

Министерство образования и науки Российской Федерации
Калужский филиал
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
(КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Горбунов А.К., Китаева Т.С., Силаева Н.А., Крицкая А.Р.,
Лысенко А.Л., Петросян О.П.

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ
ОСНОВЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ. ФИЗИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ.**

Методические указания к выполнению лабораторных работ
по курсам «Физика» и «Физика и естествознание»

для всех специальностей и направлений подготовки

Калуга, 2018

Методические указания составлены в соответствии с учебным планом для подготовки специалистов и бакалавров по следующим специальностям и направлениям подготовки КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана: 15.03.01, 09.03.04, 10.03.01, 13.03.03, 09.03.01, 11.03.03, 15.03.06, 20.03.01, 27.03.05, 27.03.04, 10.05.03, 15.05.01, 23.05.01

Методические указания рассмотрены и одобрены:

Кафедрой «Физика» (ФН4-КФ)

Зав. кафедрой ФН4-КФ _____ протокол № 7 от 19.02 2018 г.
18 д.ф.-м.н., профессор А.К. Горбунов

Методической комиссией ФНК

Председатель метод.комиссии _____ протокол № 2 от 28 декабря 2018 г.
Анфил к.х.н., доцент К.Л. Анфилов

Методической комиссией КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана

Протокол № 2 от 06.03 2018 г.
Председатель метод.комиссии _____ д.э.н., профессор О.Л.

Перерва

Рецензент _____ профессор кафедры ФН5-КФ, д.т.н., М.В. Астахов

Авторы _____ профессор кафедры ФН4-КФ, д.ф.-м.н., А.К. Горбунов

_____ доцент кафедры ФН4-КФ, к.т.н., Т.С. Китаева

_____ ст. преподаватель кафедры ФН4-КФ, Н.А. Силаева

_____ доцент кафедры ФН4-КФ, к.п.н., А.Р. Крицкая

_____ доцент кафедры ФН4-КФ, к.т.н., А.Л. Лысенко

_____ доцент кафедры ФН4-КФ, к.ф.-м.н., О.П. Петросян

Аннотация.

Методические указания составлены в соответствии с рабочей программой курса «Физика» и «Физика и естествознание» и предназначены для выполнения лабораторных работ студентами I курса всех специальностей и направлений подготовки КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Методические указания содержат цели работы, краткую теоретическую и экспериментальную часть, анализ обработки результатов измерения, методику выполнения и оформления лабораторных работ, контрольные вопросы.

© КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018 г.

© Горбунов А.К.

© Китаева Т.С.

© Силаева Н.А.

© Крицкая А.Р.

© Лысенко А.Л.

© Петросян О.П.

СОДЕРЖАНИЕ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПЕРИОДА КОЛЕБАНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА»	8
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	8
1.1. Погрешности при измерениях	8
1.2. Оценка случайных погрешностей прямых измерений.....	9
1.3. Оценка случайных погрешностей косвенных измерений.....	16
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	17
3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА	17
4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....	20
5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	21
6. ПРИЛОЖЕНИЕ	21

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРИБОРА (МАШИНЫ) АТВУДА».....	22
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	22
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	27
3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА	29
4. АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ.....	30
5. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....	31
6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	32

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТИ НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ»	33
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	33
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	36
3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА	38

4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....	39
5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	40

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ МАЯТНИКА МАКСВЕЛЛА».....	41
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	41
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	45
3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА	46
4. АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ.....	47
5. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....	48
6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	48

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОГАРИФМИЧЕСКОГО ДЕКРЕМЕНТА ЗАТУХАНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ».....	50
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	50
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	52
3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА	54
4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....	55
5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	56

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ С ПОМОЩЬЮ МАЯТНИКА ОБЕРБЕКА»	57
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	57
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	62
3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА	63

4. АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ.....	64
5. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....	65
6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	66

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ МОЛЯРНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ГАЗА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ И ОБЪЕМЕ ПО МЕТОДУ КЛЕМАНА И ДЕЗОРМА».....	67
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	67
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	69
3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА	73
4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....	75
5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	75

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8.....

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ МЕТОДОМ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ».....	76
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	76
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	78
2.1. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ	78
2.2. ПОДГОТОВКА УСТАНОВКИ К РАБОТЕ	79
3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА	80
4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....	82
5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	83

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ»	84
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	84
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	89

3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА	90
4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....	92
5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	93

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПОЛЕТА ПУЛИ С ПОМОЩЬЮ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО КРУТИЛЬНОГО МАЯТНИКА».....	94
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	94
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	98
3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА	99
4. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ	101
5. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....	101
6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	102

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №11

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ МЕТОДОМ НАКЛОННОГО МАЯТНИКА»	103
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	103
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	105
2.1. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ	105
2.2. ПОДГОТОВКА УСТАНОВКИ К РАБОТЕ	105
3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА	109
4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....	110
5. ПРИЛОЖЕНИЕ	111

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №12

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПО МЕТОДУ СТОКСА».....	114
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	114

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	116
3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА	118
4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....	120
5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	120
6. ПРИЛОЖЕНИЕ	120
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №13	
«ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ФИЗИЧЕСКОГО МАЯТНИКА».....	123
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	123
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	128
3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА	130
4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....	131
5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	132
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №14	
«ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА»	133
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	133
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	135
3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА	138
4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....	139
5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	140
ЛИТЕРАТУРА	141

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПЕРИОДА КОЛЕБАНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА»

Цель работы: изучить характер распределения погрешностей прямых измерений и оценить их величину при определении периода колебаний математического маятника.

Приборы и принадлежности: математический маятник; секундомер электронный.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1. Погрешности при измерениях

Измерить физическую величину – значит сравнить её с другой однородной величиной, принятой за эталон (меру). Этому эталону присваивают конкретное название единицы измерения.

Различают *прямые измерения*, при которых искомая величина измеряется непосредственно, и *косвенные измерения*, при которых искомая величина связана функциональной зависимостью с другими величинами, измеряемыми непосредственно. Например, при определении скорости движения тела могут быть измерены длина пройденного пути и затраченное на этот путь время, а затем по известным формулам рассчитана скорость тела.

Из-за несовершенства измерительной аппаратуры при любых измерениях получаются лишь приближенные значения измеряемых величин. Это означает, что при любых измерениях мы неизбежно допускаем некоторые ошибки (погрешности). В задачу измерений, кроме определения измеряемой величины, входит оценка допущенных погрешностей.

Погрешности делятся на две основные группы: систематические и случайные.

Систематические погрешности обусловлены ограниченной точностью измерительных приборов, неточностью метода измерений, неточностью изготовления объекта измерений. Например, шкала линейки может быть неравномерной, стрелка амперметра может не стоять на нуле при отсутствии электрического тока, капилляр термометра может иметь на различных участках различное сечение и т. д. Такие ошибки принципиально устранимы.

Случайные погрешности обусловлены большим числом как объективных, так и субъективных причин, действие которых на каждое

измерение не может быть учтено заранее. К таким погрешностям приводят: неточность измерительных приборов, связанная, например, с изменением силы трения в движущихся частях приборов; непостоянство внешних условий опыта, например, случайные колебания температуры; несовершенство органов чувств и т.п.

Исключить случайные погрешности нельзя, но оценить их можно, поскольку они подчиняются законам теории вероятностей, установленным для случайных явлений.

1.2. Оценка случайных погрешностей прямых измерений

В теории погрешностей делается два основных предположения:

- 1) случайные погрешности одинаковой величины, но разного знака встречаются одинаково часто;
- 2) большие (по абсолютной величине) погрешности встречаются реже, чем малые.

Если провести серию из n прямых измерений некоторой физической величины a и получить при этом значения $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$, то, очевидно, средняя арифметическая величина

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i$$

будет достовернее отдельных результатов.

Назовем абсолютной погрешностью измерения разность между истинным значением измеряемой величины и результатом каждого измерения:

$$\Delta a_1 = a - a_1;$$

$$\Delta a_2 = a - a_2;$$

.....

$$\Delta a_n = a - a_n.$$

При бесконечно большом числе измерений, в силу первого предположения, среднее арифметическое значение будет равно истинному значению определяемой величины:

$$\bar{a} = a \quad (\text{при } n \rightarrow \infty),$$

ибо в этом случае среднее арифметическое значение абсолютной погрешности обратилось бы в нуль:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta a_i = 0.$$

При ограниченном количестве измерений среднее арифметическое значение \bar{a} будет отличаться от истинного. Чтобы оценить это расхождение, нужно установить некоторый интервал, в пределах которого лежит измеряемая величина (доверительный интервал). Для того чтобы найти этот доверительный интервал, необходимо установить, с какой частотой появляются погрешности различной величины, т. е. установить закон распределения погрешностей. Теория вероятностей помогает найти этот закон. Величина погрешности Δa_i может принимать различные значения.

Разобьем полный интервал измерения переменной величины на более узкие равные интервалы и будем определять, с какой частотой появится погрешность в данном узком интервале (рис. 1).

При стремлении ширины узкого интервала к нулю и числа измерений к бесконечности ломаная линия превращается в плавную кривую распределения погрешностей, аналитическая формула которой имеет следующий вид:

$$Y(\Delta a_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{\Delta a_i^2}{2\sigma^2}}}.$$

Функция $Y(\Delta a_i)$ называется плотностью распределения вероятностей погрешности Δa_i . Здесь e - основание натуральных логарифмов; σ - некоторый параметр распределения.

В этом законе максимум кривой соответствует $\Delta a_i = 0$. Следовательно, при бесконечно большом числе измерений истинное значение величины оказывается наиболее вероятным.

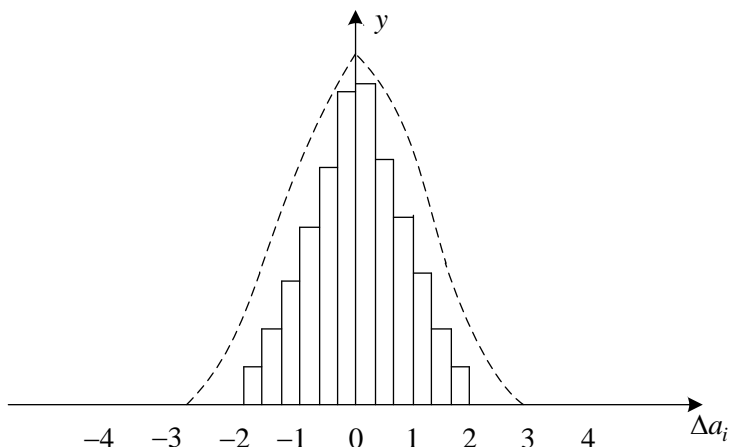


Рис. 1. Закон нормального распределения Гаусса

Входящий в этот закон распределения (Гаусса) параметр σ^2 называется *дисперсией*. Эта величина характеризует разброс погрешностей: при большом значении дисперсии кривая расплывается; в случае $\sigma = 2$ большие отклонения от истинного значения измеряемой величины встречаются чаще, чем в случае $\sigma = 1$ (рис. 2).

Величина σ зависит от условий измерений и может быть приближенно выражена через измеряемые величины. Можно показать, что если число наблюдений очень велико ($n \rightarrow \infty$), то величина дисперсии оказывается равной среднему арифметическому квадрату погрешностей отдельных измерений (рис. 1):

$$\sigma_n^2 = \Delta S_n^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta a_i^2.$$

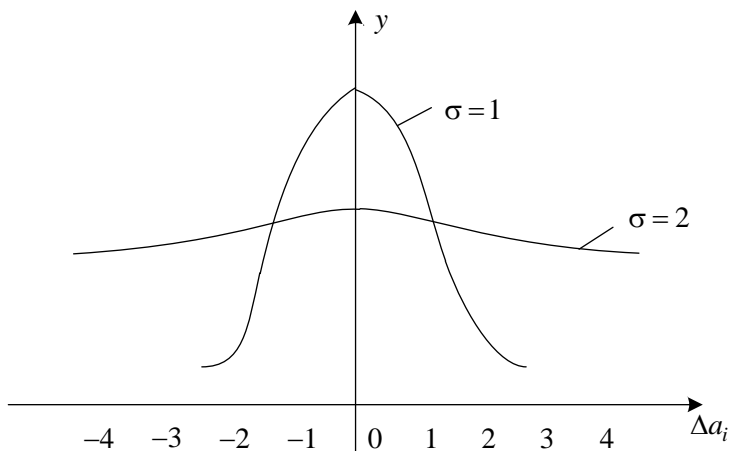


Рис. 2. Пример кривых Гаусса

При ограниченном числе измерений приближенным выражением для дисперсии распределения погрешностей результата серии измерений будет следующее:

$$\sigma_a^2 \approx \Delta S_a^2 = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \Delta a_i^2.$$

В этом случае погрешность отдельного измерения Δa_i находится как разность между средним арифметическим значением и результатом данного измерения.

После того как выполнена серия измерений и получено среднее арифметическое значение этой серии, а также определена дисперсия этих измерений, можно определить, насколько среднее арифметическое значение отличается от истинного значения измеряемой величины. Для этого в теории погрешностей пользуются понятием «доверительный интервал» и «надежность». Эти понятия взаимно связаны и определяются следующим образом.

Под *доверительным интервалом* понимается интервал, в середине которого расположено среднее арифметическое значение измеряемой величины:

$$(\bar{a} - \Delta a, \bar{a} + \Delta a),$$

где Δa - полуширина доверительного интервала, которая является оценкой погрешности результата измерений.

Истинное значение a измеряемой величины с заданной надежностью находится в заданном интервале:

$$\bar{a} - \Delta a \leq a \leq \bar{a} + \Delta a.$$

Под *надежностью* результата серии измерений понимается вероятность α того, что истинное значение измеряемой величины попадает в доверительный интервал. Величина α выражается в процентах или долях единицы. Чем больше значение погрешности Δa , тем с большей надежностью искомая величина попадает в этот интервал.

Задавая Δa в долях σ_a , можно получить величину надежности в соответствии с кривыми распределения погрешностей. Так, при многократном повторении серии измерений по n измерений в каждой, где $n \geq 30$, и при $\Delta a = \sigma_a$, т. е. в случае доверительного интервала $(\bar{a} - \sigma_a, \bar{a} + \sigma_a)$, надежность $\alpha \approx 0,68$ (или 68%). Это значит, что за пределы доверительного интервала выпадает $\approx 32\%$ результатов измерений.

При $\Delta a = 2\sigma_a$ $\alpha \approx 0.95$.

При $\Delta a = 3\sigma_a$ $\alpha \approx 0.997$.

В последнем случае лишь 0,3% результатов измерений выпадает за пределы доверительного интервала. На рис. 3. приведены графики, характеризующие величину надежности при разных k (заштрихованная площадь кривой). Здесь

$$\Delta a = k\sigma_a,$$

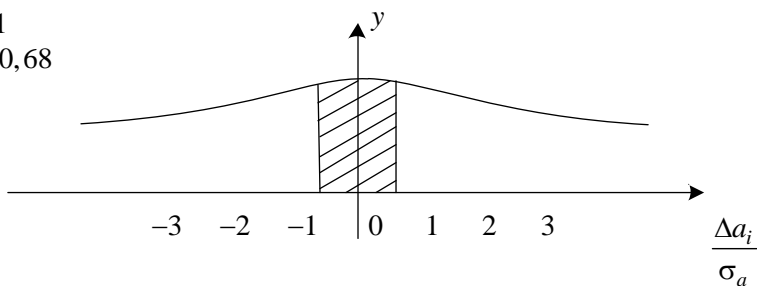
где k - коэффициент, определяющий величину доверительного интервала.

Рассмотренный нами закон нормального распределения Гаусса оказывается несправедливым при малых значениях числа измерений.

Английскому ученому Госсету (псевдоним «Стьюдент») удалось получить кривые распределения в случае небольшого числа измерений. Распределение Стьюдента позволяет оценить величину погрешности результата измерений и найти доверительный интервал при заданном числе измерений и заданной величине надежности.

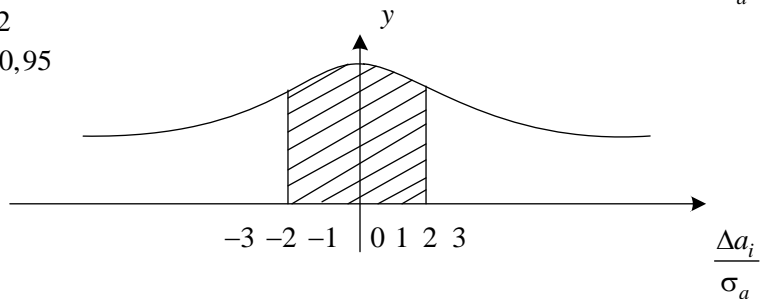
$$k = 1$$

$$\alpha = 0,68$$



$$k = 2$$

$$\alpha = 0,95$$



$$k = 3$$

$$\alpha = 0,997$$

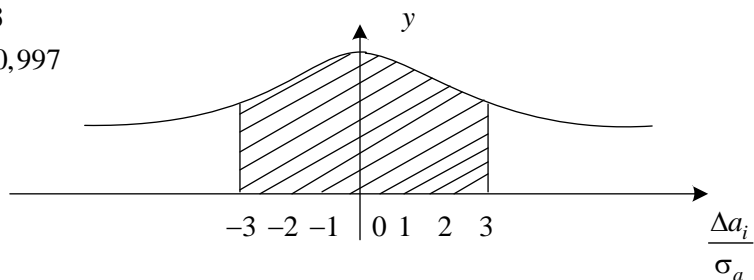


Рис. 3. Графики, характеризующие величину надежности (заштрихованная область) в соответствии с кривыми распределения погрешностей

Пределы истинного значения измеряемой величины

$$\bar{a} - \Delta a \leq a \leq \bar{a} + \Delta a$$

могут быть найдены с помощью определенных коэффициентов Стьюдента t_α .

Искомая величина находится в следующем виде:

$$\bar{a} \pm \Delta a,$$

где

$$\Delta a = t_{\alpha} \cdot \Delta S_{\alpha};$$
$$\Delta S_{\alpha} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \Delta a_i^2};$$

ΔS_{α} - средняя квадратичная погрешность результатов измерений.

Коэффициент t_{α} находится по табл. 2 для соответствующих величин числа измерений и надежности.

Для оценки точности измерений вводится понятие относительной погрешности ε :

$$\varepsilon = \pm \frac{\Delta a}{\bar{a}}.$$

Обычно эта погрешности выражается в процентах:

$$\varepsilon = \pm \frac{\Delta a}{\bar{a}} \cdot 100\%.$$

Вычисления при обработке результатов прямых измерений рекомендуется проводить в определенном порядке:

1. Записать результаты каждого измерения в таблицу.
2. Вычислить среднее значение из n измерений:

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta a_i.$$

3. Найти погрешность отдельных измерений:

$$\Delta a_i = a - a_i.$$

4. Вычислить квадраты погрешностей отдельных измерений Δa_i^2 . Резко отличающиеся измерения отбросить, считая их промахами.
5. Определить среднюю квадратичную погрешность результата серии измерений:

$$\Delta S_{\alpha} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \Delta a_i^2}.$$

6. Задать значение надежности α .
7. Определить коэффициент Стьюдента $t_{\alpha}(n)$ для заданной надежности α и числа произведенных измерений n по табл. 2.
8. Найти полуширину доверительного интервала (погрешность результата измерений):

$$\Delta a = t_{\alpha} \cdot \Delta S_{\alpha}.$$

9. Если величина погрешности результата измерений окажется сравнимой с величиной погрешности прибора, то в качестве полуширины доверительного интервала взять величину

$$\Delta a = \sqrt{t_{\alpha}(n) \cdot \Delta S_a^2 + (k_a/3)^2 \cdot \delta^2},$$

где $k_{\alpha} = t_{\alpha}(\infty)$; δ - величина погрешности прибора.

У некоторых приборов за погрешность δ принимается цена деления прибора.

1.3. Оценка случайных погрешностей косвенных измерений

Оценить границы доверительного интервала при косвенных измерениях чрезвычайно сложно, и в настоящее время не существует универсального способа определения этих границ для заданной надежности. Предлагается принять приближенную оценку погрешности косвенных измерений в соответствии с приведенной ниже литературой.

Если измеряемая физическая величина является функцией нескольких переменных

$$z = f(a, b, c, \dots),$$

то в этом случае нужно руководствоваться следующими правилами:

1. Для каждой серии измерений входящих величин необходимо провести обработку результатов, описанную в предыдущем параграфе, и получить значения доверительных интервалов

$$\Delta a, \Delta b, \Delta c, \dots$$

При этом для всех измеряемых величин задается одно и то же значение надежности α .

2. Границы доверительного интервала для результата косвенных измерений могут быть определены по формуле

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a}\right)^2 \Delta a^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b}\right)^2 \Delta b^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial c}\right)^2 \Delta c^2 + \dots};$$

здесь $\partial f / \partial a$, $\partial f / \partial b$, $\partial f / \partial c$, ... - частные производные, которые вычисляются при средних значениях параметров:

$$a = \bar{a}; b = \bar{b}; c = \bar{c}; \dots$$

(Частная производная функций многих переменных по одной переменной является обычной производной по этой переменной, если другие переменные при этом считаются постоянными.)

3. Окончательный результат записать в следующем виде:

$$f(a,b,c,...) \pm \Delta f.$$

4. Определить относительную погрешность результата:

$$\varepsilon = \frac{\Delta f}{f(a,b,c,...)} \cdot 100\%.$$

В заключение сделаем два замечания:

1. Если случайные погрешности результатов измерений меньше, чем погрешность измерительного прибора, то только погрешность прибора определит погрешность окончательного результата как прямых, так и косвенных измерений.
2. Необходимо помнить правила округления результатов. Например, если величина абсолютной погрешности составляет сотые доли, значит, мы ошибаемся в сотых долях, и нет смысла сохранять тысячные доли в результате.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В данной работе предлагается провести многократные измерения периода колебания математического маятника (при постоянной амплитуде) с помощью электрического секундомера с ценой деления 0,01 с, являющейся погрешностью δ секундомера.

3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Установить длину маятника 1 м.
2. Вывести маятник из положения равновесия, задав амплитуду, например 10 см.
3. Отпустить маятник. После того как будет совершено одно его полное колебание, измерить период одного следующего полного колебания. Для этого в момент прохождения маятником крайнего положения включить секундомер. При повторном прохождении этого же крайнего положения секундомер выключить.
4. Измерения, указанные в п. 3, провести n раз, положив $n = 60$.
5. Полученные значения периодов занести в табл. 1.

Таблица 1

Значения периодов колебаний

i	$T_i, \text{с}$	$\Delta T_i, \text{с}$	$\Delta T_i^2, \text{с}^2$
-----	-----------------	------------------------	----------------------------

1			
2			
3			
⋮			
⋮			
⋮			
60			
$\bar{T} =$		$\sigma =$	

6. Для построения гистограммы необходимо:

- а) по горизонтальной оси отложить время, соответствующее полученным периодам колебаний, в масштабе 0,25 см: 0,01 с, приняв за начало координат минимальное значение периода (см. рис. 4). По вертикальной оси отложить число появлений n^* того или иного периода в масштабе 0,5 см : 1 появление;
- б) обозначив минимальный период через T_0 , подсчитать общее число появлений четырех периодов: T_0 , $T_0 + 0,01с$, $T_0 + 0,02с$, $T_0 + 0,03с$. На отрезке $[T_0, T_0 + 0,04с]$ построить прямоугольник с высотой, равной общему числу появлений этих четырех периодов.
- в) подсчитать общее число появлений следующих четырех периодов: $T_0 + 0,04с$, $T_0 + 0,05с$, $T_0 + 0,06с$, $T_0 + 0,07с$. За основание соответствующего прямоугольника взять отрезок $[(T_0 + 0,04с), (T_0 + 0,08с)]$. Высота прямоугольника должна быть равна соответствующему числу появлений периодов;
- г) указанные построения проделать для всех периодов, полученных в эксперименте.

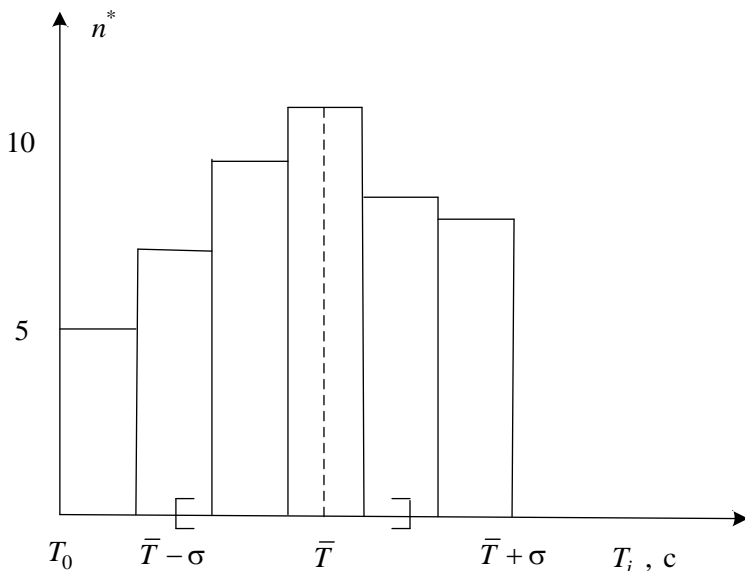


Рис. 4. Построение гистограммы

7. Провести обработку результатов измерений в следующем порядке:
- а) вычислить среднее значение \bar{T} из n измерений:

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i;$$

- б) вычислить погрешности отдельных измерений:

$$\Delta T = \bar{T} - T_i;$$

- в) вычислить квадраты погрешностей отдельных измерений ΔT_i^2 ;

- г) определить среднюю квадратичную погрешность результата серии измерений:

$$\sigma = \Delta S_T = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \Delta T_i^2};$$

- д) результаты, полученные в пп. а – г, занести в табл. 1;

- е) найти в табл. 2 коэффициент Стьюдента $t_\alpha(n)$ для надежности $\alpha = 0,95$ и числа проведенных измерений $n = 60$;

- ж) определить полуширину доверительного интервала:

$$\Delta T = t_{\alpha}(n) \cdot \Delta S_T;$$

з) окончательный результат записать в виде

$$\bar{T} \pm \Delta T;$$

и) оценить относительную погрешность результата серии измерений:

$$\varepsilon = \frac{\Delta T}{\bar{T}} \cdot 100\%.$$

8. На оси периодов T отметить среднее арифметическое значение \bar{T} , величины $\bar{T} - \Delta T$ и $\bar{T} + \Delta T$. При достаточно большом числе измерений в интервал $(\bar{T} - \Delta T, \bar{T} + \Delta T)$ должно попадать наибольшее число значений полученных периодов.
9. Для точных измерений периода колебаний маятника обычно используют метод, при котором изменяется время t большего числа n колебаний. Положив $n=60$, найти период колебаний по формуле

$$T = t/n$$

и сравнить этот результат со значением T в п. 7а.

4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Представить отчет по лабораторной работе на стандартных листах формата А4 в соответствии с методикой выполнения и оформления лабораторных работ по физике:

1. Прочитать описание лабораторной работы, ознакомиться с теоретической и экспериментальной частью, выполнением эксперимента, контрольными вопросами.
2. Придерживаясь следующего плана, оформить отчет о выполнении лабораторной работы:
 - 1) записать номер и название лабораторной работы;
 - 2) записать цель лабораторной работы;
 - 3) записать приборы и принадлежности, включая измерительную линейку, штангенциркуль, секундомер электронный, микрометр и т. д.;
 - 4) теоретическая часть: записать основной закон или расчетную формулу с разъяснением буквенных обозначений физических величин, входящих в них, указать единицы измерений в СИ;

- 5) экспериментальная часть: привести схему установки, рисунок или чертеж, поясняющий выполнение эксперимента; записать таблицу измерений, константы расчета;
- 6) обработка результатов измерений: вычисление физических величин в СИ; построение графиков на миллиметровке, скрепленной с отчетом; расчет погрешностей измерений;
- 7) записать ответ. Сделать выводы.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется доверительным интервалом и надежностью?
2. Что такое средняя квадратичная погрешность?
3. Что такое дисперсия распределения?
4. В каком случае дисперсия распределения равна квадрату средней квадратичной погрешности?
5. Зависит ли точность измерения периода колебания маятника методом, использованным в п. 9, от величины начальной амплитуды?

6. ПРИЛОЖЕНИЕ

Для большинства технических измерений ГОСТ (государственный стандарт) или ОСТ (отраслевой стандарт) устанавливают надежность измерений $\alpha = 0,95$. Поэтому и в нашем практикуме вы будете все результаты приводить с надежностью $\alpha = 0,95$. При этом для нашего практикума из таблицы Стьюдента потребуется только следующая строчка (табл. 2).

Таблица 2

Часть из таблицы Стьюдента для $\alpha = 0,95$

n	2	3	4	5	6	...	10	...	60
$t_{\alpha}(n)$	12,7	4,3	3,2	2,8	2,7		2,2		2

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРИБОРА (МАШИНЫ) АТВУДА»

Цель работы: определить ускорение свободного падения с помощью машины Атвуда.

Приборы и принадлежности: прибор Атвуда; встроенный миллисекундомер универсальный.

Назначение прибора (машины) Атвуда: предназначен для изучения прямолинейного равномерного и равнопеременного движения, в частности для определения ускорения свободного падения тел.

Правила безопасности труда при работе с прибором Атвуда:

1. Прибор разрешается эксплуатировать только при применении заземления и подробном ознакомлении с разделом «Экспериментальная часть» данного описания.
2. При работе с прибором следует соблюдать меры предосторожности согласно общим правилам по безопасности труда для устройств, в которых существует напряжение величиной до 220 В.
3. Во избежании обрыва нити установка грузов в начальное положение производится при **выключенной** клавише «СЕТЬ»!

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В основе классической механики лежат три закона Ньютона, которые возникли в результате обобщения большого количества опытных фактов (1687 г.). Классическая механика является механикой тел больших масс (по сравнению с массой атомов), движущихся с малыми скоростями (по сравнению со скоростью света в вакууме).

I закон Ньютона: любое тело сохраняет состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения до тех пор, пока воздействие со стороны других тел не заставит его изменить это состояние, т. е.

$$\vec{v} = \text{const} \ (\vec{v} = 0), \text{ если } \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0, \quad (1)$$

где $\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$ - равнодействующая всех сил $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$, действующих на тело. I закон Ньютона устанавливает факт существования инерциальных систем отсчета – в этом его значимость.

II закон Ньютона: ускорение, с которым тело движется относительно инерциальной системы отсчета, прямо пропорционально равнодействующей всех сил, действующих на тело, обратно пропорционально массе тела и по направлению совпадает с равнодействующей всех сил:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n}{m}. \quad (2)$$

Каждая сила $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$, действующая на данное тело, сообщает ему ускорение, как если бы другие силы отсутствовали. В этом заключается принцип независимости действия сил. Запишем II закон Ньютона в следующем виде:

$$m\vec{a} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n. \quad (3)$$

Выражение (3) называют *основным уравнением динамики поступательного движения материальной точки в векторной форме*.

В скалярной форме выражение (3) представляет собой систему двух уравнений (в декартовой системе координат xOy), связывающих проекции сил и ускорений по соответствующим осям:

$$\begin{cases} ma_x = F_{1x} + F_{2x} + \dots + F_{nx}; \\ ma_y = F_{1y} + F_{2y} + \dots + F_{ny}. \end{cases} \quad (4)$$

Запишем основное уравнение динамики в более общей форме с учетом того, что $\vec{a} = d\vec{v}/dt$:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F},$$

где \vec{F} - равнодействующая сила.

При $m = \text{const}$

$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = \vec{F},$$

где $m\vec{v} = \vec{p}$ - импульс тела (количество движения); $d(m\vec{v})/dt$ - скорость изменения импульса тела.

Получаем

$$d(m\vec{v}) = \vec{F} \cdot dt,$$

где $\vec{F} \cdot dt$ - импульс силы.

III закон Ньютона: два тела взаимодействуют друг с другом в инерциальной системе отсчет с силами, равными по величине, противоположными по направлению и приложенными к различным телам:

$$\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1}$$

- в векторной форме;

$$F_{1,2} = F_{2,1}$$

- в скалярной форме, где $\vec{F}_{1,2}$ - сила, действующая на первое тело со стороны второго; $\vec{F}_{2,1}$ - сила, действующая на второе тело со стороны первого.

Различные взаимодействия, известные современной физике, сводятся к четырем типам: гравитационные, электромагнитные, сильные и слабые.

В рамках классической механики учитываются две разновидности электромагнитных сил – силы упругости и силы трения, и гравитационные силы – сила всемирного тяготения и, как частный её случай, сила тяжести.

Действительно, согласно закону всемирного тяготения:

$$|\vec{F}_{\text{тяг}}| = F_{\text{тяг}} = \gamma \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}, \quad (5)$$

где m_1 и m_2 - массы взаимодействующих материальных точек (или тел со сферически-симметричным распределением масс); r - расстояние между ними (или между их центрами); γ - гравитационная постоянная: $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$.

Если $m_1 = M_3$ - масса Земли, $m_2 = m$ - масса произвольного тела вблизи поверхности Земли, тогда:

$$F = \gamma \frac{M_3}{R_3^2} m,$$

где R_3 - радиус Земли.

Величина, численно равная $\gamma M_3 / R_3^2$, называется *ускорением свободного падения у поверхности Земли*:

$$g = \gamma \frac{M_3}{R_3^2} = 9,807 \text{ м/с}^2.$$

Тогда $\vec{F} = m\vec{g}$ - сила тяжести.

На рис. 1 представлена механическая система: через неподвижный невесомый блок, который вращается с малым трением (сила трения пренебрежимо мала), перекинута невесомая нерастяжимая нить, к концам которой прикреплены грузы массой M каждый. На один из грузов положен перегрузок массой m , после чего система из состояния покоя приходит в равноускоренное движение. На расстоянии S_1 от начала движения перегрузок m отцепляется кольцом, после чего система продолжает равномерное движение по пути S_2 . Таким образом, S_1 - путь равноускоренного движения; t_1 - время равноускоренного движения; S_2 - путь равномерного движения; t_2 - время равномерного движения.

Рассмотрим силы, действующие на каждый из грузов. На первый груз действуют: $M\vec{g}$ - сила тяжести; \vec{T}_1 - сила натяжения нити; $\vec{F}_д$ - сила давления перегрузка.

Запишем основное уравнение динамики поступательного движения (II закон Ньютона) для первого груза в векторной и скалярной форме на ось X :

$$\begin{aligned} M\vec{a}_1 &= M\vec{g} + \vec{T}_1 + \vec{F}_д; \\ X : Ma_1 &= Mg + F_д - T_1. \end{aligned} \quad (6)$$

На второй груз действуют: $M\vec{g}$ - сила тяжести; \vec{T}_2 - сила натяжения нити.

Для второго груза основное уравнение динамики поступательного движения в векторной и скалярной форме на ось X запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} M\vec{a}_2 &= M\vec{g} + \vec{T}_2; \\ X : Ma_2 &= T_2 - Mg. \end{aligned} \quad (7)$$

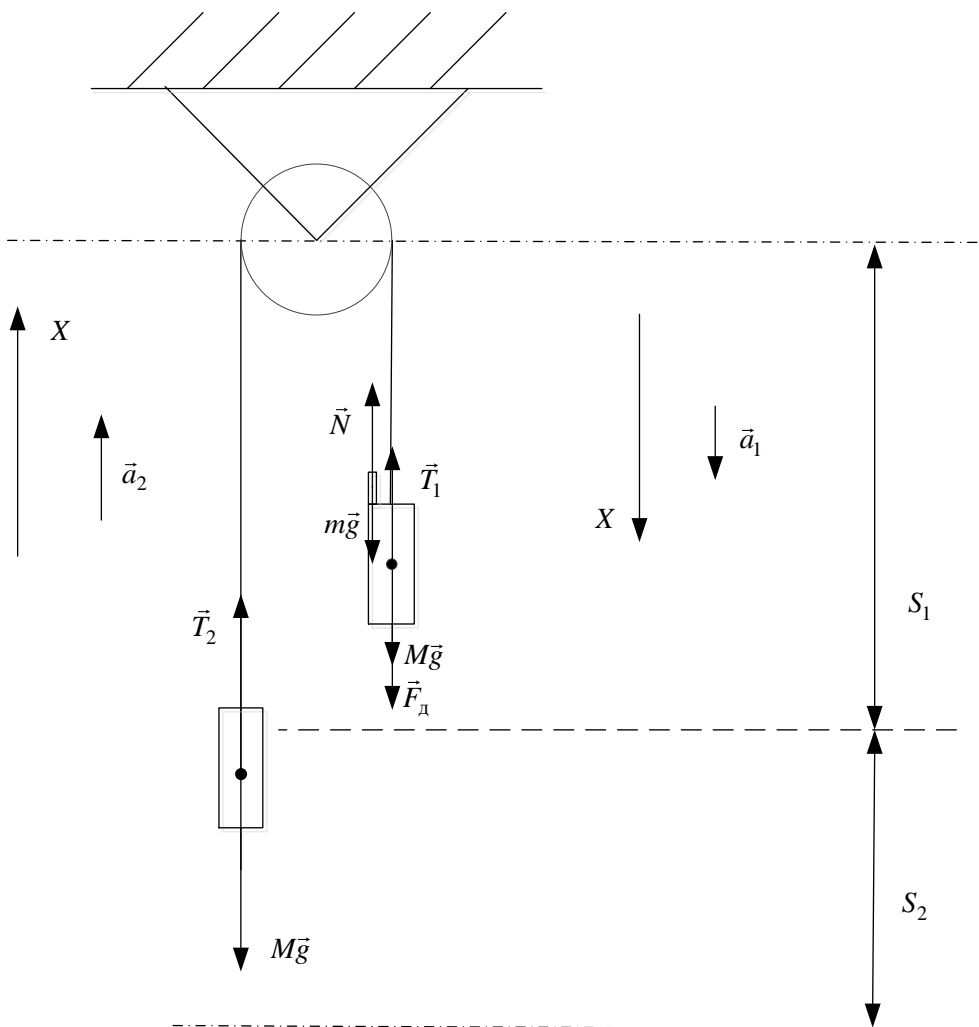


Рис. 1. Механическая система грузов

На перегрузок действуют: $m\vec{g}$ - сила тяжести, \vec{N} - сила реакции опоры.

Записывая основное уравнение динамики поступательного движения для перегрузка в векторной и скалярной форме на ось X , получим:

$$\begin{aligned} m\vec{a}_1 &= m\vec{g} + \vec{N}_2; \\ X : ma_1 &= mg - N. \end{aligned} \quad (8)$$

Складывая систему уравнений (6)-(8) почленно и учитывая, что $F_d = N$ (по третьему закону Ньютона), $T_1 = T_2 = T$ и $a_1 = a_2 = a$ (из условия невесомости и нерастяжимости нити), получим:

$$\begin{cases} Ma = Mg + F_d - T; \\ Ma = T - Mg; \\ ma = mg - N, \end{cases} \quad (9)$$

или

$$(2M + m)a = mg,$$

откуда выразим ускорение свободного падения:

$$g = \frac{2M + m}{m} a. \quad (10)$$

Запишем кинематические соотношения:

$$\begin{cases} S_2 = vt_2; \\ S_1 = \frac{at_1^2}{2}; \Rightarrow a = \frac{S_2^2}{2S_1t_2^2}; \\ v = at_1 \end{cases} \quad (11)$$

С учетом (11) получаем:

$$g = \frac{2M + m}{m} \cdot \frac{S_2^2}{2S_1t_2^2}. \quad (12)$$

Найденную зависимость (12) можно использовать для определения ускорения свободного падения.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Общий вид прибора Атвуда показан на рис. 2.

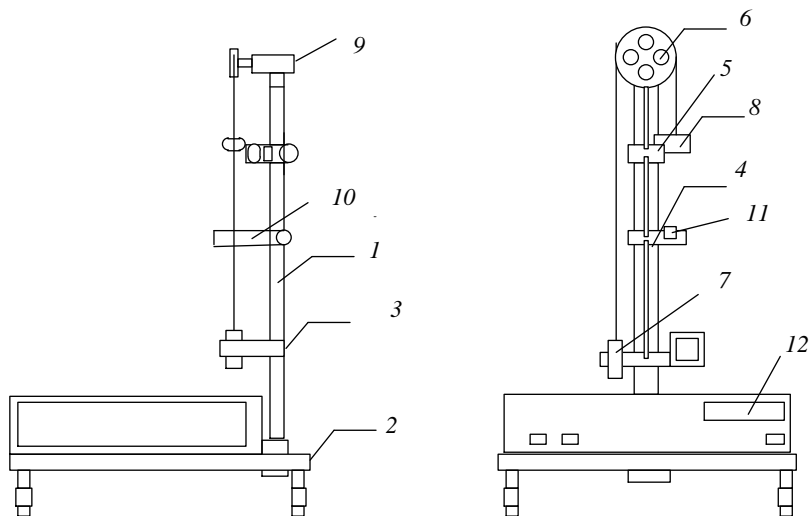


Рис. 2. Общий вид машины Атвуда

На вертикальной колонне *1* с основанием *2* закреплены три кронштейна: неподвижный нижний *3* и два подвижных – средний *4* и верхний *5*. Через блок *6* перекинута нить с грузами *7* и *8* на ее концах. Электромагнит *9* после подведения к нему питающего напряжения при помощи фрикционной муфты удерживает систему блока с грузами в состоянии покоя.

Фиксированные положения среднего и верхнего кронштейнов устанавливают длину пути равноускоренного (S_1) и равномерного (S_2) движений. Для определения этих путей на колонне имеется миллиметровая шкала, все кронштейны имеют указатель положения, а верхний кронштейн – дополнительную черту, облегчающую точное согласование нижней границы большого верхнего грузика с определенным началом пути при движении.

На среднем кронштейне закреплено задерживающее кольцо *10*, которое снимает с падающего вниз большого груза перегрузок m , а фотоэлектрический датчик *11* в это время образует электрический импульс, сигнализирующий начало равномерного движения большого груза M .

На основании прибора, прикрепленный к нему жестко, находится миллисекундомер 12. На лицевой панели миллисекундомера размещены следующие манипуляционные элементы:

- ◆ «СЕТЬ» - выключатель сети; нажатие этой клавиши включает питающее напряжение и автоматический сброс прибора;
- ◆ «СБРОС» - установка нуля измерителя; нажатие этой клавиши вызывает сброс схем миллисекундомера;
- ◆ «ПУСК» - управление электромагнитом; нажатие этой клавиши освобождает электромагнит и генерирует импульс разрешения на измерение.

3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. На правый большой груз $M = 62$ г положить дополнительный груз – перегрузок массой $m = 6.5$ г.
2. Согласовать нижнюю грань правого груза с чертой, нанесённой на верхнем кронштейне.
3. Включить «СЕТЬ», при этом срабатывает электромагнит, и фрикцион стопорит блок б.
4. Нажать клавишу «ПУСК». При этом система грузов приходит в движение. В момент снятия перегрузка m задерживающим кольцом включается миллисекундомер, отсчитывающий время t равномерного движения груза M на пути S_2 .
5. Записать показания миллисекундомера.
6. Выключить клавишу «СЕТЬ».
7. Повторить опыт 5 раз.
8. Определить время $\langle t \rangle$.
9. Снять перегрузок $m = 6.5$ г, поместить на его место другой, массой $m = 8.5$ г.
10. Прodelать операции пп. 1-8.
11. Снять перегрузок $m = 8.5$ г, поместить на его место другой, массой $m = 12$ г.
12. Прodelать операции пп. 1-8.
13. Измерить заданные пути равноускоренного S_1 и равномерного S_2 движений груза M .
14. Рассчитать ускорение свободного падения g для трех значений m :

$$g = \frac{2M + m}{m} \cdot \frac{S_2^2}{2S_1 \langle t \rangle^2}. \quad (13)$$

15.Результаты измерений и вычислений занести в табл.

Таблица 1

Результаты измерений и вычислений

№ п/п	<i>t</i> , с	<i>M</i> , кг	<i>m</i> , кг	<i>S</i> ₁ , м	<i>S</i> ₂ , м	<i>⟨t⟩</i> ² , с	<i>g_i</i> , $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$	<i>⟨g⟩</i> , $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$	<i>Δg_i</i> , $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$
1									
<i>⟨t⟩</i> , с									
2									
<i>⟨t⟩</i> , с									
3									
<i>⟨t⟩</i> , с									

4. АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

При выводе расчетной формулы для ускорения свободного падения (13) были приняты следующие допущения: блок невесом, силы трения в блоке отсутствуют, нить невесома и нерастяжима.

В действительности, более точное определение ускорения свободного падения требует учета массы блока. При этом написанная ранее система уравнения (9) должна быть дополнена еще уравнением моментов, определяющим закон вращательного движения блока. Для оценки величины тормозящего момента требуется дополнительный эксперимент. Таким образом, в результате определения ускорения свободного падения g по формуле (13) получаем результат, отличный от табличного.

1. Определить абсолютную погрешность:

$$\Delta g = t_{\alpha,n} \cdot \sqrt{\frac{\sum (\Delta g_i)^2}{n(n-1)}}, \quad (14)$$

где $t_{\alpha,n} = 4,3$ – коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ и $n = 3$ (трех подсерий измерений).

2. Определить относительную погрешность:

$$\varepsilon = \frac{\Delta g}{\langle g \rangle} \cdot 100\%. \quad (15)$$

3. Записать окончательный результат, соблюдая правила округления:

$$g = \langle g \rangle \pm \Delta g. \quad (16)$$

Примечание. Если теоретическое значение $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ не попадает в указанный интервал (16), проанализировать возможные математические погрешности (о влиянии массы блока).

5. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Представить отчет по лабораторной работе на стандартных листах формата А4 в соответствии с методикой выполнения и оформления лабораторных работ по физике:

1. Прочитать описание лабораторной работы, ознакомиться с теоретической и экспериментальной частью, выполнением эксперимента, контрольными вопросами.
2. Придерживаясь следующего плана, оформить отчет о выполнении лабораторной работы:

- 1) записать номер и название лабораторной работы;
- 2) записать цель лабораторной работы;
- 3) записать приборы и принадлежности, включая измерительную линейку, штангенциркуль, секундомер электронный, микрометр и т. д.;
- 4) теоретическая часть: записать основной закон или расчетную формулу с разъяснением буквенных обозначений физических величин, входящих в них, указать единицы измерений в СИ;
- 5) экспериментальная часть: привести схему установки, рисунок или чертеж, поясняющий выполнение эксперимента; записать таблицу измерений, константы расчета;
- 6) обработка результатов измерений: вычисление физических величин в СИ; построение графиков на миллиметровке, скрепленной с отчетом; расчет погрешностей измерений;
- 7) записать ответ. Сделать выводы.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Вывести формулу для расчета ускорения свободного падения с учетом массы блока M_0 .
2. Чем определяется ускорение свободного падения вблизи поверхности любой другой планеты?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТИ НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ»

Цель работы: определение коэффициента поверхностного натяжения воды по методу отрыва кольца.

Приборы и принадлежности: динамометр; штатив лабораторный; тонкостенное кольцо; два сосуда с водой, соединенные резиновой трубкой; столик-подставка.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Жидкость является агрегатным состоянием вещества, промежуточным между газообразным и твердым, поэтому она обладает свойствами как газообразных, так и твердых веществ.

Каждая молекула жидкости в течение некоторого времени колеблется около определенного положения равновесия, после чего скачком переходит в новое положение, отстоящее от исходного на расстояние порядка межатомного.

На молекулу жидкости со стороны окружающих её молекул действуют силы взаимного притяжения, которые с расстоянием быстро убывают. Следовательно, начиная с некоторого минимального расстояния силами притяжения между молекулами можно пренебречь. Это расстояние (порядка 10^{-9} м) называется *радиусом молекулярного действия* r , а сфера радиуса r - *сферой молекулярного действия*.

Выделим внутри жидкости какую-либо молекулу «А» и проведем вокруг неё сферу радиуса r (рис. 1).

Силы, с которыми молекулы, находящиеся внутри сферы, действуют на молекулу «А», направлены в разные стороны и в среднем скомпенсированы. Поэтому результирующая сила, действующая на молекулу внутри жидкости со стороны других молекул, равна нулю.

Если молекула «В» расположена от поверхности жидкости на расстоянии, меньшем r , то сфера молекулярного действия расположена частично внутри жидкости, а частично над жидкостью (в газе), при этом концентрация молекул газа мала по сравнению с их концентрацией в жидкости.

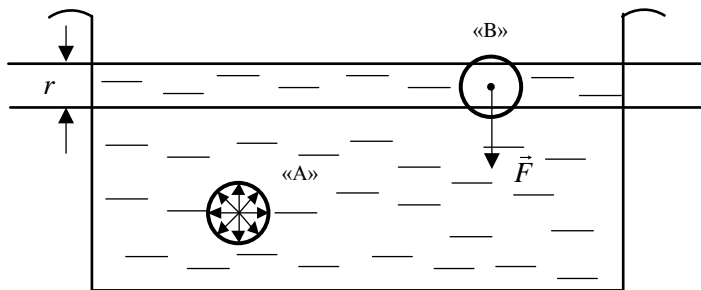


Рис. 1. Положение молекул внутри жидкости и вблизи её поверхности («А» и «В»)

В силу этого равнодействующая сила \vec{F} , приложенная к каждой молекуле поверхностного слоя, не равна нулю и направлена внутрь жидкости.

Для перемещения молекулы из глубины жидкости в поверхностный слой необходимо затратить работу, которая совершается силами, действующими на молекулу в поверхностном слое, и отрицательна по знаку. В результате кинетическая энергия молекулы уменьшается, превращаясь в потенциальную энергию, т. е. молекулы поверхностного слоя жидкости обладают большей потенциальной энергией, чем молекулы внутри жидкости. Эта дополнительная (избыточная) потенциальная энергия молекул поверхностного слоя жидкости называется *поверхностной энергией* ΔE . Она пропорциональна площади слоя ΔS :

$$\Delta E = \sigma \Delta S, \quad (1)$$

где σ - коэффициент поверхностного натяжения; откуда

$$\sigma = \Delta E / \Delta S. \quad (2)$$

Условием устойчивого равновесия жидкости является минимум поверхностной энергии. Это означает, что жидкость при отсутствии внешних сил будет принимать такую форму, чтобы при заданном объёме она имела наименьшую площадь поверхности (форму шара), т. е. жидкость стремится сократить площадь свободной поверхности. В этом случае поверхностный слой жидкости можно уподобить растянутой упругой пленке, в которой действуют силы поверхностного натяжения. Эти силы направлены по касательной к поверхности жидкости и перпендикулярны участку контура, на который они действуют.

Рассмотрим поверхность жидкости, ограниченную замкнутым контуром l (рис. 2). Под действием сил поверхностного натяжения свободная поверхность жидкости сократилась, и рассматриваемый контур переместился из положения 1 в положение 2.

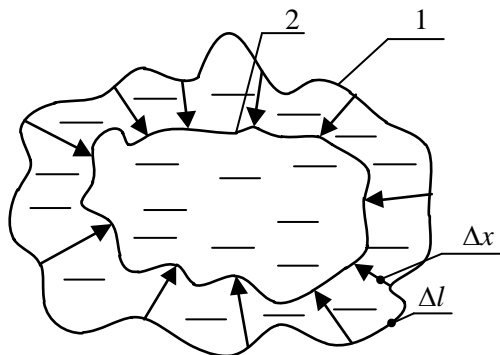


Рис. 2. Поверхность жидкости, ограниченная замкнутым контуром l

Силы, действующие со стороны выделенного участка на граничащие с ним участки, совершают работу:

$$\Delta A = f \Delta l \Delta x,$$

где $f = F/l$ - сила поверхностного натяжения, действующая на единицу длины контура поверхности жидкости.

Тогда

$$\begin{cases} \Delta A = \frac{F}{l} \Delta l \Delta x; \\ \Delta l \Delta x = \Delta S \end{cases} \Rightarrow \Delta A = \frac{F}{l} \Delta S. \quad (3)$$

Эта работа (3) совершается за счет уменьшения поверхности энергии:

$$\Delta A = \Delta E. \quad (4)$$

Сравнивая выражения (1), (3), (4), имеем:

$$\sigma = F/l, \quad (5)$$

т. е. коэффициент поверхностного натяжения σ равен силе поверхностного натяжения, действующей на единицу длины контура, ограничивающего поверхность.

Единица измерений коэффициента поверхностного натяжения в СИ – ньютон на метр [Н/м] или джоуль на квадратный метр [Дж/м²].

Большинство жидкостей при температуре 300 К имеют коэффициент поверхностного натяжения порядка $10^{-2} \div 10^{-1}$ Н/м. Так, для воды эта величина равна $\sigma = 7,5 \cdot 10^{-2}$ Н/м.

Коэффициент поверхностного натяжения с повышением температуры уменьшается, так как увеличивается среднее расстояние между молекулами жидкости.

Кроме того, σ существенным образом зависит от примесей, имеющих в жидкости.

Вещества, ослабляющие поверхностное натяжение жидкости, называются *поверхностно-активными*. Например, по отношению к воде к ним относятся спирты, мыло, нефть и др.

Другие вещества (сахар, соль) увеличивают поверхностное натяжение жидкости благодаря тому, что их молекулы взаимодействуют с молекулами жидкости сильнее, чем молекулы жидкости между собой.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Существует ряд методов определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости. Рассмотрим один из них – метод отрыва кольца. Суть метода состоит в том, что измеряются силы, которые необходимо приложить, чтобы оторвать тонкостенное металлическое кольцо от поверхности жидкости – воды.

Экспериментальная установка представляет собой стойку *A*, на который укреплена миллиметровая шкала *S* для измерения удлинения пружины с указателем *C*, чашечкой *B* и кольцом *K*. Кроме этого имеются два сосуда *M* и *N* с водой, соединенные резиновой трубкой, и столик *R* (рис. 3).

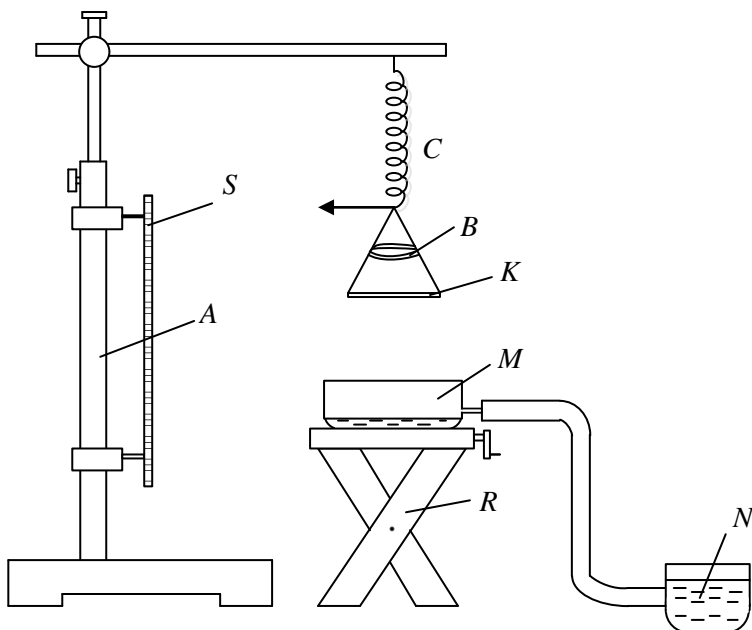


Рис. 3. Экспериментальная установка для определения коэффициента поверхностного натяжения воды по методу отрыва кольца

Согласно определению (5), коэффициент поверхностного натяжения вычисляется по формуле

$$\sigma = \frac{F}{l},$$

где F - сила поверхностного натяжения, действующая по длине окружности l внешнего и внутреннего диаметров кольца. Для её определения кольцо K приводится в соприкосновение с водой, а затем отрывается от неё. В момент отрыва кольца от поверхности воды сила поверхностного натяжения F равна силе натяжения пружины.

Длина l находится по формуле

$$l = \pi D_1 + \pi D_2, \quad (6)$$

где D_1 , D_2 - внешний и внутренний диаметры кольца.

Если толщина кольца b , то

$$D_2 = D_1 - 2b.$$

Тогда

$$l = 2\pi(D_1 - b), \quad (7)$$

следовательно:

$$\sigma = \frac{F}{2\pi(D_1 - b)}. \quad (8)$$

Измерив силу поверхностного натяжения F , а также диаметр кольца D_1 и толщину кольца b , по формуле (8) можно рассчитать коэффициент поверхностного натяжения воды.

3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Градуировка пружины C и построение градуировочного графика. На чашечку B положить поочередно гири 1 гс (грамм-сила), 2 гс, 3 гс, 4 гс, 5 гс, отмечая в делениях соответствующие значения указателя на шкале S . Результаты измерения записать в табл. 1.

Таблица 1

Градуировка пружины C

P , гс	1	2	3	4	5
a , дел.					

Построить график зависимости $a = f(P)$ на миллиметровой бумаге, отложив по горизонтальной оси P , гс, а по вертикальной оси - a , дел.

2. Определение силы поверхностного натяжения F .

Кольцо K привести в соприкосновение с водой. Для этого наклоненный сосуд N необходимо поднимать вверх так, чтобы вода могла перетекать в сосуд M до тех пор, пока кольцо слегка коснется поверхности воды. Вода начнет подниматься по стенкам кольца, а само кольцо несколько втянется внутрь жидкости. Этот эффект можно заметить по небольшому растяжению пружины.

Затем сосуд N надо медленно опускать, при этом следить за указателем пружины, так как пружина начинает постепенно растягиваться.

В момент отрыва кольца от поверхности воды записать положение указателя пружины по шкале в делениях (a_0 , дел.). Измерение следует повторить три раза, записывая каждый раз a_{01} , a_{02} , a_{03} . Сила поверхностного натяжения, действующая по длине внешнего и внутреннего диаметров кольца, в момент отрыва его от поверхности воды равна силе натяжения пружины.

По графику зависимости $a = f(P)$ определить силы поверхностного натяжения F_1, F_2, F_3 в грамм-силах, соответствующие значениям a_{01}, a_{02}, a_{03} в делениях.

3. По формуле (8) вычислить $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, подсчитать результат в СИ.

При этом $D_1 = 80 \cdot 10^{-3}$ м; $b = 1 \cdot 10^{-3}$ м; $1 \text{ гс} = 9,8 \cdot 10^{-3}$ Н.

4. Вычислить среднее значение коэффициента поверхностного натяжения воды и погрешности измерений.

- 1) среднее значение σ :

$$\langle \sigma \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i,$$

где $n=3$;

- 2) относительная погрешность измерений:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \sigma}{\sigma} = \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta D_1 + \Delta b}{D_1 - b},$$

где $\Delta F/F = \Delta a/\langle a_0 \rangle$; $\langle a_0 \rangle$ - среднее значение положений указателя пружины, дел.;

$$\Delta a = 1 \text{ дел.}; \Delta D_1 = \Delta b = 0,05 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

- 3) абсолютная погрешность измерений:

$$\Delta \sigma = \langle \sigma \rangle \varepsilon;$$

- 4) окончательный результат:

$$\sigma = \langle \sigma \rangle \pm \Delta \sigma;$$

- 5) результаты измерений и вычислений занести в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений и вычислений

№ п/п	a , дел.	F_i , гс	F_i , Н	σ , Н/м	$\langle \sigma \rangle$, Н/м
1					
2					
3					

4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Представить отчет по лабораторной работе на стандартных листах формата А4 в соответствии с методикой выполнения и оформления лабораторных работ по физике:

1. Прочитать описание лабораторной работы, ознакомиться с теоретической и экспериментальной частью, выполнением эксперимента, контрольными вопросами.
2. Придерживаясь следующего плана, оформить отчет о выполнении лабораторной работы:
 - 1) записать номер и название лабораторной работы;
 - 2) записать цель лабораторной работы;
 - 3) записать приборы и принадлежности, включая измерительную линейку, штангенциркуль, секундомер электронный, микрометр и т. д.;
 - 4) теоретическая часть: записать основной закон или расчетную формулу с разъяснением буквенных обозначений физических величин, входящих в них, указать единицы измерений в СИ;
 - 5) экспериментальная часть: привести схему установки, рисунок или чертеж, поясняющий выполнение эксперимента; записать таблицу измерений, константы расчета;
 - 6) обработка результатов измерений: вычисление физических величин в СИ; построение графиков на миллиметровке, скрепленной с отчетом; расчет погрешностей измерений;
 - 7) записать ответ. Сделать выводы.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните механизм возникновения поверхностного натяжения жидкостей.
2. Физический смысл и единицы измерения коэффициента поверхностного натяжения жидкости.
3. От чего зависит коэффициент поверхностного натяжения для данной жидкости?
4. Почему коэффициенты поверхностного натяжения для различных жидкостей различны?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ МАЯТНИКА МАКСВЕЛЛА»

Цель работы: экспериментальное определение момента инерции маятника Максвелла.

Приборы и принадлежности: маятник Максвелла; встроенный миллисекундомер универсальный.

Техника безопасности: необходимо выполнять общие правила безопасности труда, относящиеся к устройствам, в которых используется напряжение до 250 В. Эксплуатация установки допускается при наличии заземления. При любых неполадках в установке обращаться к дежурному лаборанту или преподавателю.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Момент инерции системы материальных точек относительно некоторой неподвижной оси вращения определяется равенством

$$I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2, \quad (1)$$

где m_i - масса i -й точки системы; r_i - расстояние от i -й точки до оси вращения.

Для твердого тела:

$$I = \lim_{\Delta m_i \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n \Delta m_i r_i^2 = \int_{(V)} r^2 dm = \int_{(V)} r^2 \rho dV = \rho \int_{(V)} r^2 dV, \quad (2)$$

где Δm_i - элемент массы твердого тела; r_i - расстояние от элемента массы Δm_i до оси вращения; dV - элементарный объем; r - расстояние от элементарного объема до оси вращения; ρ - плотность вещества тела ($\rho = \text{const}$).

Момент инерции тела относительно произвольно заданной оси вращения определяется с помощью теоремы Штейнера:

$$I = I_O + md^2, \quad (3)$$

где m - масса тела; I_O - момент инерции данного тела относительно оси, проходящей через центр масс тела параллельно заданной оси; d - расстояние между указанными осями.

Используя основное уравнение динамики вращательного движения, момент инерции тела относительно неподвижной оси можно вычислить по формуле

$$I = M_z^{\text{внеш}} / \varepsilon, \quad (4)$$

где $M_z^{\text{внеш}}$ - результирующий момент действующих на тело внешних сил относительно данной неподвижной оси; ε - угловое ускорение тела.

Момент инерции тела относительно заданной оси и угловая скорость ω позволяют вычислить кинетическую энергию вращательного движения этого тела:

$$W_k = I\omega^2 / 2. \quad (5)$$

Экспериментальное определение момента инерции маятника Максвелла основано на законе сохранения энергии в механике: полная энергия изолированной консервативной системы – величина постоянная.

Маятник Максвелла (рис. 1) представляет собой диск (маховик I), на который накладываются сменные кольца 5 , изменяя момент инерции системы (R_1 и R_2 - внутренний и внешний радиусы кольца), жестко закрепленный на осевом стержне 2 , висащем на двух нитях 3 , прикрепленных к опоре 4 .

Вращая маятник Максвелла вокруг его оси и тем самым наматывая нити 3 на осевой стержень 2 , можно поднять его на некоторую высоту h . В этом случае маятник, обладающий массой m , будет иметь потенциальную энергию mgh (g – ускорение свободного падения).

Предоставленный затем самому себе, маятник начнет раскручиваться, и его потенциальная энергия начнет переходить в кинетическую энергию поступательного движения $m\nu^2/2$ и вращательного движения $I\omega^2/2$. Таким образом, на основании закона сохранения механической энергии имеем:

$$mgh = \frac{m\nu^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2}, \quad (6)$$

где I - момент инерции маятника относительно его оси вращения; h - высота, на которую опустилась ось маятника; ν - скорость спуска оси

маятника в тот момент, когда ось опустилась на расстояние h ; ω - угловая скорость маятника в тот же момент времени.

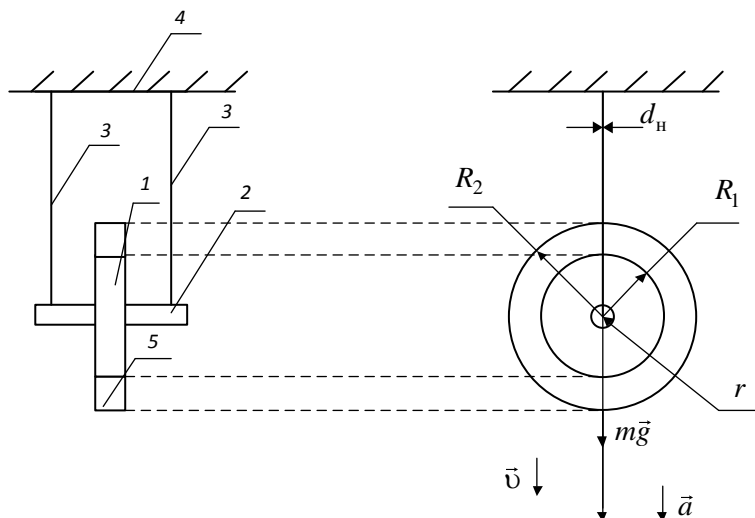


Рис. 1. Маятник Максвелла

Из уравнения (6) следует:

$$I = m \frac{v^2}{\omega^2} \left(\frac{2gh}{v^2} - 1 \right). \quad (7)$$

Раскручивание нитей с осевого стержня маятника совершается без их проскальзывания, поэтому

$$v = (r + d_n) \omega, \quad (8)$$

где r - радиус осевого сечения стержня; d_n - диаметр нити.

В то же время, поскольку маятник опускается с ускорением \vec{a} , не равным \vec{g} ($a < g$), скорость v на расстоянии h от начального верхнего положения можно определить с использованием зависимости

$$v^2 = 2ah. \quad (9)$$

Подставим формулы (8) и (9) в (7). Тогда момент инерции

$$I = m(r + d_n)^2 \left(\frac{g}{a} - 1 \right). \quad (10)$$

Учитывая, что $r = d/2$; $a = 2h/t^2$, окончательно получим:

$$I = \frac{m(d + 2 \cdot d_{\text{н}})^2}{4} \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right), \quad (11)$$

где d - диаметр осевого стержня ($d = 10$ мм); $d_{\text{н}}$ - диаметр нити ($d_{\text{н}} = 1$ мм); t - время спуска оси маятника на расстояние h ; m - масса маятника; g - ускорение свободного падения.

С другой стороны, теоретическое значение момента инерции маятника Максвелла можно рассчитать по формуле как сумму моментов инерции составляющих его отдельных элементов:

$$I^* = \frac{m_{\text{д}} R_1^2}{2} + \frac{m_{\text{ст}} r^2}{2} + \frac{m_{\text{к}} (R_1^2 + R_2^2)}{2}, \quad (12)$$

где $m_{\text{д}}$ - масса диска (маховика 1) маятника, включая массу части осевого стержня 2 внутри его; $m_{\text{ст}}$ - масса части осевого стержня вне маховика; $m_{\text{к}}$ - масса кольца 5; r - радиус осевого стержня ($r = 5$ мм); R_1 , R_2 - внутренний и внешний радиусы кольца, ($R_1 = 43$ мм; $R_2 = 53$ мм).

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Общий вид установки для определения момента инерции маятника Максвелла показан на рис. 2.

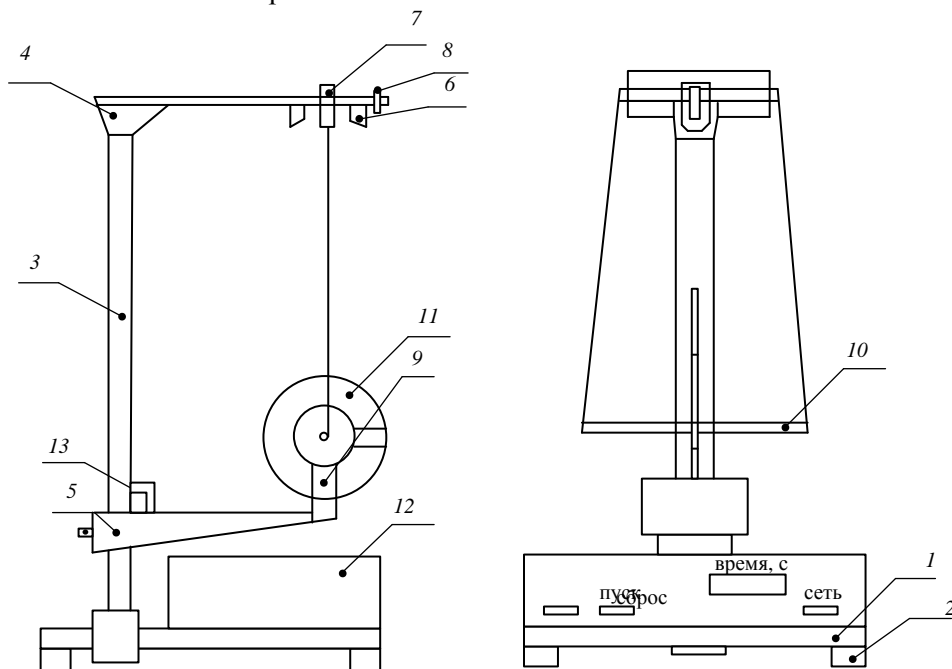


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки для определения момента инерции маятника Максвелла

Основание 1 снабжено регулируемыми ножками 2, которые позволяют произвести выравнивание установки. В основании закреплена колонка 3, к которой прикреплен неподвижный верхний кронштейн 4 и подвижный нижний кронштейн 5. На верхнем кронштейне находится электромагнит 6, фотоэлектрический датчик №1 (7) и вороток 8 для закрепления и регулирования длины бифилярной подвески маятника.

Нижний кронштейн 5 вместе с прикрепленным к нему фотоэлектрическим датчиком №2 (9) можно перемещать вдоль колонки и фиксировать в выбранном положении.

Маятник 10 прибора представляет собой диск, закрепленный на оси, на которую накладываются сменные кольца 11, позволяющие изменять момент инерции системы.

Маятник с накладным кольцом удерживается в верхнем положении электромагнитом. Длина маятника определяется по шкале на колонке 3. С целью облегчения этого измерения нижний кронштейн снабжен указателем 13, помещенным на высоте оптической оси нижнего фотоэлектрического датчика.

Перед проведением эксперимента проверяется параллельность оси маятника основанию прибора. Если необходимо провести корректировку положения оси, следует ослабить нижнюю гайку воротка 8 и вращением верхней гайки в ту или другую сторону добиться параллельности оси и основания, после чего нижнюю гайку воротка затянуть. Для правильного определения времени спуска маятника и длины маятника по указателю 13 необходимо проверить, что нижний край посаженного на диск маятника стального кольца (маятник в крайнем нижнем положении) находится на расстоянии $\Delta h = 2$ мм ниже оптической оси фотоэлектрического датчика №2 (9), отмеченной на нижнем кронштейне 5 черной горизонтальной чертой. Если величина Δh не соответствует указанному значению, необходимо ослабить винт крепления нижнего кронштейна 5 и, передвигая его по колонке 3, добиться выполнения условия $\Delta h = 2$ мм.

Изменение длины маятника осуществляется с помощью воротка 8 путем навивки на его ось избыточной длины нити или снятия части ее витков. На лицевой панели установки находятся следующие органы управления:

- ◆ «СЕТЬ» - включатель-выключатель сети; при включении светится индикатор и лампочки обоих фотоэлементов;
- ◆ «СБРОС» - клавиша обнуления цифрового индикатора (секундомера);
- ◆ «ПУСК» - клавиша управления электромагнитом 6; при нажатии клавиши маятник освобождается и начинается отсчет времени спуска.

3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. На диск маятника наложить выбранное кольцо, прижимая его до упора диска в буртик кольца.
2. Нажать клавишу «СЕТЬ».

3. Отжать клавишу «ПУСК».
4. Вращая маятник, намотать на его ось нить подвески, следя за тем, чтобы она наматывалась равномерно в один слой с обеих сторон оси.
5. Зафиксировать маятник при помощи электромагнита 6 и затем дополнительно повернуть его в направлении вращения на угол 5° . Этим устраняется возможная слабина нити.
6. Нажать клавишу «СБРОС».
7. Нажать клавишу «ПУСК».
8. Считать показания электронного секундомера.
9. Пункты 3-8 повторить 5 раз.
10. По шкале на колонке 3 определить длину маятника h .
11. Измерить диаметры осевого стержня и нити - d и d_n .
12. Определить массу маятника (массы отдельных его элементов нанесены на них).

4. АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Определить среднее значение времени падения маятника по формуле

$$t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i, \quad (13)$$

где t_i - значение времени, полученное при i -м замере, $i = 1 \div n$; n - число выполненных замеров ($n=5$).

2. По формуле (11) определить экспериментальное значение момента инерции маятника Максвелла $\langle I \rangle$ в СИ.
3. Определить относительную погрешность измерений:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta m}{m} + 2 \frac{\Delta d + 2d_n}{d + 2d_n} + \frac{gt^2 \left(\frac{2\Delta t}{t} + \frac{\Delta h}{h} \right)}{gt^2 - 2h}, \quad (14)$$

где $\Delta m = 0,5$ г; $\Delta d = 0,1$ мм; $\Delta t = 0,01$ с; $\Delta h = 0,5$ мм.

Если одно из слагаемых в формуле (14) более чем вдвое превосходит другое, то меньшим можно пренебречь.

4. Записать окончательный результат:

$$I = \langle I \rangle \pm \Delta I.$$

5. Определить теоретическое значение момента инерции маятника Максвелла по формуле (12). Массы отдельных элементов маятника указаны на них. Размеры R_1 , R_2 и r измерить с помощью штангенциркуля (или использовать указанные результаты).
6. Определить, попадает ли теоретическое значение в записанный по формуле (15) интервал. Если не попадает, проанализировать возможные систематические погрешности.

5. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Представить отчет по лабораторной работе на стандартных листах формата А4 в соответствии с методикой выполнения и оформления лабораторных работ по физике:

1. Прочитать описание лабораторной работы, ознакомиться с теоретической и экспериментальной частью, выполнением эксперимента, контрольными вопросами.
2. Придерживаясь следующего плана, оформить отчет о выполнении лабораторной работы:
 - 1) записать номер и название лабораторной работы;
 - 2) записать цель лабораторной работы;
 - 3) записать приборы и принадлежности, включая измерительную линейку, штангенциркуль, секундомер электронный, микрометр и т. д.;
 - 4) теоретическая часть: записать основной закон или расчетную формулу с разъяснением буквенных обозначений физических величин, входящих в них, указать единицы измерений в СИ;
 - 5) экспериментальная часть: привести схему установки, рисунок или чертеж, поясняющий выполнение эксперимента; записать таблицу измерений, константы расчета;
 - 6) обработка результатов измерений: вычисление физических величин в СИ; построение графиков по миллиметровке, скрепленной с отчетом; расчет погрешностей измерений;
 - 7) записать ответ. Сделать выводы.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дать определение момента инерции материальной точки, системы материальных точек, абсолютно твердого тела; указать единицы измерения в СИ. Каков физический смысл момента инерции тела?
2. Записать основное уравнение динамики вращательного движения относительно неподвижной оси вращения.
3. Сформулировать теорему Штейнера.
4. На каком законе основано экспериментальное определение момента инерции маятника Максвелла?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОГАРИФМИЧЕСКОГО ДЕКРЕМЕНТА ЗАТУХАНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ»

Цель работы: изучение зависимости логарифмического декремента затухания и коэффициента затухания колебательной системы от силы тока.

Приборы и принадлежности: массивный маятник; электромагнит; амперметр стрелочный класса 2,5; линейка измерительная; источник тока ВС-24М.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Колебательной системой называется система, совершающая колебания. Все колебания можно разделить на свободные, вынужденные, параметрические и автоколебания.

Свободными (собственными) называются колебания системы, которые возникают при однократном начальном отклонении системы из положения устойчивого равновесия при отсутствии внешних воздействий на нее.

Во всех реальных колебательных системах энергия колебаний расходуется на работу против сил сопротивления и сил внутреннего трения, что является причиной затухания свободных колебаний.

Затухающими колебаниями называются свободные колебания, амплитуда которых с течением времени уменьшается из-за потерь энергии в реальных колебательных системах.

Пусть при небольших скоростях движения сила сопротивления, действующая на колебательную систему, прямо пропорциональна скорости, т. е.

$$\vec{F}_c = -r\vec{v},$$

где r - коэффициент сопротивления; \vec{v} - вектор скорости.

Тогда основное уравнение динамики поступательного движения колебательной системы (в проекции на ось Ox) имеет следующий вид:

$$ma_x = -r v_x - kx;$$

$$a_x = \frac{d^2 x}{dt^2} = \ddot{x};$$

$$v_x = \frac{dx}{dt} = \dot{x};$$

$$m\ddot{x} + r\dot{x} + kx = 0;$$

или

$$\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x = 0 \quad (1)$$

- дифференциальное уравнение свободных затухающих колебаний, где

$$2\beta = \frac{r}{m}; \quad \omega_0^2 = \frac{k}{m},$$

где β - коэффициент затухания.

Решением дифференциального уравнения (1) является выражение вида:

$$x = A(t) \cos(\omega t + \phi); \quad (2)$$

$$A(t) = A_0 e^{-\beta t}, \quad (3)$$

где $A(t)$ - амплитуда затухающих колебаний; x - смещение колеблющейся системы от положения равновесия в данный момент времени; A_0 - начальная амплитуда колебаний в момент времени t_0 ; ω - частота затухающих колебаний; T - период затухающих колебаний. Согласно теории,

$$\omega^2 = \omega_0^2 - \beta^2; \quad T = 2\pi/\omega;$$

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}, \quad (4)$$

где ω_0 - собственная частота свободных колебаний.

Для оценки скорости затухания можно воспользоваться отношением двух последовательных максимальных отклонений колеблющейся системы в одну сторону от положения равновесия. Эта величина называется декрементом затухания D :

$$D = \frac{A(t)}{A(t+T)}. \quad (5)$$

Натуральный логарифм отношения двух последовательных значений амплитуд называется *логарифмическим декрементом затухания* λ :

$$\lambda = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)}. \quad (6)$$

Найдем связь между логарифмическим декрементом затухания и коэффициентом затухания:

$$\lambda = \ln \frac{A_0 e^{-\beta t}}{A_0 e^{-\beta(t+T)}} = \ln \frac{A_0 e^{-\beta t}}{A_0 e^{-\beta t} e^{-\beta T}} = \ln e^{\beta T} = \beta T. \quad (7)$$

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Колебательная система представляет собой маятник, нижним грузом которого служит массивная медная пластинка. При колебаниях маятника пластинка движется в магнитном поле между полюсами электромагнита N и S (рис. 1).

При отсутствии тока в цепи электромагнита колебательная система имеет незначительное сопротивление в точках подвеса (шариковые подшипники), так что колебания происходят с весьма малым затуханием.

При пропускании тока по обмоткам электромагнита, который измеряется амперметром A , возникающие в пластине токи Фуко производят тормозящее действие, обуславливая внутреннее трение колебательной системы и увеличивая затухание колебаний.

Логарифмический декремент затухания в этих условиях зависит от напряженности магнитного поля в пространстве между полюсами электромагнита, следовательно, он будет изменяться в зависимости от силы тока в цепи.

При этом надо иметь в виду, что магнитное поле в пространстве между полюсами электромагнита не является однородным, вследствие чего логарифмический декремент будет зависеть и от начальной амплитуды колебаний. Этого можно избежать, если все измерения проводить по возможности при одной и той же начальной амплитуде затухающих колебаний, т. е., сообщая маятнику колебания, отклонять его всегда на одну и ту же величину $A_0 = 10$ см по миллиметровой шкале, закрепленной на медной пластине.

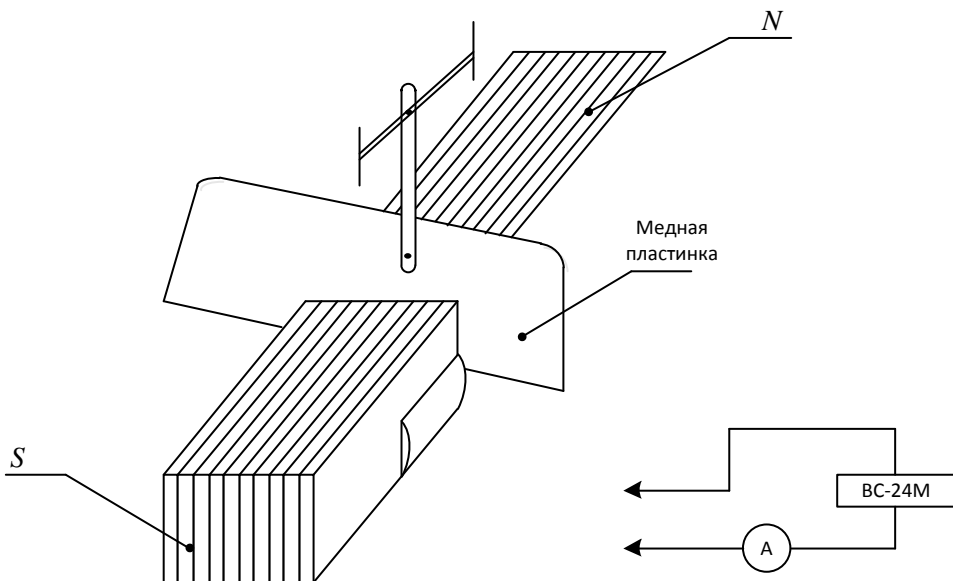


Рис. 1. Экспериментальная схема

Согласно зависимости (3), имеем

$$A_k = A_0 e^{-\beta t} = A_0 e^{-\frac{\lambda}{T} t}.$$

Тогда, измеряя начальную амплитуду A_0 и конечную амплитуду A_k , после k полных колебаний маятника за время t получим

$$\lambda = \frac{T}{t} \ln \frac{A_0}{A_k},$$

где T - период затухающих колебаний.

Очевидно, что $k = t/T$, следовательно,

$$\lambda = \frac{1}{k} \ln \frac{A_0}{A_k}. \quad (8)$$

Таким образом, для определения λ требуется измерить начальную A_0 и конечную A_k амплитуды затухающих колебаний при различных значениях силы тока.

Измерения амплитуды производятся при помощи линейки, наклеенной на медной пластине маятника, при этом смотреть надо так,

чтобы оба среза катушки оказались на одной прямой. Сила тока изменяется с помощью прибора ВС-24М.

Для определения периода колебаний маятника необходимо измерить с помощью секундомера время t , за которое происходит k полных колебаний. Тогда

$$T = \frac{t}{k}. \quad (9)$$

Коэффициент затухания маятника находим из соотношения

$$\beta = \frac{\lambda}{T}. \quad (10)$$

3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Собрать измерительную схему установки (рис. 1). При этом ручка регулятора источника тока ВС-24М должна находиться в крайнем левом положении против часовой стрелки до упора.
2. При отсутствии тока в цепи ($I_0 = 0$), установив начальную амплитуду $A_0 = 10$ см и задав число полных колебаний маятника $k = 10$, измерить конечную амплитуду A_k и полное время t 10 колебаний.
3. По формулам (8)-(10) рассчитать логарифмический декремент затухания, период затухающих колебаний и коэффициент затухания.
4. Повторить измерения и вычисления по пп. 2, 3 для следующих значений силы тока: $I_2 = 0,5$ А; $I_3 = 1$ А; $I_4 = 1,5$ А; $I_5 = 2$ А.
5. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений и вычислений

№ п/п	k	A_0 , см	I , А	A_{ki} , см	t , с	T , с	$\lambda_i^{\text{ист}}$	β , с ⁻¹
1	10	10	0					
2			0,5					
3			1					
4			1,5					
5			2					

6. Обработка результатов измерений.

Для каждого отдельно подсчитанного значения логарифмического декремента λ_i определить:

$$\Delta\lambda_i = \frac{1}{k} \frac{(A_0 + A_{ki})\Delta A}{A_0 A_{ki}},$$

где $i = 1 \div 5$; $\Delta A = 10^{-3}$ м;

$$\varepsilon = \frac{\Delta\lambda_i}{\lambda_i} \cdot 100\%.$$

Результат измерений записать в следующем виде:

$$\lambda_i^{\text{ист}} = \lambda_i \pm \Delta\lambda_i.$$

Сделать выводы: как зависит логарифмический декремент затухания и коэффициент затухания от величины силы тока.

4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Представить отчет по лабораторной работе на стандартных листах формата А4 в соответствии с методикой выполнения и оформления лабораторных работ по физике:

1. Прочитать описание лабораторной работы, ознакомиться с теоретической и экспериментальной частью, выполнением эксперимента, контрольными вопросами.
2. Придерживаясь следующего плана, оформить отчет о выполнении лабораторной работы:
 - 1) записать номер и название лабораторной работы;
 - 2) записать цель лабораторной работы;
 - 3) записать приборы и принадлежности, включая измерительную линейку, штангенциркуль, секундомер электронный, микрометр и т. д.;
 - 4) теоретическая часть: записать основной закон или расчетную формулу с разъяснением буквенных обозначений физических величин, входящих в них, указать единицы измерений в СИ;
 - 5) экспериментальная часть: привести схему установки, рисунок или чертеж, поясняющий выполнение эксперимента; записать таблицу измерений, константы расчета;

- 6) обработка результатов измерений: вычисление физических величин в СИ; построение графиков на миллиметровке, скрепленной с отчетом; расчет погрешностей измерений;
- 7) записать ответ. Сделать выводы.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Запишите дифференциальное уравнение затухающих колебаний и его решение.
2. Запишите выражение для логарифмического декремента затухания и коэффициента затухания.
3. Чем обусловлено затухание колебаний маятника с нижним грузом в виде массивной медной пластины, колеблющейся между полюсами электромагнита, при наличии тока в его цепи и без него?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ С ПОМОЩЬЮ МАЯТНИКА ОБЕРБЕКА»

Цель работы: изучение законов динамики вращательного движения и определение момента инерции твердого тела с помощью маятника Обербека.

Приборы и принадлежности: маятник Обербека; встроенный секундомер универсальный.

Назначение прибора: маятник Обербека предназначен для изучения прямолинейного равнопеременного и вращательного движения, в частности для определения моментов инерции тел.

Правила безопасности труда при работе с маятником Обербека:

1. Прибор разрешается эксплуатировать только при применении заземления и подробном ознакомлении с разделом «Экспериментальная часть».
2. При работе с прибором следует соблюдать меры предосторожности согласно общим правилам по безопасности труда для устройств, в которых существует напряжение величиной до 220 В.
3. Во избежание обрыва нити установка грузов в начальное положение производится при **выключенной** клавише «СЕТЬ»!

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Первая производная по времени t от момента импульса \vec{L} механической системы относительно любой неподвижной точки O равна главному моменту $\vec{M}^{\text{внеш}}$ всех внешних сил, приложенных к системе относительно точки O :

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}^{\text{внеш}}, \quad (1)$$

где

$$\vec{M}^{\text{внеш}} = \sum_{i=1}^n \vec{M}_i = \sum_{i=1}^n [\vec{r}_i, \vec{F}_i];$$

\vec{r} - радиус-вектор, проведенный из точки O в точку приложения вектора силы \vec{F}_i ;

$$\vec{L} = \sum_{i=1}^n \vec{L}_i = \sum_{i=1}^n [\vec{r}_i, \vec{P}_i] = \sum_{i=1}^n [\vec{r}_i, m_i \vec{v}_i],$$

где m_i ; \vec{v}_i - масса и скорость материальной точки.

Уравнение (1) выражает закон изменения момента импульса системы относительно точки O и является основным уравнением динамики вращательного движения относительно неподвижной точки O . Оно справедливо и для твердого тела, шарнирно закрепленного в точке O и вращающегося вокруг нее.

Векторное уравнение (1) эквивалентно трем скалярным уравнениям, каждое из которых представляет собой основное уравнение динамики вращательного движения относительно неподвижной оси X , Y или Z :

$$\begin{cases} \frac{dL_x}{dt} = M_x^{\text{внеш}}; \\ \frac{dL_y}{dt} = M_y^{\text{внеш}}; \\ \frac{dL_z}{dt} = M_z^{\text{внеш}}. \end{cases} \quad (2)$$

В случае когда материальная точка вращается по окружности радиуса R относительно неподвижной оси вращения, проходящей через центр окружности с угловой скоростью ω , основное уравнение динамики вращательного движения принимает следующий вид:

$$\frac{d(I\omega)}{dt} = M_z^{\text{внеш}}, \quad (3)$$

где I - момент инерции тела относительно той же оси вращения.

Момент инерции материальной точки m_i относительно неподвижной оси:

$$I_i = m_i r_i^2,$$

где r_i - расстояние от оси вращения.

Момент инерции системы материальных точек относительно неподвижной оси:

$$I = \sum_{i=1}^n I_i = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2.$$

Момент инерции абсолютно твердого тела:

$$I = \sum_{i=1}^n \Delta m_i r_i^2 = \lim_{\Delta m_i \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n \Delta m_i r_i^2 = \int r^2 dm = \int_{(V)} \rho r^2 dV,$$

где dm - масса элементарного объёма тела: $dm = \rho dV$; ρ - плотность вещества; r - расстояние от элемента объёма dV до оси вращения.

Если тело однородно, т. е. $\rho = \text{const}$, тогда

$$I = \rho \int_{(V)} r^2 dV. \quad (4)$$

Физический смысл: момент инерции тела является мерой инертности во вращательном движении относительно неподвижной оси подобно тому, как масса тела m является мерой его инертности в поступательном движении.

Формулу (4) можно использовать для теоретического определения момента инерции тела.

Момент инерции тела относительно произвольной оси вращения равен сумме момента инерции этого тела I_c относительно оси, проходящей через центр инерции и параллельной данной, и произведения массы тела m на квадрат расстояния между осями d :

$$I = I_c + md^2$$

- теорема Штейнера.

$I = \text{const}$, то уравнение (3) запишется так:

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_z^{\text{внеш}}, \quad (5)$$

или

$$I\varepsilon = M_z^{\text{внеш}},$$

где $\varepsilon = d\omega/dt$ - мгновенное угловое ускорение тела.

Если изменение угловой скорости тела $\Delta\omega$ произошло за конечный промежуток времени Δt , то под $\varepsilon = d\omega/dt$ следует понимать среднее угловое ускорение за данный промежуток времени. Тогда основное уравнение динамики вращательного движения запишется так:

$$I \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = M_z^{\text{внеш}}. \quad (6)$$

Пусть невесомая нерастяжимая нить перекинута через закрепленный блок радиусом R_1 . Нижний конец нити намотан на нижний шкив радиусом R_2 , на одной оси которого расположена крестовина из

четырёх взаимно перпендикулярных стержней с шайбами. К верхнему концу нити прикреплено тело массой m (рис. 1).

Груз массой m перемещается поступательно с ускорением \bar{a} вдоль оси X :

$$ma = mg - T. \quad (7)$$

Вращение верхнего блока радиусом R_1 , если предположить отсутствие сил трения, описывается основным уравнением динамики вращательного движения относительно оси, проходящей через точку O :

$$I_1 \varepsilon_1 = (T' - N') R_1; \quad (8)$$

$$I_1 = \frac{m_1 R_1^2}{2}, \quad (9)$$

где $T = T'$; $N = N'$; $\varepsilon_1 = a/R_1$; m_1 - масса блока.

Окончательно, вместо (8) с учетом (9) можно записать:

$$\frac{1}{2} m_1 a = T - N. \quad (10)$$

Вращение нижнего шкива радиусом R_2 и крестовины, скрепленной соосно с этим шкивом, описывается следующим уравнением:

$$I \varepsilon_2 = N R_2 - M_{\text{тр}};$$

$$I = I_{\text{шк}} + I_{\text{кр}}, \quad (11)$$

где $I_{\text{шк}}$ - момент инерции шкива; $I_{\text{кр}}$ - момент инерции крестовины; $M_{\text{тр}}$ - суммарный момент сил трения, действующих по оси шкива.

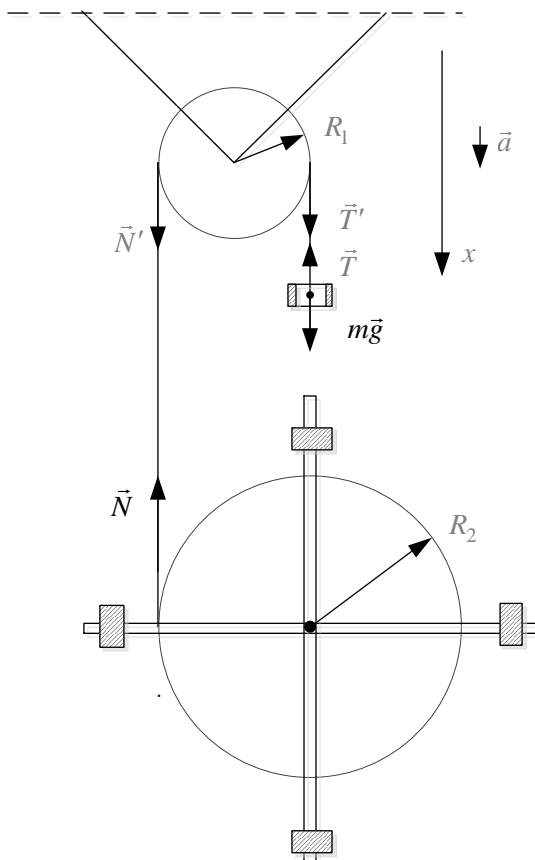


Рис. 1. Механическая система тел маятника Обербека

Полагаем, что $M_{\text{тр}} = \text{const.}$ Решая совместно (7), (10) и (11), приходим к следующему уравнению:

$$I\varepsilon_2 = \left(mg - ma - \frac{1}{2}m_1a \right) R_2 - M_{\text{тр}}, \quad (12)$$

где

$$\varepsilon_2 = a/R_2.$$

Поскольку силы и моменты сил в рассматриваемой системе являются постоянными по модулю, то груз опускается равноускоренно. Ускорение его можно определить из кинематического соотношения:

$$a = \frac{2h}{t^2},$$

где h - начальная высота груза; t - время его движения.

С учетом вышеизложенного формулу (12) можно преобразовать к следующему виду:

$$\frac{I}{mR_2^2} = \left(1 - \frac{M_{\text{тр}}}{mgR_2}\right) \frac{gt^2}{2h} - 1 - \frac{1}{2} \frac{m_1}{m}. \quad (13)$$

Поскольку масса груза m , используемая в экспериментах, значительно превосходит массу верхнего блока m_1 , то

$$\frac{1}{2} \left(\frac{m_1}{m} \right) \ll 1.$$

Кроме того, при массе груза $m \geq 100$ г (или сведя момент сил трения в оси шкива до минимума) отношение

$$\frac{M_{\text{тр}}}{mgR_2} \ll 1.$$

Используя данные упрощения, уравнение (13) запишется так:

$$\frac{I}{mR_2^2} = \frac{gt^2}{2h} - 1. \quad (14)$$

Найденную зависимость (14) можно использовать для определения момента инерции любого тела.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для определения момента инерции тела будем использовать установку «Маятник Обербека», изображенную на рис. 2.

Она содержит вертикальную стойку 1, к которой прикреплены узлы, состоящие из блоков, осей и подшипников. Через блок 2 верхнего узла перекинута нить 3 с грузами 4. Нижний узел содержит двухступенчатый шкив 5, на ободе которого имеется вырез для закрепления нити 3. На одной оси со шкивом 5 находится крестовина, состоящая из четырех взаимно перпендикулярных стержней, ввинченных во втулку 6. На каждом стержне закреплены с помощью винта 7 шайбы 8. Перемещая шайбы 8 вдоль стержня, можно изменять момент инерции крестовины.

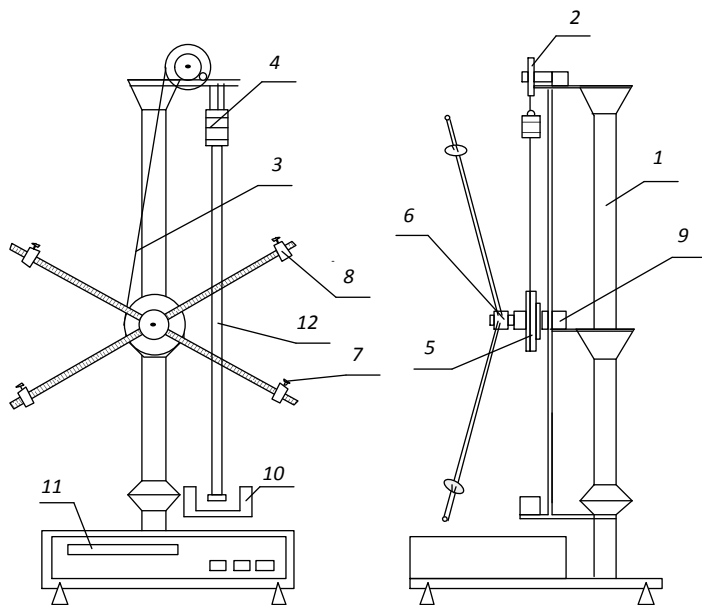


Рис. 2. Маятник Обербека

С другой стороны шкива 5 помещен электромагнитный фрикцион 9. При подаче на него напряжения, фрикцион удерживает обод шкива 5 от вращения. В нижней части вертикальной стойки 1 крепится узел, содержащий фотоэлектрический датчик 10, который вместе с миллисекундомером 11 составляет систему регистрации времени. Местонахождение груза 4 на высоте регистрируется при помощи миллиметровой линейки 12.

3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Закрепить шайбы на стержнях крестовины на расстоянии $l = 120$ мм от оси вращения. Расстояние удобно отсчитывать с помощью рисок, которые нанесены на стержень с интервалом 10 мм, при этом необходимо учитывать, что диаметр втулки равен 40 мм.
2. Зацепить нить за вырез на ободу 5, намотать нить на этот шкив, при этом к другому концу нити, перекинутому через блок, должен быть прикреплен груз массой $m = 135$ г. Поднять груз на высоту $h = 400$

мм, наматывая одновременно нить на шкив 5. Совместить нижний край груза m с риской на корпусе верхнего фотоэлектрического датчика, не перекрывая луча датчика.

3. Придерживая рукой груз m в установленном положении, нажать на миллисекундомере кнопку «СЕТЬ», при этом срабатывает электромагнит, и фрикцион стопорит шкив 5.
4. Нажатием кнопки «СБРОС» привести миллисекундомер в исходное (нулевое) положение.
5. Нажать кнопку «ПУСК», при этом электромагнитный фрикцион 9 освобождает шкив 5, а миллисекундомер начинает вести счет времени. Когда груз 4 пересекает оптическую ось фотоэлектрического датчика 10, счет времени миллисекундомером прекращается.
6. Записать показания миллисекундомера (t).
7. Выключить кнопку «СЕТЬ», нажать кнопку «СБРОС».
8. Измерения повторить 5 раз: установить груз массой m , нажать кнопку «СЕТЬ», нажать кнопку «ПУСК» и т. д.
9. Определить среднее время падения груза:

$$\langle t \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i; n=5.$$

10. Используя зависимости (11) и (14), рассчитать момент инерции крестовины относительно оси вращения:

$$I_{\text{кр}} = mR_2^2 \left(\frac{g \langle t^2 \rangle}{2h} - 1 \right) - I_{\text{шк}}, \quad (15)$$

где $I_{\text{шк}} = 0,4 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ - момент инерции шкива 5; $m = 135 \text{ г}$; $R_2 = 43 \text{ мм}$; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

4. АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

При определении момента инерции $I_{\text{кр}}$ по формуле (15) имеем дело с косвенными измерениями. Оценим погрешность, которую допускаем при вычислении:

1. Экспериментальные данные измерения времени t (времени движения груза массой m) имеют разброс, который объясняется случайными погрешностями при проведении повторных измерений. Так как инструментальная погрешность измерения времени в

данных опытах существенно меньше случайной, то полная погрешность измерения времени будет равна случайной погрешности и её следует рассчитать по формуле

$$\Delta t = t_{\alpha,n} \cdot \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum (\Delta t_i)^2}, \quad (16)$$

где $t_{\alpha,n} = 2,8$ – коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ и числе измерений $n = 5$.

2. Рассчитать относительную погрешность измерения:

$$\varepsilon = \frac{\Delta I_{\text{кр}}}{I_{\text{кр}}} = \frac{mR_2^2 \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right) \left[\frac{\Delta m}{m} + 2 \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{gt^2 \left(2 \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta h}{h} \right)}{gt^2 - 2h} \right] + \Delta I_{\text{шк}}}{mR_2^2 \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right) - I_{\text{шк}}}. \quad (17)$$

Примечания:

1. Если одно из слагаемых в квадратных скобках выражения (17) более чем вдвое превосходит другое, то меньшим можно пренебречь.
2. Поскольку экспериментальные данные ($I_{\text{кр}}$, m , R_2) приведены без указания погрешностей, можно положить её равной $\pm 0,5$ последнего значащего разряда, т. е.

$$\Delta I_{\text{шк}} = \pm 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$\Delta m = \pm 0,5 \text{ г}; \Delta R_2 = \pm 0,5 \text{ мм}.$$

3. Определить абсолютную погрешность:

$$\Delta I_{\text{кр}} = I_{\text{кр}} \varepsilon. \quad (18)$$

4. Записать окончательный результат в СИ:

$$I_{\text{кр}} = \langle I_{\text{кр}} \rangle \pm \Delta I_{\text{кр}}. \quad (19)$$

5. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Представить отчет по лабораторной работе на стандартных листах формата А4 в соответствии с методикой выполнения и оформления лабораторных работ по физике:

1. Прочитать описание лабораторной работы, ознакомиться с теоретической и экспериментальной частью, выполнением эксперимента, контрольными вопросами.
2. Придерживаясь следующего плана, оформить отчет о выполнении лабораторной работы:
 - 1) записать номер и название лабораторной работы;
 - 2) записать цель лабораторной работы;
 - 3) записать приборы и принадлежности, включая измерительную линейку, штангенциркуль, секундомер электронный, микрометр и т. д.;
 - 4) теоретическая часть: записать основной закон или расчетную формулу с разъяснением буквенных обозначений физических величин, входящих в них, указать единицы измерений в СИ;
 - 5) экспериментальная часть: привести схему установки, рисунок или чертеж, поясняющий выполнение эксперимента; записать таблицу измерений, константы расчета;
 - 6) обработка результатов измерений: вычисление физических величин в СИ; построение графиков на миллиметровке, скрепленной с отчетом; расчет погрешностей измерений;
 - 7) записать ответ. Сделать выводы.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется моментом силы и моментом импульса относительно неподвижной точки O , относительно неподвижной оси?
2. Что называется моментом инерции материальной точки, системы материальных точек, абсолютно твердого тела?
3. Записать основное уравнение динамики вращательного движения относительно неподвижной точки O , относительно неподвижной оси.
4. Сформулировать и записать теорему Штейнера.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7
«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ МОЛЯРНЫХ
ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ГАЗА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ И
ОБЪЕМЕ ПО МЕТОДУ КЛЕМАНА И ДЕЗОРМА»

Цель работы: определение отношения молярных теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и объеме по методу Клемана и Дезорма.

Приборы и принадлежности: стеклянный сосуд; соединительные трубки; насос ручной; манометр жидкостный И-образный.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Согласно первому закону (началу) термодинамики для бесконечно малого, или элементарного, квазистатического процесса:

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad (1)$$

где δQ – элементарное количество теплоты, сообщенное системе; δA – элементарная работа, совершаемая системой против внешних тел; dU – элементарное изменение внутренней энергии системы.

В качестве системы рассмотрим идеальный газ.

Величины δQ и δA , в отличие от dU , не являются функциями состояния, а зависят от способа перехода идеального газа из начального состояния в конечное и будут неодинаковы в различных процессах, в то время как величина dU будет одна и та же.

Величины, связанные первым законом термодинамики, могут быть вычислены независимо друг от друга. Рассмотрим одну из них.

По определению:

$$\delta Q = C_r \cdot m \cdot dT, \quad (2)$$

где C_r – удельная теплоемкость газа Дж/(кг · К); или

$$\delta Q = C_\mu \cdot \nu \cdot dT, \quad (3)$$

где C_μ – молярная теплоемкость газа Дж/(моль · К); $\nu = m / \mu$ – число молей идеального газа, кг/моль.

Приравняем (2) и (3), получим связь между теплоемкостями:

$$C_r \cdot m \cdot dT = C_\mu \cdot \frac{m}{\mu} \cdot dT;$$
$$C_r = C_\mu / \mu. \quad (4)$$

Наибольший интерес представляет молярная теплоемкость газа при постоянном давлении (C_p) и объеме (C_V).

Отношение $\gamma = C_p/C_V$ представляет собой характерную для каждого газа величину, которую можно рассчитать теоретически:

$$C_p = \frac{i+2}{2} \cdot R; C_V = \frac{i}{2} \cdot R,$$

где R — универсальная газовая постоянная, численно равная 8,3 Дж/(моль·К); i — число степеней свободы молекулы (для одноатомных газов $i=3$, для двухатомных газов $i=5$, для трехатомных и многоатомных $i=6$).

Тогда

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i}. \quad (5)$$

Так для воздуха ($i=6$) имеем: $\gamma = (6+2)/6 = 1,3$.

Число γ входит также в уравнение Пуассона, связывающее давление и объем идеального газа при адиабатическом процессе, происходящем без теплового обмена с окружающей средой, и называется коэффициентом Пуассона или показателем адиабаты.

Запишем первый закон термодинамики в дифференциальной форме:

$$\delta Q = dU + \delta A,$$

где

$$\delta Q = 0; dU = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R dT = \frac{m}{\mu} C_V dT; \delta A = p dV;$$

тогда

$$0 = \frac{m}{\mu} C_V dT + p dV. \quad (6)$$

Продифференцируем уравнение Клапейрона–Менделеева:

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

где

$$p dV + V dp = \frac{m}{\mu} R dT,$$

отсюда

$$dT = \frac{pdV + Vdp}{\frac{m}{\mu}R}. \quad (7)$$

Подставим (7) в (6):

$$0 = \frac{m}{\mu} C_V \frac{pdV + Vdp}{\frac{m}{\mu}R} + pdV.$$

Воспользуемся уравнением Майера:

$$R = C_p - C_V, \quad (8)$$

тогда

$$C_V (pdV + vdp) + (C_p - C_V) pdV = 0,$$

или

$$C_V pdV + C_V vdp + C_p pdV - C_V pdV = 0.$$

Поделим полученный результат почленно на $C_V pV$:

$$\frac{dp}{p} + \frac{C_p}{C_V} \frac{dV}{V} = 0,$$

где $C_p/C_V = \gamma$;

$$\frac{dp}{p} + \gamma \frac{dV}{V} = 0. \quad (9)$$

В результате интегрирования и потенцирования (9) получим:

$$\ln p + \ln V^\gamma = \ln(\text{const});$$

или

$$pV^\gamma = \text{const}. \quad (10)$$

Выражение (10) называют уравнением Пуассона, которое для двух произвольных состояний запишется следующим образом:

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma. \quad (11)$$

Уравнение Пуассона используется при выводе экспериментальной формулы.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Одним из методов экспериментального определения $\gamma = C_p / C_V$ является метод Клемана и Дезорма. Суть его заключается в следующем.

Стеклянный баллон (сосуд) вместимостью в несколько литров наполняется исследуемым газом — воздухом, который при атмосферном давлении и комнатной температуре по своим свойствам приближается к идеальному. Сосуд снабжен тремя трубками (рис 1.). Первая (1) — широкая (для лучшего адиабатического расширения воздуха, находящегося в сосуде) — соединена с сосудом и запирается краном K_1 ; вторая (2) — соединена с насосом и снабжена краном K_2 ; третья (3) — соединена с U -образным жидкостным (водяным) манометром 4.

Мысленно выделим внутри баллона произвольную порцию газа, ограниченную замкнутой поверхностью, выполняющей роль «оболочки» (5). В различных процессах газ внутри «оболочки» будет расширяться и сжиматься, совершая работу против давления окружающего газа (6) и обмениваясь с ним теплотой. Поскольку кинетическая энергия возникающего макроскопического движения невелика, эти процессы могут рассматриваться как квазистатические.

Если открыть кран K_1 , то параметры состояния мысленно выделенного малого объёма воздуха будут равны:

$$p_0; V_0; T_0,$$

где p_0 — атмосферное давление; T_0 — температура окружающей среды (комнатная).

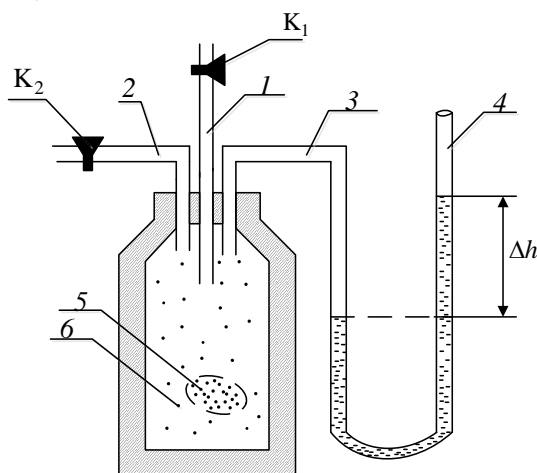


Рис. 1. Экспериментальная схема определения $\gamma = C_p / C_v$ по методу Клемана и Дезорма.

Если закрыть кран K_1 и, открыв кран K_2 , ведущий к насосу, накачать в сосуд некоторое количество воздуха, а затем закрыть кран K_2 , то рассматриваемый малый объём сожмется, а его температура и давление повысятся. Через некоторое время благодаря теплообмену с окружающей средой, температура воздуха в сосуде снова сравняется с комнатной, а параметры состояния воздуха в «оболочке» будут равны:

$$p_1 = p_0 + \Delta h_1; V_1; T_0,$$

где Δh_1 — установившаяся разность уровней жидкости в манометре после закачивания воздуха в сосуд и последующего его охлаждения до температуры окружающей среды.

Если на короткое время открыть широкую трубку (кран K_1), то воздух в сосуде адиабатически расширится и вследствие этого охладится. В конце этого малого промежутка времени, когда широкая трубка открыта, давление воздуха внутри сосуда сравняется с атмосферным и состояние воздуха внутри «оболочки» в данный момент определится параметрами:

$$p_0; V_2; T_1,$$

причем $T_1 < T_0$.

Когда давление в сосуде делается равным давлению атмосферы (разность уровней жидкости в манометре равна нулю), широкую трубку закрывают (кран K_1). Воздух, находящийся в сосуде, станет нагреваться от T_1 до T_0 за счет теплообмена с окружающей средой. Вследствие этого давление в сосуде начнет повышаться до величины $p_2 = p_0 + \Delta h_2$, где Δh_2 — установившаяся разность уровней жидкости в манометре после выравнивания температур. Параметры состояния малого объема воздуха равны:

$$p_2 = p_0 + \Delta h_2; V_2; T_0.$$

Итак, для вывода экспериментальной расчетной формулы рассмотрим три состояния малого объема воздуха в «оболочке»:

- ♦ I состояние (после закачивания воздуха в сосуд и последующего его охлаждения до температуры окружающей среды), характеризуемое параметрами:

$$p_1; V_1; T_0;$$

- ♦ II состояние (короткое, наступающее в конце адиабатного расширения) с параметрами:

$$p_0; V_2; T_1;$$

- ♦ III состояние (в конце эксперимента), характеризующееся параметрами:

$$p_2; V_2; T_0.$$

Переход из I состояния в II представляет собой адиабатный процесс. Согласно уравнению Пуассона, имеем:

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma. \quad (12)$$

I и III состояние при $T_0 = \text{const}$ связаны законом Бойля-Мариотта:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2. \quad (13)$$

Возведем уравнение (13) в степень γ :

$$p_1^\gamma V_1^\gamma = p_2^\gamma V_2^\gamma. \quad (14)$$

Поделив почленно уравнение (14) на (12) получим:

$$\frac{p_1^\gamma}{p_1} = \frac{p_2^\gamma}{p_0};$$

отсюда

$$\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^\gamma = \frac{p_0}{p_1}. \quad (15)$$

Взяв натуральный логарифм левой и правой частей (15) и решая относительно γ , находим:

$$\gamma = \frac{\ln(p_0 / p_1)}{\ln(p_2 / p_1)}. \quad (16)$$

Принимая во внимание, что

$$p_1 = p_0 + \Delta h_1; \quad p_2 = p_0 + \Delta h_2,$$

получим

$$p_0 = p_1 - \Delta h_1; \quad p_2 = p_1 - \Delta h_1 + \Delta h_2 = p_1 - (\Delta h_1 - \Delta h_2).$$

Подставляем полученные выражения для p_0 и p_2 в равенство (16), имеем:

$$\gamma = \frac{\ln \frac{p_1 - \Delta h_1}{p_1}}{\ln \frac{p_1 - (\Delta h_1 - \Delta h_2)}{p_1}} = \frac{\ln \left(1 - \frac{\Delta h_1}{p_1} \right)}{\ln \left(1 - \frac{\Delta h_1 - \Delta h_2}{p_1} \right)}. \quad (17)$$

Так как Δh_1 и $\Delta h_1 - \Delta h_2$ значительно меньше p_1 , то числитель и знаменатель правой части равенства (17) можно разложить в степенной ряд, воспользовавшись формулой:

$$\ln(1-x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} + \dots$$

Ограничимся при разложении первой степенью. Тогда:

♦ для числителя:

$$\left(1 - \frac{\Delta h_1}{p_1}\right) = \frac{\Delta h_1}{p_1};$$

♦ для знаменателя :

$$\ln\left(1 - \frac{\Delta h_1 - \Delta h_2}{p_1}\right) = \frac{\Delta h_1 - \Delta h_2}{p_1}.$$

Окончательно:

$$\gamma = \frac{\Delta h_1}{\Delta h_1 - \Delta h_2}. \quad (18)$$

3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Открыть широкую трубку (кран K_1), выравнивая уровни жидкости манометра в обоих коленях. После этого кран K_1 закрыть.
2. Открыть кран K_2 , ведущий к насосу. Наблюдая за манометром, медленно накачать в сосуд некоторое количество воздуха, при этом разность уровней жидкости в манометре не должна превышать $\square 25$ см. После этого кран K_2 закрыть. Выждать, пока температура воздуха в сосуде не сравняется с температурой окружающей среды. Когда разность уровней жидкости в манометре перестанет изменяться, записать установившееся показание манометра Δh_1 по миллиметровой шкале (мм).
3. На короткое время открыть широкую трубку (кран K_1) и держать её открытой, пока давление в сосуде не сравняется с атмосферным, наблюдая выравнивание разности уровней жидкости в манометре, а затем кран K_1 закрыть. После этого наблюдать небольшое возрастание разности уровней жидкости в манометре. Когда этот

процесс стабилизируется, записать установившуюся величину Δh_2 по миллиметровой шкале (мм).

4. Вычислить величину по формуле (18).

5. Измерения повторить десять раз.

6. Вычислить погрешности измерений:

1) среднее значение:

$$\langle \gamma \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_i,$$

где $n = 10$;

2) абсолютную погрешность:

$$\Delta \gamma = t_{\alpha(n)} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\Delta \gamma_i)^2};$$

$$t_{\alpha(n)} = t_{0,95(10)} = 2,2;$$

3) относительную погрешность:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \gamma}{\langle \gamma \rangle} \cdot 100\%;$$

4) результат измерений записать в форме

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

соблюдая правила округления.

7. Результат измерений и вычислений записать в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений и вычислений

i	$\Delta h_1, \text{мм}$	$\Delta h_2, \text{мм}$	$\Delta h_1 - \Delta h_2, \text{мм}$	γ_i	$\langle \gamma \rangle$	$\Delta \gamma_i$	$\langle \gamma \rangle \pm \Delta \gamma$	$\varepsilon, \%$
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Представить отчет по лабораторной работе на стандартных листах формата А4 в соответствии с методикой выполнения и оформления лабораторных работ по физике:

1. Прочитать описание лабораторной работы, ознакомиться с теоретической и экспериментальной частью, выполнением эксперимента, контрольными вопросами.
2. Придерживаясь следующего плана, оформить отчет о выполнении лабораторной работы:
 - 1) записать номер и название лабораторной работы;
 - 2) записать цель лабораторной работы;
 - 3) записать приборы и принадлежности, включая измерительную линейку, штангенциркуль, секундомер электронный, микрометр и т.д.;
 - 4) теоретическая часть: записать основной закон или расчетную формулу с разъяснением буквенных обозначений физических величин, входящих в них, указать единицы измерений в СИ;
 - 5) экспериментальная часть: привести схему установки, рисунок или чертеж, поясняющий выполнение эксперимента; записать таблицы измерений, константы расчета;
 - 6) обработка результатов измерений: вычисление физических величин в СИ; построение графиков на миллиметровке, скрепленной с отчетом; расчет погрешностей измерений;
 - 7) записать ответ; сделать выводы.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой газ называется идеальным? Как реальные газы приблизить к идеальному по своим свойствам?
2. Рассчитать теоретическую величину $\gamma = C_p / C_V$ для воздуха.
3. Получить уравнение Пуассона.
4. Вывести расчетную формулу для γ по методу Клемана и Дезорма.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8 «ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ МЕТОДОМ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ»

Цель работы: экспериментальное изучение одного из методов измерения моментов инерции, который во многих случаях является более предпочтительным.

Приборы и принадлежности: крутильный маятник FPM-05; встроенный миллисекундомер универсальный.

Правила безопасности при работе с крутильным маятником FPM-05. При любых неполадках в установке обращайтесь к дежурному лаборанту или преподавателю.

При работе с крутильным маятником FPM-05 необходимо соблюдать общие правила по технике безопасности труда, касающиеся устройств, в которых имеются напряжения до 250 В.

Прибор разрешается эксплуатировать только при использовании заземления.

Во время проведения процедуры технического ухода за крутильным маятником FPM-05 необходимо:

1. Проверить и поправить натяжение стальной проволоки, на которой подвешена рамка прибора, для устранения боковых отклонений во время эксперимента.
2. Удалить пыль и устранить загрязнения на поверхности прибора.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Подвесим тело на стальной проволоке так, чтобы оно могло совершать крутильные колебания вокруг вертикальной оси, совпадающей с осью проволоки. При повороте тела на угол φ проволока закручивается и возникает момент сил M , стремящийся вернуть тело в положение равновесия. Опыт показывает, что момент M в довольно широких пределах пропорционален углу φ :

$$M = -f\varphi$$

где f — постоянная данной проволоки величина, называемая её модулем кручения. Запишем для данного маятника основное уравнение динамики вращательного движения:

$$I\ddot{\varphi} = -f\varphi \quad (1)$$

где I — момент инерции тела относительно оси, совпадающей со стальной проволокой.

Это уравнение математически тождественно дифференциальному уравнению свободных незатухающих колебаний:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0 \quad (2)$$

где x — смещение колеблющегося тела относительно положения равновесия; ω_0 — собственная циклическая частота колебаний, причем

$$T = 2\pi/\omega_0, \quad (3)$$

где T — период колебаний.

Из сравнения уравнений (2) и (3) легко получить, что

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{f}{I}},$$

следовательно,

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{f}}. \quad (4)$$

Сняв первое тело, подвесим на той же проволоке другое тело с моментом инерции I^* . Тогда период колебаний будет равен:

$$T^* = 2\pi\sqrt{\frac{I^*}{f}} \quad (5)$$

Исключив из уравнений (4) и (5) неизвестный модуль кручения f , найдем:

$$I^* = I \left(\frac{T^*}{T} \right)^2 \quad (6)$$

Если один из моментов инерции, например I , известен, то по формуле (6) может быть вычислен момент инерции I^* другого тела. Формула (4) может быть использована также для экспериментального определения модуля кручения проволоки.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Прибор «Крутильный маятник FPM-05» представлен на рис. 1.

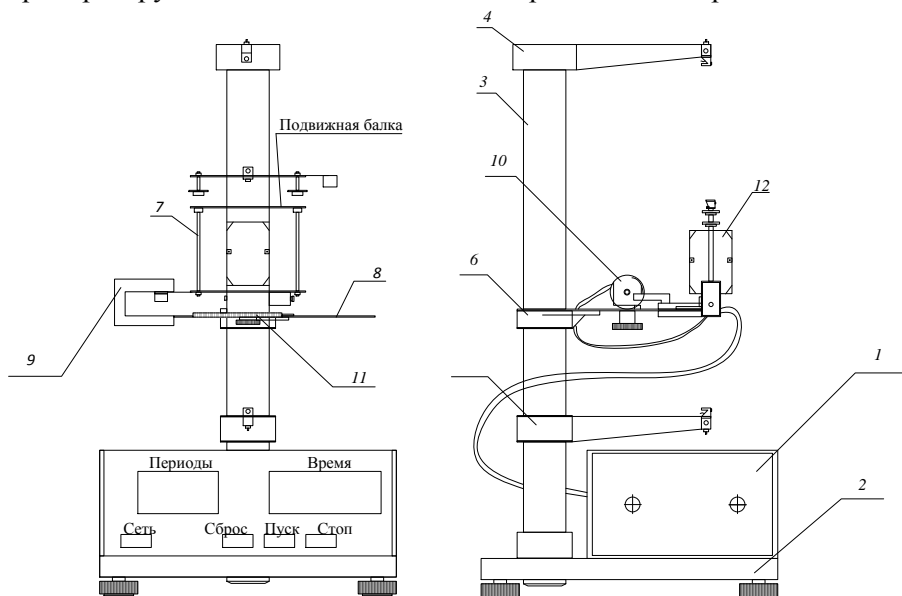


Рис.1. Крутильный маятник FPM-05

На основании 2, оснащенном четырьмя ножками с регулируемой высотой, прикреплен миллисекундомер FPM-14 1. В основании закреплена колонка 3, на которой при помощи прижимных винтов закреплены кронштейны 4, 5, 6.

Кронштейны 4 и 6 имеют зажимы, служащие для закрепления стальной проволоки, на которой подвешена рамка 7. На кронштейне 5 закреплена стальная плита 8, которая служит основанием фотоэлектрическому датчику 9, электромагниту 10 и угловой шкале 11.

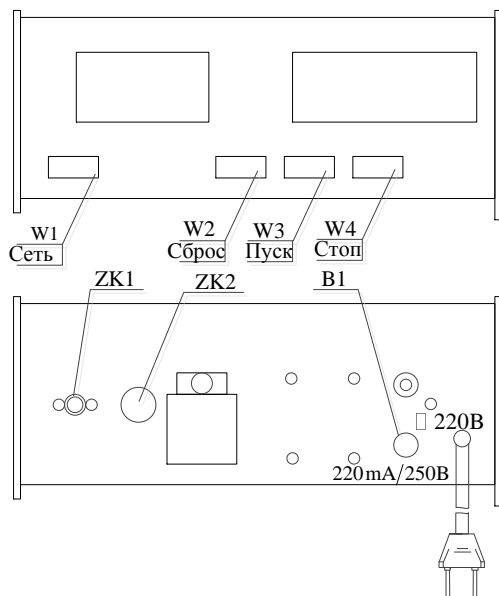


Рис. 2. Универсальный миллисекундомер FPM-14.
Лицевая панель и задняя панель

Электромагнит 10 может менять положение на плите, а его положение относительно фотоэлектрического датчика показывает на угловой шкале стрелка, прикрепленная к электромагниту. Конструкция рамки позволяет закреплять грузики 12, значительно отличающиеся друг от друга по внешним размерам. Грузики крепятся при помощи подвижной балки, которая перемещается по направляющим между неподвижными балками. Балка устанавливается путем затягивания гаек на зажимных втулках, помещенных на подвижной балке. Фотоэлектрический датчик и электромагнит соединены при помощи разъема.

Виды лицевой панели и задней стенки миллисекундомера FPM-14 представлены на рис. 2. На задней стенке корпуса находится гнездо «ZM1» для подключения фотоэлектрического датчика и электромагнита.

2.2. ПОДГОТОВКА УСТАНОВКИ К РАБОТЕ

1. Произвести выравнивание прибора с помощью регулировочных ножек.

2. Подключить миллисекундомер FPM-14 к сети (220 В).
3. Нажать по очереди «СЕТЬ» и «СБРОС», затем отклонить рамку прибора таким образом, чтобы её стрела приблизилась к сердечнику электромагнита, который остановит рамку в заданном положении (установить электромагнит в положении по угловой шкале).
4. Нажимая кнопку «ПУСК», освободить рамку, которая, выполняя движение вокруг стальной проволоки, пересекает стрелой свет фотоэлектрического датчика; импульсы, переданные датчиком, подсчитываются миллисекундомером и высвечиваются его цифровыми индикаторами в виде числа полных колебаний и их продолжительности в секундах.
5. Нажать кнопку «СТОП», после завершения очередного полного колебания рамки должно наступить задержание подсчета миллисекундомером числа полных колебаний и продолжительности колебаний рамки.
6. Записать результат.
7. Отжать кнопку «ПУСК».
8. Нажать кнопку «СБРОС» и убедиться, что все индикаторы измерителя высвечивают «0» и лампочка фотоэлектрического датчика светится. Снова отклонить рамку, чтобы её стрела приблизилась к сердечнику электромагнита, который остановит рамку в заданном положении.
9. Для повторения эксперимента снова нажать кнопку «ПУСК» и затем повторить действия, описанные в пп. 5-8.
10. Выключить установку, нажав на кнопку «СЕТЬ».
11. После выполнения описанных в пп. 1-10 действий прибор готов к выполнению эксперимента.

3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Установить электромагнит в заданное положение на плите (40° по угловой шкале) и фиксировать его, затягивая гайку.
2. Нажать кнопку «СЕТЬ». Прибор готов к работе непосредственно после включения сетевого напряжения и не нуждается в нагреве.
3. Нажать кнопку «СБРОС» и отклонить рамку прибора таким образом, чтобы её стрела приблизилась к сердечнику электромагнита, который остановит рамку в заданном положении.
4. Нажать кнопку «ПУСК».

5. После 9 полных колебаний нажать кнопку «СТОП» и записать время 10 полных колебаний.
6. Отжать кнопку «ПУСК».
7. Повторись эксперимент 10 раз, проделав каждый раз пп. 3-6.
8. Проделав эксперимент с рамкой без груза 10 раз, нажать кнопку «СБРОС», а затем «СЕТЬ».
9. Поместить груз между неподвижной и подвижной балками рамки. Затягивая гайки на зажимных втулках, проверить надежность зажатия втулок по направляющим. Груз должен быть во время колебаний неподвижен относительно рамки, т.е. он должен быть хорошо закреплен. Если рамка во время оборота имеет боковые отклонения, надо увеличить натяжение подвески рамки, затягивая гайки зажимов, которые размещены в кронштейнах 4 и 6. Это приведет к перемещению зажимов в кронштейнах и натянет проволоку.
10. Измерить время 10 полных колебаний рамки с грузом относительно трех главных осей, проходящих через середины противоположных граней груза и относительно оси, проходящей через вершину груза (диагональной оси). Эксперимент повторить 10 раз ($i = 10$).
11. Вычислить периоды колебаний T ненагруженной рамки и T^* рамки с грузом относительно главных (первой 1-1, второй 2-2, третьей 3-3) и диагональной осей:

$$T = \frac{t}{n}; \quad T^* = \frac{t^*}{n};$$

где t, t^* – время n полных колебаний рамки без груза и рамки с грузом, с.

12. Пользуясь формулой (6), получить расчетную формулу для момента инерции груза:

$$I_{\text{груза}} = I \left[\left(T^* / T \right)^2 - 1 \right], \quad (8)$$

где I – момент инерции ненагруженной рамки относительно оси, совпадающей со стальной проволокой, $I = 7 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; T^* – период колебаний рамки с грузом относительно той же оси; T – период колебаний рамки без груза.

Таблица 1

Измерение периода колебаний ненагруженной рамки

i	n	t_i, c	T_i, c	T_{cp}, c
1	10			
2	10			
·	·			
·	·			
·	·			
10	10			

Таблица 2

Измерение периода колебаний рамки с грузом и вычисление момента инерции груза относительно главной оси 1-1

i	n	t_i^*, c	T_i^*, c	T_{cp}^*, c	$I, кг \cdot м^2$	$I_{груза}, кг \cdot м^2$
1	10					
2	10					
3	10					
·	·					
·	·					
·	·					
10	10					

13. Данные измерений и вычислений занести в табл. 1-5 (табл. 3-5 аналогичны табл. 2).

4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Представить отчет по лабораторной работе на стандартных листах формата А4 в соответствии с методикой выполнения и оформления лабораторных работ по физике:

1. Прочитать описание лабораторной работы, ознакомиться с теоретической и экспериментальной частью, выполнением эксперимента, контрольными вопросами.
2. Придерживаясь следующего плана, оформить отчет о выполнении лабораторной работы:
 - 1) записать номер и название лабораторной работы;
 - 2) записать цель лабораторной работы;
 - 3) записать приборы и принадлежности, включая измерительную линейку, штангенциркуль, секундомер электронный, микрометр и т.д.;
 - 4) теоретическая часть: записать основной закон или расчетную формулу с разъяснением буквенных обозначений физических величин, входящих в них, указать единицы измерений в СИ;
 - 5) экспериментальная часть: привести схему установки, рисунок или чертеж, поясняющий выполнение эксперимента; записать таблицы измерений, константы расчета;
 - 6) обработка результатов измерений: вычисление физических величин в СИ; построение графиков на миллиметровке, скрепленной с отчетом; расчет погрешностей измерений;
 - 7) записать ответ; сделать выводы.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Момент инерции материальной точки, системы материальных точек, абсолютно твердого тела.
2. Теорема Штейнера.
3. Основное уравнение динамики вращательного движения абсолютно твердого тела.
4. Квазиупругая сила. Дифференциальное уравнение гармонических колебаний и его решение.
5. Суть метода крутильных колебаний по определению момента инерции тела.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ»

Цель работы: определение скорости звука в воздухе по методу стоячих волн.

Приборы и принадлежности: металлический сосуд цилиндрической формы; телефон; сообщающиеся сосуды; штатив лабораторный со шкалой; микрофон; милливольтметр В726; звуковой генератор ГН4ш.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Процесс распространения возмущений в веществе или в поле называется *волновым процессом*, или *волной*.

При распространении волны частицы среды колеблются около своих положений равновесия. Вместе с волной от частицы к частице среды передается лишь состояние колебательного движения и его энергия. Поэтому основным свойством всех волн, независимо от их природы, является перенос энергии в пространстве без переноса вещества.

Механические возмущения, распространяющиеся в упругой среде, называются *упругими* или *механическими волнами*. Упругие волны бывают продольными и поперечными.

В *продольных волнах* частицы среды колеблются в направлении распространения волны. Они могут распространяться в среде, в которой возникают упругие силы при деформации сжатия и растяжения, т. е. в твердых, жидких и газообразных телах.

В *поперечных волнах* частицы среды колеблются в направлениях, перпендикулярных направлению распространения волны. Они могут распространяться в среде, в которой возникают упругие силы при деформации сдвига, т. е. только в твердых телах.

Упругая волна называется *гармонической*, если соответствующие ей колебания частиц среды являются гармоническими.

На рис. 1 частица среды B_1 находится от источника колебаний O на расстоянии x_1 . Если колебания точек, лежащих в плоскости $x=0$, описываются функцией $\xi(0,t) = A \cos \omega t$, то частица среды B_1 колеблется по тому же закону, но её колебания будут отставать по времени от колебаний источника на τ , так как для прохождения волной расстояния x требуется время $\tau = x/v$, где v – скорость

распространения волны. Тогда уравнение колебаний частиц среды, лежащих в плоскости x , имеет следующий вид:

$$\xi(x, t) = A \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right). \quad (1)$$

Уравнение (1) представляет собой уравнение плоской бегущей волны, где $A = \text{const}$ — амплитуда волны; ω — циклическая частота волны; $\Phi = \omega(t - x/v)$ — фаза волны.

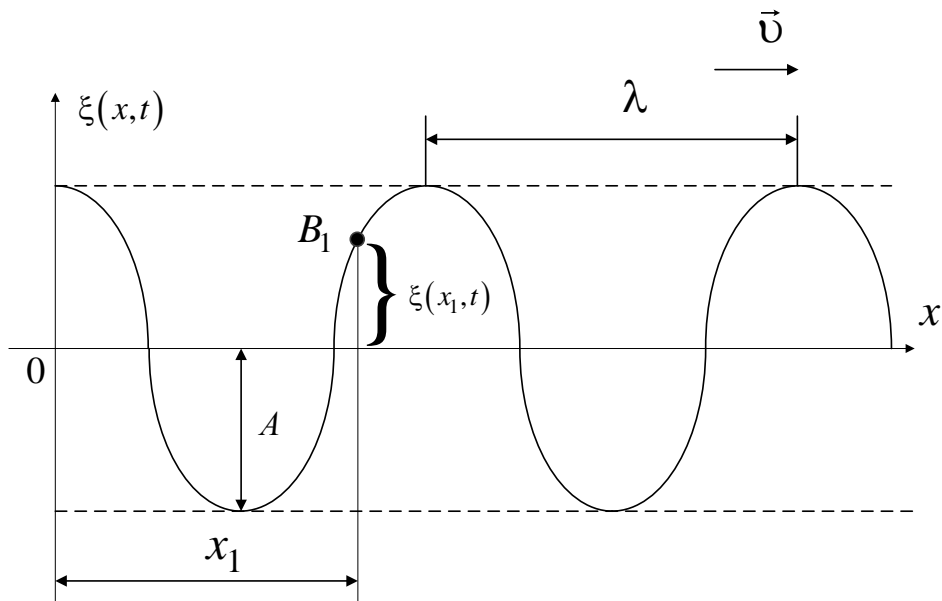


Рис. 1. Зависимость смещения частиц среды относительно положения равновесия от расстояния до источника колебаний в данный момент времени (моментальный «снимок» волны)

Бегущая волна переносит энергию в пространстве. Для характеристики волн используется волновое число:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{vT} = \frac{\omega}{v}. \quad (2)$$

С учетом (2) уравнение (1) примет следующий вид:

$$\xi(x, t) = A \cos \omega(\omega t - kx). \quad (3)$$

Если плоская волна распространяется в противоположном направлении, то

$$\xi(x, t) = A \cos \omega(\omega t + kx). \quad (4)$$

Изображенный на рис. 1 график волны дает зависимость смещения всех частиц среды относительно положения равновесия от расстояния до источника колебания в данный момент времени (моментальный «снимок»).

Расстояние между ближайшими частицами, колеблющимися в одинаковой фазе, называется *длиной волны* λ :

$$\lambda = vT. \quad (5)$$

Учитывая, что $T = 1/\nu$, где ν — частота колебаний, получим:

$$v = \lambda \nu. \quad (6)$$

Если в среде распространяется одновременно несколько волн, то происходит наложение волн друг на друга.

Волны называются *когерентными*, если разность их фаз остается постоянной во времени. Очевидно, когерентными могут быть лишь волны, имеющие одинаковую частоту (монохроматичные).

При наложении в пространстве двух или нескольких когерентных волн в различных его точках получается усиление или ослабление результирующей волны в зависимости от соотношения между фазами этих волн. Это явление называется *интерференцией волн*.

Особым случаем интерференции являются *стоячие волны* — это волны, образующиеся при наложении двух бегущих волн, распространяющихся навстречу друг другу с одинаковыми амплитудами и частотами колебаний.

Уравнения плоских бегущих волн имеют вид:

$$\xi_1 = A \cos \omega(\omega t - kx) \quad (7)$$

$$\xi_2 = A \cos \omega(\omega t + kx) \quad (8)$$

Сложив (7) и (8), получим уравнение стоячей волны:

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = 2A \cos(kx) \cos(\omega t) = \left(2A \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \right) \cos(\omega t). \quad (9)$$

Из уравнения (9) вытекает, что в каждой точке этой волны происходят колебания той же частоты ω с амплитудой

$$A_{\text{ст}} = 2A \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right).$$

В точке среды, где

$$\frac{2\pi x}{\lambda} = \pm(m\pi), \quad m=0, 1, 2, \dots, \quad (10)$$

амплитуда колебаний достигает максимального значения:

$$A_{\max} = 2A.$$

Эти точки называются пучностями *стоячей волны*. В точках среды, где

$$\frac{2\pi x}{\lambda} = \pm\left(m + \frac{1}{2}\right)\pi, \quad m=0, 1, 2, \dots, \quad (11)$$

амплитуда колебаний обращается в нуль. Эти точки называются *узлами стоячей волны*. Точки среды, находящиеся в узлах, колебаний не совершают. Из выражений (10) и (11) получим координаты пучностей и узлов:

$$x_n = \pm m \frac{\lambda}{2}, \quad m=0, 1, 2, \dots, \quad (12)$$

$$x_{\text{уэл}} = \pm\left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2}, \quad m=0, 1, 2, \dots, \quad (13)$$

Из формул (12) и (13) следует, что расстояния между двумя соседними пучностями и двумя соседними узлами одинаковы и равны $\lambda/2$, а расстояние между соседними пучностью и узлом равно $\lambda/4$ (рис. 2, где $n_2 > n_1$).

В случае стоячей волны переноса энергии нет, так как падающая и отраженная волны одинаковой амплитуды несут одинаковую энергию в противоположных направлениях. Полная энергия результирующей стоячей волны, заключенная между узловыми точками, остается постоянной. Лишь в пределах расстояний, равных $\lambda/2$, происходят взаимные превращения кинетической энергии в потенциальную и обратно.

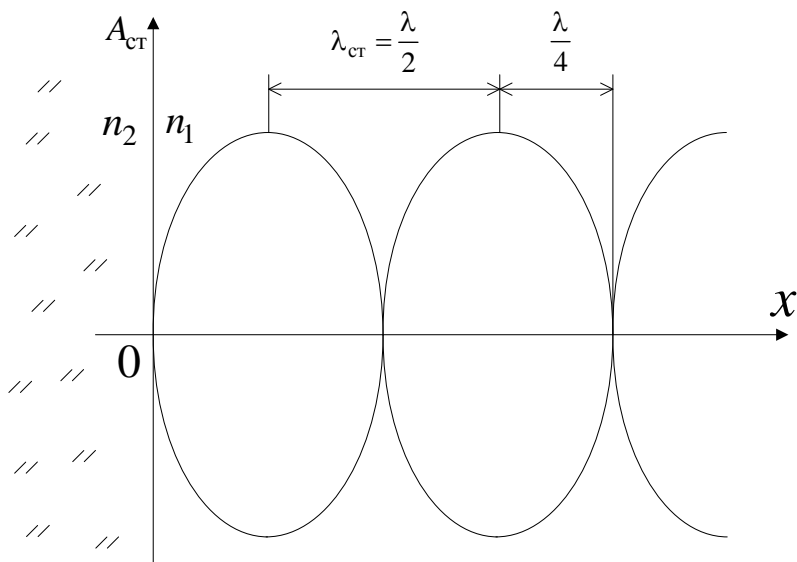


Рис. 2. Образование стоячей волны при интерференции бегущей и отраженной волн ($n_2 > n_1$)

Упругие волны, распространяющиеся в среде с частотами в пределах $16 \div 20000$ Гц, называются *звуковыми* или *акустическими*. Волны указанных частот, воздействуя на слуховой аппарат человека, вызывают ощущение звука.

Волны с частотой $\nu < 16$ Гц (инфразвуковые) и с частотой $\nu > 20$ кГц (ультразвуковые) органами слуха человека не воспринимаются.

Скорость распространения звуковых волн в газах вычисляется по следующей формуле:

$$\nu = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}}, \quad (14)$$

где R — универсальная газовая постоянная; μ — молярная масса газа; $\gamma = C_p / C_v$ — отношение молярных теплоемкостей газа при постоянном давлении и объеме; T — термодинамическая температура, К.

Так при $T = 273$ К, $\mu = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, скорость звука в воздухе $\nu = 331$ м/с. Выражение (14) соответствует опытным данным.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Если источник звука посылает волны с известной частотой ν , то измерив каким-либо способом длину волны λ , можем рассчитать скорость распространения звуковой волны в среде:

$$v = \lambda/T = \lambda\nu \quad (15)$$

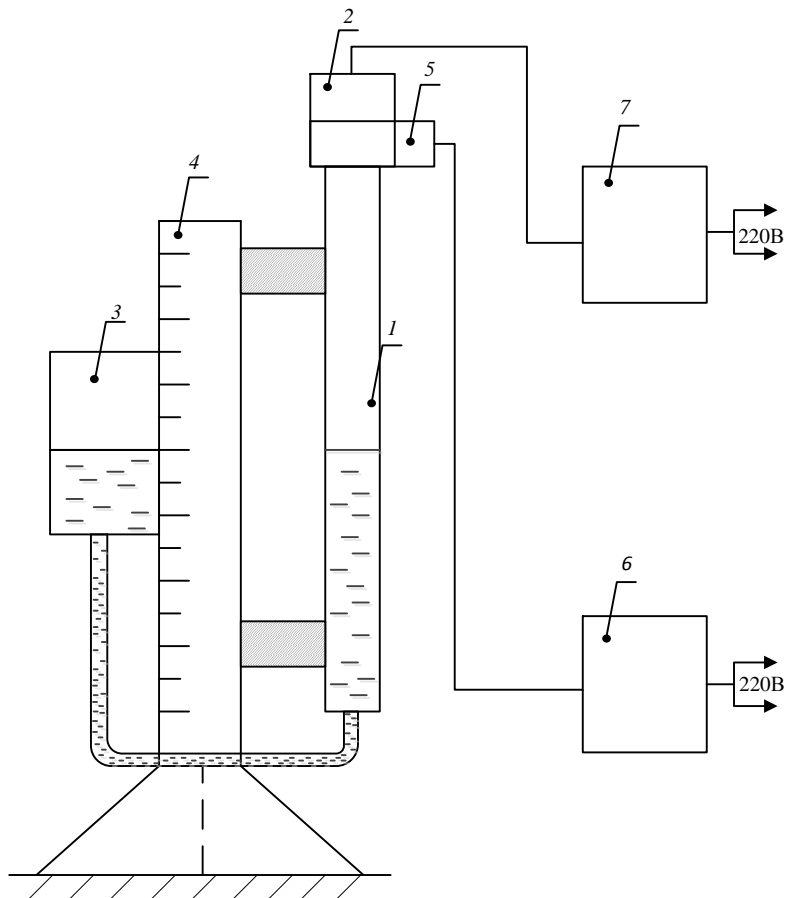


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для определения скорости звука в воздухе по методу стоячих волн

Частоту колебаний можно задать с помощью звукового генератора. Определение длины волны можно произвести с помощью метода образования стоячих волн при интерференции падающей и отраженной волны.

Например, если добиться возникновения стоячей звуковой волны, то в местах её пучностей наблюдается резкое усиление звука, так как резко увеличивается амплитуда колебания звуковой волны. Это явление называется акустическим резонансом. Определение расстояния между пучностями дает возможность измерить длину волны. Зная частоту звуковых колебаний и длину волны, можно вычислить скорость звука в среде.

Экспериментальная установка для измерения скорости звука в воздухе изображена на рис. 3. Она позволяет создавать стоячие волны в воздушном столбе и измерять их интенсивность.

Установка состоит из цилиндра 1, в котором с помощью телефона 2 возбуждается звуковая волна, распространяющаяся вниз и отражающаяся вверх от поверхности воды, заполняющей нижнюю часть цилиндра, уровень которой измеряется с помощью сообщающегося сосуда 3. Положение уровня воды в сосуде и цилиндре измеряются по шкале штатива 4. Интенсивность результирующей стоячей волны на верхнем срезе цилиндра регистрируется микрофоном 5, электрический сигнал которого измеряется ламповым милливольтметром 6. Питание телефона осуществляется от звукового генератора напряжения 7.

3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Перед началом измерений убедиться в наличии воды в сосудах.

1. Установить предел измерений милливольтметра 30мВ; регулятор напряжения генератора поставить на минимум, против часовой стрелки.
2. Включить сетевые тумблеры генератора и милливольтметра. Установить частоту генератора 1000 Гц. Плавно увеличить напряжение до 10-20 В, при этом стрелка милливольтметра должна отклоняться.
3. При перемещении сосуда по вертикали должно наблюдаться увеличение и уменьшение величины сигнала по шкале милливольтметра. При изменении уровня воды в цилиндре обеспечить диапазон отклонений стрелки не более $\frac{2}{3}$ шкалы милливольтметра.
4. Снять зависимость сигнала по шкале милливольтметра U , мВ от координаты уровня жидкости в цилиндре y , мм, измеряя её по шкале штатива, на котором размещен сообщающийся сосуд; при

этом увеличивая число точек в диапазоне, где сигнал изменяется более резко. Полученные результаты измерений занести в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений

U , мВ											
y , мм											

5. Построить на миллиметровке график зависимости $U = f(y)$.
6. Используя полученную зависимость, определить расстояние между узлами стоячих волн (мм) l (l_1, l_2, l_3).
7. Так как $l = \lambda/2$, вычислить длину звуковой волны (м) по формуле

$$\lambda = 2l \quad (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$$

8. Вычислить скорость звука в воздухе (м/с) по формуле

$$v = \lambda \nu = 2l\nu \quad (v_1, v_2, v_3)$$

9. Вычислить среднее значение скорости звука в воздухе и погрешности измерений:

$$\langle v \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i,$$

где $n = 3$;

$$\varepsilon = \frac{\Delta v}{\langle v \rangle} = \frac{\Delta \lambda}{\langle \lambda \rangle} + \frac{\Delta \nu}{\langle \nu \rangle},$$

где

$$\Delta \lambda = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad \Delta \nu = 50 \text{ Гц}; \quad \langle \nu \rangle = 1000 \text{ Гц}; \quad \Delta v = \varepsilon \langle v \rangle.$$

10. Соблюдая правила округления, ответ записать в виде

$$v = \langle v \rangle \pm \Delta v.$$

11. Результаты вычислений занести в табл. 2.

Таблица 2

Результат вычислений

№ п/п	l , мм	λ , м	v , м/с	$\langle \lambda \rangle$, м	$\langle v \rangle$, м/с	Δv , м/с	$v = \langle v \rangle \pm \Delta v$, м/с
1							
2							
3							

4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Представить отчет по лабораторной работе на стандартных листах формата А4 в соответствии с методикой выполнения и оформления лабораторных работ по физике:

1. Прочитать описание лабораторной работы, ознакомиться с теоретической и экспериментальной частью, выполнением эксперимента, контрольными вопросами.
2. Придерживаясь следующего плана, оформить отчет о выполнении лабораторной работы:
 - 1) записать номер и название лабораторной работы;
 - 2) записать цель лабораторной работы;
 - 3) записать приборы и принадлежности, включая измерительную линейку, штангенциркуль, секундомер электронный, микрометр и т.д.;
 - 4) теоретическая часть: записать основной закон или расчетную формулу с разъяснением буквенных обозначений физических величин, входящих в них, указать единицы измерений в СИ;
 - 5) экспериментальная часть: привести схему установки, рисунок или чертеж, поясняющий выполнение эксперимента; записать таблицы измерений, константы расчета;
 - 6) обработка результатов измерений: вычисление физических величин в СИ; построение графиков на миллиметровке, скрепленной с отчетом; расчет погрешностей измерений;
 - 7) записать ответ; сделать выводы.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Записать уравнение плоской бегущей волны, распространяющейся вдоль положительного направления оси Ox .
2. Получить уравнение стоячей волны, записать координаты её пучностей и узлов.
3. Как зависит скорость распространения звука в газах от температуры? Дать качественное обоснование этой зависимости с точки зрения молекулярно-кинематической теории вещества.
4. В чем заключается суть метода стоячих волн по определению скорости звука в воздухе?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПОЛЁТА ПУЛИ С ПОМОЩЬЮ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО КРУТИЛЬНОГО МАЯТНИКА»

Цель работы: ознакомиться с принципом действия баллистического крутильного маятника и с его помощью определить скорость полета пули.

Приборы и принадлежности: баллистический крутильный маятник; встроенный миллисекундомер универсальный.

Правила безопасности труда при работе баллистического крутильного маятника. Необходимо выполнять общие правила безопасности труда, относящиеся к устройствам, в которых используется напряжение до 250 В.

Эксплуатация установки допускается при наличии заземления.

Не наклоняйтесь слишком близко к прибору, так как возможен обрыв проволочного торсиона и получение травмы. Не играйте стреляющим пружинным устройством. При любых неполадках в установке обращайтесь к дежурному лаборанту или преподавателю.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Баллистический крутильный маятник (рис. 1) представляет собой горизонтальный стержень 1, жестко скрепленный с проволочным торсионом 2, натянутым в вертикальном положении между двумя кронштейнами. На концах стержня 1 с одной стороны находится мишень 3, в которую попадает пуля, а с другой — противовес 4 с массой, равной массе мишени 3. Одинаковые грузы 5 и 6 можно располагать в нужном положении на стержне 1, задавая тем самым различные моменты инерции крутильного маятника относительно оси, совпадающей с осью торсиона 2. Угол поворота φ стержня 1 при его крутильных колебаниях можно отсчитывать по прозрачной шкале 7. На поверхность мишени 3 наложен пластилин для того, чтобы пуля в нем застревала, и её удар о мишень можно было считать абсолютно неупругим.

При определении скорости полета пули в данной работе используется закон сохранения момента импульса L : если момент внешних сил относительно оси вращения равен нулю — $M_z^{\text{внеш}} = 0$, то

где I — момент инерции системы (маятник + пуля) относительно оси вращения; ω — угловая скорость системы.

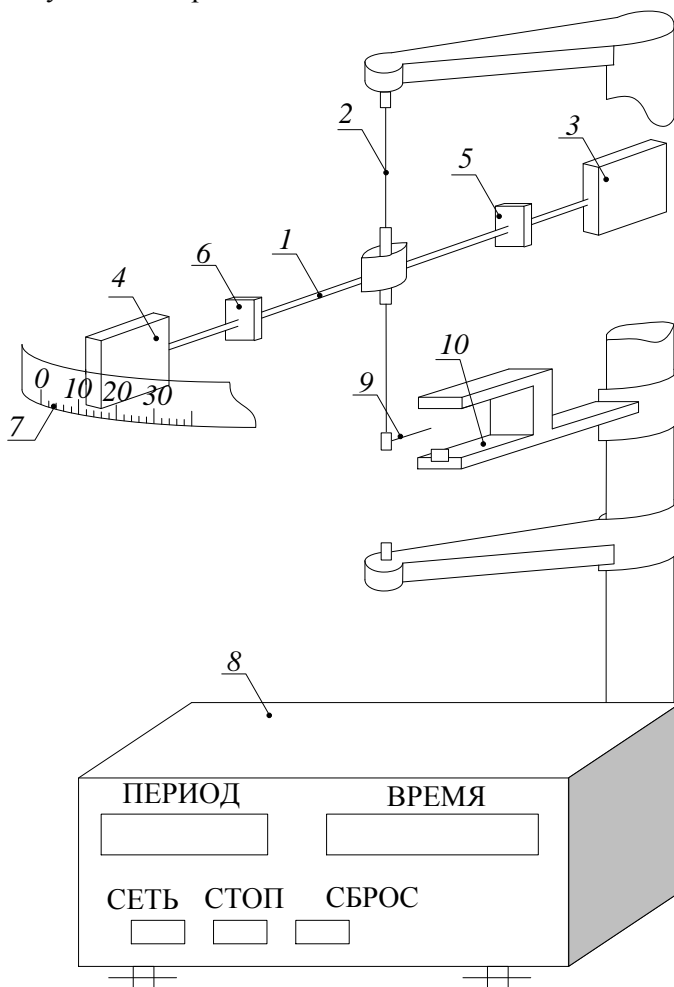


Рис. 1. Баллистический крутильный маятник.

На основании закона сохранения момента импульса для данной системы можно написать:

$$mvl = (I_1 + ml^2)\omega_1, \quad (1)$$

где m — масса пули; ω — угловая скорость стержня l ; v — скорость пули в момент попадания её в мишень; l — расстояние от оси вращения до застрявшей в мишени пули; I_1 — момент инерции маятника (без пули, с закрепленными на стержне l грузами 5 и 6) относительно оси вращения.

Левая часть равенства (1) — это момент импульса пули и покоящегося маятника в самом начале их взаимодействия, т. е. когда начальная угловая скорость маятника $\omega_0 = 0$. Правая часть — момент импульса системы, когда взаимодействие прекратится, т. е. когда пуля застрянет в мишени.

С другой стороны, на основании закона сохранения механической энергии в данном случае можно записать:

$$W_k = W_{\pi},$$

где W_k — кинетическая энергия маятника с пулей в момент окончания взаимодействия пули с мишенью; W_{π} — потенциальная энергия упругой деформации торсиона 2 при наибольшем повороте стержня l на угол φ_1 .

Закон сохранения механической энергии приводит к равенству:

$$\frac{1}{2}(I_1 + ml^2)\omega_1^2 = \frac{1}{2}D\varphi_1^2, \quad (2)$$

где φ_1 — наибольший угол поворота стержня l после попадания пули в мишень 3; D — постоянная момента упругих сил (коэффициент жесткости).

Из уравнений (1) и (2) получаем:

$$v^2 = \frac{D\varphi_1^2}{m^2 l^2} (I_1 + ml^2).$$

Так как в данной лабораторной установке $I_1 \gg ml^2$, то можно записать:

$$v^2 = \frac{D\varphi_1^2}{m^2 l^2} I_1.$$

Следовательно,

$$v = \frac{\varphi_1 \sqrt{I_1}}{ml} \sqrt{D}. \quad (3)$$

Крутильные колебания маятника возникают под действием момента M упругих сил, вызванных кручением торсиона, поэтому

$$M = \varphi D, \quad (4)$$

где φ — угол поворота стержня l ; D — коэффициент жесткости торсиона.

Задавая два значения момента инерции маятника I_1 и I_2 (с помощью перемещающихся по стержню l грузов 5 и 6), получим соответственно два значения периода колебаний маятника:

$$T_1 = 2\pi\sqrt{I_1/D}; \quad (5)$$

$$T_2 = 2\pi\sqrt{I_2/D}. \quad (6)$$

Разделив (6) на (5), возведя в квадрат и вычтя из обеих частей единицу, получим:

$$I_2/I_1 - 1 = T_2^2/T_1^2 - 1,$$

откуда

$$I_1 = \frac{T_1^2 \Delta I}{T_1^2 - T_2^2}.$$

Подставляя в формулу (3) полученное значение I_1 и вытекающее из уравнения (5) значение D :

$$\sqrt{D} = 2\pi\sqrt{I_1}/T_1,$$

получим

$$\nu = \frac{2\pi}{ml} \cdot \frac{\varphi_1 T_1}{T_1^2 - T_2^2} \cdot \Delta I. \quad (7)$$

Используя теорему Штейнера, запишем:

$$I_1 = I + 2(m_r R_1^2 + I_0), \quad (8)$$

$$I_2 = I + 2(m_r R_2^2 + I_0), \quad (9)$$

где m_r — масса одного из грузов (5 или 6); I — момент инерции маятника без грузов относительно оси вращения системы; I_0 — момент инерции груза массы m_r относительно оси, проходящей через его центр инерции и параллельной оси вращения системы; I_1 и I_2 —

моменты инерции маятника с грузами при удалении их центров инерции от оси вращения на R_1 и R_2 соответственно.

Если $R_1 > R_2$, то уравнения (8) и (9) дают:

$$\Delta I = I_1 - I_2 = 2m_r (R_1^2 - R_2^2). \quad (10)$$

Из соотношений (7) и (10) получаем формулу для вычисления скорости полета пули:

$$v = \frac{4\pi m_r}{ml} \cdot \frac{\phi_1 T_1}{T_1^2 - T_2^2} (R_1^2 - R_2^2). \quad (11)$$

Можно показать, что в данном эксперименте

$$\phi_1 T_1 = \phi_2 T_2,$$

а следовательно, скорость пули можно вычислить также по формуле

$$v = \frac{4\pi m_r}{ml} \cdot \frac{\phi_2 T_2}{T_1^2 - T_2^2} (R_1^2 - R_2^2). \quad (12)$$

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Описание экспериментальной установки (см.рис.1) содержится в теоретической части. В дополнение к нему необходимо обратить внимание на то, что для отсчета числа периодов и времени колебаний стержня 1 установка имеет электронный миллисекундомер 8. На торсионе 2 жестко укреплен небольшой стержень 9, колеблющийся с той же частотой, что и стержень 1. При колебаниях стержень 9 пересекает луч света фотоэлектрического датчика 10, сигнал от которого поступает в миллисекундомер 8.

Установка имеет также стреляющее пружинное устройство (рис.2). В исходном положении крючок "К" должен быть отведен от штифта "Ш" так, как показано на рис.2. Для этого подвижная рукоятка, поворачивающая крючок, должна быть поставлена в наклонное положение "С". Чтобы зарядить устройство, необходимо пулю "П", изготовленную в виде небольшого металлического колечка, надеть на штифт "Ш". Затем, повернув подвижную рукоятку в положение "С", т.е. повернув крючок "К" к штифту "Ш", передвинуть её из положения "С" вплотную к неподвижной рукоятке "У". В результате крючок "К" задвинет пулю внутрь устройства, пружина штифта будет сжата, а подвижная рукоятка зафиксирована. Пуск (выстрел) осуществляется легким нажатием вниз правой части подвижной рукоятки. В этом

случае крючок "К" отходит от штифта и пружина штифта, разжимаясь, выталкивает пулю по направлению к мишени маятника.

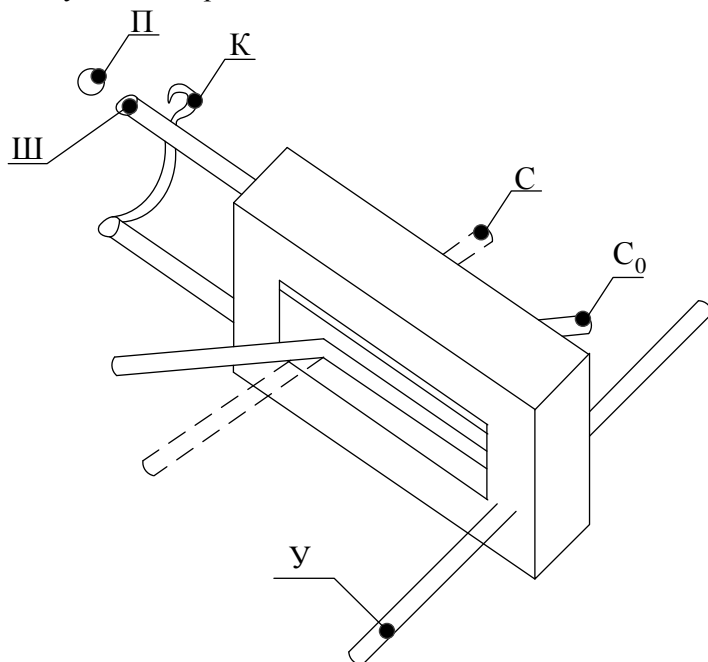


Рис. 2. Стреляющее пружинное устройство баллистического крутильного маятника

3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Установить грузы 5 и 6 (см.рис 1) на расстоянии $R_1 = 9$ см от оси вращения, для чего груз 5 придвинуть вплотную к мишени 3, а груз 6 — вплотную к противовесу 4. При этом учесть, что расстояние между делениями, нанесёнными на стержень 1, равно 1 см, толщина груза 5 (также и 6) — 2 см, ширина мишени — 4 см, причём мишени имеют миллиметровые деления для отсчёта положения l пули с погрешностью до 1мм.
2. Проверить правильность исходного положения стержня 9. Он должен быть в состоянии покоя недалеко от отверстия датчика 10, но не над ним. Включить миллисекундомер 8, нажав его клавишу

«СЕТЬ». Если при этом на табло будут высвечиваться цифры, отличные от нуля, нажать клавишу «СБРОС».

3. Осторожно рукой привести маятник в колебательное движение так, чтобы угол отклонения по шкале 7 не превышал 10° , а измерить время t_1 пяти периодов колебаний маятника. Для этого, когда табло высветит 4-й период, надо нажать клавишу «СТОП» и ждать остановки цифр на табло времени. Она произойдёт точно в конце пятого периода. Подсчитать период колебаний $T_1 = t_1/n$.

4. Установить грузы 5 и 6 на расстоянии $R_2 = 2$ см от оси вращения (приблизить их вплотную к торсиону 2). Так же, как в п.3, определить период $T_2 = t_2/n$.

Выключить миллисекундомер, нажав клавишу «СЕТЬ», и дальше работу выполнять при выключенном миллисекундомере.

5. Остановить рукой стержень 1 и, не меняя положения грузов 5 и 6, проверить, совпадает ли в исходном положении штрих на торце противовеса 4 с нулём шкалы 7. В противном случае обратиться к сотруднику лаборатории.
6. Зарядить пусковое пружинное устройство пуль (рис.2). Убедившись в том, что в положении равновесия стержень 1 не вибрирует, произвести выстрел и отсчитать по шкале 7 максимальный угол отклонения φ_2 . Этот отсчёт произвести только в том случае, если пуля застрянет в мишени. Если же она отскочит от неё, то необходимо рукой разравнять пластилин мишени и выстрел повторить.
7. Установить грузы 5 и 6 на расстоянии $R_1 = 9$ см от оси вращения и повторить операции по пп.6, 7.
Примечание. Так как при выводе формул (11) и (12) значение l и при R_1 , и при R_2 считается постоянным, необходимо, чтобы при повторном выстреле пуля попала в ту же точку мишени. В противном случае выстрел следует повторить.
8. Полученные результаты измерений занести в табл.1

Результаты измерений

№	R , м	T , с	l , м	m , кг	m_T , кг	v , м/с	Δv , м/с
1							
2							

4. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

1. По полученным данным и по массе пули $m = 4 \cdot 10^{-3}$ кг, а также массе одного из грузов 5 или 6 ($m_T = 0,2$ кг) вычислить скорость полёта пули по формуле (11) или (12). Результаты занести в табл.1.
2. Оценить относительную погрешность измерения скорости:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta m_T}{m_T} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta \phi}{\phi} + \frac{\Delta T_1}{T_1} + \frac{2\Delta T_1}{T_1 - T_2} + \frac{2\Delta R}{R_1 - R_2}.$$

Поскольку в данном эксперименте относительная погрешность $\Delta\phi/\phi$ значительно больше других слагаемых, то можно положить, что

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta \phi}{\phi}.$$

Если при повторных измерениях угла ϕ его значения будут повторяться, то за $\Delta\phi$ можно принять цену деления шкалы, т.е. 1° . Таким образом:

$$\Delta v = v \frac{\Delta \phi}{\phi}.$$

**5. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

Представить отчет по лабораторной работе на стандартных листах формата А4 в соответствии с методикой выполнения и оформления лабораторных работ по физике:

1. Прочитать описание лабораторной работы, ознакомиться с теоретической и экспериментальной частью, выполнением эксперимента, контрольными вопросами.
2. Придерживаясь следующего плана, оформить отчет о выполнении лабораторной работы:

- 1) записать номер и название лабораторной работы;
- 2) записать цель лабораторной работы;

- 3) записать приборы и принадлежности, включая измерительную линейку, штангенциркуль, секундомер электронный, микрометр и т.д.;
- 4) теоретическая часть: записать основной закон или расчетную формулу с разъяснением буквенных обозначений физических величин, входящих в них; указать единицы измерений в СИ;
- 5) экспериментальная часть: привести схему установки, рисунок или чертёж, поясняющий выполнение эксперимента; записать таблицу измерений, константы расчёта;
- 6) обработка результатов измерений: вычисление физических величин в СИ; построение графиков на миллиметровке, скреплённой с отчётом; расчёт погрешностей измерений;
- 7) записать ответ; сделать вывод.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется моментом импульса вращающегося тела?
2. Как сформулировать закон сохранения момента импульса?
3. Сформулируйте теорему Штейнера.
4. Какие законы используются при получении формулы (11)?
5. Получите формулу (11) для скорости полёта пули.
6. Уравнение (1) написано для случая, когда пуля летит по нормали к мишени. Изменится ли оно (и если да, то как) в том случае, когда скорость пули будет направлена под углом $\alpha \neq 0$ к мишени?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №11

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ МЕТОДОМ НАКЛОННОГО МАЯТНИКА»

Цель работы: экспериментальное изучение основных закономерностей, возникающих при трении качения, и определение коэффициента трения качения методом наклонного маятника.

Приборы и принадлежности: наклонный маятник FRM-07; встроенный миллисекундомер универсальный.

Техника безопасности: при работе с наклонным маятником FRM-07 необходимо соблюдать общие правила безопасности труда, касающиеся устройств, в которых имеется напряжения до 250В. Прибор разрешается эксплуатировать только при использовании заземления.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Сплошь и рядом силы трения являются вредными. Таковы, например, силы трения, возникающие между осью и втулкой, а также между другими деталями машины.. Они приводят к преждевременному износу машин, и с ними приходится бороться. Для этой цели используется смазка. Однако более радикальным способом уменьшения сил трения является замена трения скольжения трением качения (шарикоподшипники).

Под *трением качения* понимают трение, возникающее, например, между шарообразным или цилиндрическим телом, катящимся без скольжения по плоской или изогнутой поверхности. Трение качения формально подчиняется тем же законам, что и трение скольжения. Однако коэффициент трения при качении значительно меньше, чем при скольжении.

Возникновение трения качения можно объяснить деформациями шара и плоскости, имеющими место в реальных условиях. При этом могут возникать как упругие, так и пластические деформации. Из-за деформации поверхностей линия действия силы реакции \vec{Q} не совпадает с линией действия силы нормального давления \vec{N} , действующей на опору со стороны катящегося тела, т.е. с линией действия силы веса тела (рис.1). Нормальная составляющая \vec{Q}_n силы реакции к плоскости численно практически равна силе \vec{N} , а

горизонтальная составляющая представляет собой силу трения качения $\vec{F}_{\text{тр}}$. Если цилиндр или шар движется по плоскости без ускорения, должно выполняться правило равенства моментов. Момент силы трения качения относительно точки O равен произведению силы нормальной реакции опоры \vec{Q}_n на расстояние смещения k вследствие контактных деформаций точки приложения:

$$F_{\text{тр}} R = Q_n k, \quad (1)$$

где k — плечо силы Q_n ($Q_n \approx N$); R — радиус тела.

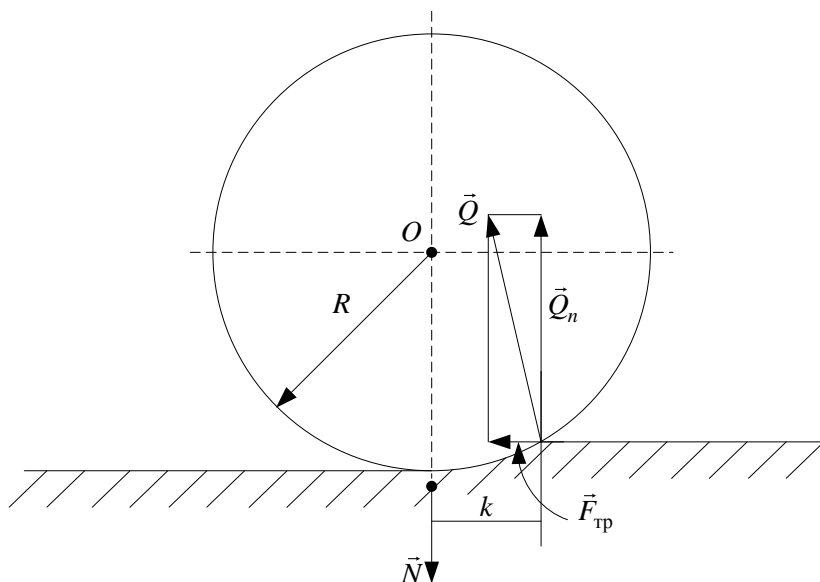


Рис.1. К вопросу о возникновении силы трения качения

Отсюда для силы трения качения получаем следующее выражение:

$$F_{\text{тр}} \approx k \frac{N}{R}. \quad (2)$$

Величину k называют *коэффициентом трения качения*. Коэффициент трения качения, таким образом, представляет собой плечо силы Q_n и имеет размерность длины.

В данной работе коэффициент трения качения шара по плоскости определяется методом наклонного маятника. В этом случае маятник представляет шарик, подвешенный на нити и катящийся по наклонной

плоскости; затухание этого маятника обусловлено главным образом трением качения.

Расчётная формула для коэффициента трения качения имеет следующий вид:

$$k = R \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \frac{\alpha_0 - \alpha_n}{4n}, \quad (3)$$

где R — радиус шара; β — угол наклона маятника, прочитанный на боковой шкале; n — число колебаний; α_0 — начальное значение угла отклонения маятника; α_n — угол отклонения через n колебаний.

Вывод формулы (3) приведён в Приложении.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Прибор «Наклонный маятник FPM-07» представлен на рис. 2, 3.

К основанию 2, оснащённому четырьмя ножками с регулируемой высотой, прикреплен миллисекундомер 1 (FPM-14). В основании закреплена труба 3, на которой смонтирован корпус 4 с червячной передачей. Посредством оси червячная передача соединена с кронштейном 5, на котором прикреплена шкала I (6) и шкала II (7). В кронштейне закреплена колонка 8, на которой подвешена нити шар с указателем 9. В кронштейн 5 по направляющим вставляются образцы 10.

Для наклонения маятника используется маховичок 11. К кронштейну 5 привинчен фотоэлектрический датчик 12. Шары заменяются путём отвинчивания шара от указателя и навинчивания нового.

Фотоэлектрический датчик соединен с миллисекундомером разъемом «ZKI».

Вид лицевой панели и задней стенки миллисекундомера FPM-14 представлен на рис. 4.

2.2. ПОДГОТОВКА УСТАНОВКИ К РАБОТЕ

1. Установить в кронштейн 5 по направляющим исследуемый образец.

2. Произвести выравнивание прибора при помощи ножек основания таким образом, чтобы нить подвеса маятника совпала с нулевым делением шкалы; установить угол наклона образца 45° .
3. Подключить миллисекундомер FPM-14 к сети (220 В).
4. Отклонить маятник на некоторый небольшой угол.

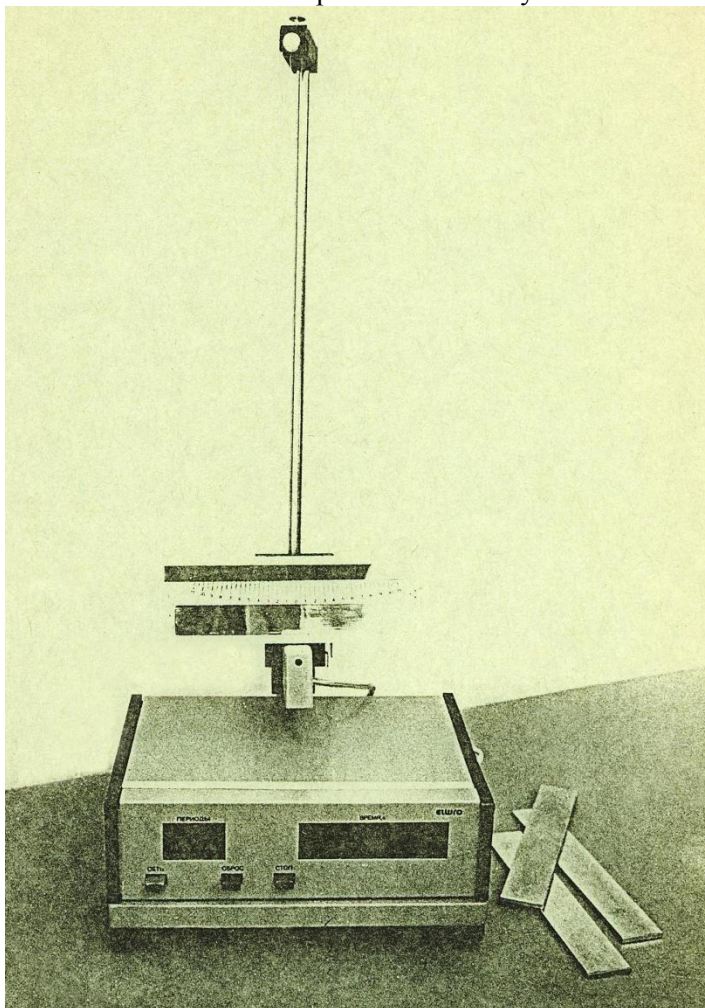


Рис. 2. Наклонный маятник FPM-07 (общий вид)

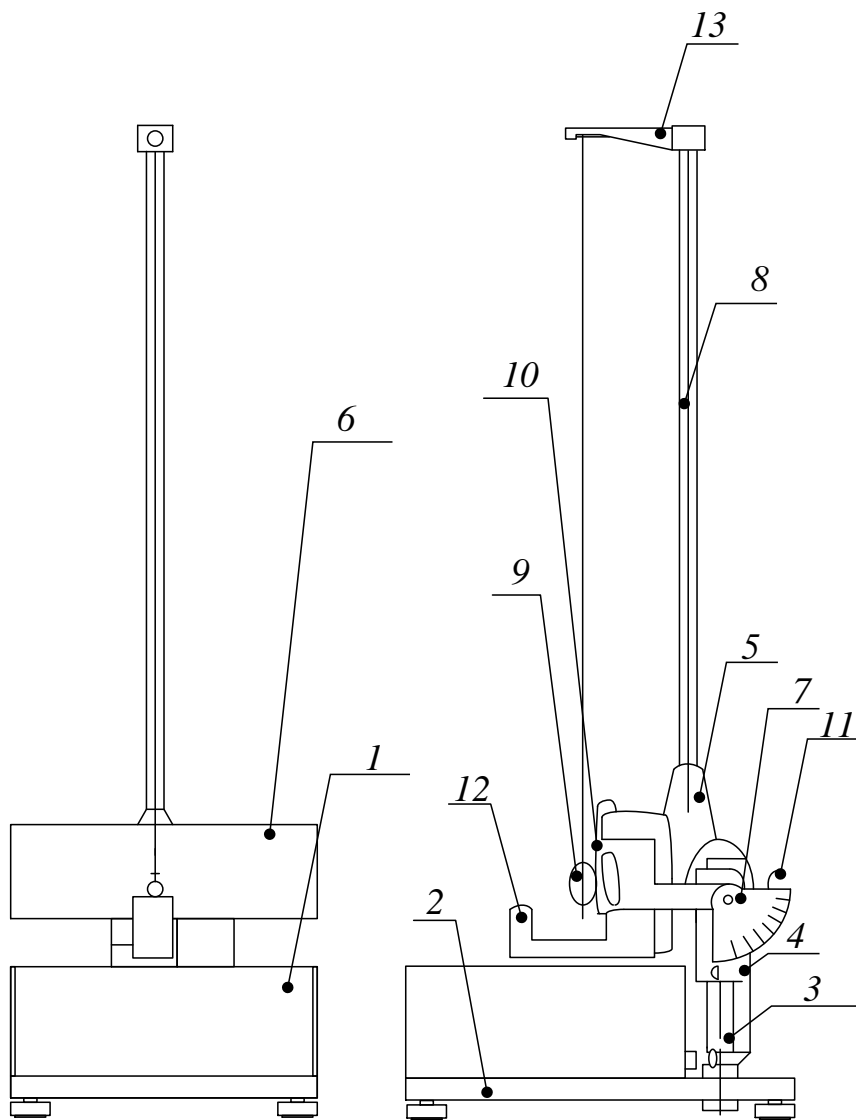


Рис. 3. Наклонный маятник FPM-07 (общий вид)

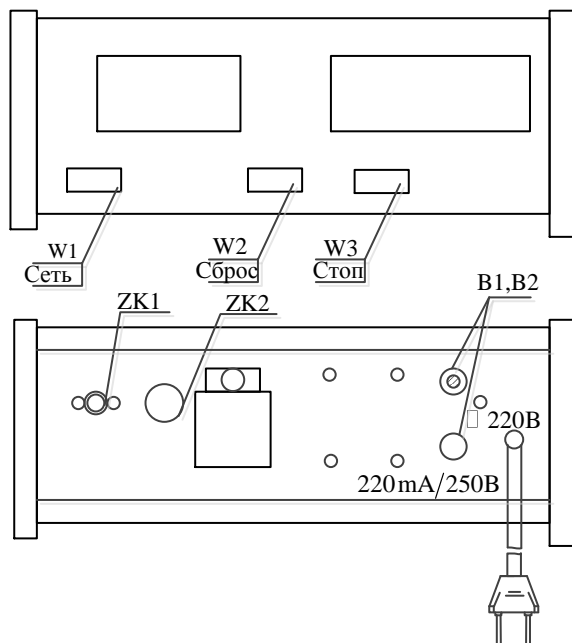


Рис. 4. Универсальный миллисекундомер FPM-14
(лицевая панель и задняя стенка)

5. Нажать кнопку «СЕТЬ».
6. Проверить, все ли индикаторы измерителя высвечивают цифру нуль, и светится ли лампочка фотоэлектрического датчика.
7. Нажать кнопку «СБРОС».
8. Плавно отпустить маятник. Убедиться, что маятник совершает колебательные движения, миллисекундомер производит отсчет времени и количества полных периодов колебаний маятника. Указатель должен пересекать световой поток фотоэлектрического датчика. Длина маятника регулируется вращением маховичка верхнего кронштейна 13.
9. После совершения маятником нескольких колебаний нажать на кнопку «СТОП» и убедиться, что счет времени и количества полных периодов колебаний прекращается в момент окончания очередного колебания маятника.
10. Для повторения эксперимента повторить пп. 4, 7-9.
11. Выключить установку, нажав на кнопку «СЕТЬ».

3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Отклонить маятник на угол $\alpha_0 = 6^\circ$.
2. Нажать кнопку «СЕТЬ». Прибор готов к работе непосредственно после подключения сетевого напряжения и не нуждается в нагреве.
3. Нажать на кнопку «СТОП» миллисекундомера при достижении амплитуды колебаний маятник $\alpha_n = 2^\circ$. Снять показания миллисекундомера о количестве полных колебаний маятника.
4. Повторить эксперимент 10 раз.
5. Результаты эксперимента занести в табл. 1.

Таблица 1

Результаты эксперимента

Образец №1, (шарик №1), $\beta=45^\circ$										
i	α_0 , град	α_0 , рад	α_n , град	α_n , рад	n	k_i , м	k_{cp} , м	Δk , м	$k = k_{cp} \pm \Delta k$, м	ε , %
1	6°									
2	6°									
...	...									
10	6°									

6. Аналогичные измерения провести для наклона образца 30° и 60° . Результаты эксперимента занести в таблицы, аналогичные табл. 1. Заменить образец и провести измерения для нового образца.
7. Вычислить k по формуле (3).
8. Окончательный результат эксперимента для каждого образца представить в виде.

$$k = k_{cp} \pm \Delta k \quad (4)$$

Чтобы рассчитать Δk , воспользуемся выражением для полуширины доверительного интервала результата косвенных измерений:

$$\Delta k = \sqrt{\left(\frac{\partial k}{\partial R}\right)^2 (\Delta R)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial \alpha}\right)^2 (\Delta \alpha)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial \beta}\right)^2 (\Delta \beta)^2}. \quad (5)$$

Подставляя значение k , определённое по формуле (3), получим

$$\Delta k = \sqrt{(\alpha \operatorname{tg} \beta)^2 (\Delta R)^2 + (R \operatorname{tg} \beta)^2 (\Delta \alpha)^2 + \left(\frac{\alpha R}{\cos^2 \beta} \right)^2 (\Delta \beta)^2}.$$

где ΔR , $\Delta \alpha$, и $\Delta \beta$ — абсолютные погрешности прямых измерений R , α , и β .

$$\alpha = \frac{\alpha_0 - \alpha_n}{4n};$$

$$\Delta \alpha = \frac{1}{4n} \sqrt{(\Delta \alpha_0)^2 + (\Delta \alpha_n)^2}.$$

Преобразуем выражение (5) к виду, удобному для вычислений:

$$\begin{aligned} \varepsilon = \frac{\Delta k}{k} &= \sqrt{\left(\frac{\Delta R}{R} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha} \right)^2 + \left(\frac{\alpha \Delta \beta}{\cos^2 \beta} \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{\Delta R}{R} \right)^2 + \frac{(\Delta \alpha_0)^2 + (\Delta \alpha_n)^2}{(\alpha_0 - \alpha_n)^2} + \left(\frac{\alpha \Delta \beta}{\cos^2 \beta} \right)^2}. \end{aligned}$$

Абсолютные погрешности ΔR , $\Delta \alpha_0$, $\Delta \alpha_n$ и $\Delta \beta$ принять равными цене деления соответствующих шкал.

4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Представить отчет по лабораторной работе на стандартных листах формата А4 в соответствии с методикой выполнения и оформления лабораторных работ по физике:

1. Прочитать описание лабораторной работы, ознакомиться с теоретической и экспериментальной частью, выполнением эксперимента, контрольными вопросами.
2. Придерживаясь следующего плана, оформить отчет о выполнении лабораторной работы:
 - 1) записать номер и название лабораторной работы;
 - 2) записать цель лабораторной работы;
 - 3) записать приборы и принадлежности, включая измерительную линейку, штангенциркуль, секундомер электронный, микрометр и т.д.;

- 4) теоретическая часть: записать основной закон или расчетную формулу с разъяснением буквенных обозначений физических величин, входящих в них, указать единицы измерений в СИ;
- 5) экспериментальная часть: привести схему установки, рисунок или чертеж, поясняющий выполнение эксперимента; записать таблицы измерений, константы расчета;
- 6) обработка результатов измерений: вычисление физических величин в СИ; построение графиков на миллиметровке, скрепленной с отчетом; расчет погрешностей измерений;
- 7) записать ответ; сделать выводы.

5. ПРИЛОЖЕНИЕ

Вывод формулы (3) (по рис.5). Шарик, подвешенный на нити длиной L , опирается на наклонную плоскость, угол наклона которого можно изменять. Если вывести шарик из положения равновесия, он будет катиться по плоскости, и его движение примет характер затухающих колебаний. Коэффициент трения качения с помощью наклонного маятника определяют путем измерения уменьшения амплитуды его колебаний за определенное число периодов.

За n периодов колебаний маятника шарик переходит из положения B в положение B' . При этом маятник теряет энергию $\Delta E = mg\Delta h$, равную работе, затраченной на преодоление сил сопротивления при изменении угла отклонения маятника на величину S/R , где S — длина дуги, которую описывает шарик:

$$\Delta E = \Delta A + \Delta A_1, \quad (6)$$

где ΔA — работа, затраченная на преодоление силы трения качения:

$$\Delta A = F_{\text{тр}} S = kN \frac{S}{R};$$

ΔA_1 — работа, затраченная на преодоление сопротивления среды и трения в подвесе маятника; Δh — изменение положения центра тяжести маятника.

Пренебрегая ΔA_1 , ввиду её малости, имеем

$$mg\Delta h = kN \frac{S}{R}. \quad (7)$$

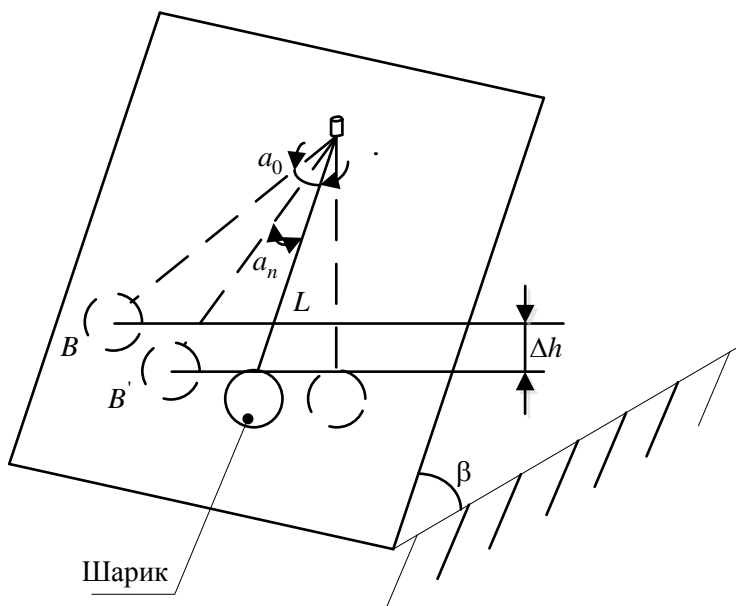


Рис.5. К выводу расчётной формулы (3)

Из геометрических соображений (рис.5) найдём:

$$\Delta h = \Delta L \sin \beta;$$

$$N = mg \cos \beta.$$

(8)

Подставив Δh и N в выражение (7), получим

$$mg \Delta L \sin \beta = \frac{k}{R} mg S \cos \beta,$$

где R — радиус шара; α_0 и α_n — амплитудные значения угла отклонения маятника от положения равновесия в начальный момент и через n полных колебаний соответственно;

$$\Delta L = L(\cos \alpha_n - \cos \alpha_0).$$

Из выражения (8) определяем коэффициент трения качения:

$$k = \frac{R}{S} \tan \beta \cdot L(\cos \alpha_n - \cos \alpha_0). \quad (9)$$

Путь, который проходит центр тяжести маятника за n полных колебаний:

$$S = 4nL\alpha_{cp}, \quad (10)$$

где $\alpha_{cp} = (\alpha_0 + \alpha_n)/2$.

При малых углах α_0 и α_n , учитывая, что $\cos\alpha \cong 1 - \alpha^2/2$, получим

$$k = R \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \frac{\alpha_0 - \alpha_n}{4n}, \quad (11)$$

где α_0 и α_n выраженные в радианах углы отклонения маятника в начальный и конечный моменты наблюдения.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №12

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПО МЕТОДУ СТОКСА»

Цель работы: определить коэффициент внутреннего трения касторового масла по методу Стокса.

Приборы и принадлежности: стеклянная цилиндрическая трубка; исследуемая жидкость (касторовое масло); свинцовый шарик малого диаметра; секундомер; микрометр.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Внутреннее трение (вязкость) – это свойство реальных жидкостей оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой.

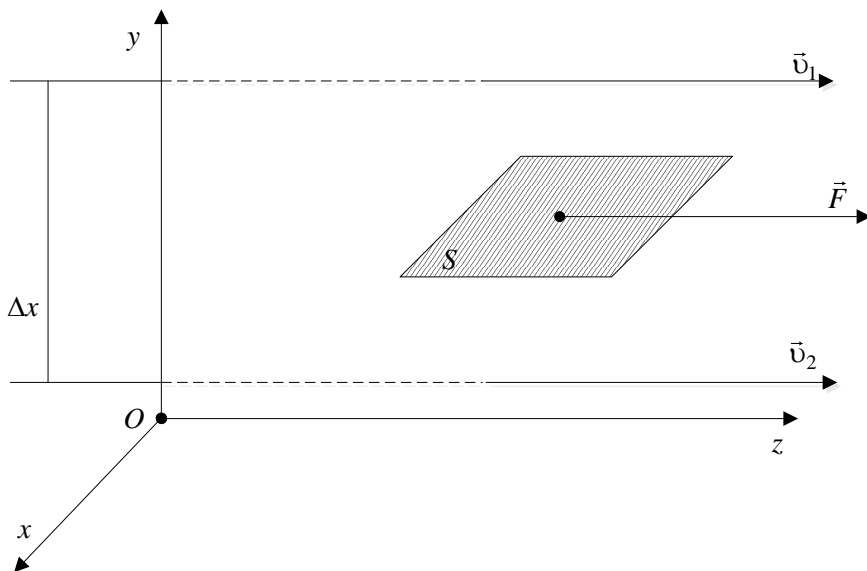


Рис. 1. К вопросу о силе внутреннего трения

При перемещении одних слоев реальной жидкости относительно других возникают силы внутреннего трения, направленные по касательной к поверхности слоев. Действие этих сил проявляется в том,

что со стороны слоя, движущегося быстрее, на слой, движущийся медленнее, действует «ускоряющая» сила. Со стороны того же слоя, движущегося медленнее, на слой, движущийся быстрее, действует «тормозящая» сила.

Сила внутреннего трения $\vec{F}_{\text{тр}}$ тем больше, чем больше рассматриваемая площадь поверхности слоя S (рис.1), и зависит от того, насколько быстро меняется скорость течения жидкости при переходе от слоя к слою.

Пусть два слоя, отстоящие друг от друга на расстояние Δx , движутся со скоростями \vec{v}_1 и \vec{v}_2 . При этом

$$\vec{v}_2 - \vec{v}_1 = \Delta \vec{v}$$

Направление, в котором отсчитывается расстояние между слоями, перпендикулярно скорости течения слоёв. Величина $\Delta v / \Delta x$, которая показывает, как быстро меняется скорость при переходе от слоя к слою в направлении x , перпендикулярном направлению движения слоёв, называется *градиентом скорости*. Таким образом, модуль силы внутреннего трения

$$F = \eta \left| \frac{\Delta v}{\Delta x} \right| S, \quad (1)$$

где η – коэффициент пропорциональности, зависит от природы жидкости и называется *коэффициентом динамической вязкости*, или *коэффициентом внутреннего трения*; единицей измерения является [Па·с]. 1 Па·с равен динамической вязкости среды, в которой при ламинарном течении и градиенте скорости с модулем, равным 1 м/с, на 1 м возникает сила внутреннего трения в 1 Н на 1 м² поверхности касания слоёв, т.е.

$$1 \text{ Па} \cdot \text{с} = 1 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2.$$

Течение жидкости называется *ламинарным* (слоистым), если вдоль потока каждый выделенный тонкий слой скользит относительно соседних, не перемешиваясь с ними. Чем больше вязкость, тем сильнее жидкость отличается от идеальной, тем большие силы внутреннего трения в ней возникают.

Вязкость зависит от температуры, причём характер этой зависимости для жидкостей и газов различен. Для жидкостей с увеличением температуры η уменьшается, у газов – наоборот, увеличивается. Это указывает на различие в них механизмов внутреннего трения.

Особенно сильно от температуры зависит вязкость масел.

Так, например, вязкость касторового масла в интервале температур 18-40°C падает в 4 раза. Жидкий гелий при температуре 2,17 К переходит в сверхтекучее состояние, в котором его вязкость равна нулю.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Метод определения коэффициента внутреннего трения жидкости по Стоксу (метод Стокса) основан на измерении скорости медленно движущихся небольших тел сферической формы в жидкости. При движении шарика слой жидкости, граничащий с его поверхностью, прилипает к шарiku и движется вместе с ним с одинаковой скоростью. Ближайшие, смежные слои жидкости также приводятся в движение, но получаемая ими скорость тем меньше, чем дальше они находятся от шарика.

Таким образом, при вычислении сопротивления среды следует учитывать трение отдельных слоев жидкости друг о друга, а не трение шарика о жидкость.

На шарик, падающий в жидкости вертикально вниз (рис.2), действуют три силы:

1. Сила тяжести:

$$F_T = mg = \rho_{\text{ш}} V_{\text{ш}} g = \frac{4}{3} \rho_{\text{ш}} \pi r^3 g .$$

2. Сила Архимеда:

$$F_A = \rho_{\text{ж}} V_{\text{ш}} g = \frac{4}{3} \rho_{\text{ж}} \pi r^3 g .$$

3. Сила сопротивления, эмпирически установленная Стоксом:

$$F_C = 6\pi\eta r v .$$

где $\rho_{\text{ш}}$, $\rho_{\text{ж}}$ – плотности шарика и жидкости соответственно; r – радиус шарика; v – скорость шарика; η – коэффициент внутреннего трения жидкости; g – ускорение свободного падения.

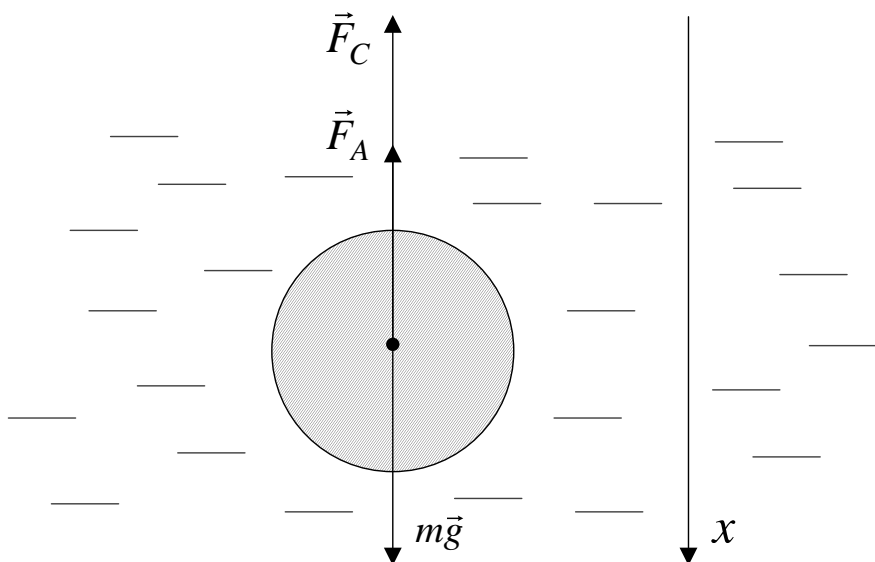


Рис.2. Движение шарика в жидкости вертикально вниз

Основное уравнение динамик поступательного движения шарика в жидкости (рис.2) в проекции на ось x имеет следующий вид:

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{\text{ш}} g - \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{\text{ж}} g - 6\pi \eta r v. \quad (2)$$

Сила сопротивления с увеличением скорости движения шарика возрастает, а ускорение — уменьшается. Наконец, шарик достигает такой скорости, при которой ускорение становится равным нулю (установившееся движение). Тогда выражение (2) принимает следующий вид:

$$\frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}}) - 6\pi \eta r v_0 = 0. \quad (3)$$

Решая уравнение (3) относительно η , получаем

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}}}{v_0} g r^2, \quad (4)$$

где v_0 — скорость установившегося равномерного движения шарика.

Формула (4) справедлива для падения шарика в безграничной среде.

Если же шарик падает вдоль оси цилиндрического сосуда радиуса R , то учёт наличия стенок приводит к следующему выражению для η :

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}}}{v_0 \left(1 + 2,4 \frac{r}{R} \right)} g r^2, \quad (5)$$

где R — радиус цилиндрического сосуда, в котором находится жидкость.

Наличие таких границ, как дно сосуда и верхняя поверхность жидкости, формулой (5) не учитывается.

Экспериментальная установка, состоящая из стеклянной цилиндрической трубки с нанесенными на неё через равные расстояния кольцевыми горизонтальными метками (всего восемь), наполняется исследуемой жидкостью так, чтобы уровень жидкости был на 5-8 см выше верхней метки.

Для определения коэффициента внутреннего трения необходимо придерживаться следующей методики измерения.

Свинцовый шарик очень малого диаметра опускают в цилиндрический сосуд с исследуемой жидкостью (касторовое масло) вблизи его оси. Глаз наблюдателя должен при этом находиться напротив верхней второй метки так, чтобы она сливалась в одну прямую. В момент прохождения шарика через эту метку включают секундомер.

После этого наблюдатель располагается аналогичным образом напротив метки последнего (восьмого) кольца и в момент прохождения через неё шарика секундомер выключают.

Считая, что к моменту прохождения шариком верхней метки скорость его уже установилась, получим

$$v_0 = \frac{l}{t}, \quad (6)$$

где l — расстояние между метками, пройденное шариком, м; t — время прохождения шариком расстояния l , измеренное секундомером, с.

3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Измерить диаметр свинцового шарика микрометром (см. Приложение). Записать значение радиуса шарика r , измеренное в метрах.

- Опустив шарик в цилиндр с касторовым маслом вблизи его оси, измерить время t прохождения шариком расстояния l между второй и восьмой метками в соответствии с вышеописанной методикой.
- Измерения повторить три раза ($n = 3$).
- Рассчитать по формуле (6) скорость равномерного движения шарика в касторовом масле.
- Рассчитать по формуле (5) коэффициент внутреннего трения касторового масла.
- Провести расчёт погрешностей измерений по формулам:

1) абсолютная погрешность:

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

где $t_{\alpha(n)} = 4,3$; $\alpha = 0,95$; $n = 3$;

2) относительная погрешность:

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

- Окончательный ответ представить по форме

$$\eta = \langle \eta \rangle \pm \Delta \eta.$$

- Результаты измерений и вычислений занести в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений и вычислений

n	r , м	R , м	t , м	v_0 , м/с	η_i , Па·с	$\langle \eta \rangle \pm \Delta \eta$, Па·с
1						
2						
3						

- Табличные данные для расчёта:

$$\rho_{\text{свинца}} = 11350 \text{ кг/м}^3; \rho_{\text{масла}} = 960 \text{ кг/м}^3.$$

Диаметр цилиндрического сосуда считать равным $D_{\text{цил}} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Представить отчет по лабораторной работе на стандартных листах формата А4 в соответствии с методикой выполнения и оформления лабораторных работ по физике:

1. Прочитать описание лабораторной работы, ознакомиться с теоретической и экспериментальной частью, выполнением эксперимента, контрольными вопросами.
2. Придерживаясь следующего плана, оформить отчет о выполнении лабораторной работы:
 - 1) записать номер и название лабораторной работы;
 - 2) записать цель лабораторной работы;
 - 3) записать приборы и принадлежности, включая измерительную линейку, штангенциркуль, секундомер электронный, микрометр и т.д.;
 - 4) теоретическая часть: записать основной закон или расчетную формулу с разъяснением буквенных обозначений физических величин, входящих в них, указать единицы измерений в СИ;
 - 5) экспериментальная часть: привести схему установки, рисунок или чертеж, поясняющий выполнение эксперимента; записать таблицы измерений, константы расчета;
 - 6) обработка результатов измерений: вычисление физических величин в СИ; построение графиков на миллиметровке, скрепленной с отчетом; расчет погрешностей измерений;
 - 7) записать ответ; сделать выводы.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова природа внутреннего трения (вязкости) в жидкостях?
2. Физический смысл и размерность в системе СИ коэффициента внутреннего трения жидкости.
3. Обосновать зависимость вязкости реальных жидкостей от температуры с точки зрения молекулярно-кинетической теории вещества.

6. ПРИЛОЖЕНИЕ

Микрометрический винт (микрометр) применяется в точных измерительных приборах и даёт измерения до сотых долей миллиметра.

Микрометр состоит из двух основных частей: скобы *B* и микрометрического винта *A* (рис.3, 4).

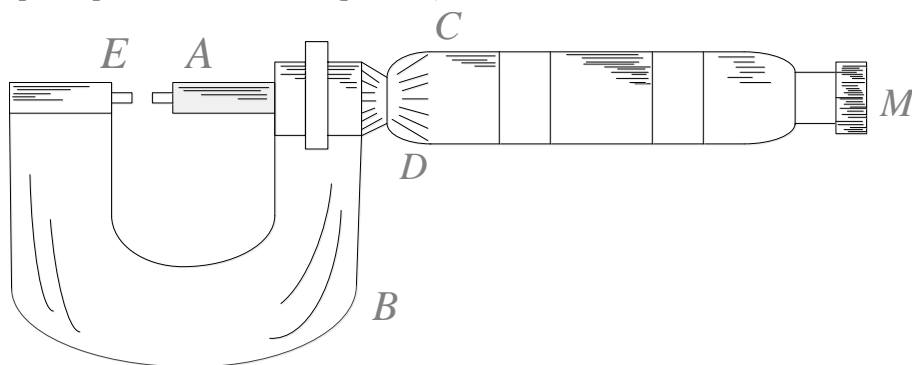


Рис. 3. Микрометр

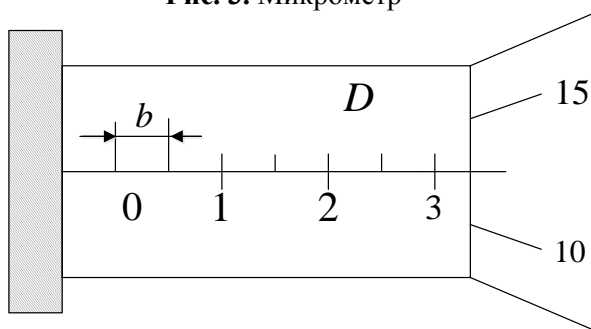


Рис. 4. Линейная шкала микрометра

Микрометрический винт *A* проходит через отверстие скобы *B* с внутренней резьбой. Против микрометрического винта на скобе имеется упор *E*. На микрометрическом винте закреплён полый цилиндр (барaban) *C* с делениями по окружности. При вращении микрометрического винта барабан скользит по линейной шкале, нанесённой на стебле *D*.

Наиболее распространён микрометр, у которого цена делений линейной шкалы стебля $b = 0,5$ мм. Верхние и нижние риски шкалы сдвинуты относительно друг друга на полмиллиметра; цифры проставлены только для делений нижней шкалы, т.е. нижняя шкала представляет собой обычную миллиметровую шкалу (рис.4).

Для того, чтобы микрометрический винт A передвинулся на 1 мм, необходимо сделать два оборота барабана C , таким образом шаг микрометрического винта равен 0,5 мм. У такого микрометра на барабане C имеется шкала, содержащая 50 делений. Так как шаг винта $b = 0,5$ мм, а число делений барабана $m = 50$, то точность микрометра

$$\frac{b}{m} = \frac{0,5}{50} = 0,01 \text{ мм.}$$

Для измерения микрометром предмет помещают между упором E и микрометрическим винтом A (рис.3) и вращают винт за головку M до тех пор, пока измеряемый предмет не будет зажат между упором E и концом винта A (вращение винта A производится только за головку M , так как в противном случае легко сбить с нуля шкалы стебля D и барабана C).

Числовое значение L измеренного предмета находят по следующей формуле:

$$L = kb + n \frac{b}{m}, \quad (7)$$

где k — число наименьших делений шкалы; $\Phi(t) = \omega_0 t + \varphi_0$ — цена наименьшего деления шкалы; m — число всех делений на шкале барабана; n — номер того деления барабана, который в момент отсчета совпадает с осью шкалы стебля D .

Если применяется микрометр, у которого $b = 0,5$ мм, $m = 50$, то формула (7) принимает следующий вид:

$$L = 0,5b + \frac{n}{100}. \quad (8)$$

На рис.4 отсчет по микрометру показывает:

$$L = 0,5 \cdot + \frac{12}{100} = 3,5 + 0,12 = 3,62 \text{ мм.}$$

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №13

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ФИЗИЧЕСКОГО МАЯТНИКА»

Цель работы: определение ускорения свободного падения при помощи физического маятника.

Приборы и принадлежности: физический маятник FPM-04; встроенный миллисекундомер универсальный.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Колебаниями называются процессы, характеризующиеся той или иной степенью повторяемости во времени.

Системы, совершающие колебания, называются *колебательными*: математический маятник, крутильный маятник, физический маятник и др.

В зависимости от характера воздействия на колеблющуюся систему различают свободные и вынужденные колебания. *Свободными* (или *собственными*) называют такие колебания, которые происходят в системе, предоставленной самой себе после того, как она была выведена из состояния устойчивого равновесия. Колебания называются *периодическими*, если значения характеризующих их физических величин повторяются через одинаковые промежутки времени.

Простейшими свободными периодическими колебаниями являются *гармонические*, т.е. колебания, при которых физические величины, их характеризующие, изменяются по закону синуса или косинуса.

Пусть колебательная система совершает гармонические колебания. Согласно основному уравнению динамики поступательного движения, имеем

$$F_x = ma_x, \quad (1)$$

где, m — масса колебательной системы, a_x — ускорение колебательной системы вдоль оси x :

$$a_x = \frac{d^2x}{dt^2} = \ddot{x};$$

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (2)$$

где x — смещение колебательной системы относительно положения равновесия; A — амплитуда колебаний, равная максимальному

абсолютному значению смещения; $\Phi(t) = \omega_0 t + \varphi_0$ — фаза колебаний: аргумент тригонометрической функции в формуле (2); $\varphi_0 = \Phi(t_0)$ — начальная фаза колебаний: значение фаз колебаний в начальный момент времени $t_0 = 0$; ω_0 — круговая (циклическая) собственная частота колебаний; T — период колебаний: наименьший интервал времени, по истечении которого значения физических величин, характеризующих колебания, повторяются, т.е.

$$x(t+T) = x(t)$$

или

$$A \sin[\omega_0(t+T) + \varphi_0] = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0),$$

при этом фаза колебаний будет отличаться на 2π :

$$\omega_0(t+T) + \varphi_0 = (\omega_0 t + \varphi_0) + 2\pi,$$

откуда

$$T = 2\pi/\omega_0. \quad (3)$$

Продифференцируем выражение (2) дважды, найдём ускорение и подставим его в (1):

$$v = \dot{x} = A\omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0);$$

$$a = \dot{v} = \ddot{x} = -A\omega_0^2 \sin(\omega_0 t + \varphi_0);$$

$$F_x = -mA\omega_0^2 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = -m\omega_0^2 A \sin(\omega_0 t + \varphi_0);$$

$$F_x = -m\omega_0^2 x = -kx, \quad (4)$$

где $k = m\omega_0^2$.

Видим, что сила F_x , действующая на колебательную систему, совершающую гармонические колебания, удовлетворяет следующим условиям:

- 1) сила F_x пропорциональна смещению x ;
- 2) сила F_x направлена к положению равновесия (возвращающая сила).

Роль такой силы может играть как упругая, так и квазиупругая сила.

Используя понятие квазиупругой силы, исходя из основного уравнения динамики поступательного движения для колебательной системы, имеем

$$ma_x = -kx,$$

где

$$a_x = \ddot{x};$$
$$m\ddot{x} + kx = 0 \rightarrow \ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0,$$

где $k = m\omega_0^2$;

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0. \quad (5)$$

Выражение (5) есть дифференцированное уравнение гармонических колебаний, решением которого является выражение вида

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0).$$

В качестве колебательной системы рассмотрим физический маятник — абсолютно твёрдое тело, совершающее колебания в вертикальной плоскости под действием силы тяжести вокруг неподвижной горизонтальной оси Z , не проходящей через центр масс C (рис.1).

Если физический маятник массой m отклонить на небольшой угол φ от положения равновесия, то момент силы тяжести относительно точки O можно представить в виде

$$M_z = -mgl \sin \varphi = -mgl \varphi$$

где l — расстояние от точки O , лежащей на оси вращения, до центра масс C ; причём здесь учтено, что для малых углов $\sin \varphi \approx \varphi$.

Запишем основное уравнение динамики вращательного движения относительно неподвижной оси Z :

$$M_z = I_z \varepsilon_z, \quad (6)$$

где I_z — момент инерции физического маятника относительно оси Z ;
 $\varepsilon_z = d^2 \varphi / dt^2 = \ddot{\varphi}$ — угловое ускорение относительно той же Z .

уравнение гармонических колебаний с собственной круговой частотой ω_0 :

$$\varphi = \varphi_{0\lambda} \sin(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (8)$$

Период малых колебаний физического маятника

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{I_z}{mgl}}. \quad (9)$$

Введём понятие приведённой длины физического маятника.

С этой целью рассмотрим другую колебательную систему – математический маятник – материальная точка массой m , подвешенная на невесомой нерастяжимой нити и колеблющаяся под действием силы тяжести в вертикальной плоскости.

Хорошим приближением математического маятника является небольшой шарик, подвешенный на тонкой длинной нити ($l \approx 1$ м).

Поскольку математический маятник можно представить как предельный случай физического маятника, учитывая, что его момент инерции относительно горизонтальной неподвижной оси, проходящей через точку подвеса, равен $I_z = ml^2$, получим следующее выражение для периода колебаний математического маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_z}{mgl}} = 2\pi \sqrt{\frac{ml^2}{mgl}} = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

(10)

Сравнивая выражения (9) и (10), видим, что периоды малых колебаний физического и математического маятников будут равны в том случае, если длина математического маятника равна I_z/ml . Эта величина называется приведённой длиной физического маятника и обозначается $l_{\text{пр}}$, т.е.

$$l_{\text{пр}} = \frac{I_z}{ml}. \quad (11)$$

Следовательно, приведённая длина физического маятника – это длина такого математического маятника, период колебаний которого совпадает с периодом колебаний данного физического маятника. Используя формулы (10) и (11), период колебаний физического маятника можно найти по формуле

$$T = 2\pi \sqrt{l_{\text{пр}}/g}.$$

Точка O' , лежащая на продолжении прямой OC (рис.1), отстоящая от точки подвеса на расстояние $l_{\text{пр}}$, называется *центром качания* физического маятника. Центр качания примечателен тем, что период физического маятника не изменяется, если точкой подвеса сделать точку O' . Применяя теорему Штейнера, получим

$$l_{\text{пр}} = \frac{I_z}{ml} = \frac{I_C + ml^2}{ml} = l + \frac{I_C}{ml} > l,$$

т.е. $l_{\text{пр}} > l$.

Измеряя значения периода T , $l_{\text{пр}}$ для физического маятника, из формулы (12) можно выразить ускорение свободного падения g .

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Общий вид физического маятника представлен на рис.2.

Основание 1 оснащено регулируемыми ножками 2 , которые позволяют провести выравнивание прибора. В основании закреплена колонка 3 , на которой зафиксирован верхний кронштейн 4 и нижний кронштейн 5 с фотоэлектрическим счётчиком 6 .

Оборотный маятник выполнен в виде стального стрежня 8 , на котором зафиксированы два ножа, повернутые друг к другу лезвиями, и два ролика (тела линзообразной формы).

На стержне через 10 мм выполнены кольцевые нарезания, служащие для точного определения длины оборотного маятника (расстояния между ножами). Ножи и ролики можно перемещать вдоль оси стержня и фиксировать в любом положении.

Нижний кронштейн вместе с фотоэлектрическим датчиком можно перемещать вдоль колонки и фиксировать в произвольно выбранном положении. Фотоэлектрический датчик соединён с прикреплённым к основанию универсальным секундомером 10 . Затяжение воротка 11 фиксирует верхний кронштейн в любом произвольно избранном положении. С одной стороны кронштейна находится математический маятник 7 , его длина регулируется при помощи воротка 9 .

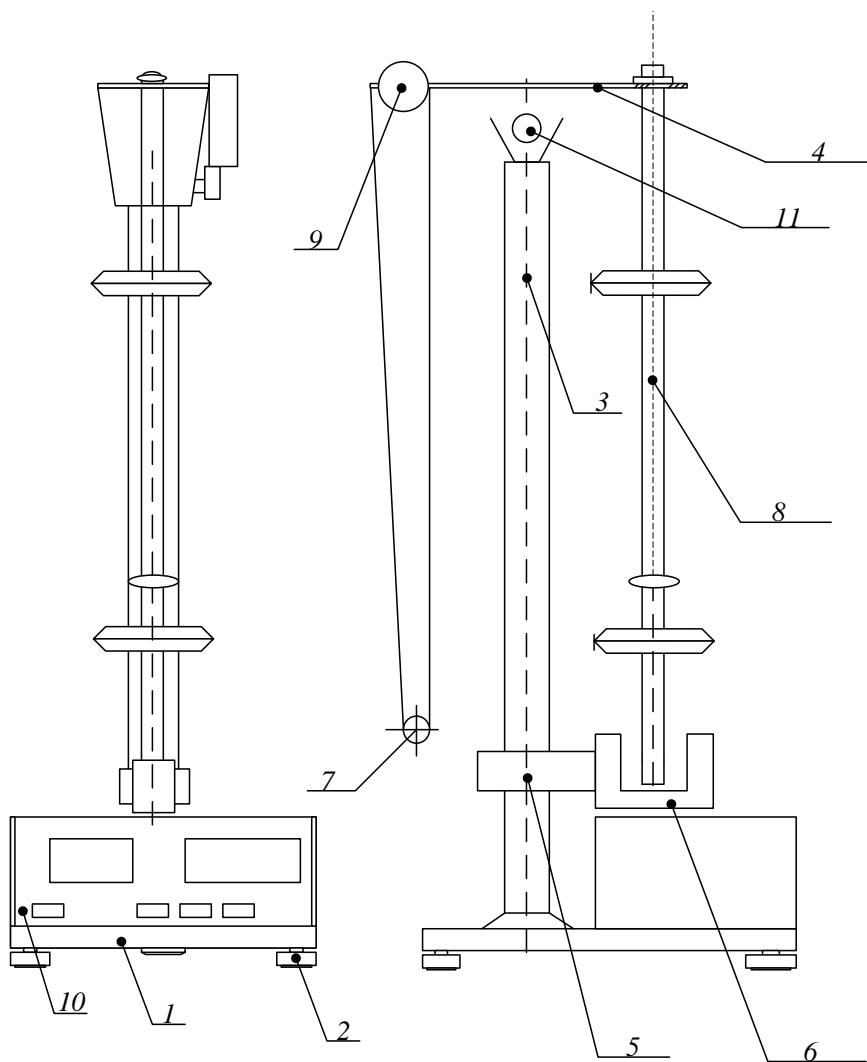


Рис.2. Универсальный маятник FPM-04. Общий вид

3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Зафиксировать ролики на стержне несимметрично так, чтобы один из них находился вблизи конца стержня, а другой — вблизи его середины.
2. Ножи маятника закрепить по обеим сторонам центра тяжести полученной системы таким образом, чтобы они были обращены друг к другу лезвиями. Один из них поместить вблизи свободного конца стержня, а второй — на половине расстояния между роликами.
3. Проверить, отвечают ли грани лезвий ножей нарезаниям на стержне.
4. Закрепить маятник на вкладыше верхнего кронштейна на ноже, находящемся вблизи конца стержня.
5. Нижний кронштейн вместе с фотоэлектрическим датчиком переместить так, чтобы стержень маятника пересекал оптическую ось.
6. Нажать кнопку «СБРОС».
7. Отклонить маятник на 4° – 5° от положения равновесия, предоставить его самому себе и, измерив время 10 полных колебаний (периодов), нажать клавишу «СТОП».

Величина периода определяется по формуле

$$T_1 = t_1 / n,$$

где t_1 – время 10 полных колебаний, с; n – число полных колебаний ($n = 10$).

8. Снять маятник и закрепить его на втором ноже.
9. Нижний кронштейн с фотоэлектрическим датчиком переместить таким образом, чтобы стержень маятника пересекал оптическую ось.
10. Отклонить маятник на 4° – 5° от положения равновесия, измерить время 10 полных колебаний (периодов) и определить период T_2 по формуле

$$T_2 = t_2 / n.$$

Сравнить найденные значения T_1 и T_2 .

11. Если $T_1 > T_2$, то второй нож переместить в направлении ролика, находящегося в конце стержня, если $T_2 < T_1$, то — в направлении середины стержня.

12. Повторно измерить T_2 и сравнить с величиной T_1 . Изменять положение второго ножа до момента получения равенства $T_2 \approx T_1 = T$ (с точностью до 0,5%).

13. Определить приведенную длину обратного маятника $l_{\text{пр}}$, подсчитав количество нарезаний на стержне между ножами. Определить ускорение свободного падения по формуле

$$g = 4\pi^2 l_{\text{пр}} / T^2.$$

14. Вычислить погрешности измерений:

а) определить относительную погрешность:

$$\varepsilon = \frac{\Delta g}{g} = \frac{\Delta l_{\text{пр}}}{l_{\text{пр}}} + 2 \frac{\Delta T}{T},$$

где $\Delta l_{\text{пр}} = 5$ мм (в соответствии с п.13); $\Delta T/T = 0,005$ (в соответствии с п.12).

б) определить абсолютную погрешность:

$$\Delta g = g \varepsilon;$$

в) записать результат в следующем виде:

$$g = g \pm \Delta g; \varepsilon = \%,$$

соблюдая правила округлений;

г) если теоретическое значение $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ не совпадает в доверительный интервал, выяснить возможные причины систематической погрешности.

4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Представить отчет по лабораторной работе на стандартных листах формата А4 в соответствии с методикой выполнения и оформления лабораторных работ по физике:

1. Прочитать описание лабораторной работы, ознакомиться с теоретической и экспериментальной частью, выполнением эксперимента, контрольными вопросами.
2. Придерживаясь следующего плана, оформить отчет о выполнении лабораторной работы:
 - 1) записать номер и название лабораторной работы;
 - 2) записать цель лабораторной работы;

- 3) записать приборы и принадлежности, включая измерительную линейку, штангенциркуль, секундомер электронный, микрометр и т.д.;
- 4) теоретическая часть: записать основной закон или расчетную формулу с разъяснением буквенных обозначений физических величин, входящих в них, указать единицы измерений в СИ;
- 5) экспериментальная часть: привести схему установки, рисунок или чертеж, поясняющий выполнение эксперимента; записать таблицы измерений, константы расчета;
- 6) обработка результатов измерений: вычисление физических величин в СИ; построение графиков на миллиметровке, скрепленной с отчетом; расчет погрешностей измерений;
- 7) записать ответ; сделать выводы.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие процессы называются колебательными?
2. Какие колебания называются гармоническими?
3. Записать дифференциальное уравнение и его решение для физического и математического маятников, записать периоды малых колебаний.
4. Показать, что приведённая длина физического маятника больше расстояния между точкой подвеса и центром масс.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №14

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА»

Цель работы: определение коэффициента динамической вязкости воздуха методом истечения воздуха через капилляр.

Приборы и принадлежности: сосуд стеклянный с водой; манометр жидкостный U-образный; капилляр встроенный; секундомер.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Термодинамическая система представляет собой совокупность макроскопических тел. Её состояние задается термодинамическими параметрами – параметрами состояния, в качестве которых обычно выбирают температуру, давление и удельный объем.

Термодинамическая система находится в равновесии, если её состояние с течением времени не меняется.

В термодинамических неравновесных системах возникают особые необратимые процессы, называемые *явлениями переноса*, в результате которых происходит пространственный перенос энергии, массы и импульса.

К явлениям переноса относятся *теплопроводность* (обусловлена переносом энергии), *диффузия* (обусловлена переносом массы) и *внутреннее трение* (обусловлено переносом импульса).

Механизм возникновения внутреннего трения между параллельными слоями газа, движущимися с различными скоростями, заключается в том, что из-за хаотического теплового движения происходит обмен молекулами между слоями. В результате импульс слоя, движущегося быстрее, уменьшается, а слоя, движущегося медленнее, - увеличивается, что приводит к торможению слоя, движущегося быстрее, и ускорению слоя, движущегося медленнее.

Сила внутреннего трения между двумя слоями газа подчиняется закону Ньютона:

$$F = \eta \left| \frac{dv}{dx} \right| S, \quad (1)$$

где η - коэффициент динамической вязкости газа (динамическая вязкость) ($\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2 = \text{Па} \cdot \text{с}$); $|dv/dx|$ - модуль градиента скорости, который показывает быстроту измерения скорости в направлении оси

Ox , перпендикулярном движению слоев; S - площадь, на которую действует сила F .

Взаимодействие двух слоев согласно второму закону Ньютона можно рассматривать как процесс, при котором от одного слоя к другому в единицу времени передается импульс, по модулю равный действующей силе. Тогда выражение (1) можно переписать в следующем виде:

$$I_p = -\eta \frac{dv}{dx}, \quad (2)$$

где I_p - плотность потока импульса: величина, определяемая полным импульсом, переносимым в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную оси Ox в положительном направлении данной оси. Знак «минус» показывает, что импульс переносится в направлении убывания скорости.

Таким образом, динамическая вязкость η численно равна плотности потока импульса при градиенте скорости, равном единице.

Можно показать, что

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

где ρ - плотность газа; $\langle v \rangle$ - средняя арифметическая скорость теплового движения молекул; $\langle \lambda \rangle$ - средняя длина свободного пробега молекул.

Согласно молекулярно-кинетической теории газов:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}, \quad (4)$$

где T - абсолютная температура газа; μ - молекулярная масса газа; R - универсальная газовая постоянная.

Отсюда следует, что с увеличением температуры увеличивается средняя арифметическая скорость теплового движения молекул, и динамическая вязкость в газах возрастает.

Наряду с коэффициентом динамической вязкости часто используется коэффициент кинематической вязкости ν :

$$\nu = \eta / \rho, \quad (5)$$

где ρ - плотность газа.

Коэффициент кинематической вязкости в СИ измеряется в $\text{м}^2/\text{с}$.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для определения коэффициента динамической вязкости воздуха в данной работе используется метод истечения воздуха через капилляр.

С этой целью рассмотрим метод Пуазейля, который основан на ламинарном течении жидкости в тонком капилляре радиусом R и длиной l . В жидкости мысленно выделим цилиндрический слой радиусом r и толщиной dr (рис. 1).

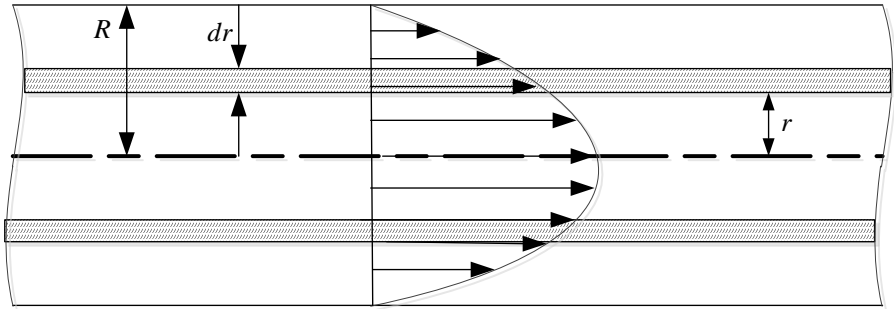


Рис. 1. Ламинарное течение жидкости в тонком капилляре радиуса R

Сила внутреннего трения, действующая на боковую поверхность этого слоя, согласно (1) равна:

$$F = -\eta \frac{dv}{dr} S = -\eta \cdot 2\pi r l \frac{dv}{dr}, \quad (6)$$

где S - боковая поверхность цилиндрического слоя.

Знак «минус» означает, что при возрастании радиуса скорость уменьшается.

При установившемся течении жидкости сила внутреннего трения, действующая на боковую поверхность цилиндра, уравновешивается разностью сил давления, действующих на его основание:

$$-\eta \cdot 2\pi r l \frac{dv}{dr} = \Delta p \pi r^2.$$

Разделяя переменные, получим

$$dv = \frac{-\Delta p}{2\eta l} r dr, \quad (7)$$

где Δp - разность давлений в начале и конце капилляра.

После интегрирования, полагая, что у стенок имеет место прилипание жидкости, т. е. скорость на расстоянии R от оси равна нулю, получим

$$v = \frac{\Delta p}{4\eta l} (R^2 - r^2) \quad (8)$$

Отсюда видно, что скорость частиц жидкости распределяется по параболическому закону, причем вершина параболы лежит на оси «трубы» капилляра.

За время t из капилляра вытечет жидкость, объем которой равен:

$$\begin{aligned} V &= \int_0^R v t \cdot 2\pi r dr = \frac{2\pi \Delta p t}{4\eta l} \int_0^R (R^2 - r^2) r dr = \\ &= \frac{\pi \Delta p t}{2\eta l} \left(R^2 \frac{r^2}{2} - \frac{r^4}{4} \right) \bigg|_0^R = \frac{\pi R^4 \Delta p t}{8\eta l}, \end{aligned}$$

откуда находим коэффициент динамической вязкости:

$$\eta = \frac{\pi R^4 \Delta p t}{8Vl}. \quad (9)$$

Газы в отличие от жидкостей обладают значительной сжимаемостью. Но при малых разностях давлений и соответственно малых скоростях течения сжимаемостью газов можно пренебречь и применить к ним формулу (9).

Таким образом, зная R , Δp , V и l , можно определить вязкость воздуха. На рис. 2 представлена экспериментальная установка. Один конец капилляра 1, через который протекает воздух, с помощью тройника 2 соединяется с сосудом 3, который закрыт резиновой трубкой с небольшим отверстием, и левым коленом манометра 4. Если при закрытом кране 5 воронки открыть кран 6, то вследствие вытекания воды давление в баллоне 7 будет уменьшаться, и в него будет подсасываться воздух, который пройдет через капилляр. Скорости движения бесконечно тонких цилиндрических слоев воздуха, расположенных на различных расстояниях от оси капилляра, будут различны.

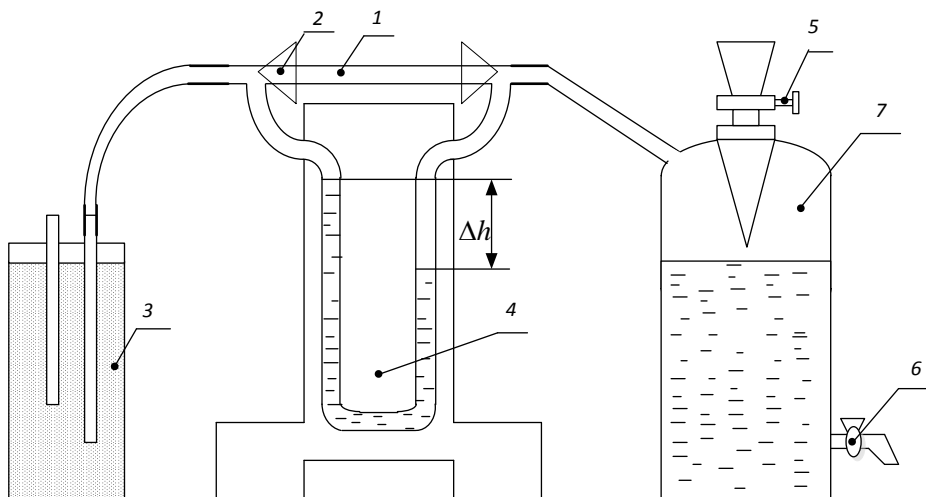


Рис. 2. Экспериментальная установка для определения коэффициента динамической вязкости воздуха

Если установившееся течение жидкости является ламинарным, то скорости по сечению капилляра 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 по осевой линии капилляра. Вследствие различия скоростей слоев между ними возникнут силы внутреннего трения. При этом силу вязкости, действующую на элементарный цилиндрический объем и приложенную у боковой поверхности цилиндра, уравнивает разность сил давлений, действующих на основания цилиндра. На концах капилляра при протекании через него воздуха будет существовать разность давлений:

$$\Delta p = p_1 - p_2,$$

где p_1 и p_2 - давление на входе и выходе капилляра соответственно. Эта разность давлений будет постоянной, так как параметры, характеризующие установившееся течение - скорость, давление в различных точках потока и т. д. с течением времени не меняются.

Английский ученый О. Рейнольдс установил, что характер течения как жидкостей, так и газов зависит от безразмерной величины, называемой *числом Рейнольдса*:

$$R_e = \frac{\rho v_{\text{ср}} d}{\eta}, \quad (10)$$

где ρ - плотность воздуха; $v_{\text{ср}}$ - средняя по сечению капилляра скорость воздуха; d - диаметр капилляра.

При малых значениях числа Рейнольдса ($R_e \leq 1000$) наблюдается ламинарное течение. Переход от ламинарного течения к турбулентному происходит в области значений $1000 \leq R_e \leq 2000$, а при $R_e = 2300$ (для гладких труб) течение становится турбулентным. Остается добавить, что течение называется *ламинарным*, если вдоль потока каждый выделенный тонкий слой скользит относительно соседних, не перемешиваясь с ними; и *турбулентным* (вихревым), если вдоль потока происходит интенсивное вихреобразное перемешивание жидкости или газа.

3. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Закрыть кран 6. Наполнить баллон 7 водой на $2/3$ его объема, открыв кран 5 воронки, после чего кран 5 закрыть.
2. Открыть кран 6, регулируя скорость течения воды так, чтобы разность уровней жидкости (воды) в коленях манометра Δh не превышала 2-2,5 см.
3. Убедившись в том, что течение воздуха через капилляр установилось (в этом случае Δh остается неизменной), измерить Δh , а также время τ , за которое из баллона в мензурку вытекает объем воды $V = 500 \text{ см}^3$ (этот объем занимает воздух).
4. Вычислить разность давлений Δp :

$$\Delta p = \rho_v g \Delta h,$$

где ρ_v - плотность воды; g - ускорение свободного падения:
 $\rho_v = 10^3 \text{ кг/м}^3$; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

5. Измерения повторить ещё два раза при той же разности уровней воды в коленях манометра Δh , рассчитать среднее значение времени τ из этих трех измерений.
6. По формуле (9) вычислить коэффициент динамической вязкости воздуха (в СИ), где $R = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $l = 2,5 \cdot 10^{-1} \text{ м}$.
7. По формуле (5) рассчитать коэффициент кинематический вязкости воздуха, где ρ - плотность воздуха ($\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$).

8. По формуле (10) вычислить число Рейнольдса, где $v_{cp} = V/S\tau$; S - площадь поперечного сечения капилляра: $S = \pi R^2$.
9. Рассчитать погрешности измерений:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\eta}{\langle\eta\rangle} = \frac{4\Delta R}{R} + \frac{\Delta(\Delta h)}{\Delta h} + \frac{\Delta\tau}{\langle\tau\rangle} + \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta l}{l},$$

где

$$\frac{\Delta R}{R} = 0,02; \quad \frac{\Delta(\Delta h)}{\Delta h} = 0,04; \quad \frac{\Delta V}{V} = 0,01;$$

$$\Delta\tau = 0,01 \text{ с}; \quad \Delta l = 1 \text{ мм}; \quad \Delta\eta = \langle\eta\rangle \cdot \varepsilon; \quad \varepsilon = \frac{\Delta\eta}{\langle\eta\rangle} \cdot 100\%.$$

10. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 1.

Примечание. Если время вытекания одного и того же объема воды определяется при несколько отличающихся разностях давлений, усреднять это время нельзя. В этом случае коэффициент динамической вязкости рассчитывается три раза, а затем находится его среднее значение.

Таблица 1

Результаты измерений и вычислений

№ п/п	τ , с	$\langle\tau\rangle$, с	V , м ³	Δh , м	Δp , Па	$\langle\eta\rangle$, Па·с	v , м/с	R_e	$\langle\eta\rangle \pm \Delta\eta$, Па·с	ε , %
1										
2										
3										

4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Представить отчет по лабораторной работе на стандартных листах формата А4 в соответствии с методикой выполнения и оформления лабораторных работ по физике:

- Прочитать описание лабораторной работы, ознакомиться с теоретической и экспериментальной частью, выполнением эксперимента, контрольными вопросами.
- Придерживаясь следующего плана, оформить отчет о выполнении лабораторной работы:
 - записать номер и название лабораторной работы;

- 2) записать цель лабораторной работы;
- 3) записать приборы и принадлежности, включая измерительную линейку, штангенциркуль, секундомер электронный, микрометр и т. д.;
- 4) теоретическая часть: записать основной закон или расчетную формулу с разъяснением буквенных обозначений физических величин, входящих в них, указать единицы измерений в СИ;
- 5) экспериментальная часть: привести схему установки, рисунок или чертеж, поясняющий выполнение эксперимента; записать таблицу измерений, константы расчета;
- 6) обработка результатов измерений: вычисление физических величин в СИ; построение графиков на миллиметровке, скрепленной с отчетом; расчет погрешностей измерений;
- 7) записать ответ. Сделать выводы.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Коэффициент динамической вязкости газов – его определение, физический смысл и единицы измерения в СИ.
2. От каких параметров зависит коэффициент динамической вязкости газов?
3. Как объяснить различие в зависимости от температурного коэффициента динамической вязкости газов и жидкостей?
4. Почему, несмотря на истечение воды из баллона, с некоторого момента устанавливается постоянная разность давлений Δp в манометре?

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев, И.В. Курс общей физики. В 3 т. Т. 1. Механика. Молекулярная физика. [Электронный ресурс]: учеб.пособие / И.В. Савельев. — Электрон.дан.—СПб. : Лань, 2016.—436 с.— Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/71760>
2. Алешкевич, В.А. Курс общей физики. Оптика. [Электронный ресурс]: учебник / В.А. Алешкевич. — Электрон.дан. — М. : Физматлит, 2011. — 320с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/2098>
3. Грабовский, Р.И. Курс физики. [Э\Электронный курс]: учеб.пособие / Р.И. Грабовский. — Электр.дан. — СПб. : Лань, 2012. — 608с с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/3718>