

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего образования

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

по дисциплине

**ФИЗИКА**

Разделы: Механика и молекулярная физика  
курс 1, 2

Санкт-Петербург  
РГГМУ  
2020

*Одобрено методической комиссией Института информационных систем и геотехнологий*

**УДК 537**

**ББК 22.33**

Лабораторный практикум по дисциплине «Физика». Разделы: Механика и молекулярная физика. – СПб.: РГГМУ, 2020. – 62 с.

*Авторы:* А.П. Бобровский, В.И. Биненко, Н.В. Дьяченко, В.В. Косцов, Е.Ю. Михтеева, И.А. Потапова, А.Л. Скобликова, В.Г. Сыромятников, П.П. Хлябич, Т.Ю. Яковлева.

*Ответственный редактор:* А.П. Бобровский, зав. каф. физики, канд. физ.-мат. наук, доцент, РГГМУ.

Практикум содержит описания 8 лабораторных работ Учебной лаборатории по разделам «Механика» и «Молекулярная физика». В каждой работе излагаются физические основы изучаемого явления, описание метода исследования и экспериментальных установок, порядок выполнения работы, методика обработки экспериментальных данных и т.д.

Лабораторный практикум предназначен для студентов первого и второго курсов очной формы обучения по направлениям гидрометеорология, прикладная гидрометеорология, физика, экология и природопользование, корабельное вооружение и по специальности информационная безопасность телекоммуникационных систем.

© Коллектив авторов, 2020,

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2020.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Лабораторный практикум содержит описание 8 лабораторных работ по разделам «Механика» и «Молекулярная физика», выполнение которых предусмотрено федеральным государственным образовательным стандартом третьего поколения (ФГОС-3+) для указанных направлений и специальностей. Приводятся описания сущности физических явлений, изучаемых в процессе выполнения лабораторных работ, схемы лабораторных установок, методики проведения физических экспериментов. В заключение каждой работы прилагается перечень контрольных вопросов. Список необходимой литературы и Интернет-ресурсы приведены в конце пособия.

Каждая лабораторная работа рассчитана на два академических часа. Студент допускается к выполнению лабораторной работы после самостоятельного домашнего изучения необходимых сведений из теории, ознакомления с порядком выполнения основных операций и наличии оформленного рабочего журнала с формулами для обработки результатов физических величин. Выполнив измерения и произведя необходимые расчеты, студент оформляет отчет, который представляет преподавателю. Следует учесть, что при выполнении работ в таблицы для записи прямых измерений все физические величины вносятся в единицах измерений, используемых в данной работе измерительных приборов и инструментов. А при расчетах косвенных измерений и их погрешностей в формулы вносятся значения физических величин, выраженных в единицах системы СИ. Требования к оформлению отчета указаны в учебном пособии «Обработка результатов измерений физических величин». Кроме того, студент должен ответить преподавателю на контрольные вопросы по теоретической части лабораторных работ. При этом студент должен показать понимание физических величин, полученных в результате выполнения лабораторных работ и дать оценку их достоверности.

## Содержание.

### Лабораторная работа № 101.

Определение момента инерции кольца методом сравнения крутильных колебаний . . . . . 5 .

### Лабораторная работа № 102.

Изучение вращательного движения с помощью маятника Обербека . . 12.

### Лабораторная работа № 103.

Определение момента инерции физического маятника и проверка теоремы Штейнера . . . . . 16

### Лабораторная работа № 104.

Определение коэффициента жёсткости и модуля Юнга методом пружинного маятника . . . . . 22

### Лабораторная работа № 125.

Определение универсальной газовой постоянной методом электролиза 29

### Лабораторная работа № 147.

Определение коэффициента вязкости и диаметра молекулы газа . . . . 39

### Лабораторная работа № 148.

Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса . . . . 49

### Лабораторная работа № 159.

Определение коэффициента теплопроводности твердых тел с малой теплопроводностью . . . . . 54

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 101

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ КОЛЬЦА МЕТОДОМ СРАВНЕНИЯ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

#### 1. Задача работы.

##### 1.1. Определение момента инерции кольца.

#### 2. Предварительные сведения.

Основной закон динамики (2 закон Ньютона для вращательного движения) в случае вращения тела вокруг неподвижной оси имеет вид:

$$\vec{\beta} = \frac{\vec{M}}{I},$$

где:  $\vec{M}$  – момент силы;

$\vec{\beta}$  – угловое ускорение;

$I$  – момент инерции тела.

Угловое ускорение  $\beta$  определяется как производная угловой скорости  $\vec{\omega}$  по времени  $t$ :

$$\vec{\beta} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}.$$

Угловая скорость  $\vec{\omega}$  представляет собой вектор, лежащий вдоль оси вращения, причем ориентация его связана с направлением вращения правилом правого винта, а модуль равен углу поворота тела за единицу времени.

Таким образом, вектор  $\vec{\beta} = d\vec{\omega}/dt$  в случае неподвижной оси направлен так же, как и вектор  $\vec{\omega}$ , если скорость вращения возрастает, и в противоположную сторону, если она убывает.

Момент силы  $\vec{M}$ , или вращающий момент, относительно оси вращения проходящей через точку  $O$  (см. рис. 1) - определяется как векторное произведение:

$$\vec{M} = [\vec{r} \times \vec{F}],$$

где:  $\vec{F}$  – вектор силы, лежащий в плоскости вращения;

$\vec{r}$  – радиус-вектор в той же плоскости, направленный от оси вращения к точке приложения силы.

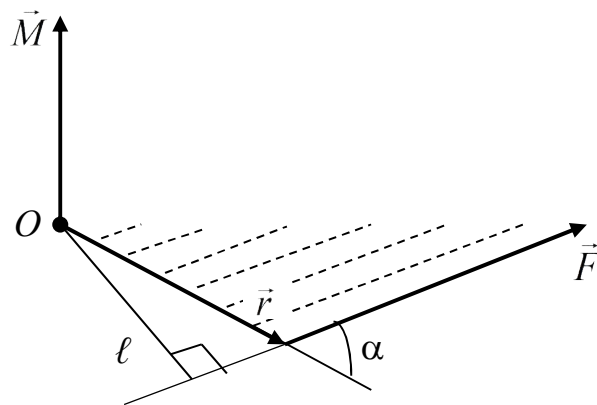


Рис. 1. Векторное произведение  $\vec{M} = [\vec{r} \times \vec{F}]$ .

Направление вектора  $\vec{M}$  связано с направлениями векторов  $\vec{r}$  и  $\vec{F}$  правилом правого винта. Модуль момента силы

$$M = rF \sin \alpha = \ell F,$$

где:  $\alpha$  – угол между радиус-вектором  $\vec{r}$  и вектором силы  $\vec{F}$ ;

$\ell$  – плечо вектора  $\vec{F}$  относительно точки  $O$  ( $\ell = r \sin \alpha$ ).

Плечом силы относительно оси называют кратчайшее расстояние от оси вращения до линии, вдоль которой направлена приложенная сила.

Момент инерции тела  $I$  относительно оси вращения - это скалярная величина, определяемая для материальной точки как произведение массы точки на квадрат ее расстояния от оси:

$$I = m r^2,$$

а для твердого тела проводится суммирование моментов инерции всех точек тела:

$$I = \sum m_i r_i^2,$$

где:  $m_i$  – масса  $i$ -ой частицы твердого тела;

$r_i$  – расстояние от оси вращения до  $i$ -ой частицы твердого тела.

Момент инерции характеризует инертные свойства тела при вращательном движении.

Момент инерции  $I$  для симметричных тел, в случае прохождения оси вращения через центр масс может быть вычислен по формулам:

1) в случае тонкого цилиндра (обруча), момент инерции  $I$  имеет вид:

$$I = mR^2,$$

2) для сплошного цилиндра (диска):

$$I = \frac{mR^2}{2}$$

3) для шара:

$$I = \frac{2mR^2}{5}$$

где:  $m$  – масса тела,  $R$  – радиус тела.

Определение момента инерции тел сложной конфигурации связано с большими математическими трудностями, поэтому их часто определяют опытным путем.

В том случае, если ось вращения не проходит через центр масс, момент инерции определяется с помощью теоремы Штейнера:

$$I = I_0 + md^2,$$

где:  $I_0$  – момент инерции относительно оси, проходящей через центр масс и параллельной оси, относительно которой определяется  $I$ ;

$d$  – расстояние между осями;

$m$  – масса тела.

### 3. Метод исследования и описание установки.

В данной работе определяется момент инерции кольца с помощью измерения периода крутильных колебаний  $T$ .

При малых углах поворота тела можно считать  $\sin \alpha \approx \alpha$ . Период крутильных колебаний тела с моментом инерции  $I$  определяется по формуле:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{k}}, \quad (1)$$

где  $k$  - модуль кручения нити, равный моменту силы, необходимому для закручивания нити на угол, равный одному радиану. Величина " $k$ " находится путем измерения периода колебаний  $T_0$  эталонного тела с известным моментом инерции  $I_0$ .

На рис. 2 представлен прибор, используемый в данной работе. В качестве эталонного тела взят диск с массой  $m$  и диаметром  $D$ . Его момент инерции относительно оси, проходящей через центр масс:

$$I_0 = \frac{1}{8}mD^2 \quad (2)$$

После измерения периода колебаний  $T_0$  диска, зная из формулы (2) момент инерции этого диска  $I_0$ , можно по формуле (1) найти модуль кручения нити  $k$ . Далее, поместив на диск кольцо с моментом инерции относительно оси, совпадающей с нитью  $I$ , получим систему тел, момент инерции  $I_1$  которой равен сумме моментов инерции диска  $I_0$  и кольца  $I$ :

$$I_1 = I_0 + I \quad (3)$$



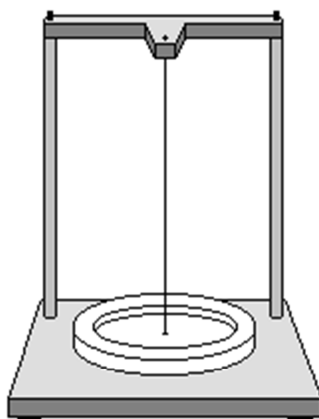


Рис. 2. Схема установки.

Измерив период колебаний системы диск-кольцо  $T_1$ , находим момент инерции этой системы по формуле, полученной на основе соотношения (1):

$$I_1 = I_0 \left( \frac{T_1}{T_0} \right)^2 \quad (4)$$

Из формулы (3) момент инерции кольца  $I = I_1 - I_0$

или с учетом формулы (4)

$$I = I_0 \left( \frac{T_1^2}{T_0^2} - 1 \right).$$

Учитывая формулу (2), получаем формулу для расчета момента инерции кольца  $I$ :

$$I = \frac{mD^2}{8} \left( \frac{T_1^2}{T_0^2} - 1 \right) \quad (5)$$

Если  $t_0$  - время, за которое совершается  $N$  колебаний диска, а  $t_1$  - время того же числа колебаний системы диск-кольцо, то период колебаний диска  $T_0$  и период колебаний системы диск-кольцо  $T_1$  определяются следующим образом:

$$T_0 = \frac{t_0}{N}, \quad T_1 = \frac{t_1}{N}$$

и, значит, момент инерции кольца  $I$  равен:

$$I = \frac{mD^2}{8} \left( \frac{t_1^2}{t_0^2} - 1 \right) \quad (6)$$

где:  $m$  – масса диска;

$D$  – диаметр;

$t_0$  – время, за которое совершается  $N$  колебаний диска;

$t_1$  – время, за которое совершается  $N$  колебаний системы диск-кольцо.

Формула (6) является рабочей формулой для расчета момента инерции кольца  $I$ .

#### 4. Порядок выполнения работы.

4.1. Измерьте штангенциркулем диаметр диска 5 – 7 раз. Результаты занесите в таблицу.

4.2. Сообщите диску крутильные колебания. Несколько первых колебаний пропустите, затем измерьте время  $t_0$  десяти полных колебаний. Опыт повторите 5 – 7 раз. Результаты занесите в таблицу.

4.3. Наденьте на диск кольцо и для системы диск-кольцо измерьте время  $t_1$  десяти полных колебаний, как указано в пункте 4.2. Обратите внимание на то, что число полных колебаний  $N$  при измерениях  $t_0$  и  $t_1$  должно быть обязательно одинаковым.

4.4. Занесите в таблицу массу диска, которая указана на установке.

№ опыта	$t_0$ , с	$t_1$ , с	$D$ , мм	$m$ , кг	$\Delta m$ , кг

5. *Обработка результатов наблюдений.*

5.1. Рассчитайте средние значения наблюдаемых величин  $t_0$ ,  $t_1$  и  $D$  и доверительные границы абсолютной погрешности этих величин.

5.2. Вычислите момент инерции кольца  $I$  по формуле (6). Рассчитайте абсолютную погрешность косвенного измерения  $\Delta I$ .

6. *Контрольные вопросы.*

6.1. Сформулируйте основной закон динамики для вращательного движения.

6.2. Что такое момент инерции и от чего он зависит?

6.3. Какую роль при вращательном движении играет момент инерции тела?

6.4. Что такое угловое ускорение и как найти его направление?

6.5. Что такое момент силы относительно неподвижной оси вращения?

6.6. Сформулируйте теорему Штейнера.

6.7. Что называется модулем кручения?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 102

### ИЗУЧЕНИЕ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАЯТНИКА ОБЕРБЕКА

#### 1. Задачи работы.

1.1. Определение момента инерции крестообразного маховика (маятника Обербека).

1.2. Определение вращающего момента.

1.3. Определение углового ускорения.

#### 2. Предварительные сведения.

См. соответствующий раздел в работе № 101.

#### 3. Метод исследования и описание установки.

Основной частью установки (рис.1) является крестообразный маховик, закрепленный на горизонтальной оси. На спицы маховика (1) насажены одинаковые по размерам и массе цилиндры (2), положение которых можно изменять. На одной оси с маховиком находится шкив (3) с намотанной на него нитью. К концу нити привязан груз (4).

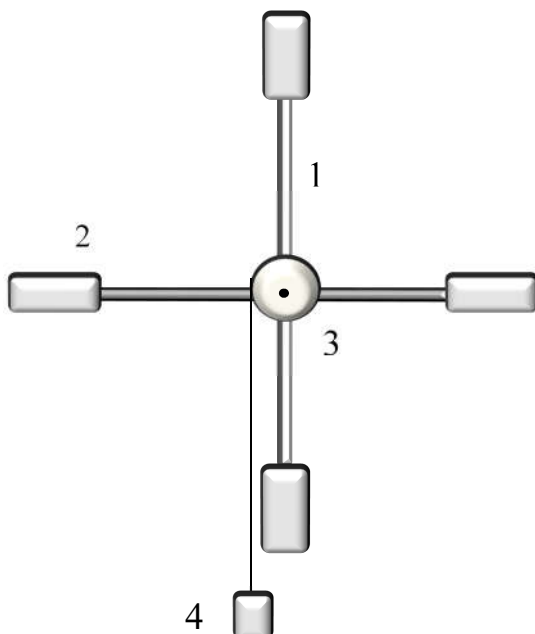


Рис.1. Схематическое изображение установки.

### 3.1. Определение углового ускорения.

Угловое ускорение  $\beta$  связано с линейным ускорением груза  $a$  и радиусом  $r$  шкива следующим образом:

$$\beta = \frac{a}{r}$$

Линейное ускорение  $a$  определяется из формулы пути равноускоренного движения без начальной скорости:

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

где:  $h$  – путь, который проходит груз за время  $t$ .

Следовательно, угловое ускорение  $\beta$  определяется по формуле:

$$\beta = \frac{4h}{Dt^2} \quad (1)$$

где:  $D$  – диаметр шкива.

Эта формула является рабочей формулой для определения углового ускорения  $\beta$ .

### 3.2. Определение вращающего момента.

Силой, вращающей шкив установки, является сила натяжения нити  $T$ :

$$T = m(g - a) = m \frac{(gt^2 - 2h)}{t^2}$$

Следовательно, вращающий момент  $M$  равен:

$$M = rT = mD \frac{(gt^2 - 2h)}{2t^2}$$

Преобразовав это выражение, получаем формулу для расчета вращающего момента  $M$ :

$$M = mD \left( \frac{g}{2} - \frac{h}{t^2} \right) \quad (2)$$

Эта формула является рабочей формулой для определения вращающего момента  $M$ .

### 3.3. Определение момента инерции.

Момент инерции  $I$  находится из основного закона динамики для вращательного движения:

$$I = M / \beta \quad (3)$$

Момент инерции  $I$  зависит от расположения цилиндров относительно оси вращения. Следовательно, и угловое ускорение  $\beta$  будет зависеть от расположения цилиндров. Возможные варианты приведены на рис. 2.

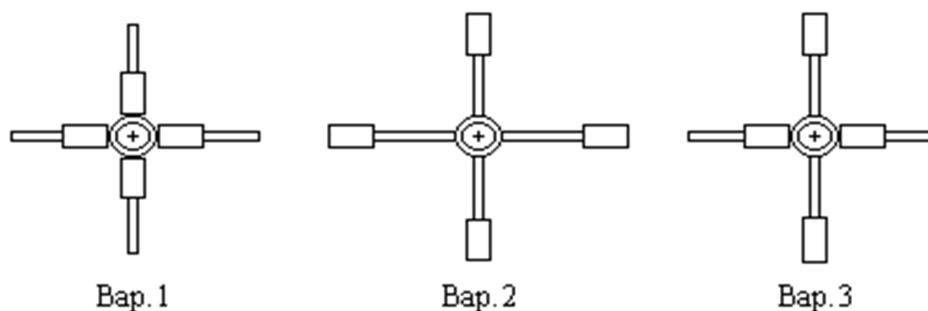


Рис. 2. Возможные варианты расположения цилиндров.

### 4. Порядок выполнения работы.

До начала работы получите у преподавателя задание относительно выбора двух вариантов расположения цилиндров на крестовине.

4.1. Расположите цилиндры на спицах согласно первому варианту и закрепите их.

4.2. Намотайте нить на шкив, при этом груз поднимется на высоту  $h$ .

4.3. Включите электрический секундомер, одновременно груз начнет падать. Измерьте время падения  $t_1$  груза.

4.4. Опыт повторите 10 раз. Результаты занесите в таблицу.

4.5. Расположите цилиндры на спицах согласно второму варианту и 10 раз определите время падения груза. Результаты занесите в таблицу.

4.6. Измерьте штангенциркулем 5 – 7 раз диаметр шкива  $D$ .

4.7. Масса груза указана на установке.

Таблица

№	$t_1$ , с	$t_2$ , с	$D$ , мм	$h$ , см	$m$ , кг	$\Delta m$ , кг

### 5. *Обработка результатов измерений.*

5.1. Рассчитайте средние значения измеренных величин  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $D$  и доверительные границы абсолютных погрешностей для них.

5.2. Для каждого варианта расположения цилиндров вычислите:

– угловое ускорение по формуле (1);

– вращающий момент по формуле (2);

– момент инерции маховика по формуле (3)

и их абсолютные погрешности.

### 6. *Контрольные вопросы.*

6.1. Что называется моментом инерции тела? От чего зависит эта величина?

6.2. Что такое момент силы относительно неподвижной оси? Как определяется направление момента силы?

6.3. Напишите основной закон динамики для вращательного движения.

6.4. Что называется угловым ускорением? Как определяется его направление?

6.5. Сформулируйте теорему Штейнера.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ФИЗИЧЕСКОГО МАЯТНИКА И  
ПРОВЕРКА ТЕОРЕМЫ ШТЕЙНЕРА

1. *Задачи работы.*

1.1. Экспериментальное определение момента инерции тела.

1.2. Расчет момента инерции по теореме Штейнера.

2. *Предварительные сведения.*

См. соответствующий раздел в работе № 101.

3. *Метод исследования и описание установки.*

Установка представляет собой треугольное основание и полку, жестко скрепленные тремя стойками. В центре полки в круглом углублении лежит поворотный диск радиуса  $r$  с рычажком. Круглая платформа радиуса  $R$  подвешена на расстоянии  $L$  к поворотному диску (рис. 1).

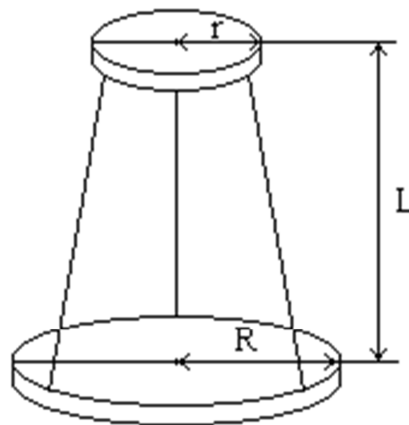


Рис.1. Схема установки.

Если верхний диск повернуть на небольшой угол (на установке есть ограничитель угла поворота), то нижняя платформа также придет в движение, начнет совершать крутильные колебания вокруг оси.



Период колебаний платформы измеряется цифровым частотомером-периодомером, принцип работы которого заключается в том, что счетный блок считает количество поступающих на его вход импульсов в течение определенного интервала времени. Прибор может измерить как единичный период, так и средний из  $10$ ,  $10^2$ ,  $10^3$ ,  $10^4$  периодов электрических сигналов. Электрические сигналы возникают после преобразования световых импульсов, а последние поступают на прибор с помощью светозатвора, шторка которого открывается и закрывается колеблющейся платформой. Период колебания платформы при малых углах поворота (когда  $\sin\alpha \approx \alpha$ ) связан с массой и моментом инерции платформы следующей зависимостью:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I \cdot L}{M g r R}},$$

где:  $I$  – момент инерции платформы;

$M$  – масса платформы;

$R$  – радиус платформы;

$r$  – радиус поворотного диска;

$L$  – расстояние между платформой и поворотным диском.

Из этой формулы можно получить значение момента инерции платформы:

$$I = \frac{g r R M T^2}{4\pi^2 L} \quad (1)$$

Произведение  $g r R / 4\pi^2 L$  является постоянной величиной для данной установки. Массу платформы  $M$  и период колебаний платформы  $T$  можно определить экспериментально. Следовательно, формула (1) является рабочей формулой для расчета экспериментального значения момента инерции платформы  $I$ .

На платформе можно устанавливать дополнительные грузы, при этом изменяется масса платформы  $M$  и ее момент инерции  $I$ , а, следовательно, и период колебаний  $T$ .

Дополнительные грузы изготовлены в виде цилиндров, которые на платформе можно устанавливать относительно центра по-разному. В таблице 1 предложено несколько вариантов расположения грузов.

Момент инерции платформы с грузами  $I$  можно не только измерить экспериментально, но и вычислить, применяя теорему Штейнера:

$$I = I_0 + md^2 \quad (2)$$

где:  $I_0$  – момент инерции относительно оси, проходящей через центр масс груза;

$d$  – расстояние между осью вращения и центром масс груза;

$m$  – масса груза.

Таблица 1

№ варианта	Геометрия расположения грузов	Расстояние от оси вращения до центра масс груза, мм
1	Два груза в центре один на другом	$d = 0$
2	Два груза на одном диаметре	$d = 25$
3	Три груза симметрично на окружности	$d = 29$
4	Три груза симметрично на окружности	$d = 35$

Если, как в нашем случае, колеблется сложная конфигурация, состоящая из нескольких грузов, то теорему Штейнера можно записать в виде:

$$I = I_0 + I_{01} + I_{02} + I_{03} + m_1d_1^2 + m_2d_2^2 + m_3d_3^2 \quad (3)$$

где:  $I_0 = \frac{mR^2}{2}$  - момент инерции платформы;

$$I_{01} = \frac{1}{8}m_1D_1^2, \quad I_{02} = \frac{1}{8}m_2D_2^2, \quad I_{03} = \frac{1}{8}m_3D_3^2$$
 - моменты инерции грузов-

цилиндров с массами  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  и диаметрами  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  относительно оси, проходящей через их центры масс;

$d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  – расстояния от центров масс грузов до оси вращения (центра платформы).

#### 4. Порядок выполнения работы.

##### 4.1. Включите частотомер тумблером СЕТЬ.

Пока прибор прогревается, проверьте работу механической части установки:

4.2. Для возбуждения колебаний платформы с фиксированной начальной амплитудой отведите рычаг верхнего диска влево до упора, осторожно успокойте (рукой) платформу и плавно переведите рычаг в правое положение. Платформа должна совершать колебания с амплитудой без заметного затухания. Шторка светозатвора не должна задевать за корпус. В случае неполадки обратитесь к лаборанту.

4.3. Включите в сеть блок светозатвора. При этом индикатор на нем должен мигать в такт с колебаниями платформы.

##### 4.4. Подготовьте частотомер к работе:

Установите тумблер СУММИР. - ПАМЯТЬ в положение ПАМЯТЬ;

Переключатель ВРЕМЯ ИНДИКАЦИИ в положение 0,1;

Переключатель ВХОД А – произвольно;

Переключатель РОД РАБОТЫ в положение КОНТРОЛЬ;

Переключатель ВРЕМЯ СЧЕТА/МНОЖ.ПЕРИОДЫ - в положение 10;

Переключатель МЕТКИ ВРЕМЕНИ - 0,1.

Если в режиме КОНТРОЛЬ высвечивается показание 00000100, переведите переключатель РОД РАБОТЫ в положение ПЕРИОД Б.

Прибор готов к работе.

##### 4.5. Измерьте период колебаний платформы.

Осторожно установите на платформе необходимую конфигурацию грузов (один из вариантов таблицы 1, рекомендованных преподавателем). Возбудите колебания, как указано в п. 4.2.

Нажмите кнопку СБРОС частотомера. Через 3 – 5 с начнется процесс измерения периода колебаний. При указанном в п. 4.4. положении переключателей прибор автоматически измеряет среднее значение периода 10 колебаний. По окончании счета частотомер высвечивает значение периода (обратите внимание на единицы измерения и положение запятой). Процесс счета будет периодически (через 10 с) повторяться, поэтому не медлите с записью показаний.

Если амплитуда колебаний сильно уменьшилась, остановите платформу и запустите ее снова.

Получите для данной конфигурации грузов не менее 10 значений периода.

4.6. Диаметры цилиндров измерьте штангенциркулем 5 раз в разных направлениях.

4.7. Заполните таблицу 2 экспериментальных данных. Значения величин  $m$ ,  $r$ ,  $R$  и  $L$  и их абсолютные погрешности приведены на установке.

Таблица 2

М, кг	m, кг	R, м	r, м	D, мм	d, мм	L, м	T, с	T <sub>ср</sub> , с

### 5. Обработка результатов измерений.

5.1. Для выбранного варианта конфигурации грузов вычислите суммарную массу  $M$  платформы и грузов. .

5.2. Рассчитайте среднее значение периода колебаний  $T$ .

5.3. Вычислите момент инерции  $I$  по формуле (1).

5.4. Рассчитать погрешности всех прямых и косвенных измерений.

5.5. Вычислите момент инерции платформы с грузами согласно теореме Штейнера по формуле (3) для выбранного варианта.

5.6. Сравните значения экспериментального и теоретического значения момента инерции. Сделайте выводы.

6. *Контрольные вопросы.*

6.1. Что называется моментом инерции тела?

6.2. Как вычислить момент инерции тела, если ось вращения не проходит через центр тяжести тела?

6.3. От чего зависит период колебания тела?

6.4. Дайте расшифровку всех символов, входящих в формулы (1), (2) и (3).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЖЁСТКОСТИ МЕТОДОМ  
ПРУЖИННОГО МАЯТНИКА

1. *Задачи работы.*

1.1. Определение коэффициента жесткости пружины.

2. *Предварительные сведения.*

Под действием внешних сил всякое реальное тело деформируется, то есть изменяет свои геометрические размеры и форму. Если после прекращения действия сил тело принимает первоначальные размеры и форму, то деформация называется упругой. Изменение размеров и формы тела после прекращения действия сил указывает на наличие пластической деформации.

Упругие деформации наблюдаются в том случае, если сила, обусловившая деформацию, не превосходит некоторый определенный для каждого тела предел (предел упругости).

Простейшим видом упругой деформации твердого тела является деформация растяжения (сжатия). Рассмотрим такой вид деформации на примере растяжения пружины. Такая деформация возникает, если один конец пружины неподвижно закреплен, а к другому концу приложена внешняя сила  $F$ , направленная по оси пружины.

В состоянии равновесия сила тяжести груза, подвешенного за свободный конец пружины (внешняя сила  $F$ ), будет уравновешена упругими силами  $F_{упр}$ , возникающими в пружине в результате деформации.

Отметим, что закрепление одного конца пружины, в силу третьего закона Ньютона, равносильно приложению к закрепленному концу силы, равной по величине и противоположной по направлению силе, действующей на свободный конец.

При этом величина деформации  $X$  (полное удлинение) пропорциональна величине действующей силы  $F$ :

$$F_{\text{упр}} = -F = -kX \text{ – закон Гука,} \quad (1)$$

где:  $k$  – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом жесткости пружины.

Наличие внешней силы  $F$  вызывает появление напряжений  $\sigma$  в пружине, величина которых зависит не только от величины внешней силы, но и от площади поперечного сечения  $S$  стержня (проволоки), из которой изготовлена пружина:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (2)$$

Упругие напряжения возникают по всей пружине и одинаковы вдоль всей ее длины. Это значит, что на каждый элемент длины пружины действуют со стороны прилегающих к нему частей пружины одни и те же усилия  $\sigma$ . Поэтому каждая единица длины пружины подвергается одинаковому растяжению, так что полное удлинение  $X = \Delta L$  пружины будет пропорционально ее общей длине  $L$ . При этом можно показать, что относительное удлинение  $\varepsilon$  прямо пропорционально приложенному напряжению  $\sigma$ , то есть:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\sigma}{E}, \quad (3)$$

где:  $E$  - коэффициент пропорциональности, который носит название модуля растяжения или модуля Юнга.

Выражение (3), так же как и уравнение (1), соответствует закону Гука.

Под действием упругой или квазиупругой силы (не упругой по своей природе, но подчиняющейся выражению вида (1)), тела после прекращения действия внешней силы, совершают гармонические колебания, то есть колебания, при которых колеблющаяся величина изменяется по закону синуса (косинуса). Поэтому упругие или квазиупругие силы называются также гармоническими силами.

Примером такого движения являются колебания пружинного маятника.

Колебание тела на пружине под действием упругих сил может быть описано с помощью второго закона Ньютона:

$$F = ma = m \frac{dv}{dt} = -kX, \quad (4)$$

где:  $m$  – масса колеблющегося тела;

$v$  – его скорость.

Уравнение (4) может быть записано в виде:

$$\frac{d^2 X}{dt^2} + \omega_o^2 X = 0, \quad (5)$$

где:  $\omega_o$  – циклическая частота колебаний:

$$\omega_o = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (6)$$

Это дифференциальное уравнение второго порядка (5) имеет решение в виде следующей функции:

$$X = X_{\max} \sin(\omega_o t + \varphi_o), \quad (7)$$

где:  $\varphi_o$  – начальная фаза колебания в момент времени  $t = 0$ ;

$(\omega_o t + \varphi_o)$  – фаза колебаний в произвольный момент времени  $t$ ;

$X_{\max}$  – максимальное смещение колеблющегося тела относительно положения равновесия (амплитуда колебаний).

Циклическую частоту соответствующих колебаний можно также определить как:

$$\omega_o = \frac{2\pi}{T_o}, \quad (8)$$

где  $T_o$  – период собственных колебаний - наименьший промежуток времени, за который все физические параметры, характеризующие колебательное движение, повторяются.



Так, например, по истечении периода  $T_o$  фаза колебания получает приращение  $2\pi$ , а колеблющееся тело возвращается в исходное состояние.

Подставляя (8) в (6), находим, что:

$$T_o = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (9)$$

т.е. период свободных упругих колебаний тела массой  $m$ , подвешенного на пружине, зависит от его массы и коэффициента жесткости пружины. Отметим, что для всех простых гармонических колебаний период колебания не зависит от амплитуды колебаний ( $X_{max}$ ) до тех пор, пока выполняется закон Гука. При превышении этого предела тело получает остаточные или пластические деформации.

Из уравнения (9) получаем

$$k = \frac{4\pi^2 m}{T_o^2} \quad (10)$$

Это формула является рабочей формулой для расчета коэффициента жесткости пружины.

### *3. Метод исследования и описание установки.*

В установке, которую условно назовем пружинным маятником, используется упругая пружина, один конец которой закреплен, а другой, вместе с подвешенным к пружине грузом, может двигаться относительно линейки. На пружине закреплён визир, который позволяет фиксировать положение конца пружины при различных значениях внешней силы. Если пружину с грузом оттянуть, а затем отпустить, то под действием упругих сил груз будет совершать вертикальные колебания. Время, затраченное на  $N$  полных колебаний, можно определить по секундомеру. Под одним полным колебанием подразумевается наименьшее время, за которое колеблющееся тело вернется в исходное состояние, то есть время, близкое периоду колебаний.

### *4. Порядок выполнения работы.*

### Определение коэффициента жесткости первым способом

4.1. Отметить на шкале линейки положение указателя на пружине без грузов ( $X_0$ ).

4.2. Нагружая пружину различными грузами с массами  $m_i$ , определить соответствующие удлинения пружины:

$$X = X_i - X_0. \quad (11)$$

Выполнить измерения с пятью различными грузами.

Результаты отсчетов по пунктам 4.1 – 4.2 занести в таблицу 1 и туда же вписать результаты расчетов внешней силы  $F$ :

$$F = m_i g, \quad (12)$$

где:  $m_i$  – масса груза;

$g$  – ускорение свободного падения ( $g = 9,80 \text{ м/с}^2$ ).

Таблица 1

№ опыта	$m_i$ , кг	$F$ , Н	$X_0$ , см	$X_i$ , см	$X$ , см

## Определение коэффициента жесткости вторым способом

4.3. Определить время, за которое совершаются  $N = 5$  колебаний. Для этого подвесить груз массой  $m = 0,8$  кг, оттянуть его на 5 см и, отпустив его, измерить время 5 полных колебаний. Прodelать опыт 5 раз.

4.4. Результаты занести в таблицу 2.

Таблица 2

№ опыта	$t, c$	$N$	$T_0, c$

### 5. Обработка результатов измерений.

#### 5.1. Первый способ расчета коэффициента жесткости пружины $k$ :

5.1.1. По формулам (11) и (12) рассчитайте значения удлинения пружины  $X$  и внешней силы  $F$ .

5.1.2. Постройте график зависимости внешней силы  $F$  от удлинения пружины  $X$ .

5.1.3. По графику определите коэффициент жесткости  $k$  и  $\Delta k$  считая, что коэффициент жесткости пружины  $k$  это угловой коэффициент  $a$  графика зависимости внешней силы  $F$  от удлинения  $X$  (см. закон Гука формула (1)). То есть  $k=a$ ,  $\Delta k=\Delta a$ .

5.2. **Второй способ** расчета коэффициента жесткости пружины  $k$ :

5.2.1. Рассчитайте среднее значение времени пяти колебаний.

5.2.2.. Определите среднее значение периода колебаний:

$$T_o = \frac{t}{N}$$

где:  $N$  – число колебаний груза;

$T_o$  – период колебаний.

5.2.3. По формуле (10) определите значение коэффициента жесткости пружины  $k$  и  $\Delta k$ .

5.3. Сравните полученные по первому и второму способам результаты определения коэффициентов жесткости пружины  $k$  и их точности.

6. *Контрольные вопросы.*

6.1. Какие виды деформации Вы знаете?

6.2. Сформулируйте закон Гука.

6.3. Какие силы называются упругими, квазиупругими?

6.4. Дайте определение периода колебаний.

6.5. От чего зависит период колебаний пружинного маятника?

6.6. Какие условия являются необходимыми для возникновения колебательного движения?

6.7. Напишите дифференциальное уравнение и его решение для гармонических колебаний.

6.8. Какие колебания являются гармоническими и зависят ли они от амплитуды?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ГАЗОВОЙ ПОСТОЯННОЙ  
МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЛИЗА

1. *Задача работы.*

1.1. Определение универсальной газовой постоянной  $R$ .

2. *Предварительные сведения.*

Идеальным газом называется газ, в котором отсутствуют силы молекулярного взаимодействия. Считается, что такой газ состоит из множества молекул, находящихся в непрерывном хаотическом движении, обменивающихся энергией только при абсолютно упругих столкновениях либо друг с другом, либо со стенками сосуда. Расстояние между молекулами в идеальном газе настолько велико, что объемом самих молекул можно пренебречь по сравнению с объемом сосуда, в котором они находятся, то есть их можно считать физическими точками. Идеальный газ – это идеальная физическая модель, однако свойства реальных газов в достаточно широком диапазоне давлений и температур близки к свойствам идеального газа. Так, например, воздух при нормальном атмосферном давлении (101,325 кПа или 760 мм рт. ст.) и комнатной температуре ведет себя как идеальный газ и, следовательно, к воздуху применимо уравнение состояния идеального газа.

Законы для идеальных газов выражаются более простыми формулами, если температура выражена в градусах Кельвина, а не Цельсия:

$$T [K] = t [^{\circ}C] + 273.$$

Основным уравнением, описывающим идеальный газ, является уравнение состояния идеального газа или уравнение Менделеева-Клапейрона:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT, \quad (1)$$

где:  $P$  – давление газа;

$V$  – объем газа;

$T$  – температура (в градусах Кельвина);

$m$  – масса всего газа;

$\mu$  – молярная масса газа ;

$R$  – искомая универсальная газовая постоянная.

При непрерывном изменении  $P$ ,  $V$  и  $T$  уравнение применимо ко всей последовательности состояний только при бесконечно медленных процессах, когда неравномерности в распределении температуры и давления бесконечно малы.

В этом приближении из уравнения (1) дифференцированием получаем выражение :

$$P\Delta V = \frac{m}{\mu}R\Delta T \quad (2)$$

где:  $\Delta V$  – изменение объема;

$\Delta T$  – изменение температуры, соответствующее изменению объема  $\Delta V$  в изобарическом процессе;

Учитывая, что при изобарическом расширении или сжатии газа совершается работа  $A$  (3), равная:

$$A = P\Delta V, \quad (3)$$

получаем выражение для расчета  $R$

$$R = \frac{A}{\nu\Delta T} \quad (4)$$

где:  $\nu$  – число молей газа ( $\nu = \frac{m}{\mu}$ ).

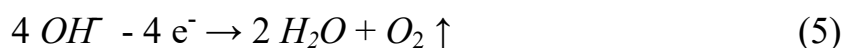
Таким образом, универсальная газовая постоянная  $R$  численно равна работе, которую совершает один моль идеального газа при постоянном давлении при повышении его температуры на один градус.

Известно, что точное значение этой величины равно  $(8,31441 \pm 0,0003)$  Дж/моль·К.

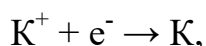
### 3. Методика работы и описание установки.

В данной работе универсальную газовую постоянную  $R$  определяют, используя соотношение (1) применительно к водороду. Для получения водорода используется электролиз. Электролизом называется процесс выделения на электродах продуктов разложения раствора или расплава электролита при прохождении через него электрического тока. В качестве электролита, то есть раствора, проводящего электрический ток, в данной работе служит водный раствор едкого калия  $KOH$ .

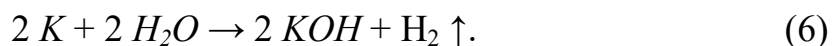
В результате электролитической диссоциации едкого калия получаются ионы  $K^+$ ,двигающиеся к катоду, и ионы  $OH^-$ ,двигающиеся к аноду. Около анода от иона  $OH^-$ отщепляется электрон  $e^-$  и из оставшейся гидроксильной группы образуется вода и кислород:



Около катода к иону  $K^+$ присоединяется электрон и восстанавливает его до нейтрального атома:



Калий, реагируя с водой, снова обогащает раствор едким калием  $KOH$  с выделением водорода:



Таким образом, количество молекул едкого калия остается в растворе неизменным, а выделяющиеся на электродах газы водород и кислород являются продуктами разложения воды.

Количественные законы электролиза были экспериментально установлены Фарадеем. Количество выделившегося на электроде вещества оказалось прямо

пропорционально количеству заряда  $q$ , протекающего через раствор или расплав электролита:

$$m = k \cdot q, \quad (7)$$

где:  $m$  – масса выделившегося при электролизе вещества;

$k$  – коэффициент пропорциональности, различный для разных веществ, носит название электрохимического эквивалента и выражается в [кг/Кл];

$q$  – прошедший через электролит заряд.

Согласно второму закону Фарадея электрохимический эквивалент  $k$  вещества прямо пропорционален молярной массе этого вещества  $\mu$  и обратно пропорционален его валентности  $Z$ :

$$k = \frac{\mu}{F Z} = \frac{A}{F} \quad (8)$$

где:  $A$  – химический эквивалент вещества,  $A = \frac{\mu}{Z}$  [кг/моль];

$F$  – постоянная Фарадея, которая имеет для всех веществ одно и то же значение.  $F$  равна произведению заряда электрона  $e$  на число Авогадро  $N_A$  ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл,  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>):

$$F = N_A \cdot e = 96484,56 \text{ Кл/моль.}$$

Постоянная Фарадея показывает, какой заряд  $q$  должен пройти через раствор электролита для того, чтобы на электроде выделилась масса вещества, численно равная его химическому эквиваленту  $A$ .

Массу выделившегося газа можно вычислить из следующих соображений: каждый ион водорода несет заряд, равный заряду электрона по модулю  $|e|$ . Следовательно, если через электролит прошло  $n'$  ионов, то они перенесли заряд  $q$ :

$$q = e \cdot n'. \quad (9)$$

Сила тока  $I$  в цепи при прохождении через раствор электролита заряда  $q$  за время  $\tau$  равна:



$$I = \frac{q}{\tau} \quad (10)$$

Так как выделившийся на электроде водород  $\text{H}_2$  является двухатомным газом, то число молекул водорода  $n$  в два раза меньше числа ионов  $n'$ , то есть:

$$n = \frac{n'}{2} \quad (11)$$

Масса всего выделившегося водорода  $m$  равна массе молекулы водорода  $m_n$ , умноженной на число молекул  $n$ :

$$m = 2 m_H n, \quad (12)$$

где:  $m_H$  – масса одного атома водорода.

Используя соотношения (9), (10), (11) и (12), получаем, что масса всего выделившегося водорода равна:

$$m = \frac{m_H I \tau}{e} \quad (13)$$

Из формулы (1), (13) следует, что универсальная газовая постоянная  $R$  выражается следующим образом:

$$R = \frac{PV \mu e}{T m_H I \tau} \quad (14)$$

Прибор для получения нормированного количества газа путем электролиза называется электролизером (рис. 1).

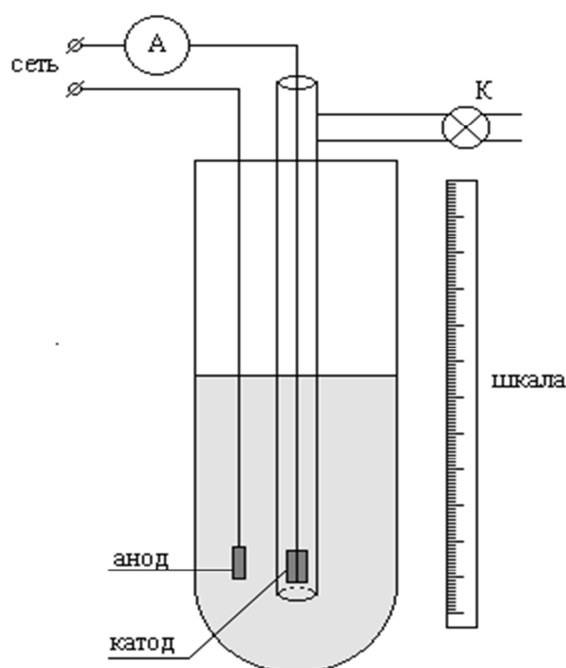


Рис. 1. Принципиальная схема установки.

К – кран; А – амперметр.

В данной работе применяется электролизер коаксиальной конструкции. Он состоит из двух трубок, вставленных одна в другую. В центральную трубку введен катод, в зазоре между трубками находится анод. При электролизе водород скапливается во внутренней трубке (при закрытом кране К), а кислород улетучивается в атмосферу. Электрическая часть прибора состоит из выпрямителя, амперметра и реостата для регулировки тока в электролизере. Температура, при которой находится водород, измеряется при помощи термометра.

Объем  $V$  водорода, выделившегося в течение опыта, определяется по формуле:

$$V = S \cdot (X_1 - X_2), \quad (15)$$

где:  $S$  – площадь сечения трубки (для нашей установки  $S = 1,00 \pm 0,01 \text{ см}^2$ );

$X_1$  – уровень раствора в центральной трубке до электролиза;

$X_2$  – уровень раствора в центральной трубке после электролиза.

Осталось определить давление водорода в трубке. Поскольку поверхность электролита, над которой находится водород в трубке, покоится, давление газа на жидкость равно давлению жидкости на газ. В состав газа, находящегося над поверхностью электролита, кроме водорода входят пары воды. Поэтому давление газа складывается из парциального давления водорода  $P$  и парциального давления насыщенных паров воды над поверхностью электролита  $P_2$ . Давление электролита на газ складывается из атмосферного давления  $P_{атм}$  и гидростатического давления  $P_1$ , возникающего из-за разницы уровней во внешней ( $X_3$ ) и центральной ( $X_2$ ) трубках электролизера. То есть:

$$P + P_2 = P_{атм} + P_1. \quad (16)$$

Гидростатическое давление  $P_1$  находится по формуле:

$$P_1 = \rho \cdot g \cdot (X_3 - X_2), \quad (17)$$

где:  $\rho$  – плотность электролита ( $1,25 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>);

$g$  – ускорение свободного падения ( $9,80$  м/с<sup>2</sup>);

$X_3$  – уровень раствора во внешней трубке после электролиза.

Из уравнений (16) и (17) получим:

$$P = P_{атм} + \rho g (X_3 - X_2) - P_2. \quad (18)$$

Уравнения (15) и (18) являются рабочими формулами для расчета значений величины объема  $V$  и давления  $P$  водорода. Полученные значения  $V$  и  $P$  используются для расчета значения  $R$  по рабочей формуле (14). Величины молярной массы молекулы водорода  $\mu$ , заряда электрона  $e$  и массы атома водорода  $m_H$  являются табличными и имеют значения:

$$\mu = 2,00 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}; \quad e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}; \quad m_H = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

#### 4. Порядок выполнения работы.

4.1. При открытом кране К замкните цепь и установите ток порядка 0,2 А.

4.2. Разомкните цепь, дождитесь прекращения выделения пузырьков газа и закройте кран К.

4.3. Определите уровень раствора  $X_1$  в центральной трубке.

4.4. Включите ток и одновременно пустите секундомер. Время пропускания тока  $\tau$  должно быть порядка 10 - 15 мин. Во время опыта следите за величиной тока через 5, 10 и 15 мин., запишите эти значения в таблицу.

4.5. Выключите одновременно ток и секундомер. Подождите 1 - 2 мин, пока полностью не прекратится выделение пузырьков газа и не выровняется температура.

4.6. Определите уровень раствора  $X_2$  в центральной трубке.

4.7. Определите уровень раствора во внешней трубке  $X_3$ .

4.8. Измерьте температуру  $t$  воздуха в комнате, где проводится эксперимент.

4.9. Определите атмосферное давление  $P_{атм}$  по барометру (1 мм рт. ст. = 133,322 Па).

4.10. Данные опыта занесите в таблицу 1.

Таблица 1

$I, A$	$\tau, c$	$X_1, cm$	$X_2, cm$	$X_3, cm$	$S, cm^2$	$t, C$	$T, K$	$P_1, Pa$	$P_2, Pa$	$P_{атм}, mm.rт.ст.$	$P_{атм}, Pa$

4.11. По таблице зависимости давления насыщенных паров от температуры [ $P_{H_2O} = f(t)$ ] найдите упругость насыщенных паров  $P_2$  при данной температуре (таблица 2).

Зависимость давления насыщенных паров воды над 80 %-ным водным раствором едкого калия  $KOH$  от температуры.

$t, ^\circ C$	$P_{H_2O}, Pa$
10	971
18	1639
20	1853
22	2106
24	2343
26	2519
28	2679
30	3012

4.12. Для определения систематических составляющих погрешностей измеренных в работе величин запишите параметры использованных приборов (барометра, термометра, секундомера, амперметра) – класс точности, максимальное значение измеряемой величины, цену деления.

#### 5. *Обработка результатов измерений.*

Обработка результатов измерений проводится по трем отдельным рабочим формулам (15), (18) и (14):

5.1. Вычислите объем  $V$  выделившегося в течение опыта водорода по формуле (15).

5.2. Вычислите давление  $P$ , под которым находится водород в трубке, по формуле (18).

5.3. Рассчитайте среднее значение силы тока, наблюдаемого в эксперименте.

5.4. Вычислите универсальную газовую постоянную  $R$  по формуле (14).

6. *Контрольные вопросы.*

6.1. Какой газ называется идеальным?

6.2. Каким уравнением можно описать состояние идеального газа?

6.3. Что такое моль вещества?

6.4. Каков физический смысл универсальной газовой постоянной? Какова ее размерность в системе единиц СИ?

6.5. Что называется электролизом?

6.6. От чего зависит масса выделившегося вещества при электролизе?

6.7. Сформулируйте два закона Фарадея для электролиза. Получите из этих двух законов объединенный закон Фарадея для вычисления массы выделившегося на электродах вещества.

6.8. Каков физический смысл числа Фарадея?

6.9. Какой прибор называется электролизером?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ  
И ДИАМЕТРА МОЛЕКУЛЫ ГАЗА

1. *Задачи работы.*

1.1. Измерение величины коэффициента вязкости (внутреннего трения) воздуха.

1.2. Измерение среднего диаметра молекулы воздуха.

2. *Предварительные сведения.*

Явления переноса - это процессы установления равновесия в системе путем переноса массы (диффузия), энергии (теплопроводность) и импульса молекул (внутреннее трение, или вязкость). Все эти явления обусловлены тепловым движением молекул.

При явлении вязкости наблюдается перенос импульса от молекул из слоев потока, которые двигаются быстрее к молекулам более медленных слоев. Разберем этот процесс подробнее.

Представим себе поток газа, движущегося вдоль твердой стенки в капилляре со скоростью  $u$ . Движение молекул газа можно представить складывающимся из двух движений:

1) упорядоченное движение молекул параллельно стенке. Это движение при малых скоростях носит слоистый (ламинарный) характер. То есть, поток газа движется отдельными слоями, которые не смешиваются между собой. В этом случае слои представляют собой совокупность бесконечно тонких цилиндрических поверхностей, вложенных одна в другую, имеющих общую ось, совпадающую с осью трубы. Распределение скорости газа  $u$  такого движения от координаты  $x$  показано на рис. 1.

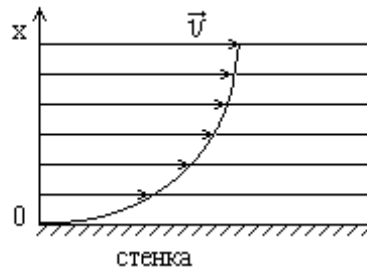


Рис. 1. Распределение скоростей в газе при ламинарном течении.

Скорость пристенного слоя (при  $x=0$ ) принимается равной нулю (условие «прилипания»). По мере удаления от стенки (то есть  $x$  увеличивается) скорость слоя молекул  $v$  возрастает сначала очень быстро, затем ее возрастание замедляется;

2) хаотическое тепловое движение молекул, перемещающихся из слоя в слой. Молекулы, переходящие из слоя, движущегося с большей скоростью, в слой с меньшей скоростью, переносят с собой импульс (количество движения)  $mv$  того слоя, из которого они вышли ( $m$  – масса молекулы газа,  $v$  скорость слоя молекул). Тем самым они увеличивают импульс упорядоченного движения медленного слоя. Такое же число молекул из слоя с меньшей скоростью переходят в слой с большей скоростью, что уменьшает импульс этого слоя.

Известно, что изменение импульса за единицу времени  $\frac{d(mv)}{dt}$  по основному закону динамики Ньютона, связано с действием силы:  $\frac{d(mv)}{dt} = F$ .

В данном случае, эта сила называется силой вязкости или силой внутреннего трения газа. Сила вязкости, приложенная к медленному слою, ускоряет его в направлении потока, а сила вязкости, приложенная к быстрому слою, замедляет его. То есть для быстрого слоя эта сила равносильна действию на быстрый слой затормаживающей силы, а для медленного слоя эта сила равносильна действию на него ускоряющей силы.

В соответствии с третьим законом Ньютона обе силы равны по модулю и противоположны по направлению.



Экспериментально установлено, что величина импульса, который передается между слоями  $d(mv)$  пропорционален площади соприкосновения слоев  $S$ , градиенту скорости  $\frac{dv}{dx}$  и времени  $dt$ :

$$d(mv) = -\eta \left| \frac{dv}{dx} \right| S dt \left| \frac{dv}{dx} \right|$$

где:  $\eta$  – (греческая буква «эта») – коэффициент вязкости газа, зависящий от рода и параметров состояния газа;

- градиент скорости ( $\text{grad } v$ ). Эта величина характеризует быстроту изменения скорости слоев при переходе молекул от слоя к слою.

Силу внутреннего трения  $F_{mp}$ , возникающую между слоями, можно определить по закону Ньютона следующим образом:

$$F_{mp} = \frac{d(mv)}{dt} = -\eta \left| \frac{dv}{dx} \right| S \quad (1)$$

Из этого выражения видно, что коэффициент вязкости  $\eta$  численно равен импульсу, который переносится в единицу времени через единичную площадку при градиенте скорости, равном единице. В этом заключается физический смысл коэффициента вязкости.

Модуль силы вязкости, приложенной к единице площади поверхности слоя, называется напряжением вязкости и обозначается  $f$ :

$$f = \eta \left| \frac{dv}{dx} \right|.$$

Напряжение вязкости  $f$ , а, следовательно, и величина силы вязкости, зависят от градиента скорости. У самой стенки скорость равна нулю, но производная  $\left| \frac{dv}{dx} \right|$  здесь максимальна, то есть быстрота изменения скорости в направлении нормали к стенке велика и, значит, велика сила вязкости. По мере удаления от стенки скорость слоя  $v$  растет, но изменение этой скорости на единицу

расстояния от стенки становится все меньшим и меньшим. Иными словами, убывает производная  $\left| \frac{dv}{dx} \right|$  и вместе с ней убывает сила вязкости.

Выведем размерность коэффициента вязкости  $\eta$  из формулы (1):

$$[\eta] = \frac{H}{\frac{m/c}{m} \cdot m^2} = \frac{H \cdot c}{m^2} = \frac{кг}{c \cdot м} = Па \cdot c.$$

В СИ за единицу  $\eta$  принимается вязкость такой среды, в которой на площадь слоя в  $1 \text{ м}^2$  действует сила внутреннего трения в  $1 \text{ Н}$  при градиенте скорости, равном  $1 \text{ с}^{-1}$ .

Вязкость среды зависит от ее температуры. Интересно отметить, что у газов она при нагревании возрастает, а у жидкостей уменьшается. Это указывает на то, что природа внутреннего трения в газах и жидкостях различна.

### *3. Метод исследования и описание установки.*

#### *3.1. Определение коэффициента вязкости газа.*

Установка для определения коэффициента вязкости воздуха (рис. 2) состоит из U-образной стеклянной трубки постоянного по всей длине сечения, левое колено которой сообщается с атмосферой, а правое снабжено двумя кранами. Кран  $K_1$  подключает к правому колену капилляр  $Q$ , а кран  $K_2$  соединяет это колено с атмосферой. Трубка заполнена жидкостью (водой) настолько, что ее уровень  $00$  при равенстве давлений воздуха в обоих коленах устанавливается примерно посередине левого колена. На установке имеется шкала  $T$ , предназначенная для измерения уровня жидкости в левом колене.

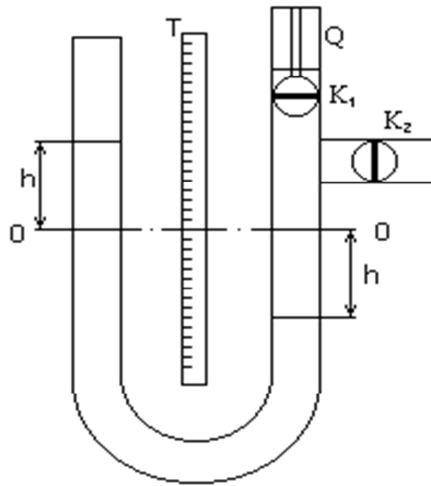


Рис.2. Принципиальная схема установки.

Для определения коэффициента вязкости, (или коэффициента внутреннего трения), используется закон Пуазейля. Согласно этому закону скорость протекания объема  $dV$  жидкости или газа через поперечное сечение трубы (капилляра) за единицу времени  $t$  пропорциональна перепаду давления ( $P_1 - P_2$ ) на концах трубы длиной  $L$  (Рис. 3), пропорциональна четвертой степени радиуса капилляра  $r$  и обратно пропорциональна коэффициенту вязкости  $\eta$ :

$$\left| \frac{dV}{dt} \right| = \frac{(P_1 - P_2) \pi r^4}{8 \eta L} \quad (2)$$

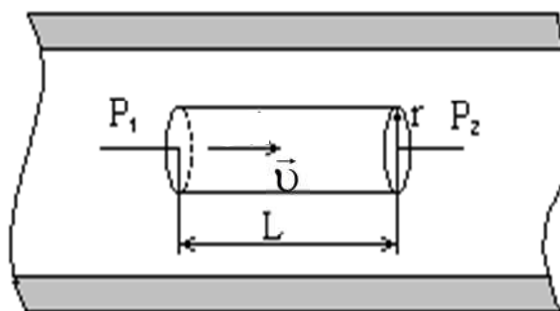


Рис.3. Цилиндрический объем газа радиусом  $r$  и длиной  $L$ .

Если каким-либо образом создать повышенное давление воздуха в правом колене и выпускать его, то разность давлений ( $P_1 - P_2$ ) (в формуле (2)) равна

гидростатическому давлению столба жидкости высотой  $2h$ , где  $h$  – отклонение уровней жидкости в обоих коленах от равновесного  $00$ , то есть:

$$(P_1 - P_2) = 2\rho gh, \quad (3)$$

где:  $\rho$  – плотность жидкости.

Объем воздуха, протекающий через капилляр, можно определить по перемещению уровня жидкости:

$$dV = - Sdh, \quad (4)$$

где:  $S$  – площадь сечение трубки, а знак "-" означает, что объем вытекающего воздуха растет с уменьшением  $h$ .

Подставив выражения для  $(P_1 - P_2)$  и  $dV$  в уравнение (2), получим дифференциальное уравнение, решение которого есть:

$$h = h_0 e^{-\frac{\pi r^4 \rho g}{4\eta L S} t} = h_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5)$$

где:  $h_0$  – уровень жидкости в начальный момент времени;

$\tau$  – постоянная времени процесса:

$$\tau = \frac{4\eta L S}{\pi r^4 \rho g}. \quad (6)$$

Из (5) видно, что величина  $h$  экспоненциально убывает во времени. Постоянная времени  $\tau$  характеризует скорость этого убывания: за промежуток времени, равный  $\tau$ , величина  $h$  уменьшается в  $e = 2,72$  раза (основание натурального логарифма).

Таким образом, если экспериментально определить величину  $\tau$  и знать параметры установки ( $r, L, S, \rho$ ), то можно вычислить величину коэффициента вязкости воздуха  $\eta$ :

$$\eta = \frac{\pi r^4 \rho g \tau}{4 L S} \quad (7)$$

Эта формула является рабочей формулой для расчета  $\eta$ .

Наилучший способ определения постоянной времени  $\tau$  – получение экспериментальной зависимости  $h$  от времени. Логарифмируя выражение (5), имеем:

$$\ln h = \ln h_0 - \frac{t}{\tau}, \quad (8)$$

Зависимость  $\ln h$  от времени  $t$  есть линейная функция, а график ее – прямая линия с угловым коэффициентом  $-\frac{1}{\tau}$ , который можно определить графически:

$$y = ax + b, \quad y = \ln h, \quad x = t, \quad a = -\frac{1}{\tau}, \quad b = \ln h_0. \quad (9)$$

Постоянная времени  $\tau$  определяется через угловой коэффициент  $a$  из (9) по формуле:

$$\tau = -\frac{1}{a} \quad (10)$$

### 3.2. Определение диаметра молекулы воздуха.

В идеальном газе величина коэффициента вязкости  $\eta$  определяется формулой (11):

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \langle v_m \rangle, \quad (11)$$

где:  $\rho$  – плотность газа;

$\langle \lambda \rangle$  – средняя длина свободного пробега молекул;

$\langle v_m \rangle$  – средняя скорость теплового движения молекул (средняя арифметическая скорость).

Величины, входящие в формулу (11) рассчитываются через температуру  $T$  и давление  $P$  следующим образом:

$$\rho = \frac{\mu P}{RT}, \quad \langle v_m \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}, \quad \langle \lambda \rangle = \frac{KT}{\sqrt{2}\pi d^2 P} \quad (12)$$

где:  $R$  – универсальная газовая постоянная (8,31 Дж/моль·К);

$k$  – постоянная Больцмана ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);

$\mu$  – молярная масса газа (в данной работе молярная масса воздуха,  $\mu = 29,0 \cdot 10^{-3}$  кг/моль);

$d$  – диаметр молекулы газа.

Учитывая, что постоянная Больцмана  $k = \frac{R}{N_A}$ , (где  $N_A$  – число Авогадро,  $6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>), после подстановок в уравнение (11) величин уравнения (12) и выражение для  $k$ , находим диаметр молекулы воздуха  $d$ :

$$d = \left( 1,4 \cdot 10^{-2} \frac{\mu k T}{N_A \eta^2} \right)^{1/4} \quad (13)$$

Эта формула является рабочей формулой для расчета  $d$ .

#### 4. Порядок выполнения работы

4.1. Открыть краны  $K_1$  и  $K_2$  (рис. 2) и определить уровень воды в обоих коленах  $H_o$ . Записать в таблицу.

4.2. При открытых кранах  $K_1$  и  $K_2$  поднять уровень воды в левом колене при помощи груши до максимально возможного значения  $h_{max}$ . Для этого сжать резиновую грушу, плотно ввести ее в верхнее отверстие левого колена и плавно разжать. Следите, чтобы вода не попала в грушу, так как это изменит значение  $H_o$ . Закрыть  $K_1$  и  $K_2$ .

4.3. При помощи крана  $K_1$  несколько понизить (на 1 – 2 см) уровень воды в левом колене по сравнению с  $h_{max}$ . Записать это значение как  $h_o$ .

4.4. Открыв кран  $K_1$ , при помощи секундомера определить момент времени, когда уровень понизится на 2 см. Записать в таблицу значения  $h_1 = (h_o - 2) - H_o$  и  $t_1$ .

4.5. Вновь установить в левом колене столб жидкости высотой  $h_o$  и, открыв кран  $K_1$ , измерить время  $t_2$ , когда уровень понизится на 4 см. Записать в таблицу значения  $h_2 = (h_o - 4) - H_o$  и  $t_2$ .

4.6. Повторить процедуру измерений времени, когда уровень будет снижаться на 6, 8, 10, 12 см, т.е. рассчитать

$$h_i = (h_0 - i) - H_0,$$

где  $i = 2, 4, 6, 8, 10, 12$  см.

Таблица

№	$H_0$ , см	$H_0$ , см	$i$ , см	$h_i$ , см	$\ln h_i$	$t$ , с

### 5. Обработка результатов измерений.

5.1. По результатам измерений заполнить таблицу и построить график зависимости  $\ln h = f(t)$ .

Точки на графике должны быть указаны с соответствующими погрешностями  $\Delta(\ln h)$  и  $\Delta t$ . Определить  $\Delta h$  как погрешность результата прямого измерения, а затем  $\Delta(\ln h)$  определяется как погрешность результата косвенного измерения. Погрешность  $\Delta t$  определяется как погрешность результата прямого измерения.

5.2. Пользуясь методом графической обработки, определить из графика  $\ln h = f(t)$  угловой коэффициент  $a$  и  $\Delta a$ , а затем вычислить по формуле (10) постоянную времени процесса  $\tau$  и  $\Delta \tau$ . При этом,  $\Delta \tau$  определяется как погрешность результата косвенного измерения.

5.3. Рассчитать коэффициент вязкости воздуха  $\eta$  по формуле (7) и  $\Delta \eta$ ,

где:  $r$  – радиус капилляра,  $r = (1,24 \pm 0,03) \cdot 10^{-4}$  м;

$\rho$  – плотность воды,  $\rho = (998,0 \pm 0,5)$  кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;

$L$  – длина капилляра,  $L = (1,63 \pm 0,01) \cdot 10^{-2}$  м;

$S$  – площадь поперечного сечения трубки,  $S = (1,28 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>.

5.4. Рассчитать диаметр молекулы воздуха  $d$  по формуле (13) и  $\Delta d$ ,

6. *Контрольные вопросы.*

6.1. Сформулируйте закон Ньютона для внутреннего трения.

6.2. Дайте определение напряжению вязкости.

6.3. Каков физический смысл коэффициента вязкости?

6.4. Как зависит коэффициент вязкости газа от температуры?

6.5. Как зависит коэффициент вязкости от давления газа?

6.6. Сформулируйте закон Пуазейля.

6.7. Что такое ламинарное течение газа?

6.8. Что такое средняя длина свободного пробега молекулы газа? От чего она зависит?



ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ  
СТОКСА

1. *Задача работы.*

1.1. Измерение коэффициента вязкости жидкости.

2. *Предварительные сведения.*

Вязкость, или внутреннее трение – это свойство текучих тел (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой.

Более детально механизм возникновения вязкости описан в работе № 147. В основном, причины вязкости в жидкостях аналогичны причинам вязкости в газах. Однако есть и специфика, обусловленная тем, что расстояние между молекулами в жидкости много меньше, чем в газе. Проявляющиеся при этом силы межмолекулярного взаимодействия ограничивают подвижность молекул. В жидкости молекула может проникнуть в соседний слой лишь при образовании в нем полости, достаточной для перескакивания туда молекулы. На образование полости затрачивается энергия, которая уменьшается с ростом температуры и понижением давления. В этом состоит одна из причин резкого снижения вязкости жидкостей с повышением температуры и роста ее при высоких давлениях.

Основной закон вязкого течения был установлен Ньютоном:

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

где:  $F$  – касательная (тангенциальная) сила, вызывающая сдвиг слоев жидкости (газа) друг относительно друга (см. предварительные сведения к работе № 147);

$S$  – площадь слоя, по которому происходит сдвиг;

$$\frac{d\upsilon}{dx} \vec{F} = -6\pi\eta r \vec{v} - \text{быстрота изменения скорости течения от слоя к слою}$$

(градиент скорости течения);

$\eta$  – коэффициент пропорциональности (греческая буква "эта"), называется коэффициентом вязкости. Он характеризует сопротивление жидкости (газа) смещению ее слоев. В системе СИ единицей вязкости является Па·с .

В условиях установившегося ламинарного течения (при параллельном перемещении слоев) при постоянной температуре вязкость газов и жидкостей является постоянной величиной. Она не зависит от градиента скорости. При температуре 20 °С вязкость кислорода равна  $2,02 \cdot 10^{-5}$  Па·с, воды –  $1,002 \cdot 10^{-3}$  Па·с, глицерина – 1,5 Па·с. Вязкость жидкостей зависит от химической структуры молекул, температуры и давления.

В случае движения в жидкости тел сферической формы (шаров) закон Ньютона преобразуется к виду:

$$\vec{F} = -6 \pi \eta \vec{v}, \quad (1)$$

где:  $r$  – радиус шара;

$\vec{v}$  – скорость его движения.

Формула (1) носит название закона Стокса. Закон получен в предположении, что:

- 1) скорость движения шарика достаточно мала, а обтекание является ламинарным,
- 2) скольжение жидкости на границе соприкосновения шарика со средой отсутствует,
- 3) шарик твердый и не деформируется,
- 4) радиус шарика велик по сравнению с длиной свободного пробега молекулы жидкости.

При падении такого шарика в вязкой среде на него действуют три силы: сила тяжести, выталкивающая сила (сила Архимеда) и сила Стокса. Уравнение движения шарика запишется в виде:

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho - \rho_o) g - 6\pi \eta v r, \quad (2)$$

где:  $\rho$  и  $\rho_o$  - плотности шарика и жидкости соответственно.

В начальный момент после погружения шарика ускорение шарика близко к ускорению свободного падения, шарик движется с возрастающей скоростью. При этом возрастает сила сопротивления, а, значит, уменьшается ускорение. С некоторого момента времени шарик движется равномерно с постоянной скоростью  $v_o$  (т.е.  $a = \frac{dv}{dt} = 0$ ). При этих условиях:

$$\frac{4}{3} \pi r^3 (\rho - \rho_o) g - 6\pi \eta v_o r = 0$$

Тогда, выразив скорость  $v_o$  через пройденный путь и время, можно получить рабочую формулу для определения коэффициента вязкости:

$$\eta = \frac{g d^2 (\rho - \rho_o) t}{18S} \quad (3)$$

где:  $g$  – ускорение свободного падения ( $g = 9,80 \text{ м/с}^2$ );

$d$  – диаметр шарика;

$S$  – путь, пройденный шариком при падении;

$t$  – время падения шарика.

### 3. Описание установки.

Экспериментальная установка представляет собой прозрачный цилиндр с делениями, нанесенными через 10 см. Цилиндр заполнен исследуемой вязкой жидкостью (маслом). Шарик – свинцовая дробинка.

### 4. Порядок выполнения работы.

4.1. Определите диаметр шарика  $d$  с помощью штангенциркуля. Результаты измерений занесите в таблицу.

4.2. Определите путь  $S$ , который должен пройти шарик (постоянная скорость шарика устанавливается уже к отметке "0"). Рекомендуется расстояние  $S$  взять равным 70 – 80 см.

4.3. Измерьте время  $t$  прохождения шариком выбранного пути: шарик закладывается в желобок, нанесенный на крышке, прикрывающей цилиндр, откуда он скатывается к оси цилиндра и падает в масло. Секундомер включают в тот момент, когда шарик проходит отметку "0", и останавливают его, когда шарик проходит последнюю выбранную отметку.

4.4. Опыт повторите 5 раз с разными шариками.

Данные занести в таблицу.

Плотность вещества шарика и жидкости указаны на установке.

Таблица

№	d, мм	t, с	S, см	$\eta$ , Па·с
1				
2				
3				
4				
5				
				$\langle \eta \rangle$

5. *Обработка результатов измерений.*

5.1. По результатам каждого опыта по формуле (3) вычислите коэффициент вязкости жидкости  $\eta_i$  ( $i$  – номер опыта).

5.2. Рассчитайте среднее арифметическое значение коэффициента вязкости  $\langle \eta \rangle$ .

5.3. Рассчитайте систематические погрешности результатов всех прямых измерений:  $\Delta d = \Theta(d)$ ,  $\Delta t = \Theta(t)$ ,  $\Delta S = \Theta(S) = 1,1h$ . ( где  $h$ - предельная приборная погрешность). Определите погрешности табличных величин  $\Delta g$ ,  $\Delta \rho_0$ ,  $\Delta \rho$ .

5.4. По формуле для вычисления погрешности косвенного измерения рассчитайте абсолютную погрешность  $\Delta \eta$ . Для расчета  $\Delta \eta$  и для записи окончательного результата используйте данные опыта, по которым значение  $\eta_i$  наиболее близко к  $\langle \eta \rangle$ .

*6. Контрольные вопросы.*

6.1. Каковы причины возникновения сил внутреннего трения в жидкости?

6.2. Запишите и объясните формулу Ньютона.

6.3. Каков физический смысл коэффициента вязкости?

6.4. От каких параметров зависит коэффициент вязкости?

6.5. Запишите закон Стокса и сформулируйте условия его выполнения.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №159

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ С МАЛОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ

#### 1. Задача работы.

##### 1.1. Определение коэффициента теплопроводности твердых тел.

#### 2. Предварительные сведения.

Если в твердом теле существует разность температур между различными его частями, то возможен перенос тепла от более нагретой к менее нагретой области. Процесс переноса тепла называется теплопроводностью. Количественно переноса тепла в твердом теле описывается законом Фурье:

$$\delta Q = \chi \frac{T_1 - T_2}{|x_1 - x_2|} S \tau \quad (1)$$

где:  $T_1 - T_2$  – разность температур двух параллельных поверхностей твердого тела, отстоящих друг от друга на расстоянии  $(x_1 - x_2)$  и перпендикулярных потоку тепла. Отношение  $\frac{T_1 - T_2}{|x_1 - x_2|}$  называется градиентом температуры (grad T). Градиент какой-либо величины численно равен изменению этой величины, отнесенному к единице длины расстояния, на котором это изменение происходит;

$S$  – площадь сечения, через которое переносится тепло;

$\tau$  – время, в течение которого переносится теплота  $\delta Q$ ;

$\chi$  – коэффициент теплопроводности.

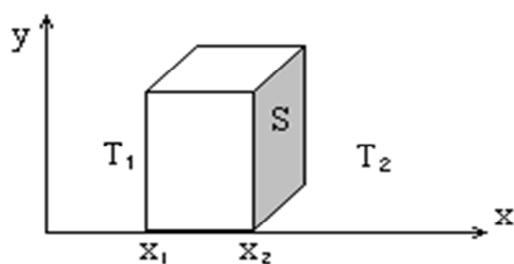


Рис. 1.

На рис. 1 изображено твердое тело, поверхности которого имеют разную температуру  $T_1$  и  $T_2$ . Тепло переносится вдоль оси  $x$ .

Формула (1) справедлива лишь для установившегося процесса, при котором градиент температур постоянен во времени. Из формулы (1) следует физический смысл коэффициента теплопроводности:

$$\chi = \frac{\delta Q |x_1 - x_2|}{(T_1 - T_2) S \tau} \quad \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{м} \cdot \text{с}} \right].$$

Коэффициентом теплопроводности называется величина, равная количеству тепла, протекающего через нормально расположенную к потоку тепла единичную площадку за единицу времени при градиенте температуры равном единице.

Количество тепла, попавшее в калориметр ( $\delta Q$ ) можно определить по известному уравнению:

$$\delta Q = cm\Delta T, \quad (2)$$

где:  $c$  – удельная теплоемкость среды, принимающей тепло;

$m$  – масса среды;

$\Delta T$  – приращение температуры в калориметре.

Сравнивая (1) и (2), получим:

$$cm\Delta T = \chi \frac{(T_1 - T_2)}{|x_1 - x_2|} S \tau,$$

или

$$cmL \frac{\Delta T}{T_1 - T_2} = \chi S \tau \quad (3)$$

где:  $L = |x_1 - x_2|$  – толщина тела.

Если рассматривать перенос тепла за бесконечно малый интервал времени  $d\tau$ , то изменение температуры будет  $dT$  и формула (3) примет вид:

$$cmL \frac{dT}{T_1 - T_2} = \chi S d\tau \quad (4)$$

Можно взять  $T_1$  постоянной, например, температуру паров кипящей воды, тогда  $T_2$  – температура противоположной поверхности тела, которая меняется в течение времени наблюдений.

Если температура тела  $T_2$  изменилась за время  $\tau$  от  $T_0$  до  $T$ , то значение коэффициента теплопроводности  $\chi$  можно получить, интегрируя уравнение (4):

$$cmL \int_{T_0}^T \frac{dT_2}{T_1 - T_2} = \chi S \int_0^\tau d\tau,$$

$$-cmL \ln(T_1 - T_2) \Big|_{T_0}^T = \chi S \tau,$$

откуда:

$$cmL \ln \frac{T_1 - T_0}{T_1 - T} = \chi S \tau,$$

или:

$$\ln(T_1 - T_0) = \ln(T_1 - T) + \tau \frac{\chi S}{cmL} \quad (5)$$

Выражение  $\frac{\chi S}{cmL}$  для данной установки величина

$\ln(T_1 - T) = \ln(T_1 - T_0) - \beta \tau$  постоянная. Введя обозначение:

$$\frac{\chi S}{cmL} = \beta \quad (6)$$



получим:

$$\ln(T_1 - T) = \ln(T_1 - T_0) - \beta \tau \quad (7)$$

В момент времени  $\tau = 0$ ,  $T = T_0$  и, поэтому,  $\ln(T_1 - T) = \ln(T_1 - T_0)$ .

Из формулы (7) видно, что зависимость натурального логарифма  $\ln(T_1 - T)$  от времени  $\tau$  (рис.2) представляет прямую  $y = ax + b$ , где:

$$y = \ln(T_1 - T), \quad x = \tau, \quad a = -\beta, \quad b = \ln(T_1 - T_0).$$

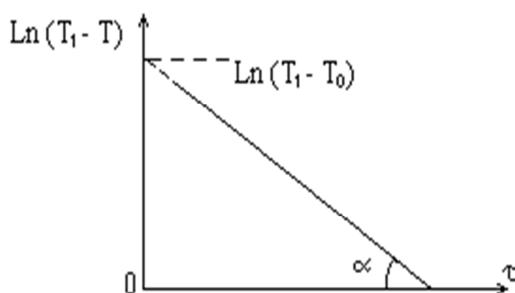


Рис. 2.

Из выражения (7) и рис. 2, пользуясь методом графической обработки, из графика линейной зависимости  $\ln(T_1 - T) = f(\tau)$ , можно определить угловой коэффициент  $a$  и его погрешность  $\Delta a$ :

$$a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{\ln(T_1 - T) - \ln(T_1 - T_0)}{\tau} \quad (8)$$

Учитывая, что  $a = -\beta$ ,  $\Delta a = \Delta \beta$  и что нагревается в процессе теплопроводности не только вода, но и calorimeter (его удельная теплоемкость  $c_l$ , масса  $m_l$ , площадь поверхности диска  $S = \frac{\pi d^2}{4}$ ), уточним формулу (6):

$$\chi = \frac{4\beta(c m + c_1 m_1)L}{\pi d^2} \quad (9)$$

Эта формула является рабочей формулой для расчета коэффициента теплопроводности  $\chi$ .

Зная толщину диска  $L$ , площадь его поверхности  $S$  и температуру воды  $T_0$  в калориметре до нагревания и температуру  $T$  через время  $\tau$  после начала нагревания, можно построить график зависимости  $\ln(T_1 - T)$  от времени  $\tau$  (рис. 2). Из графика можно определить угловой коэффициент  $a$  и далее определяем  $\beta$ , а затем вычисляем коэффициент теплопроводности  $\chi$ .

### 3. Метод исследования и описание установки.

Количество тепла  $\delta Q$ , протекающее через тело, можно определить калориметрически. Действительно, если один конец тела будем нагревать, а другой поместим в калориметр (рис. 3), тогда, вследствие теплопроводности, жидкость в калориметре будет нагреваться и за какое-то время  $\tau$  ее температура увеличится на  $\Delta T$ .

Схема установки представлена на рис. 3. Пар из сосуда М через трубку Z непрерывно поступает в сосуд С, благодаря чему температура стенок сосуда  $T_1$  остается постоянной, равной  $100\text{ }^\circ\text{C}$  с того момента, когда из сосуда С начинает выходить пар.

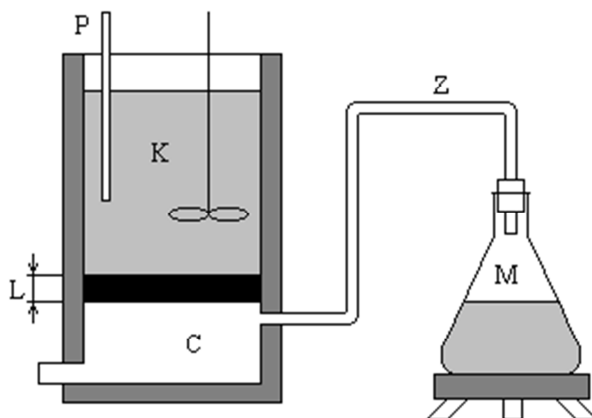


Рис.3. Схема установки.

На крышку сосуда С кладется диск из исследуемого материала толщиной  $L$ , на него ставится металлический стакан (калориметр) К с водой. Изменение температуры воды в калориметре фиксируется термометром Р.

### 4. Порядок выполнения работы.

4.1. Налить приблизительно 100 мл воды в калориметр, предварительно определив ее массу  $m$ . Для этого предлагается мерный цилиндр, масса воды в цилиндре составит  $m = (100 \pm 5)$  г.

4.2. Измерить штангенциркулем 4 – 5 раз в разных местах толщину  $L$  и диаметр  $d$  диска.

4.3. Включить электроплитку. Заметить время, когда из сосуда С начнет выходить пар и измерить температуру воды  $T_0$ .

4.4. Через каждые 5 минут в течение 30 минут отмечать температуру воды  $T$  в калориметре.

4.5. Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1

№	$\tau$ , с	$\Delta\tau$ , с	$t$ , С <sup>0</sup>	$t_0$ , С <sup>0</sup>	$m$ , г	$L$ , мм	$L$ , м	$d$ , мм	$d$ , м

4.6. Масса калориметра  $m_1$ , теплоемкость воды  $c$  и калориметра  $c_1$  приведены на установке.

## 5. Обработка результатов измерений.

5.1. По результатам измерений заполнить таблицу 2.

№	$\tau, \text{с}$	$(T_1 - T), \text{°C}$	$\ln(T_1 - T)$

5.2. Построить график зависимости  $\ln(T_1 - T)$  от времени  $\tau$ . Не забудьте, что точки на графике должны быть указаны с соответствующими погрешностями  $\Delta(\ln(T_1 - T))$  и  $\Delta\tau$ . Для этого необходимо определить абсолютные погрешности  $\Delta T$ ,  $\Delta T_1$  и  $\Delta\tau$ , как погрешности результата прямого измерения, а погрешность  $\Delta(\ln(T_1 - T))$ , как погрешность косвенного измерения.

5.3. Пользуясь методом графической обработки, определить из графика линейной зависимости  $\ln(T_1 - T) = f(\tau)$  угловой коэффициент  $a$  и его погрешность  $\Delta a$ .

5.4. Определить  $\beta = -a$  и  $\Delta\beta$ .

5.5. По формуле (9) вычислить коэффициент теплопроводности  $\chi$ .

5.6. Вычислить абсолютную погрешность  $\Delta\chi$  (необходимые для этих расчетов значения величин  $\Delta c$ ,  $\Delta c_1$  и  $\Delta m_1$  определяются как погрешности табличных величин).

6. *Контрольные вопросы.*

6.1. Сформулируйте законом Фурье и физический смысл коэффициента теплопроводности.

6.2. Какие механизмы теплопроводности вы знаете?

6.3. Каковы особенности явления теплопроводности в металлах по сравнению с теплопроводностью в диэлектриках?

## Литература

### а) основная литература:

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. Книги 1-5. – М.: Наука. Физматлит. 2009.
2. *Трофимова Т.И.* Курс физики: Учеб. пособие для вузов. – 7-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2008.
3. *Фриш С.Э., Тиморева А.В.* Курс общей физики. Книги 1-3. – М.: Лань-Трейд. 2006.
4. *Волькенштейн В.С.* «Сборник задач по общему курсу физики» – 2005.
5. К.Б. Канн. Курс общей физики: Учебное пособие - М.: КУРС: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 360 с. Учебное пособие ЭБС Znanium.com (<http://znanium.com>).

### б) дополнительная литература:

1. *Бармасов А.В., Холмогоров В.Е.* Курс общей физики для природопользователей. Механика // СПб.: БХВ-Петербург, 2008, 416 с.
2. *Бармасов А.В., Холмогоров В.Е.* Курс общей физики для природопользователей. Колебания и волны // СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 256 с.
3. *Бармасов А.В., Холмогоров В.Е.* Курс общей физики для природопользователей. Молекулярная физика и термодинамика // СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 512 с.
4. *Недзвецкая И.В.* Силы инерции. Конспект лекций – СПб.: Изд. РГГМУ, 2003. - 20 с.
5. *Фокин С.А., Бармасова А.М., Мамаев М.А.* Обработка результатов измерений физических величин. Учебное пособие для лабораторного практикума по физике. - СПб.: Изд. РГГМУ, 2009. – 62 с.

### в) Интернет-ресурсы:

1. <http://pskgu.ru/ebooks/okphysikc.html> Учебные пособия по общей физике.
2. <http://lectoriy.mipt.ru/lecture?category=Physics&lecturer> Видеолекции и открытые образовательные материалы ФизТеха. Лекции по Физике.

3. <http://feynmanlectures.caltech.edu/>- The Feynman Lectures on Physics
4. <http://pskgu.ru/ebooks/tf.html> . Теоретическая Физика.
5. <http://physics.nad.ru/> - физика в анимациях
6. <http://dmitryukts.narod.ru/kopilka/video.html>- опыты по физике.

*Учебное издание*

Лабораторный практикум по дисциплине «Физика».

Разделы: Механика и молекулярная физика.

I и II курсы

*Авторы:* А.П. Бобровский, Биненко В.И., Н.В. Дьяченко, В.В. Косцов,  
Е.Ю. Михтеева, И.А. Потапова, А.Л. Скобликова,  
В.Г. Сыромятников, П.П. Хлябич, Т.Ю. Яковлева.

*Печатается в авторской редакции.*

Подписано в печать 13.10.2020. Формат 60×90 1/16.  
Гарнитура Times New Roman. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 4. Тираж 75 экз. Заказ № 899.  
РГГМУ, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская, 79.