент Афанасьева Л.Е.

Физический практикум. Механика и молекулярная физика: метод. указания / сост. В.В. Измайлов, М.В. Новоселова. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2021. 40 с.

Приведены описания экспериментальных установок, методов и порядка проведения лабораторных работ; методики обработки экспериментальных данных. В конце каждого описания работы даны рекомендуемая литература и контрольные вопросы для подготовки к выполнению лабораторной работы и ее защиты. Правила работы с измерительными приборами, основные физические постоянные и некоторые справочные величины вынесены в приложения.

Предназначены для студентов, выполняющих лабораторные работы по разделам «Механика», «Молекулярная физика» курса физики.

Рассмотрены на кафедре прикладной физики и рекомендованы к печати (протокол № 5 от 08.04.2021 г.).

ВВЕДЕНИЕ

Инструкция по проведению занятий в учебных лабораториях

Перед выполнением лабораторных работ все студенты в обязательном порядке должны пройти инструктаж по технике безопасности, о чем расписываются в специальном журнале. Очередность выполнения лабораторных работ и их защиты определяется графиком, имеющимся в лаборатории. Лабораторная работа выполняется группой, состоящей, как правило, не более чем из двух студентов.

Допуск студентов к выполнению лабораторных работ

1. Студент должен иметь тетрадь, предназначенную только для лабораторных работ.

2. Студент должен быть подготовлен к выполнению лабораторных работ как минимум в объеме описания к данной работе.

3. Допуск студентов к выполнению лабораторных работ проводится преподавателем путем опроса.

4. К выполнению текущей лабораторной работы допускаются только те студенты, которые:

а) показали достаточную подготовку к занятиям, а именно: понимание сущности явлений; знание физических величин и законов, которые лежат в основе данной работы; цели работы и принципа устройства измерительных приборов, применяемых в работе;

б) оформили полностью отчет по предыдущей работе;

в) имеют в тетради отчет по выполняемой работе, состоящий из пунктов 1–6 раздела «Требования к отчету по лабораторной работе».

5. Студенты, не допущенные к выполнению лабораторной работы, занимаются в лаборатории подготовкой к ней с целью получить разрешение (допуск) к выполнению работы.

6. Студенты, не допущенные к выполнению лабораторной работы или не явившиеся на занятия, выполняют пропущенную работу в часы дополнительных занятий (в лабораторной тетради студента обязательно должно быть разрешение преподавателя на выполнение этой работы).

7. Экспериментальные данные, полученные студентами в процессе выполнения лабораторной работы, подписываются ведущим преподавателем или методистом.

8. После окончания занятий студент обязан привести приборы и оборудование в исходное положение, убрать рабочее место.

Требования к отчету по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующие разделы:

1. Дата выполнения лабораторной работы, ее номер и название.

2. Цель работы.

3. Приборы и принадлежности.

4. Основные расчетные формулы и законы.

Раздел содержит законы, проверяемые в работе, и формулы, по которым производится расчет экспериментальных результатов.

5. Схема экспериментальной установки.

Раздел содержит рисунок установки (схематический) и ее краткое описание.

6. Таблица(ы) результатов эксперимента.

7. Обработка результатов эксперимента.

В этом разделе представляются численный расчет первого опыта полностью; график (если он требуется) на миллиметровой бумаге размером в тетрадный лист; расчет ошибки результатов эксперимента; расчеты по дополнительным заданиям.

8. Результат работы.

Раздел содержит конечный результат работы, расчетные значения по дополнительным заданиям и выводы по работе.

Защита лабораторных работ

К защите лабораторных работ студент обязан:

1. Предоставить отчет о проделанной работе, выполненный в соответствии с требованиями раздела «Требования к отчету по лабораторной работе».

2. Знать необходимый теоретический материал (как минимум в объеме контрольных вопросов и заданий, которые имеются в данных методических указаниях).

3. Уметь кратко рассказать о содержании проведенного им эксперимента и сделать выводы по работе.

4. Уметь быстро приближенно производить оценку точности своих измерений.

Допуск, отчет и защита лабораторных работ оцениваются преподавателем по рейтинговой системе.

Лабораторная работа № 1–2 ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ НА МАЯТНИКЕ ОБЕРБЕКА

Цели работы: 1. Измерение момента инерции твердого тела и момента сил трения в подшипниках. 2. Проверка выполнения основного закона динамики вращательного движения. 3. Проверка выполнения закона сохранения энергии.

Приборы и принадлежности: маятник Обербека, пять гирь, секундомер, линейка.

Описание экспериментальной установки и методики проведения эксперимента

Для изучения законов вращательного движения в данной работе используется маятник Обербека (рис. 1), который состоит из четырех спиц 2, укрепленных во втулке под прямым углом друг к другу и образующих крестовину маятника. На концах спиц укреплены грузы 3 массой m_0 каждый. Втулка и два шкива 1 различных радиусов закреплены на общей оси. Ось вращается в подшипниках. Таким образом, вся система может совершать вращательное движение вокруг неподвижной горизонтальной оси. На один из шкивов намотана нить 4, к которой привязан подвес с гирями 5. Нить перекинута через блок 6. Если момент силы натяжения нити относительно оси маятника превысит момент сил трения в подшипниках, маятник будет совершать ускоренное вращательное движение, а подвес с гирями – ускоренно опускаться вертикально вниз.

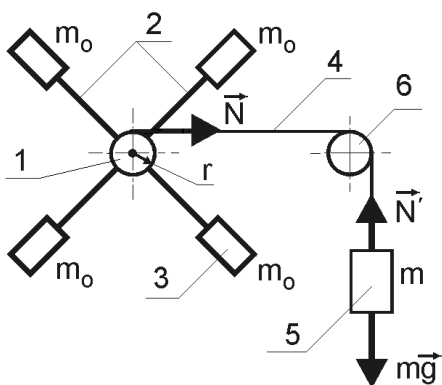


Рис. 1

Основной закон динамики вращательного движения

Пренебрегая сопротивлением воздуха, уравнение движения маятника согласно основному закону динамики вращательного движения представим в виде

$$J\varepsilon = M - M_{\text{тр}}, \quad (1)$$

где J – момент инерции маятника; ε – угловое ускорение; M – момент силы натяжения нити N , приводящей маятник во вращение; $M_{\text{тр}}$ – момент силы трения в подшипниках.

Так как момент сил трения $M_{\text{тр}}$ и момент инерции маятника J постоянны для данной установки, то из уравнения (1) следует линейная зависимость углового ускорения ε от момента M вида

$$\varepsilon = -\frac{M_{\text{тр}}}{J} + \frac{1}{J}M, \quad (2)$$

график которой имеет вид прямой линии (рис. 2).

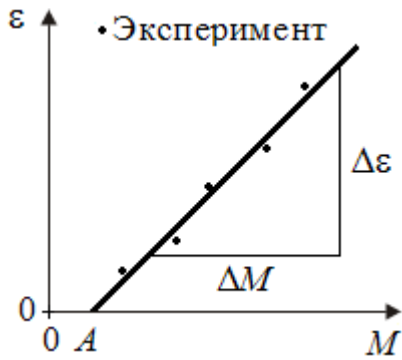


Рис. 2

Таким образом, если построенный по результатам эксперимента график зависимости $\varepsilon(M)$ будет иметь вид прямой линии, то это будет подтверждением выполнения основного закона динамики вращательного движения для маятника Обербека.

Выражение (2) позволяет определить по построенному графику момент инерции маятника J по наклону прямой линии к оси ординат (как отношение приращения момента силы натяжения нити ΔM к соответствующему приращению углового ускорения $\Delta\varepsilon$, см. рис. 2):

$$J = \frac{\Delta M}{\Delta\varepsilon}. \quad (3)$$

Момент сил трения $M_{\text{тр}}$ определяется как отрезок $0A$, отсекаемый линией графика на оси абсцисс (рис. 2).

Для построения графика зависимости $\varepsilon(M)$ необходимо знать угловое ускорение маятника и момент силы натяжения нити. Угловое ускорение может быть найдено через линейное ускорение a подвеса с гирями

$$\varepsilon = \frac{a}{r}, \quad (4)$$

где r – радиус шкива.

Величину линейного ускорения подвеса с гирями можно определить из уравнения

$$a = \frac{2h}{t^2}, \quad (5)$$

где h – высота, на которую опускается подвес с гирями за время t . Величины h и t определяются экспериментально.

Момент силы натяжения нити определяется формулой $M = Nr$. Если пренебречь моментом инерции блока δ и моментом сил трения в его опоре, то по третьему закону Ньютона сила N , приводящая маятник во вращение, равна силе N' , действующей на подвес с гирями (см. рис. 1). Силу N' можно найти из уравнения движения подвеса с гирями массой m . Согласно второму закону Ньютона

$$ma = mg - N',$$

где g – ускорение свободного падения. Отсюда $N = N' = m(g - a)$ и момент силы

$$M = Nr = m(g - a)r. \quad (6)$$

Закон сохранения энергии

Найденные из опыта значения момента инерции маятника J и момента сил трения $M_{\text{тр}}$ позволяют осуществить проверку закона сохранения энергии для системы тел, состоящей из маятника Обербека и подвеса с гирями. При подъеме подвеса с гирями на высоту h системе сообщается потенциальная энергия mgh . Когда подвес с гирями опустится до пола ($h = 0$), эта энергия пе-

рейдет в кинетическую энергию поступательного движения подвеса с гирями $mv^2/2$, кинетическую энергию вращательного движения маятника $J\omega^2/2$ и потратится на работу против сил трения в подшипниках маятника $A = M_{\text{тр}}\varphi$, где $\varphi = h/r$ – угол, на который поворачивается маятник за время опускания подвеса с высоты h . Таким образом, закон сохранения энергии для системы тел, состоящей из маятника Обербека и подвеса с гирями, имеет вид

$$mgh = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2} + M_{\text{тр}}\varphi. \quad (7)$$

Равенство (7) подлежит экспериментальной проверке в данной лабораторной работе.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с указаниями, расположенными на установке. Значение радиуса шкива r записать в табл. 1.

2. Намотать нить на шкив радиусом r (шкив с бóльшим радиусом на данной установке) так, чтобы основание подвеса находилось на высоте h от пола, выбранной из интервала 120...130 см. Положение основания подвеса отметить специальной металлической меткой, расположенной на установке. Значение высоты h занести в табл. 1.

Таблица 1

$r = \dots$		$h = \dots$						
№	$m, \text{ г}$	$t_1, \text{ с}$	$t_2, \text{ с}$	$t_3, \text{ с}$	$\langle t \rangle, \text{ с}$	$a, \text{ м/с}^2$	$\varepsilon, 1/\text{с}^2$	$M, \text{ Н}\cdot\text{м}$
1								
...								
5								

3. Выбрать одну из гирь, входящих в комплект установки. Рассчитать массу груза m , как суммарную массу гири и собственной массы подвеса. Результат записать в табл. 1.

4. Поместить гирю на подвес и трижды измерить время, за которое подвес опускается с высоты h до уровня пола. Полученные значения t_1, t_2, t_3 занести в табл. 1.

5. Выполнить пункты 3 и 4 еще четыре раза, **добавляя** каждый раз по одной гире к падающему грузу в предыдущем опыте. Таким образом, в опыте № 5 масса m будет состоять из массы пяти гирь и массы подвеса.

Обработка результатов эксперимента

1. По данным табл. 1 рассчитать среднее время движения подвеса с гирями $\langle t \rangle$, его линейное ускорение a [формула (5)], угловое ускорение маятника ε [формула (4)] и момент силы натяжения нити M [формула (6)] для каждой строки табл. 1.

2. По данным табл. 1 построить график зависимости $\varepsilon(M)$. Общие правила построения графиков изложены в *Приложении 1*.

3. По графику определить момент инерции маятника J [формула (3)] и момент сил трения $M_{тр}$ (см. рис. 2).

4. Проверить для одного из опытов (указывается преподавателем) выполнение закона сохранения энергии (7). Результаты расчета занести в табл. 2.

Таблица 2

$E_1 = mgh$	$\frac{mv^2}{2}$	$\frac{J\omega^2}{2}$	$M_{тр}\phi$	$E_2 = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2} + M_{тр}\phi$	$E = \frac{E_1 - E_2}{E_1} 100 \%$

Результат работы

1. Записать найденные значения момента инерции маятника и момента сил трения:

$$J = \dots \qquad M_{тр} = \dots$$

2. Записать вывод о том, подтверждают ли ваши экспериментальные результаты выполнение основного закона динамики вращательного движения.

3. Записать вывод о том, с какой погрешностью выполняется закон сохранения энергии в данном эксперименте.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте и запишите основной закон динамики вращательного движения в общем виде. Запишите его для маятника Обербека.

2. Что называется моментом силы? Как определяется величина момента силы относительно неподвижной оси? В каких случаях момент силы равен нулю?

3. Что называется моментом инерции тела относительно данной оси? Каков его физический смысл? От чего он зависит?

4. Для какого тела определяется момент инерции в данной работе?

5. В чем заключается метод определения момента инерции в данной работе?

6. Как определяется момент сил трения в данной работе?

7. Как в данной работе рассчитывается вращающий момент?

8. Как рассчитывается кинетическая энергия тела при вращательном движении?

9. Как рассчитывается работа при вращательном движении?

10. Как зависит угловое ускорение маятника Обербека от положения грузов 3 на спицах 2 (рис. 1)?

11. Как зависит угловое ускорение маятника Обербека от массы подвеса с гирями 5 (рис. 1)?

12. Каким образом можно теоретически рассчитать момент инерции маятника Обербека?

Лабораторная работа № 1–4

Часть 1. ИЗУЧЕНИЕ ВТОРОГО ЗАКОНА НЬЮТОНА ПРИ ДВИЖЕНИИ ТЕЛА В ВЯЗКОЙ СРЕДЕ

Цели работы: 1. Экспериментальная проверка выполнения второго закона Ньютона при установившемся движении тела в жидкости. 2. Измерение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса.

Приборы и принадлежности: цилиндрический сосуд с жидкостью, набор шариков, микрометр, секундомер.

Теоретическое введение

На тело, движущееся в вязкой среде (жидкой или газообразной), действует сила сопротивления среды, обусловленная внутренним трением (вязкостью среды). При малых скоростях движения тела сила сопротивления пропорциональна его скорости:

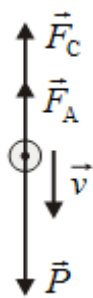
$$\vec{F} = -b\vec{v},$$

где b – коэффициент сопротивления среды; v – скорость тела. Знак «минус» означает, что вектор силы сопротивления направлен противоположно вектору скорости тела. Величина коэффициента сопротивления b зависит от размеров и формы тела и свойств жидкости.

Дж. Г. Стокс установил, что сила сопротивления, действующая на шар радиусом R , движущийся со скоростью v в вязкой среде, определяется по формуле

$$F_C = 6\pi\eta Rv, \quad (1)$$

где η – коэффициент вязкости среды, который в системе СИ измеряется в Па·с. Силу сопротивления, определяемую выражением (1), называют силой Стокса. Зависимость силы сопротивления от коэффициента вязкости лежит в основе метода его определения (метода Стокса).



Рассмотрим движение металлического шарика в жидкости (рис. 1). На шарик действуют сила тяжести \vec{P} , выталкивающая сила (сила Архимеда) \vec{F}_A и сила сопротивления (сила Стокса) \vec{F}_C . Согласно второму закону Ньютона, уравнение движения шарика в проекции на направление скорости \vec{v} имеет вид

$$ma = P - F_A - F_C, \quad (2)$$

Рис. 1

где m – масса шарика; a – ускорение шарика.

Так как в процессе движения шарика $(P - F_A) = \text{const}$, то согласно уравнению (2) первоначально шарик движется с ускорением $a > 0$, если $(P - F_A) > F_C$, или с ускорением $a < 0$, если $P - F_A < F_C$. Соответственно изменяется (увеличивается или уменьшается) скорость шарика и сила сопротивления F_C , которая пропорциональна скорости. В результате, как видно из уравнения (2), модуль ускорения a шарика будет уменьшаться со временем, стремясь в пределе к ну-

лю (при $(P - F_A) \approx F_C$), то есть шарик начнет двигаться практически с постоянной скоростью v . В этом случае движение шарика считают установившимся, а его скорость – установившейся скоростью. Тогда уравнение (2) принимает вид

$$0 = P - F_A - F_C. \quad (3)$$

Сила тяжести P и сила Архимеда F_A равны соответственно

$$P = mg = \rho Vg, \quad F_A = \sigma gV, \quad (4)$$

где g – ускорение свободного падения; ρ – плотность материала шарика; σ – плотность жидкости; $V = \frac{4}{3}\pi R^3$ – объем шарика.

Выразим силу Стокса из уравнения движения шарика (3) и перепишем результат с учетом выражений (4):

$$F_C = \rho Vg - \sigma gV = (\rho - \sigma)g \frac{4}{3}\pi R^3. \quad (5)$$

Приравнивая правые части выражений (5) и (1), получим

$$(\rho - \sigma)g \frac{4}{3}\pi R^3 = 6\pi\eta Rv. \quad (6)$$

Так как уравнение (5) получено из второго закона Ньютона (3) для установившегося движения шарика, то скорость v можно рассчитать согласно закону равномерного движения

$$v = \frac{S}{t}, \quad (7)$$

где t – время прохождения шариком пути S .

Из выражения (6) с учетом формулы (7) следует

$$D^2t = \frac{18\eta}{(\rho - \sigma)g} S,$$

где $D = 2R$ – диаметр шарика. Это выражение представим в виде

$$D^2t = KS \quad (8)$$

где коэффициент пропорциональности

$$K = \frac{18\eta}{(\rho - \sigma)g} \quad (9)$$

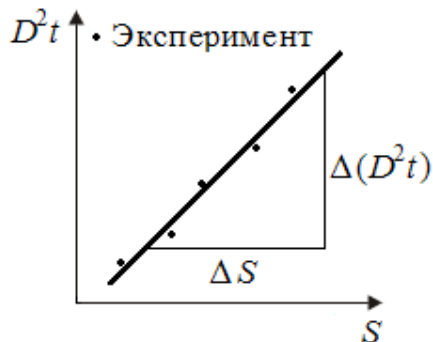


Рис. 2

является постоянным по величине в данной лабораторной работе.

Из уравнения (8) следует, что график зависимости параметра D^2t от величины S должен иметь вид прямой линии (рис. 2).

Таким образом, если построенный по результатам эксперимента график зависимости параметра D^2t от величины S будет иметь вид прямой линии, то это будет подтверждением выполнения второго закона Ньютона при установившемся движении шарика в жидкости.

Описание экспериментальной установки и методики эксперимента

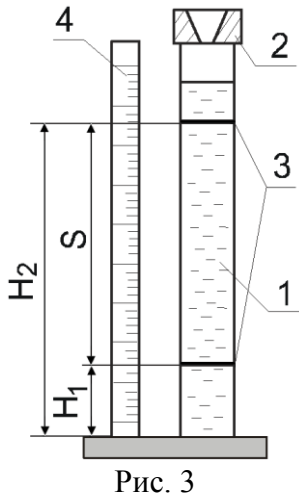


Рис. 3

Для изучения движения металлического шарика в жидкости используется установка, схематически изображенная на рис. 3. Она представляет собой стеклянный цилиндрический сосуд 1, укрепленный на жестком штативе. Сверху сосуда установлен центрирующий конус 2, обеспечивающий движение шарика по оси сосуда. Сосуд заполнен жидкостью с плотностью 1300 кг/м^3 . На поверхности сосуда, на расстояниях H_1 и H_2 от дна сосуда установлены две горизонтальные метки 3.

Для построения графика зависимости параметра D^2t от величины S (см. рис. 2) необходимо знать диаметр шарика D и время t прохождения шариком пути S в жидкости.

Диаметр шарика измеряется микрометром с точностью до $0,01 \text{ мм}$. Величина пути (расстояние между метками) определяется по шкале 4: $S = H_2 - H_1$. Время t движения шарика между метками измеряется секундомером.

Из выражения (9) при известных значениях плотностей материала шарика ρ и жидкости σ может быть рассчитан коэффициент вязкости жидкости

$$\eta = \frac{K(\rho - \sigma)g}{18}, \quad (10)$$

где коэффициент K определен по наклону прямой линии в координатах D^2t от S к оси абсцисс, построенной по результатам эксперимента (см. рис. 2),

$$K = \frac{\Delta(D^2t)}{\Delta S}. \quad (11)$$

Порядок выполнения работы

1. Установить между метками 3 на поверхности сосуда расстояние $S = 60 \text{ см}$. Значение S занести в табл. 1.

2. Выбрать один из предложенных для эксперимента шариков и с помощью микрометра измерить его диаметр в пяти различных направлениях (работа с микрометром описана в *Приложении 2*). Полученные значения D_1, D_2, \dots, D_5 занести в табл. 1.

3. Опустить шарик в центрирующий конус сосуда и измерить время его прохождения пути S . Полученное значение t занести в табл. 1.

4. Повторить пункты 1–3 с другими шариками, устанавливая последовательно расстояние между метками $S = 50, 40, 35, 30 \text{ см}$.

Таблица 1

		$\rho_{Al} = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$					$\sigma = 1,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$			
№	$S, \text{ см}$	$D_1, \text{ мм}$	$D_2, \text{ мм}$	$D_3, \text{ мм}$	$D_4, \text{ мм}$	$D_5, \text{ мм}$	$D, \text{ м}$	$t, \text{ с}$	$D^2t, \text{ м}^2 \cdot \text{с}$	
1	60									
...										
5	30									

Обработка результатов эксперимента

1. Рассчитать среднее значение диаметра каждого шарика по формуле

$$D = (D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5) / 5,$$

полученные значения выразить в метрах и занести в табл. 1.

2. Рассчитать параметр D^2t для каждой строки табл. 1.
3. По данным табл. 1 построить график зависимости параметра D^2t от величины S . Общие правила построения графиков изложены в *Приложении 1*.
4. По графику определить коэффициент K , используя формулу (11).
5. Рассчитать коэффициент вязкости жидкости по формуле (10).

Результат работы

1. Записать вывод о том, подтверждают ли ваши экспериментальные результаты выполнение второго закона Ньютона при движении шарика в жидкости.
2. Записать значение коэффициента вязкости $\eta = \dots$.

Часть 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

Цели работы: 1. Измерение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса. 2. Изучение методики обработки результатов измерения.

Теоретическое введение

Для вывода расчетных зависимостей воспользуемся теоретическим введением части 1 данной лабораторной работы.

Рассмотрим установившееся движение металлического шарика в жидкости (см. рис. 1).

Заменяем силы, входящие в уравнение движения шарика (3), соответствующими выражениями (1) и (4), получим выражение

$$0 = \rho Vg - \sigma gV - 6\pi\eta Rv.$$

Откуда, полагая объем шарика $V = \frac{\pi}{6}D^3$, для определения коэффициента вязкости следует выражение

$$\eta = \frac{(\rho - \sigma)gD^2}{18v} = K \frac{D^2}{v}, \quad (12)$$

где $K = \frac{(\rho - \sigma)g}{18}$ – постоянная величина в условиях данного эксперимента.

Таким образом, коэффициент вязкости может быть рассчитан по формуле (12), если при известных значениях плотности материала шарика ρ и плотности жидкости σ по результатам эксперимента определить диаметр шарика D и установившуюся скорость v шарика.

Обработка результатов эксперимента

1. Переписать из табл. 1 в табл. 2 экспериментальные значения среднего диаметра шарика D для пяти шариков.

2. По данным табл. 1 рассчитать установившуюся скорость v каждого шарика по формуле (7). Результаты записать в табл. 2.

Таблица 2

№	D , м	v , м/с	K	η , Па·с	$\Delta\eta$	$(\Delta\eta)^2$
1						
2						
...						
5						

3. Рассчитать и занести в табл. 2 коэффициент K , входящий в формулу (12).

4. Рассчитать коэффициент вязкости по формуле $\eta = K \frac{D^2}{v}$ для каждой строки табл. 2.

5. В соответствии с *Приложением 4* рассчитать среднее значение коэффициента вязкости $\langle \eta \rangle$, доверительный интервал $\Delta\eta$, относительную погрешность измерения E .

Результат работы

1. Записать значение коэффициента вязкости и относительную погрешность измерения в виде

$$\eta = \langle \eta \rangle \pm \Delta\eta = \dots, \quad E = \dots$$

Контрольные вопросы

1. Дайте определение скорости, ускорения тела.
2. Сформулируйте и запишите второй закон Ньютона.
3. Какие силы действуют на шарик, движущийся в жидкости? Изобразите их на чертеже. Составьте уравнение движения шарика для случаев $\rho > \sigma$ и $\rho < \sigma$.
4. Какова природа силы сопротивления движению тела в жидкости и от чего она зависит?
5. При каких условиях шарик погружается в жидкости ускоренно, замедленно, равномерно?
6. Постройте примерные графики зависимостей ускорения $a(t)$ и скорости $v(t)$, где t – время погружения, отсчитываемое от момента вхождения шарика в жидкость. Рассмотрите три случая: $v_0 = 0$, $v_0 < v_{уст}$, $v_0 > v_{уст}$, где v_0 – скорость шарика в начальный момент времени, $v_{уст}$ – установившаяся скорость шарика.
7. В чем сущность метода Стокса, применяемого для определения коэффициента вязкости среды? В каких единицах измеряется коэффициент вязкости?

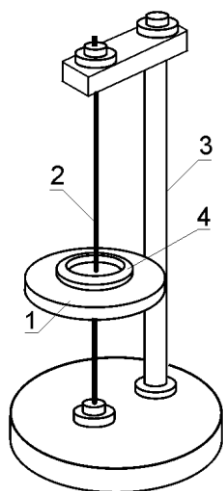
Лабораторная работа № 1–7 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ТЕЛ МЕТОДОМ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: Измерение момента инерции тела методом крутильных колебаний.

Приборы и принадлежности: крутильный маятник, кольцо, секундомер, штангенциркуль, измерительная рулетка.

Описание экспериментальной установки и метода измерений

Для определения момента инерции тел в работе используется крутильный маятник (рис.). Крутильный маятник представляет собой диск 1, подвешенный на вертикально натянутой стальной проволоке 2, концы которой прикреплены к верхнему кронштейну и основанию стойки 3. Диск маятника позволяет размещать на своей торцевой поверхности тела 4, момент инерции которых подлежит определению. Если диск маятника вывести из положения равновесия и предоставить самому себе, то он будет совершать крутильные колебания относительно вертикальной оси, совпадающей с проволокой 2.



При повороте диска маятника вокруг вертикальной оси на угол φ проволока закручивается и возникает крутящий момент M , стремящийся вернуть диск в положение равновесия:

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

где k – коэффициент крутильной жесткости, определяемый геометрическими размерами проволоки и упругими свойствами ее материала. Для системы из двух проволок круглого сечения коэффициент k рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{\pi d^4 G}{32} \left(\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} \right), \quad (2)$$

где d – диаметр проволоки; G – модуль упругости материала проволоки при деформации сдвига (для стали $G = 79,3 \cdot 10^9$ Н/м²); l_1 и l_2 , – длина верхней и длина нижней проволок.

Пренебрегая сопротивлением воздуха, уравнение движения диска маятника согласно основному закону динамики вращательного движения можно записать в виде

$$J\varepsilon = M, \quad (3)$$

где J – момент инерции диска относительно оси колебаний маятника; $\varepsilon = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$ – угловое ускорение диска. Закон (3) с учетом формулы (1) можно записать в дифференциальном виде

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{k}{J}\varphi = 0. \quad (4)$$

Уравнение (4) представляет собой дифференциальное уравнение гармонических колебаний. Решением этого уравнения является выражение вида

$$\varphi = \varphi_0 \cos(\omega t + \alpha_0),$$

согласно которому диск маятника совершает гармонические колебания с амплитудой φ_0 , начальной фазой α_0 , циклической частотой $\omega = \sqrt{\frac{k}{J}}$ и периодом

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{J}{k}}. \quad (5)$$

Формула (5) позволяет определить момент инерции любого тела, которое можно разместить на диске крутильного маятника, если по результатам эксперимента определить соответствующие периоды.

Если на диске маятника разместить какое-либо тело (например, кольцо), то уравнение (4) не изменит своего вида. Следовательно, период колебаний диска с телом можно найти по формуле, аналогичной формуле (5):

$$T_x = 2\pi\sqrt{\frac{J + J_x}{k}}, \quad (6)$$

где J и J_x – момент инерции диска и момент инерции исследуемого тела относительно оси колебаний маятника соответственно.

Выразив момент инерции исследуемого тела J_x из системы уравнений (5) и (6), получим расчетную формулу:

$$J_x = \frac{k}{4\pi^2}(T_x^2 - T^2), \quad (7)$$

где коэффициент крутильной жесткости k вычисляется по формуле (2), а период колебаний

$$T = \frac{t}{N}, \quad (8)$$

где t – измеренное экспериментально время, за которое маятник совершает N колебаний.

В данной лабораторной работе за исследуемое тело примем кольцо, момент инерции которого относительно оси, проходящей через центр масс, можно рассчитать теоретически:

$$J_k = \frac{1}{2}m(R_n^2 + R_b^2), \quad (9)$$

где m – масса кольца; R_n и R_b – наружный и внутренний радиусы кольца.

Метод крутильных колебаний можно использовать для экспериментального определения момента инерции тел и в том случае, когда коэффициент крутильной жесткости неизвестен. В этом случае для определения момента инерции тела J_T необходимо исключить из формулы (7) коэффициент крутильной жесткости k . Для этого поступают следующим образом:

измеряют период колебаний диска маятника T_1 ;

на диске маятника размещают тело (например, кольцо), момент инерции J_k которого известен, и измеряют период колебаний T_2 системы диск – кольцо;

на диске маятника размещают тело, момент инерции J_T которого следует определить, и измеряют период колебаний T_3 системы диск – тело с неизвестным моментом инерции.

Согласно формуле (7), момент инерции кольца и момент инерции тела относительно оси колебаний маятника можно выразить через соответствующие периоды T_1, T_2, T_3 :

$$J_{\kappa} = \frac{k}{4\pi^2}(T_2^2 - T_1^2), \quad J_{\tau} = \frac{k}{4\pi^2}(T_3^2 - T_1^2).$$

Из этой системы уравнений следует расчетная формула для момента инерции тела в виде

$$J_{\tau} = J_{\kappa} \frac{T_3^2 - T_1^2}{T_2^2 - T_1^2}. \quad (10)$$

Порядок выполнения работы

1. Величину массы кольца m (масса указана на поверхности кольца) занести в табл. 1.
2. С помощью штангенциркуля измерить наружный и внутренний диаметры кольца (работа со штангенциркулем описана в *Приложении 3*). Результаты измерений занести в табл. 1.
3. С помощью штангенциркуля измерить диаметр проволоки d . Измерения выполнить по два раза в разных местах верхней и нижней проволок. Результаты измерений занести в табл. 2.
4. Измерить рулеткой длину верхней и нижней проволок l_1 и l_2 . Результаты измерений занести в табл. 2.

Таблица 1

m , г	$D_{\text{н}}$, мм	$D_{\text{в}}$, мм	J_{κ} , кг·м ²

Таблица 2

d_1 , мм	d_2 , мм	d_3 , мм	d_4 , мм	$\langle d \rangle$, мм	l_1 , мм	l_2 , мм	k , Н·м/рад

5. Повернуть диск маятника вокруг вертикальной оси на малый угол (примерно 10°) и, предоставив его самому себе, измерить время t , за которое совершается N полных колебаний маятника. Результат измерения занести в табл. 3.

Таблица 3

№	N	t , с	t_x , с	T , с	T_x , с	J_x , кг·м ²	ΔJ_x	$(\Delta J_x)^2$
1	10							
...								
5	30							

Измерения времени колебаний произвести для $N = 10, 15, 20, 25, 30$ колебаний.

6. На диск маятника симметрично относительно проволоки поместить кольцо, момент инерции J_x которого подлежит определению. Измерить время t_x , за которое совершается N полных колебаний маятника, согласно п. 5.

Таблица 4

7. На диск маятника симметрично относительно проволоки поместить тело, момент инерции J_{τ} которого подлежит определению. Измерить время t_3 , за которое совершается N полных колебаний маятника, согласно п. 5. Результаты измерений занести в табл. 4.

№	N	t_3 , с	T_3 , с	$\langle T_3 \rangle$, с	$\langle T_2 \rangle$, с	$\langle T_1 \rangle$, с	J_{τ} , кг·м ²
1	10						
...							
5	30						

Обработка результатов эксперимента

1. Рассчитать момент инерции кольца J_k по формуле (9). Результат занести в табл. 1.
2. Рассчитать среднее значение диаметра проволоки $\langle d \rangle$. Результат занести в табл. 2.
3. Вычислить коэффициент крутильной жесткости по формуле (2). Результат занести в табл. 2.
4. По данным табл. 3 рассчитать периоды T и T_x по формуле (8) для каждой строки табл. 3.
5. Вычислить момент инерции J_x по формуле (7) для каждой строки табл. 3.
6. В соответствии с *Приложением 4* рассчитать среднее значение момента инерции $\langle J_x \rangle$, доверительный интервал Δ_{J_x} , относительную погрешность измерения E .
7. Рассчитать период T_3 по формуле (8) для каждой строки табл. 4.
8. Рассчитать среднее значение периода $\langle T_3 \rangle$. Результат занести в табл. 4.
9. По данным табл. 3 рассчитать среднее значение периода колебаний диска с кольцом $\langle T_2 \rangle = \langle T_x \rangle$. Результат занести в табл. 4.
10. По данным табл. 3 рассчитать среднее значение периода колебаний диска маятника $\langle T_1 \rangle = \langle T \rangle$. Результат занести в табл. 4.
11. Вычислить момент инерции J_T по формуле (10). Результат занести в табл. 4.

Результат работы

1. Записать экспериментально определенное значение момента инерции кольца относительно оси колебания маятника и относительную погрешность измерения в виде

$$J_x = \langle J_x \rangle \pm \Delta_{J_x} = \dots, \quad E = \dots$$

2. Сравнить экспериментально определенное значение момента инерции кольца J_x с расчетным J_k :

$$E = \frac{J_k - J_x}{J_k} 100 \% .$$

3. Записать значение момента инерции тела $J_T = \dots$

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой крутильный маятник?
2. Как в работе определяется период колебаний крутильного маятника?
3. В чем заключается метод определения момента инерции тел, применяемый в данной работе?
4. Сформулируйте и запишите основной закон динамики вращательного движения вокруг неподвижной оси.
5. Что называется моментом инерции твердого тела? От чего он зависит? Каков его физический смысл?
6. В каких единицах измеряется момент инерции?
7. В каких единицах измеряется коэффициент крутильной жесткости?
8. Выведите формулу (9).
9. Сформулируйте теорему Штейнера.

Лабораторная работа № 1–9

Часть 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ МЕТОДОМ ОБОРОТНОГО МАЯТНИКА

Цель работы: Измерение ускорения силы тяжести методом оборотного маятника.

Приборы и принадлежности: оборотный маятник, секундомер.

Теоретическое введение

Физическим маятником называется твердое тело, способное колебаться под действием силы тяжести относительно неподвижной горизонтальной оси подвеса O (рис. 1). При отклонении маятника на угол φ от положения равновесия возникает вращающий момент, создаваемый силой тяжести,

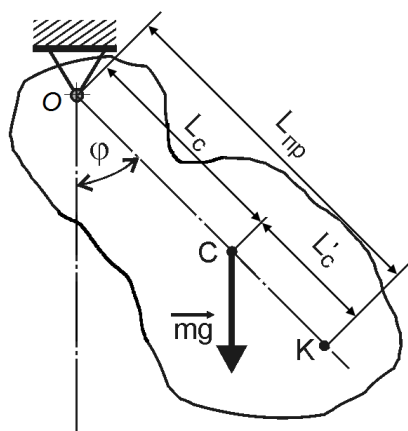


Рис. 1

$$M = -mgL_C \sin \varphi, \quad (1)$$

где m – масса маятника; g – ускорение силы тяжести; L_C – расстояние от оси подвеса до центра масс тела C (рис. 1).

Основной закон динамики вращательного движения с учетом выражения (1) имеет вид

$$J\varepsilon = -mgL_C \sin \varphi, \quad (2)$$

где J – момент инерции тела относительно оси подвеса; $\varepsilon = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$ – угловое ускорение маятника. В случае малых колебаний ($\varphi \leq 10^\circ$) $\sin \varphi \approx \varphi$. Тогда закон (2) примет вид

$$J \frac{d^2\varphi}{dt^2} + mgL_C \varphi = 0,$$

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{mgL_C}{J} \varphi = 0. \quad (3)$$

Уравнение (3) представляет собой дифференциальное уравнение гармонических колебаний. Решением этого уравнения является выражение вида

$$\varphi = \varphi_0 \sin(\omega t + \alpha_0), \quad (4)$$

согласно которому маятник совершает гармонические колебания с амплитудой φ_0 , начальной фазой α_0 , циклической частотой $\omega = \sqrt{\frac{mgL_C}{J}}$ и периодом

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgL_C}}. \quad (5)$$

Приведем эту формулу к виду

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L_{пр}}{g}}, \quad (6)$$

где введено обозначение

$$L_{\text{пр}} = \frac{J}{mL_C}. \quad (7)$$

Величина $L_{\text{пр}}$ называется приведенной длиной физического маятника. По определению, она равна длине нити математического маятника, имеющего одинаковый с физическим маятником период колебаний.

Согласно теореме Штейнера момент инерции маятника относительно оси подвеса O

$$J = J_C + mL_C^2, \quad (8)$$

где J_C – момент инерции маятника относительно оси, проходящей через центр масс C и параллельной оси подвеса O .

Тогда, подставляя (8) в (7), для приведенной длины маятника получаем

$$L_{\text{пр}} = L_C + \frac{J_C}{mL_C}, \quad (9)$$

откуда следует, что $L_{\text{пр}}$ всегда больше L_C .

Отложив из точки O по направлению прямой OC отрезок длиной $L_{\text{пр}}$, получим точку K (см. рис. 1), которая называется центром колебаний. Если ось подвеса переместить в центр колебаний, то приведенная длина маятника станет равной

$$L'_{\text{пр}} = L'_C + \frac{J_C}{mL'_C}, \quad (10)$$

где L'_C – расстояние от центра колебаний до центра масс. Сопоставляя выражения (9) и (10) с учетом того, что $L'_C = L_{\text{пр}} - L_C$, можно показать, что приведенная длина, а следовательно, и период колебаний не изменяются, то есть точка подвеса O и центр колебаний K обратимы. Это свойство обратимости используется в обратном маятнике для определения приведенной длины $L_{\text{пр}}$.

Описание экспериментальной установки и метода измерений

Оборотный маятник (рис. 2) представляет собой цилиндрический стержень, на котором укреплены две треугольные опорные призмы 1 и 2. Расстояние между ними неизменно и равно $L = 73$ см. На стержень надеты две массивные чечевицы 3 и 4. Одна из них (чечевица 3) может перемещаться вдоль стержня и закрепляется винтом 6. Для отсчета положения чечевицы N на стержне имеется миллиметровая шкала с нониусом 5. В рабочем состоянии маятник опирается одной из призм (призма 1 на рис. 2) на кронштейн 7, укрепленный в стене. При этом опорное ребро призмы должно совпадать с ребром V-образного углубления в кронштейне 7. Общая масса маятника составляет $m = 6,5$ кг.

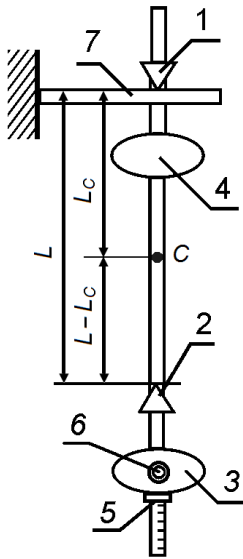


Рис. 2

Перемещая подвижную чечевицу 3 по стержню, можно добиться такого ее положения, при котором периоды колебаний маятника относительно обеих опорных призм будут одинаковы, то есть $T_1 = T_2 = T$.

В этом случае приведенная длина маятника станет равной расстоянию между его опорными призмами ($L_{пр} = L$), и тогда ускорение силы тяжести можно рассчитать по формуле, следующей из выражения (6),

$$g = 4\pi^2 \frac{L}{T^2}. \quad (11)$$

Необходимый для расчета период колебаний маятника T можно определить экспериментально, измерив время t , за которое маятник совершает n полных колебаний:

$$T = \frac{t}{n}. \quad (12)$$

Порядок выполнения работы

1. Установить подвижную чечевицу маятника в положение $N = 0$ по шкале 5 и закрепить винтом 6.

2. Установить маятник на кронштейне в рабочее состояние на опорную призму 1.

3. Отвести маятник влево от положения равновесия на малый угол (примерно $5...7^\circ$) и, предоставив его самому себе, измерить время t_1 , за которое совершается n полных колебаний маятника (*рекомендуется* $n = 20$). Результат измерения занести в табл. 1.

4. Установить маятник на опорную призму 2, и также определить время t_2 , за которое совершается n полных колебаний. Результат измерения занести в табл. 1.

Таблица 1

		$n = 20$						
$N, \text{ см}$		0	3	6	9	12	15	18
$t_1, \text{ с}$								
$t_2, \text{ с}$								

5. Повторить пункты 2–4, устанавливая и закрепляя подвижную чечевицу последовательно в положениях $N = 3, 6, 9, 12, 15, 18 \text{ см}$.

6. По полученным данным построить на одних координатных осях графики зависимости t_1 и t_2 от N .

7. По точке пересечения графиков определить положение подвижной чечевицы N_p , при котором периоды колебаний маятника одинаковы относительно обеих опорных призм. Записать значение N_p в табл. 2.

8. Установить подвижную чечевицу маятника в положение N_p и измерить время t_1 и t_2 , за которое совершается n полных колебаний маятника относительно одной и другой опорной призмы. Результат измерения занести в табл. 2.

Таблица 2

$N_p, \text{ см}$	n	t_1	t_2	$T_1, \text{ с}$	$T_2, \text{ с}$	$T, \text{ с}$	$L_{пр}, \text{ см}$	$g, \text{ м/с}^2$

Обработка результатов эксперимента

1. По данным табл. 2 рассчитать периоды колебаний маятника T_1 и T_2 по формуле (12), найти их среднее значение T . Результат занести в табл. 2.
2. Определить приведенную длину $L_{пр}$ маятника. Записать ее значение в табл. 2.
3. Рассчитать ускорение силы тяжести g по формуле (11). Результат занести в табл. 2.

Результат работы

1. Записать значение ускорения силы тяжести

$$g = \dots$$

2. Сравнить экспериментально определенное значение ускорения силы тяжести g с табличным g_T :

$$E = \frac{g_T - g}{g_T} 100 \% .$$

Часть 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ОБОРОТНОГО МАЯТНИКА И ПРОВЕРКА ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Цель работы: 1. Экспериментальное и теоретическое определение момента инерции твердого тела. 2. Проверка выполнения закона сохранения энергии в колебательном движении.

Приборы и принадлежности: оборотный маятник, секундомер, угломер, измерительная рулетка.

Экспериментальный метод определения момента инерции

Рассмотрим общий случай, когда подвижная чечевица находится в произвольном положении N , расстояние между опорами равно L , а расстояние от опорной призмы 1 (первой оси подвеса) до центра масс C равно L_C (см. рис. 2, подвижная чечевица внизу). Обозначим период колебаний в этом случае T_1 . Из формулы (5) выразим момент инерции маятника относительно первой оси подвеса

$$J_1 = \frac{T_1^2}{4\pi^2} mgL_C. \quad (13)$$

Если маятник перевернуть и разместить на опорной призме 2, то расстояние от опорной призмы 2 (второй оси подвеса) до центра масс C равно $L - L_C$ (см. рис. 2). Соответственно обозначим период колебаний в этом случае T_2 . Выразим момент инерции маятника относительно второй оси подвеса

$$J_2 = \frac{T_2^2}{4\pi^2} mg(L - L_C). \quad (14)$$

Эти же моменты инерции маятника относительно соответствующих осей подвеса можно выразить, используя теорему Штейнера:

$$J_1 = J_C + mL_C^2, \quad (15)$$

$$J_2 = J_C + m(L - L_C)^2, \quad (16)$$

где J_C – момент инерции маятника относительно оси, проходящей через центр масс и параллельной оси подвеса.

Решая систему четырех уравнений (13) – (16), получим формулу для расчета расстояния от первой оси подвеса до центра масс C :

$$L_C = L \frac{4\pi^2 L - gT_2^2}{8\pi^2 L - g(T_2^2 + T_1^2)}.$$

Данное выражение можно представить в виде

$$L_C = L \frac{A - T_2^2}{2A - (T_2^2 + T_1^2)}, \quad (17)$$

где величина $A = \frac{4\pi^2 L}{g}$ является постоянной для данного маятника. Таким образом для расчета величины L_C достаточно экспериментально определить периоды колебаний маятника T_1 и T_2 относительно двух осей подвеса по формуле

$$T = \frac{t}{n}, \quad (18)$$

где t – время, за которое маятник совершает n полных колебаний.

Экспериментально определив расстояние L_C по формуле (17) и зная массу маятника m , далее по формулам (13) и (14) можно вычислить моменты инерции маятника J_1 и J_2 относительно первой и второй осей подвеса.

Теоретический расчет момента инерции (приближенный)

Оборотный маятник разобьем на составные части: стержень массой $m_{ст} = 1,3$ кг и длиной $l = 1,24$ м; две чечевицы массой $m_ч = 2,6$ кг каждая, массами опорных призм пренебрежем. Для теоретического определения координаты положения центра масс x_C можно воспользоваться формулой

$$x_C = \frac{m_ч}{2m_ч + m_{ст}}(x_1 + x_2) + \frac{m_{ст}}{2(2m_ч + m_{ст})}l, \quad (19)$$

где x_1 и x_2 – координаты центров масс каждой чечевицы относительно конца стержня (рис. 3).

По размерам оборотного маятника можно определить расстояние от первой оси подвеса до центра масс L_C по формуле

$$L_C = x_C - x_{п1}, \quad (20)$$

где $x_{п1}$ – координата ребра опорной призмы 1 (рис. 3).

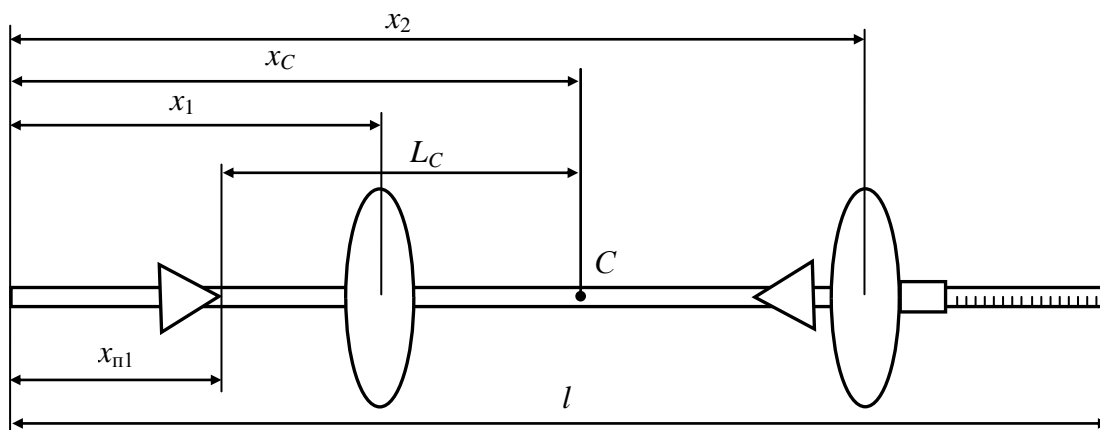


Рис. 3.

Момент инерции маятника относительно первой оси подвеса рассчитаем через моменты инерции его составляющих частей относительно этой оси:

$$J_1 = J_{\text{ст}} + J_{\text{ч1}} + J_{\text{ч2}}, \quad (21)$$

где момент инерции стержня вычисляется согласно теореме Штейнера

$J_{\text{ст}} = \frac{m_{\text{ст}} l^2}{12} + m_{\text{ст}} \left(\frac{l}{2} - x_{\text{п1}} \right)^2$; моменты инерции чечевиц находятся как моменты инерции материальных точек $J_{\text{ч1}} = m_{\text{ч}} (x_1 - x_{\text{п1}})^2$ и $J_{\text{ч2}} = m_{\text{ч}} (x_2 - x_{\text{п1}})^2$.

Закон сохранения энергии

Если маятник отклонить от положения равновесия на угол φ_0 , то его центр масс C поднимется на высоту $h = L_C(1 - \cos\varphi_0)$, где L_C – расстояние от оси подвеса до центра масс тела C . При этом потенциальная энергия маятника массой m увеличивается на величину mgh . Если маятник предоставить самому себе, то он начнет совершать колебания. Когда маятник будет проходить положение равновесия, потенциальная энергия mgh перейдет в кинетическую энергию маятника $\frac{Jw_{\text{max}}^2}{2}$, где J – момент инерции маятника относительно оси подвеса;

w_{max} – угловая скорость маятника в момент прохождения положения равновесия. Потерями энергии на преодоление трения в подвесе и на преодоление сопротивления воздуха ввиду их малой величины можно пренебречь. Таким образом, закон сохранения энергии для оборотного маятника можно записать в виде

$$mgh = \frac{Jw_{\text{max}}^2}{2}. \quad (22)$$

Равенство (22) подлежит экспериментальной проверке в данной лабораторной работе. Для этого необходимо при известной массе маятника m и заданном угле отклонения φ_0 экспериментально определить следующие величины: расстояние L_C , момент инерции маятника J и угловую скорость w_{max} .

Из уравнения (4) для угловой скорости получаем

$$w = \frac{d\varphi}{dt} = \omega \varphi_0 \cos(\omega t + \alpha_0) = w_{\text{max}} \cos(\omega t + \alpha_0). \quad (23)$$

Так как в момент прохождения положения равновесия величина угловой скорости соответствует амплитудному значению, то согласно уравнению (23)

$$w_{\max} = \omega \varphi_0 = \frac{2\pi}{T} \varphi_0, \quad (24)$$

где φ_0 – начальный угол отклонения от положения равновесия измеряется угломером; T – период колебаний (см. формулу (18)).

Порядок выполнения работы

1. Установить подвижную чечевицу маятника в положение N , указанное преподавателем, по шкале 5 и закрепить винтом 6. Значение N занести в табл. 3.
2. Установить маятник на кронштейне в рабочее состояние на опорную призму 1 (подвижная чечевица внизу).
3. Отвести маятник влево от положения равновесия на угол $\varphi = 10^\circ$, контролируя величину угла с помощью угломера.
4. Измерить время t_1 , за которое совершается n полных колебаний маятника (рекомендуется $n = 20$). Результат измерения занести в табл. 3.
5. Повторить опыт (пункты 2–4) относительно опорной призмы 2.

Таблица 3

$m = 6,5$ кг

N , см	n	φ_0 , °	φ_0 , рад	t_1 , с	t_2 , с	T_1 , с	T_2 , с	L_C , м	J_1 , кг·м ²
	20	10							

6. Измерить расстояния x_1 , x_2 и $x_{п1}$ (см. рис. 3), результаты занести в табл. 4.

Таблица 4

$m_{ст} = 1,3$ кг

$l = 1,24$ м

$m_ч = 2,6$ кг

x_1 , см	x_2 , см	$x_{п1}$, см	x_C , см	L_C , м	J_1 , кг·м ²

Обработка результатов эксперимента

1. Рассчитать периоды колебаний маятника T_1 и T_2 по формуле (18). Результат занести в табл. 3.
2. Рассчитать расстояние от первой оси подвеса до центра масс L_C по формуле (17). Результат занести в табл. 3.
3. Рассчитать момент инерции маятника J_1 относительно первой оси подвеса по формуле (13). Результат занести в табл. 3.
4. Рассчитать координату положения центра масс x_C по формуле (19). Результат занести в табл. 4.
5. Рассчитать расстояние от первой оси подвеса до центра масс L_C по формуле (20). Результат занести в табл. 4.
6. Рассчитать момент инерции стержня $J_{ст}$, моменты инерции чечевиц $J_{ч1}$ и $J_{ч2}$, входящие в формулу (21).

7. Рассчитать момент инерции маятника J_1 относительно первой оси подвеса по формуле (21). Результат занести в табл. 4.

8. Используя экспериментальные результаты, рассчитать: высоту подъема центра масс по формуле $h = L_C(1 - \cos(\varphi_0))$; угловую скорость маятника w_{\max} по формуле (24); потенциальную энергию $\Pi = mgh$;

кинетическую энергию маятника $K = \frac{J_1 w_{\max}^2}{2}$.

9. Проверить для данного опыта выполнение закона сохранения энергии (22), рассчитав относительную погрешность в процентах:

$$E = \frac{\Pi - K}{\Pi} 100 \% .$$

Результат работы

1. Записать значения момента инерции маятника относительно первой оси подвеса, найденные экспериментальным и расчетным способами соответственно:

$$J_{1э} = \dots$$

$$J_{1р} = \dots .$$

2. Сравнить экспериментально определенное и расчетное значения момента инерции маятника:

$$E = \frac{J_{1э} - J_{1р}}{J_{1э}} 100 \% .$$

3. Записать вывод о том, с какой погрешностью выполняется закон сохранения энергии в данном эксперименте.

Контрольные вопросы

1. Какой маятник называется физическим, математическим?
2. Составьте уравнение движения физического маятника.
3. От чего зависит период колебаний физического маятника?
4. Что называется приведенной длиной физического маятника?
5. Что называется центром масс, точкой подвеса, точкой колебаний?
6. Сформулируйте и запишите теорему Штейнера.
7. В чем заключается метод определения ускорения силы тяжести, применяемый в работе?
8. Что называется ускорением силы тяжести, силой тяжести, силой тяготения?
9. От чего зависит ускорение силы тяжести? Как оно меняется с удалением от центра Земли, от широты местности? Постройте примерные графики этих зависимостей.

Лабораторная работа № 2–1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ГАЗА МЕТОДОМ АДИАБАТИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ

Цель работы: Изучение термодинамических процессов в идеальном газе и экспериментальное определение C_p/C_V воздуха методом адиабатического расширения.

Приборы и принадлежности: прибор Клемана-Дезорма, насос, манометр.

Описание экспериментальной установки и методики эксперимента

Отношение теплоемкостей газов $\gamma = C_p/C_V$, где C_p – теплоемкость при постоянном давлении; C_V – теплоемкость при постоянном объеме, играет важную роль в теории идеальных газов. Величина γ является показателем степени в уравнении адиабатического процесса, поэтому ее еще называют показателем адиабаты. Величина γ зависит от числа степеней свободы молекул газа i

$$\gamma = \frac{i+2}{i}. \quad (1)$$

Метод Клемана-Дезорма, используемый в данной работе, основан на изучении изменения состояния газа, заключенного в стеклянном баллоне.

Прибор (рис. 1) состоит из баллона 1, соединенного трубками с манометром 2 и насосом. Посредством клапана 3 баллон может сообщаться с атмосферой. Кран 4 служит для предотвращения неконтролируемой утечки газов из баллона через насос.

Уравнение состояния воздуха в баллоне, считая воздух идеальным газом, можно записать в виде

$$PV_B = \frac{m}{\mu} RT,$$

где P – давление; V_B – объем баллона; m и μ – масса и молярная масса воздуха соответственно;

R – газовая постоянная; T – абсолютная температура. Перепишем уравнение состояния в виде

$$PV = \frac{RT}{\mu},$$

где $V = V_B/m$ – удельный объем (объем единицы массы). В ходе выполнения работы величины V_B , R и μ остаются неизменными, а величины P , m , V и T изменяются.

Последовательность проводимых термодинамических процессов для единицы массы газа представлена PV -диаграммой на рис. 2.

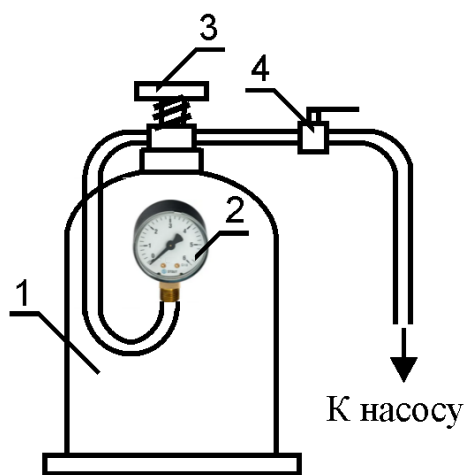


Рис. 1

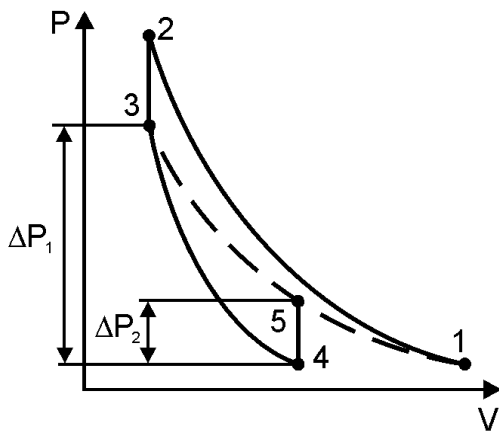


Рис. 2

В начале опыта открывают клапан 3 и кран 4. В результате в баллоне установятся давление P_1 и температура T_1 , равные давлению и температуре окружающей среды, а удельный объем принимает значение V_1 . Этому состоянию газа на PV -диаграмме соответствует точка 1.

Далее при закрытом клапане через открытый кран в баллон быстро накачивают насосом воздух до давления P_2 , а затем закрывают кран. В результате удельный объем уменьшится до V_2 , так как возрастает

масса газа в баллоне. При этом температура газа повысится до значения T_2 , так как теплообмен с окружающей средой не успевает произойти (из-за быстрого протекания процесса и низкой теплопроводности стенок сосуда) и работа, затраченная на сжатие газа, практически полностью идет на увеличение его внутренней энергии. В результате единица массы газа перейдет в состояние (P_2, V_2, T_2) , которому будет соответствовать точка 2 на PV -диаграмме. Процесс 1–2 можно считать близким к адиабатическому.

Далее вследствие теплообмена с окружающей средой, при постоянном значении удельного объема ($V_2 = V_3$) температура газа в баллоне понизится и примет первоначальное значение $T_3 = T_1$, а давление уменьшится до величины P_3 . При этом единица массы газа перейдет в состояние (P_3, V_3, T_3) , соответствующее точке 3 на PV -диаграмме. Установившееся значение давления P_3 связано с давлением окружающей среды P_1 соотношением

$$P_3 = P_1 + \Delta P_1, \quad (2)$$

где ΔP_1 (см. рис. 2) – избыточное давление по сравнению с атмосферным P_1 , определяемое по манометру.

Если на короткое время открыть клапан 3 и сбросить давление в баллоне до атмосферного P_1 , то удельный объем газа увеличится до значения V_4 , так как уменьшится масса газа в баллоне. Расширение газа сопровождается уменьшением его внутренней энергии, в результате чего температура газа понизится до величины T_4 и он перейдет в состояние (P_4, V_4, T_4) , соответствующее точке 4 на PV -диаграмме. Вследствие кратковременности процесса расширения и низкой теплопроводности стенок баллона, препятствующих теплообмену с окружающей средой, процесс расширения единицы массы газа 3–4 можно считать близким к адиабатическому. Запишем уравнение адиабатического процесса 3–4 с учетом того, что давление $P_4 = P_1$:

$$P_3 V_3^\gamma = P_1 V_4^\gamma. \quad (3)$$

Далее вследствие теплообмена с окружающей средой температура воздуха в баллоне изохорически ($V_4 = V_5$) повысится до значения T_5 , равного температуре окружающей среды T_1 , а давление возрастет до величины P_5 . Установившееся давление P_5 связано с давлением окружающей среды P_1 соотношением

$$P_5 = P_1 + \Delta P_2, \quad (4)$$

где ΔP_2 (см. рис. 2) – избыточное давление по сравнению с атмосферным P_1 , определяемое по манометру.

В состояниях 1, 3, 5 температура воздуха равна температуре окружающей среды T_1 , то есть на PV -диаграмме (см. рис. 2) эти точки принадлежат одной изотерме. Используя уравнение изотермы и равенство объемов $V_5 = V_4$, можно записать

$$P_3 V_3 = P_5 V_4, \quad (5)$$

Выведем расчетную формулу для показателя адиабаты воздуха на основании уравнений термодинамических процессов. Из системы уравнений (5) и (3) получим

$$\left(\frac{P_3}{P_5}\right)^\gamma = \frac{P_3}{P_1}.$$

Откуда $\gamma = \frac{\ln(P_3/P_1)}{\ln(P_3/P_5)}$, или с учетом выражений (2) и (4):

$$\gamma = \frac{\ln\left(1 + \frac{\Delta P_1}{P_1}\right)}{\ln\left(1 + \frac{\Delta P_1}{P_1}\right) - \ln\left(1 + \frac{\Delta P_2}{P_1}\right)}. \quad (6)$$

Так как величины $\Delta P_1 \ll P_1$ и $\Delta P_2 \ll P_1$, то можно воспользоваться приближенной формулой $\ln(1 + x) \approx x$, справедливой при $x \ll 1$. С учетом это перепишем уравнение (6):

$$\gamma = \frac{\Delta P_1}{\Delta P_1 - \Delta P_2}. \quad (7)$$

Таким образом, нахождение показателя адиабаты γ сводится к измерению двух избыточных давлений ΔP_1 и ΔP_2 в указанных процессах.

Порядок выполнения работы

1. Открыть кран 4 (повернуть ручку вдоль трубки) и клапан 3 (нажать на клапан сверху и отпустить), то есть сбросить давление в баллоне до атмосферного. В результате стрелка манометра должна установиться на нулевой отметке шкалы манометра.

2. Быстро накачать насосом в баллон столько воздуха, чтобы давление воздуха в баллоне выросло на 5...6 кПа по манометру (процесс 1–2, см. рис. 2). Перекрыть кран 4.

3. Выждать некоторое время, пока вследствие теплообмена температура в баллоне не станет равной комнатной (процесс 2–3), при этом величина избыточного давления ΔP_1 , контролируемая по манометру, перестанет меняться. Затем измерить ΔP_1 и записать в табл.

Таблица

№	ΔP_1	ΔP_2	γ	$\Delta\gamma$	$(\Delta\gamma)^2$
1					
...					
10					

4. Быстро нажать и отпустить клапан 3, при этом давление в баллоне должно резко упасть до атмосферного (процесс 3–4). Стрелка манометра должна скачком достигнуть нуля по шкале манометра.

5. Выждать некоторое время, пока газ, охлажденный при адиабатическом расширении, нагреется до комнатной температуры (процесс 4–5), при этом величина избыточного давления ΔP_2 , контролируемая по манометру, перестанет меняться. Затем измерить ΔP_2 и записать в табл.

6. Повторить пункты 1–5 еще девять раз.

Обработка результатов эксперимента

1. Вычислить значение γ по формуле (7) для каждой строчки табл.

2. В соответствии с *Приложением 4* рассчитать среднее значение показателя адиабаты $\langle \gamma \rangle$, доверительный интервал Δ_γ , относительную погрешность измерения E .

3. Рассчитать теоретическое значение γ_T по формуле (1).

Результат работы

1. Записать экспериментально определенное значение показателя адиабаты воздуха и относительную погрешность измерения в виде

$$\gamma = \langle \gamma \rangle \pm \Delta_\gamma = \dots, \quad E = \dots$$

2. Сравнить экспериментально определенное значение показателя адиабаты с теоретическим:

$$E = \frac{\gamma_T - \gamma}{\gamma_T} 100 \% .$$

Контрольные вопросы

1. Какие процессы происходят в газе при выполнении опыта?
2. Что такое удельный объем? Как он связан с плотностью вещества?
3. Какие процессы, протекающие в газах, называются изохорическими, изотермическими, изобарическими, адиабатическими?
4. Записать уравнения этих процессов. Какой газ называется идеальным?
5. В чем сущность первого начала термодинамики?
6. Какой вид принимает уравнение первого начала в изохорическом, изотермическом, изобарическом, адиабатическом процессах?
6. Что называется теплоемкостью? Какая теплоемкость называется молярной, удельной?
7. От чего зависит теплоемкость газа?
8. Чему равна теплоемкость газа в изохорическом, изотермическом, изобарическом, адиабатическом процессах?
9. Почему теплоемкость газа при изобарическом процессе больше теплоемкости этого же газа при изохорическом процессе?
10. Почему адиабата идет всегда круче изотермы?
11. Вычертить графики, изображенные на PV -диаграмме (рис. 2), процессов, протекающих в сосуде во время опыта, в координатах P и V ; P и T ; V и T (V – удельный объем).

Лабораторная работа № 2–2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА

Цели работы: 1. Измерение коэффициента вязкости воздуха. 2. Расчет средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха.

Приборы и принадлежности: прибор по определению вязкости газов, мерный стакан, секундомер.

Теоретическое введение

Внутреннее трение возникает между слоями потока газа, движущимися относительно друг друга (рис. 1). Величина силы внутреннего трения действует на границе смежных слоев и определяется формулой

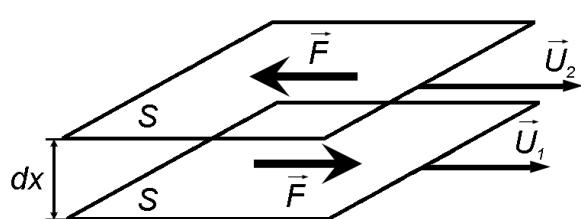


Рис. 1

$$F = -\eta \frac{du}{dx} S, \quad (1)$$

где η – коэффициент вязкости или внутреннего трения; $\frac{du}{dx}$ – поперечный градиент скорости слоев; S – площадь соприкасающихся слоев.

Молекулярно-кинетическая теория газов позволяет связать величину коэффициента вязкости с параметрами, характеризующими тепловое движение молекул,

$$\eta = \frac{1}{3} v \lambda \rho, \quad (2)$$

где средняя арифметическая скорость движения молекул

$$v = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}; \quad (3)$$

средняя длина свободного пробега молекул

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n} = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d^2 P}; \quad (4)$$

плотность газа

$$\rho = \frac{mP}{kT} = \frac{\mu P}{RT}. \quad (5)$$

В формулах (3)-(5) k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; m – масса молекулы; R – газовая постоянная; μ – молярная масса газа; d – эффективный диаметр молекул; P – давление газа.

Из приведенных зависимостей следует, что по экспериментально определенному значению коэффициента вязкости газа можно оценить среднюю длину свободного пробега и эффективный диаметр молекул.

Из формулы (2) с учетом (3) и (5) выразим среднюю длину свободного пробега молекул:

$$\lambda = 1,9 \frac{\eta}{P} \sqrt{\frac{kT}{m}} = 1,9 \frac{\eta}{P} \sqrt{\frac{RT}{\mu}}. \quad (6)$$

Из формулы (4) для оценки эффективного диаметра молекул следует уравнение

$$d = \sqrt{\frac{kT}{4,4\lambda P}}. \quad (7)$$

Описание метода измерений и экспериментальной установки

Существуют различные способы определения коэффициента вязкости газов. В этой работе применяется метод, основанный на движении газа по капиллярной трубке. Вследствие внутреннего трения слоев на концах трубки возникает перепад давлений ΔP , величина которого при установившемся движении газа определяется формулой Пуазейля:

$$\Delta P = \frac{8\eta LV}{\pi r^4 \tau},$$

где η – коэффициент вязкости газа; L и r – длина и внутренний радиус капилляра; V – объем газа, протекающего через капилляр за время τ .

Из приведенного соотношения следует

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta P \tau}{8LV}. \quad (8)$$

Установка для экспериментального определения коэффициента вязкости воздуха (рис. 2) состоит из капилляра 1; U-образного манометра 2; сосуда 3 с крышкой 4 и краном 5; мерного стакана 6 с чашкой 7. Крышка 4 плотно перекрывает отверстие, через которое сосуд наполняется водой. Кран 5 предназначен для регулирования расхода воды, вытекающей из сосуда. U-образный манометр служит для измерения перепада давления на капилляре. Величина перепада давления рассчитывается по формуле

$$\Delta P = \rho g \Delta h,$$

где ρ – плотность жидкости в манометре (в данном случае воды); g – ускорение свободного падения; Δh – разность уровней жидкости в коленях манометра.

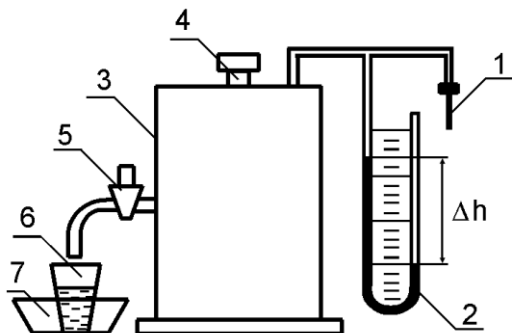


Рис. 2

Если при плотно завернутой крышке открыть кран, то из сосуда начинает вытекать вода, давление в сосуде понижается и через капилляр засасывается воздух. В установившемся режиме (о чем свидетельствует постоянная во времени разность уровней жидкости в U-образном манометре) объем воздуха, прошедшего через капилляр за время τ , равен объему воды, вытекающей из сосуда за это же время.

Для определения объема воды служит мерный стакан 6. Время наполнения стакана водой определяется секундомером.

Порядок выполнения работы

1. По барометру и термометру определить давление P и температуру t воздуха в лаборатории. Результаты измерения запишите в табл.

2. Ознакомиться с установкой. Значение внутреннего радиуса r и длины L капилляра записать в табл.

3. Запишите в табл. объем наполнения мерного стакана V (задается преподавателем из интервала $V = 150 \dots 250 \text{ см}^3$).

4. Плотно заверните крышку 4, при этом разность уровней в коленях манометра Δh должна быть равна нулю.

5. Откройте кран так, чтобы перепад давления по манометру был не менее 20 мм. Дождитесь установления стационарного режима течения (разность уровней Δh в коленях манометра станет постоянной). Значение Δh занесите в табл.

6. Подставьте мерный стакан, одновременно включив секундомер.

7. Зафиксируйте время τ наполнения объема V мерного стакана. Значения V и τ занесите в табл.

Таблица

$P =$		$t =$		$r =$		$L =$	
№	$V, \text{ см}^3$	$\Delta h, \text{ мм}$	$\Delta P, \text{ Па}$	$\tau, \text{ с}$	$\eta, \text{ Па}\cdot\text{с}$	$\Delta \eta$	$(\Delta \eta)^2$
1							
...							
5							

7. Повторите пункты 3–6 еще 4 раза с разным расходом воды. Регулирование расхода осуществляется путем поворота рукоятки крана 5 на разные углы. Расход воды характеризуется перепадом давления Δh по манометру.

Обработка результатов эксперимента

1. По данным таблицы рассчитайте значения коэффициента вязкости воздуха по формуле (8), приведя ее к виду

$$\eta = K \Delta P \tau,$$

где $K = \frac{\pi r^4}{8LV}$ – постоянная величина в условиях данного эксперимента.

2. В соответствии с *Приложением 4* рассчитать среднее значение коэффициента вязкости $\langle \eta \rangle$, доверительный интервал $\Delta \eta$, относительную погрешность измерения E .

3. По формулам (6) и (7) определите среднюю длину свободного пробега молекул воздуха и их эффективный диаметр. Молярная масса воздуха $\mu = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

Результат работы

1. Записать экспериментально определенное значение коэффициента вязкости воздуха и относительную погрешность измерения в виде

$$\eta = \langle \eta \rangle \pm \Delta\eta = \dots, \quad E = \dots$$

2. Сравнить экспериментально определенное значение коэффициента вязкости воздуха с табличным:

$$E = \frac{\eta_{\tau} - \eta}{\eta_{\tau}} 100 \% .$$

3. Записать полученное значение средней длины свободного пробега молекул воздуха: $\lambda = \dots$

4. Записать полученное значение эффективного диаметра молекул воздуха: $d = \dots$

5. Сравнить экспериментально определенное значение эффективного диаметра молекул воздуха с табличным:

$$E = \frac{d_{\tau} - d}{d_{\tau}} 100 \% .$$

Контрольные вопросы

1. Каков механизм возникновения силы внутреннего трения в газах и жидкостях? От чего зависит сила внутреннего трения? Поясните формулу (1) с помощью рисунка.

2. Что называется коэффициентом внутреннего трения?

3. В чем заключается суть данного метода определения коэффициента внутреннего трения?

4. Почему коэффициент внутреннего трения газов при обычных условиях не зависит от давления?

5. Что понимается под средней длиной свободного пробега молекул? От чего она зависит?

6. Что такое эффективный диаметр молекулы. От чего он зависит?

7. Построить графики зависимостей коэффициента внутреннего трения η от температуры T (при $d = \text{const}$); от давления P .

8. Построить графики зависимостей длины свободного пробега молекул λ от давления P (при $T = \text{const}$); от температуры T (при $P = \text{const}$ и $d = \text{const}$).

9. Как изменится длина свободного пробега молекул воздуха, если при неизменной температуре его давление увеличить в три раза?

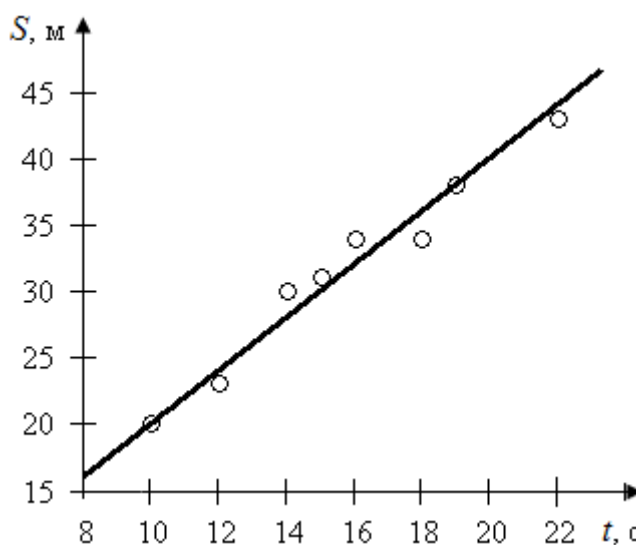
ОБЩИЕ ПРАВИЛА ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКОВ

График следует вычерчивать аккуратно, простым карандашом на бумаге в клетку. Выбор масштаба и начало отсчета на осях координат должен быть таким, чтобы наносимые точки располагались на всей площади, отведенной под график (рис.).

Оформление осей. Масштаб.

В первую очередь рисуют координатные оси. Для аргумента (независимой переменной) выбирается ось абсцисс, для зависимой переменной (функции) – ось ординат. На концах координатных осей наносятся буквенные обозначения откладываемых величин и единицы их измерения.

Затем на осях наносят масштабные деления. Расстояние между соседними делениями (единицу масштаба) обычно берут равными 10, 20 или 25 мм. Это расстояние должно соответствовать «круглому» числу единиц измеряемой величины (1, 2, 5 или те же цифры, умноженные на 10^n , где n – целое число).



Пример оформления графика

Начало координат может не совпадать с нулевыми значениями величин (если это не указано в описании лабораторной работы). При этом минимальные значения должны соответствовать началу координатной оси, а максимальные располагаться вблизи ее конца.

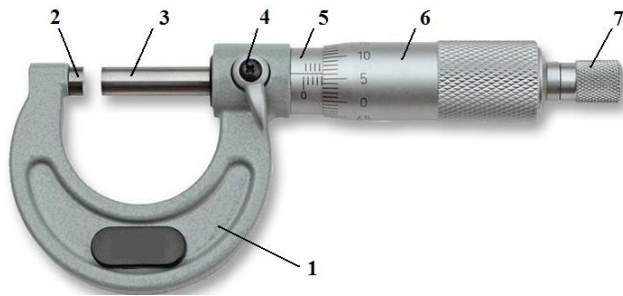
Далее масштабные деления оцифровывают, указывая возле них соответствующие им значения величин, кратные единице масштаба. Если недостаточно места, то оцифровывают не все деления, а например, каждое второе. Если значения величин много больше или меньше 1, то множитель $10^{\pm n}$, определяющий порядок величины, записывают в конце оси, включая его в единицы измерения. Например, v , 10^2 м/с или I , мкА.

Графическое представление зависимости физических величин. Экспериментальные точки изображаются четко и крупно (в виде кружков, крестиков и т. п.), причем их числовые значения на координатных осях не отмечают и линии, определяющие координаты точек, не проводят.

Экспериментальную линию проводят по возможности ближе к экспериментальным точкам так, чтобы количество точек по обе стороны от нее было одинаковым (усредняют «на глаз»). Обычно физические зависимости соответствуют линейным или плавно меняющимся функциям, поэтому линии не должны иметь резких изломов и перегибов.

РАБОТА С МИКРОМЕТРОМ

Микрометр – прибор, предназначенный для измерения линейных величин. Основные элементы конструкции микрометра представлены на рис. 1.



- 1 – скоба;
- 2 – пятка;
- 3 – микрометрический винт;
- 4 – стопорный винт;
- 5 – стебель;
- 6 – барабан;
- 7 – трещотка

Рис. 1

Порядок проведения измерений. Микрометр взять за скобу около пятки. При помощи барабана развести рабочие поверхности пятки и микровинта на величину чуть большую, чем размер измеряемой детали. Расположить деталь между пяткой и микровинтом. **С помощью трещотки** вращать микрометрический винт до соприкосновения его с поверхностью детали (до появления легкого по звуку треска). Далее следует прекратить вращение и приступить к снятию показания микрометра. Легкий треск сигнализирует, что пятка и микровинт контактируют с деталью и трещотка стабилизирует усилие сжатия, чтобы не сорвать резьбу винта и не деформировать деталь.

Порядок снятия показания. На стебле 5 нанесена горизонтальная шкала, которая уходит под цилиндр барабана 6 (см. рис. 1). На шкале имеется прямая горизонтальная линия (риски). Снизу риски расположены деления с шагом в 1 мм, сверху – деления с таким же шагом, но смещенные на 0,5 мм относительно нижних делений. Круговая шкала на барабане имеет 50 делений с ценой 0,01 мм (см. рис. 1). Полная величина показания (размеров детали) складывается из отсчета по шкале стебля и отсчета по шкале барабана.

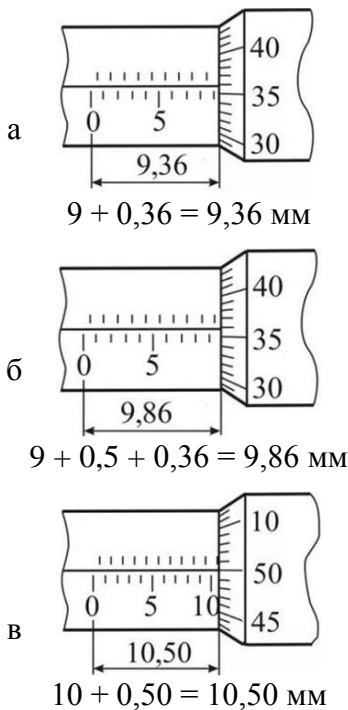


Рис. 2

Рассмотрим примеры снятия показания микрометра (рис. 2). Отметим последний полностью открытый скосом барабана штрих ниже горизонтальной риски шкалы стебля. Его значение составляет целое число миллиметров (на рис. 2а, б оно равно 9 мм). Если правее этого штриха сверху горизонтальной риски имеется открытый штрих, то нужно прибавить 0,5 мм к полученному значению (рис. 2б).

При отсчете по круговой шкале берут значение, которое совпадает с горизонтальной риской стебля (на рис. 2а, б оно с учетом цены деления равно 0,36 мм). Распространенной ошибкой является случай, когда неверно учитывают (или не учитывают) величину 0,5 мм по шкале стебля сверху риски. Это связано с тем, что ближайший к барабану штрих шкалы может быть открыт частично (рис. 2в).

При отсчете по круговой шкале берут значение, которое совпадает с горизонтальной риской стебля (на рис. 2а, б оно с учетом цены деления равно 0,36 мм).

Распространенной ошибкой является случай, когда неверно учитывают (или не учитывают) величину 0,5 мм по шкале стебля сверху риски. Это связано с тем, что ближайший к барабану штрих шкалы может быть открыт частично (рис. 2в).

РАБОТА СО ШТАНГЕНЦИРКУЛЕМ

Штангенциркуль – инструмент, используемый для измерения наружных и внутренних линейных размеров, глубин отверстий и пазов. Основные элементы конструкции штангенциркуля представлены на рис. 1.

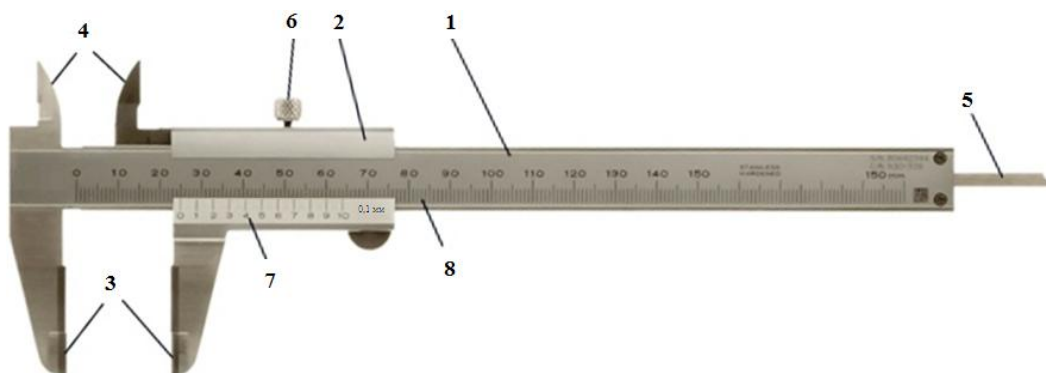


Рис. 1.

1 – штанга; 2 – рамка; 3 – губки для измерений наружных размеров;
4 – губки для измерений внутренних размеров; 5 – линейка глубиномера;
6 – стопорный винт для фиксации рамки; 7 – нониус; 8 – шкала штанги

Порядок проведения измерений. Для определения наружных размеров губки штангенциркуля плотно с небольшим усилием, без зазоров и перекосов прижимают к детали.

При измерении размеров отверстий губки штангенциркуля располагают в диаметрально противоположных точках.

Чтобы измерить глубину отверстия, штангу устанавливают у его края перпендикулярно поверхности детали. Линейку глубиномера выдвигают до упора в дно при помощи подвижной рамки.

Полученный размер фиксируют стопорным винтом и определяют показания.

Порядок снятия показания. Для определения показаний штангенциркуля (размеров детали) необходимо сложить отсчеты по шкалам штанги (числа целых миллиметров) и нониуса (долей мм).

Рассмотрим примеры снятия показания штангенциркуля (рис. 2). По шкале штанги отсчитывается слева направо количество целых миллиметров. Указателем служит нулевой штрих нониуса. Для отсчета долей миллиметра необходимо найти тот штрих нониуса, который наиболее точно совпадает с одним из штрихов шкалы штанги (на рис. 2 совпадающий штрих нониуса выделен жирным). После этого нужно умножить порядковый номер этого штриха на цену деления нониуса, указанной на рамке (в примере цена деления равна 0,1).

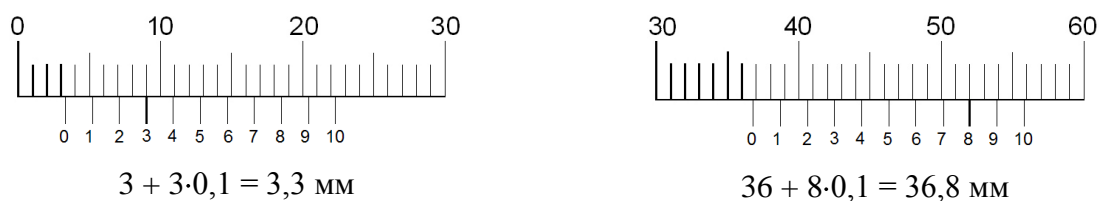


Рис. 2.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

Пусть в результате эксперимента получено n значений измеряемой величины u : u_1, u_2, \dots, u_n .

Обработка результатов измерения включает в себя этапы:

1. Рассчитывается среднее значение измеряемой величины

$$\langle u \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{n} = \frac{u_1 + u_2 + \dots + u_n}{n}.$$

2. Рассчитывается абсолютная погрешность каждого измерения

$$\Delta u_i = |u_i - \langle u \rangle|.$$

3. Рассчитывается квадрат абсолютной погрешности каждого измерения $(\Delta u_i)^2$.

Рассчитывается их сумма

$$\sum_{i=1}^n (\Delta u_i)^2 = (\Delta u_1)^2 + (\Delta u_2)^2 + \dots + (\Delta u_n)^2.$$

4. Рассчитывается доверительный интервал

$$\Delta_u = t_{\alpha, n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta u_i)^2}{n(n-1)}},$$

где $t_{\alpha, n}$ – коэффициент Стьюдента, значение которого определяется по таблице в зависимости от числа опытов n и доверительной вероятности α .

Чем выше вероятность α , тем больше будет доверительный интервал.

Рекомендуется брать $\alpha = 0,95$.

Таблица значений коэффициента Стьюдента

$\alpha \backslash n$	3	4	5	10	15
0,70	1,3	1,3	1,2	1,1	1,1
0,95	4,3	3,2	2,8	2,3	2,1
0,99	9,9	5,8	4,6	3,3	3,0

5. Рассчитывается относительная погрешность измерения

$$E = \frac{\Delta_u}{\langle u \rangle} \cdot 100 \%$$

Результат измерения нужно представить в виде

$$u = \langle u \rangle \pm \Delta_u \quad E = \dots \%$$

где $\langle u \rangle$ – среднее значение измеряемой величины; Δ_u – доверительный интервал; E – относительная погрешность измерения.

ТАБЛИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Основные физические постоянные

Ускорение свободного падения	$g = 9,81 \text{ м/с}^2$.
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$.
Газовая постоянная	$R = 8,31 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$.
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$.
Элементарный заряд	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.
Скорость света в вакууме	$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.
Постоянная Планка	$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.
Постоянная Планка	$\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$.
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$.
Постоянная Вина	$b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$.
Постоянная Стефана – Больцмана	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$.
Масса покоя электрона	$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$.
Масса покоя протона	$m_p = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.

Эффективный диаметр молекул, динамическая вязкость и теплопроводность газов при нормальных условиях

Вещество	Эффективный диаметр, нм	Динамическая вязкость, мкПа·с	Теплопроводность мВт/(м·К)
Азот	0,38	16,6	24,3
Аргон	0,35	21,5	16,2
Водород	0,28	8,66	168
Воздух	0,27	17,2	24,1
Гелий	0,22	18,9	142
Кислород	0,36	19,8	24,4
Пары воды	0,30	8,32	15,8

Динамическая вязкость жидкостей при 20 °С, мкПа·с

Вода	1,00
Глицерин	1480
Масло касторовое	987
Масло машинное	100
Ртуть	1,58

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Лабораторная работа 1–2	
Изучение законов вращательного движения на маятнике Обербека	5
Лабораторная работа 1–4	
Часть 1. Изучение второго закона Ньютона при движении тела в вязкой среде	9
Часть 2. Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса	12
Лабораторная работа 1–7	
Определение момента инерции тел методом крутильных колебаний	14
Лабораторная работа 1–9	
Часть 1. Определение ускорения силы тяжести методом оборотного маятника	18
Часть 2. Определение момента инерции оборотного маятника и проверка закона сохранения энергии	21
Лабораторная работа 2–1	
Определение отношения теплоемкостей газа методом адиабатического расширения	26
Лабораторная работа 2–2	
Определение коэффициента вязкости воздуха	30
ПРИЛОЖЕНИЯ	34
ТАБЛИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	38

Физический практикум.
Механика и молекулярная физика

*Методические указания
к лабораторным работам*

Составители: В.В. Измайлов, М.В. Новоселова.

Корректор Я.А. Петрова
Технический редактор Ю.Ф. Воробьева

Подписано в печать

Формат 60x84/16

Физ. печ. л.

Тираж 100 экз.

Усл. печ. л.

Заказ №

Бумага писчая

Уч.-изд. л.

С –

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22