

М 1432

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
... РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

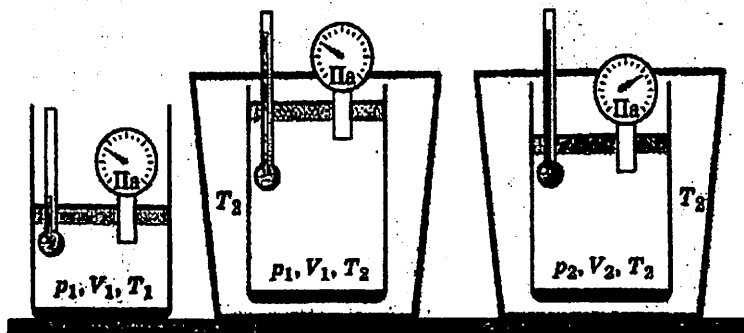
ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ ИМЕНИ МУХАММАДА АЛЬ-ХОРАЗМИЙ

КАФЕДРА ФИЗИКИ

Методическое пособие по выполнению лабораторных  
работ на многомодульном лабораторном устройстве  
по физике

МЕХАНИКА.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА



Ташкент – 2023

**Авторы: К.П.Абдурахманов, Х.М.Холмедов,  
Н.А.Ахмедова, У.Х.Тахиров**

**Механика. Молекулярная физика. Методическое пособие по выполнению лабораторных работ на многомодульном лабораторном устройстве по физике. – Ташкент: ТУИТ имени Мухаммада аль-Хоразмий. 2023 г. – стр. 80**

Данное методическое пособие разработано на основе учебной программы предмета «Физика 1» для студентов 1-курса бакалавриата Ташкентского Университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий, в ней представлены: темы лабораторных работ, цель работы, необходимое оборудование, краткие теоретические сведения, порядок выполнения работы, необходимые формулы и понятия для выполнения математических расчётов, а также таблицы для ввода данных. Также представлены вопросы по теоретическому материалу, а также список литературы для самостоятельного изучения.

Данное методическое пособие предназначено для студентов первого курса всех направлений бакалавриата ТУИТ имени Мухаммада ал-Хоразмий, а также может быть использовано студентами других технических ВУЗов.

Методическое пособие рекомендовано к публикации на заседании совета ТУИТ имени Мухаммада ал-Хоразмий (протокол № 7 (164) от 29.03.2023 г).

**Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада аль - Хоразмий, 2023**

**Лабораторная работа № 1**  
**- ИЗУЧЕНИЕ КИНЕМАТИКИ И ДИНАМИКИ**  
**ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ**  
**МАЯТНИКА ОБЕРБЕКА**

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящей работе на примере крестообразного маятника (маятника Обербека) изучаются основные кинематические закономерности равноускоренного вращательного движения.

**1. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ**

Вращение - частный вид движения тел, при котором их отдельные - *осевые* - точки в некоторой системе отсчёта остаются неподвижными, а все остальные движутся по окружностям разных радиусов, поворачиваясь вокруг оси за одинаковое время на один и тот же угол. *Зависимость угла поворота  $\varphi$  неосевых точек, а, значит, всего твёрдого тела от времени  $t$ , исчисляемого от начала отсчёта углов,*

$$\varphi = \varphi(t) \quad (1.1)$$

называют *кинематическим уравнением вращения тела.*

Быстрота вращения характеризуется *угловой скоростью.* Функция угловой скорости  $\omega$  находится из уравнения вращения (1.1) как первая производная по времени:

$$\omega(t) = \frac{d\varphi}{dt} \quad (1.2)$$

MUSHAMMAD ALI YUSUF NOMID, 83  
TOSHIKENT A'LBOROT  
TEKNOLOGIYALARI UNIVERSITETI

В общем случае вращения  $\omega$  - изменяющаяся во времени величина, и если это так, то вращение называют переменным – *ускоренным*. Если же производная (1.2) - постоянное число, то вращение называют *равномерным*. Переменное вращение характеризуют величиной *углового ускорения*  $\varepsilon$ , которое находят как первую производную от функции угловой скорости (1.2), или как вторую производную от (1.1):

$$\varepsilon(t) = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}. \quad (1.3)$$

Физический смысл углового ускорения - быстрота изменения угловой скорости во времени.

Угловое ускорение при сложном характере вращения также является функцией времени, но если  $\varepsilon$  оказывается постоянным, то вращение называют *равноускоренным* ( $\varepsilon > 0$ ) или *равнозамедленным* ( $\varepsilon < 0$ ).

В данной работе изучается равноускоренное вращение. Представляя (1.3) в виде  $d\omega(t) = \varepsilon \cdot dt$  и интегрируя это выражение, имеем:

$$\int d\omega(t) = \omega(t) = \int \varepsilon \cdot dt = \varepsilon t + C_1.$$

Если в начале отсчёта времени ( $t = 0$ ) тело вращалось с угловой скоростью  $\omega_0$ , то  $\omega_0 = \varepsilon \cdot t + C_1 = \varepsilon \cdot 0 + C_1$ , т.е.  $C_1 = \omega_0$ , и, значит, уравнение угловой скорости при равнопеременном вращении приобретает вид:

$$\omega(t) = \varepsilon \cdot t + \omega_0. \quad (1.4)$$

Представим (1.2) в виде:  $d\varphi(t) = \omega(t) \cdot dt = (\varepsilon \cdot t + \omega_0) dt$ .

Интегрируя это выражение, имеем:  $\varphi(t) = \int \omega(t) \cdot dt = \frac{\varepsilon t^2}{2} + \omega_0 t + C_2$ .

Если при  $t=0$  точка тела, названная *меткой*, повернута от начала отсчёта углов на  $\varphi_0$ , то  $C_2 = \varphi_0$ , и уравнение равнопеременного вращения имеет вид:

$$\varphi(t) = \frac{\varepsilon t^2}{2} + \omega_0 t + \varphi_0. \quad (1.5)$$

Если в момент  $t=0$  метку совместить с началом отсчёта углов и начать вращение из положения покоя, то (1.4) и (1.5) предстанут в виде:

$$\omega(t) = \varepsilon \cdot t \quad (1.6)$$

$$\varphi(t) = \frac{\varepsilon t^2}{2}. \quad (1.7)$$

Постоянство углового ускорения  $\varepsilon$  в работе обеспечивается действием неизменного момента силы натяжения нити, приложенной к барабану крестовины уравновешенного *маятника Обербека* (см. рис.3.1).

Точки вращающегося тела имеют одинаковые  $\varphi$ ,  $\omega$  и  $\beta$ , но в зависимости от расстояния  $r$  их до оси, движутся с разными *тангенциальным*  $a_t$ , *нормальным*  $a_n$ , а, значит, и с разным *полным*  $a_o$  ускорениями:

$$a_t = r \cdot \varepsilon, \quad (1.8)$$

$$a_n = \omega^2 r, \quad (1.9)$$

$$a_o = \sqrt{a_t^2 + a_n^2} = r \cdot \sqrt{\varepsilon^2 + \omega^4}. \quad (1.10)$$

## 2. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

В работе необходимо подтвердить неизменность углового ускорения вращающегося тела при действии постоянного момента сил и определить кинематические характеристики (угловые и линейные) вращающегося тела в целом и его отдельных частей.

## 3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка (Рис. 3.1) представляет собой крестообразный маятник (маятник Обербека), смонтированный на основании, содержащем электронный счетчик времени (таймер) заданного числа оборотов. Передняя панель установки (Рис. 3.2) содержит рукоятку выбора числа оборотов, кнопку «Сброс» и шкалу таймера.

1 – Основание, 2 – Винт регулировки, 3 – Привеска, 4 – Спица, 5 – Барабан, 6 – Нить, 7 – Блок, 8 – Стойка, 9 – Грузик.

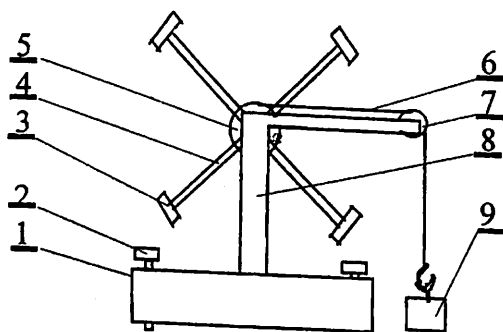
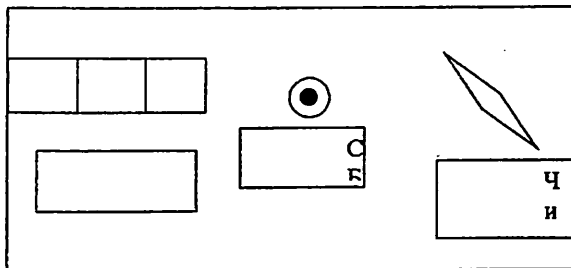


Рисунок 3.1. Схема экспериментальной установки



**Рисунок 3.2. Передняя панель установки**

Таймер запускается импульсом, формируемым оптическим датчиком в момент прохождения спицы между источником света и фотоприемником. Отсчет времени прекращается, когда маятник сделает заданное число оборотов.

#### **4. ЗАДАНИЕ**

**4.1.** Измерить зависимость времени вращения маятника от числа оборотов.

**4.2.** Освоить методики расчётов погрешностей физического опыта.

**4.3.** Проверить соответствие опытной зависимости угла поворота от времени уравнению равноускоренного вращения (1.7).

**4.4.** Определить угловое ускорение крестовины маятника и кинематические характеристики движения привесок по указанию преподавателя.

## 2. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

В работе необходимо подтвердить неизменность углового ускорения вращающегося тела при действии постоянного момента сил и определить кинематические характеристики (угловые и линейные) вращающегося тела в целом и его отдельных частей.

## 3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка (Рис. 3.1) представляет собой крестообразный маятник (маятник Обербека), смонтированный на основании, содержащем электронный счетчик времени (таймер) заданного числа оборотов. Передняя панель установки (Рис. 3.2) содержит рукоятку выбора числа оборотов, кнопку «Сброс» и шкалу таймера.

1 – Основание, 2 - Винт регулировки, 3 – Привеска, 4 – Спица, 5 – Барабан, 6 – Нить, 7 – Блок, 8 – Стойка, 9 - Грузик.

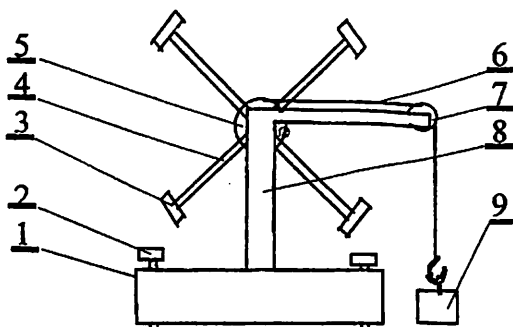
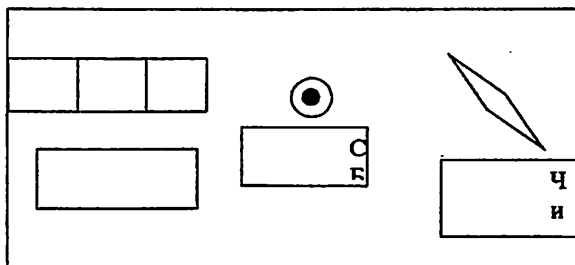


Рисунок 3.1. Схема экспериментальной установки





**Рисунок 3.2. Передняя панель установки**

Таймер запускается импульсом, формируемым оптическим датчиком в момент прохождения спицы между источником света и фотоприемником. Отсчет времени прекращается, когда маятник сделает заданное число оборотов.

#### **4. ЗАДАНИЕ**

4.1. Измерить зависимость времени вращения маятника от числа оборотов.

4.2. Освоить методики расчётов погрешностей физического опыта.

4.3. Проверить соответствие опытной зависимости угла поворота от времени уравнению равноускоренного вращения (1.7).

4.4. Определить угловое ускорение крестовины маятника и кинематические характеристики движения привесок по указанию преподавателя.

## 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

5.1. Ознакомиться с работой таймера. Учесть, что таймер запускается при первом проходе спицы между источником света и фотоприемником.

5.2. Настроить маятник: регулировочными винтами 2 устранить качание основания 1; обеспечить движение грузика 9 до пола; в отсутствие грузика сбалансировать маятник скользящими привесками 3 так, чтобы он оставался неподвижным в любом положении крестовины.

5.3. Придерживая любую спицу непосредственно перед областью фотоприемника, выставить рукоятку числа оборотов на цифру 1 и нажать кнопку «Сброс», после чего отпустить спицу, предоставив маятнику возможность свободно вращаться. После остановки таймера записать его показания в таблицу 5.1.

5.4. Вернуть маятник в исходное состояние и повторить измерения по п. 3. Произвести измерения по п. 3 не менее пяти раз для одного и того же числа оборотов.

5.5. Измерения по пп. 5.3 и 5.4 произвести для числа оборотов от двух до пяти.

**Примечание.** В случае выполнения работы на установке, сопряженной с компьютером, снятие отсчетов времени производить с экрана монитора. Порядок выполнения работы приведен в разделе 6.

**Таблица 5.1. Результаты измерений времени**

Число оборотов		1	2	3	4	5
Угол, рад.		2π	4π	6π	8π	10π
Номер изм..	1					
	2					
	3					
	4					
	5					
Среднее время $\bar{t}$ , с						
$\Delta t$						

## 6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ НА УСТАНОВКЕ, СОПРЯЖЕННОЙ С КОМПЬЮТЕРОМ.

6.1. Включить компьютер.

6.2. Войти в среду «Лаборатория», для чего нажать комбинацию клавиш Ctrl-Alt-Del, ввести имя пользователя "student", нажать "OK". На экране высветится меню.

6.3. Установить указатель мыши на значок «Лаборатория» и нажать дважды на левую кнопку мыши. При этом открывается меню с перечнем работ.

6.4. Выбрать строку с названием работы и щелкнуть мышью. На экране появится стенд.

6.5. Включить питание лабораторной установки выключателем на шнуре питания. При этом на экране загорится лампочка, а надпись «Включите макет» сменится на «Поставьте маятник в исходное положение».

6.6. На передней панели установки установить переключатель «Число оборотов» на цифру 5, обнулить индикатор таймера, нажав «Сброс».

6.7. Установить любую спицу маятника непосредственно перед окном фотоприемника и отпустить ее, предоставив маятнику свободно вращаться. На мониторе в клетках  $N=1$ ,  $N=2$  и т.д. будут записаны времена, за которые маятник сделал один, два и т.д. оборотов.

6.8. На экране монитора установить указатель мыши на кнопку «Запомнить результат», нажать на левую клавишу. Результаты измерений переместятся в таблицу, в которой  $\Delta$  – номер опыта,  $N$  – число оборотов. В левой части экрана появится график зависимости  $N(t)$  для первого опыта. Навести указатель мыши на кнопку «Показать скрытые точки», щелкнуть левой кнопкой. На графике появятся экспериментальные точки.

6.9. Вернуть маятник в исходное положение, показания таймера обнулить. Измерения по пунктам 6.7 – 6.8 повторить пять раз. На экране появятся пять кривых, расположение которых относительно друг друга свидетельствует о наличии или отсутствии систематических погрешностей. Удалить явно выпадающие кривые, для чего выделить мышью соответствующие строки в таблице и щелкнуть мышью по клавише «Удалить результат». После этого повторить измерения.

6.10. Результаты измерений переписать в таблицу 5.1 в рабочей тетради. Обработку результатов проводить в соответствии с требованиями раздела 7.

6.11. Вычисления и построение графиков можно произвести с помощью программы EXCEL. Для этого следует щелкнуть мышью по кнопке «Буфер обмена», находящейся в верхней части экрана, после чего открыть EXCEL и вставить туда результаты из буфера.

## 7. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

7.1. Рассчитать средние значения времени  $\langle t \rangle$  совершения  $N$  оборотов маятника и вписать их в специальную строку таблицы 5.1.

7.2. Построить график экспериментальной зависимости  $\langle t \rangle$  от числа оборотов  $N$ . При построении руководствоваться указаниями, изложенными в [1]. Сделать предварительные выводы о соответствии эксперимента и теории.

7.3. С целью точного установления характера зависимости угла поворота  $\varphi$  от  $t$  нанести экспериментальные точки на график в координатах  $t^2, \varphi$ .

7.4. Рассчитать согласно [2] абсолютные погрешности измерения величины  $t^2$ , для чего сначала рассчитать величины  $(t_i - \langle t \rangle)$  и  $(t_i - \langle t \rangle)^2$ , занести их в Таблицу 7.1 и воспользоваться формулой расчета случайной погрешности величины  $\langle t \rangle$  при многократных измерениях

$$\sigma(\langle t \rangle) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K (t_i - \langle t \rangle)^2}{K(K-1)}} \quad (7.1)$$

где  $K$  – число измерений в неизменных условиях.

После этого для расчета погрешности косвенного измерения использовать выражение

$$\sigma\langle t^2 \rangle = 2\langle t \rangle \sigma\langle t \rangle \quad (7.2)$$

Таблица 7.1. Расчету случайных погрешностей

N	1			2	3, 4, 5, ...
	1	$t_i$	$t_i - \langle t \rangle$	$(t_i - \langle t \rangle)^2$	→ то же
2					
...					
K					
$\langle t \rangle = \bar{t}$	$\Sigma(t_i - \langle t \rangle)^2 =$			→ то же	
$\sigma\langle t_1 \rangle =$				$\sigma\langle t_2 \rangle =$	

7.5. Нанести на график доверительные интервалы для каждого значения  $t^2$ , равные  $\pm \sigma\langle t^2 \rangle$  согласно табл. 7.1 и формулам (7.1) и (7.2). Если удаётся провести прямую через все интервалы, то полагают: *эксперимент соответствует теории в пределах погрешностей*. Если это сделать не удаётся, то необходимо выяснить причину и, по указанию преподавателя, либо устранить ее и повторить измерения, либо ограничиться указанием причин неудачи в выводе по работе.

7.6. Рассчитать угловое ускорение крестовины маятника. Для этого выбрать произвольные (как можно большие) соответствующие друг другу отрезки на осях координат  $\Delta(t^2)$  и  $\Delta(\varphi)$  и, согласно Рис. 7.1, найти угловое ускорение  $\varepsilon$  как

$$\varepsilon = 2a = 2 \cdot \frac{\Delta(\varphi)}{\Delta(t^2)}. \quad (7.3)$$

По указанию преподавателя вычислить иные кинематические характеристики.

7.7. В соответствии с [2] рассчитать для углового ускорения абсолютную  $\sigma(\varepsilon)$  и относительную  $\delta(\varepsilon)$  погрешности.

7.8. Представить итоги измерений в виде:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{рас.}} \pm \sigma(\varepsilon) \text{ (рад/с}^2\text{)}, \delta(\varepsilon) = \% \text{ при } \varphi = \text{рад.}$$

$$\omega = \text{рад/с}, a_{\tau} = \text{м/с}^2, a_n = \text{м/с}^2, a_o = \text{м/с}^2.$$

Пример итога расчёта углового ускорения:  $\varepsilon = (7,2 \pm 0,3) \cdot 10^{-1} \text{ рад/с}^2$ ,  $\delta(\varepsilon) = 3,9 \%$

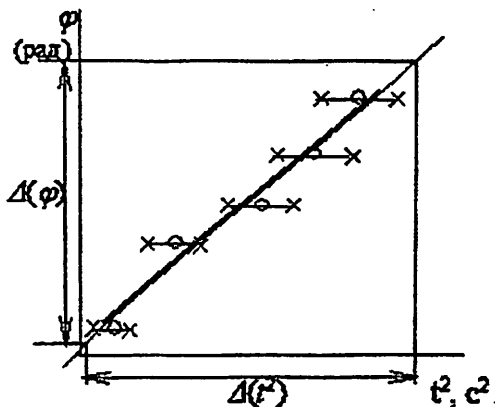


Рисунок 7.1. Зависимость угла поворота от квадрата времени

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

8.1. Какие условия необходимы и достаточны для обеспечения равноускоренного вращения тела.

8.2. Как убедиться в наличии равноускоренного вращения.

**8.3.** Как направлены относительно друг друга угловая скорость и угловое ускорение точки, если линейная скорость уменьшается со временем.

**8.4.** Какое по характеру движение совершает материальная точка, если направление мгновенной скорости  $v$  образует с полным ускорением  $a$  тупой угол.

**8.5.** От каких величин зависит угловое ускорение.

**8.8.** Как снизить погрешность измерения.

**8.9.** Какое движение тела называется вращательным.

**8.10.** Как направлены относительно друг друга угловая и линейная скорости материальной точки совершающей вращательное движение.

**8.11.** Запишите уравнения устанавливающие связь между линейными и угловыми характеристиками для материальной точки совершающей вращательное движение.



## Лабораторная работа № 2

### ИЗУЧЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ ФИЗИЧЕСКОГО МАЯТНИКА НА ПРИМЕРЕ МАЯТНИКА ОБЕРБЕКА

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование колебаний физического маятника на примере маятника Обербека, установление зависимости частоты колебаний от момента инерции маятника, а также определение момента инерции маятника без привесок.

#### 2. ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Любое твердое тело, совершающее колебания относительно оси, жестко связанной с телом, называется физическим маятником. В нашем случае роль физического маятника выполняет несимметричный маятник Обербека, момент инерции которого относительно оси колебаний складывается из момента инерции стержней и барабана, а также моментов инерции привесок. Для записи уравнения колебаний обратимся к рисунку 2.1, где  $I$  – момент инерции маятника вместе с привесками относительно оси колебаний,  $\theta$  – угол отклонения от положения равновесия,  $M$  – момент силы, возвращающей маятник в положение равновесия,  $r_1 \div r_4$  – расстояния до оси вращения от центров масс 1÷4 привесок соответственно.

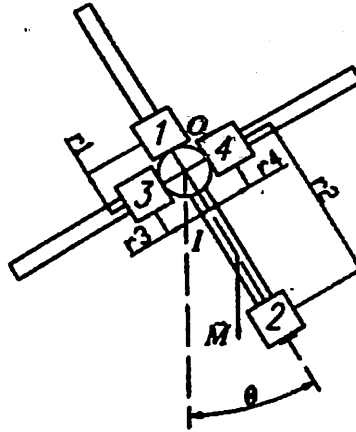


Рисунок 2.1. Физический маятник

С учетом введенных обозначений уравнение колебаний маятника примет вид

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = -M. \quad (2.1)$$

Момент силы  $M$  представляет собой сумму моментов сил тяжести всех привесок. В случае симметричного расположения привесок 3 и 4 он может быть определен как

$$M = mg(-r_1 + r_2) \sin \theta, \quad (2.2)$$

где  $m$  - масса одной привески.

Для малых  $\theta$  уравнение (2.1) преобразуется в

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{mg}{I} (r_2 - r_1) \theta = 0. \quad (2.3)$$

Решением этого уравнения являются гармонические колебания

$$\theta = \theta_0 \cos \omega t, \quad (2.4)$$

где  $\theta_0$  - амплитудное значение угла отклонения,

$$\omega = \sqrt{\frac{mg(r_2 - r_1)}{I}}. \quad (2.5)$$

Выражение (2.4) лишь приближенно описывает происходящие колебания, поскольку не учитывает затухание, влияющее как на уменьшение со временем амплитуды колебаний, так и на их частоту. Вместе с тем, в условиях настоящего эксперимента измерения амплитуды не производятся, а отклонением частоты от

$\omega = \sqrt{\frac{mg(r_2 - r_1)}{I}}$  можно пренебречь, ввиду малости затухания. Таким образом, можно считать, что выражение (2.5) достаточно точно связывает частоту колебаний с параметрами маятника.

Обозначим через  $r = r_3 = r_4$  расстояние от пружин до оси колебаний. Тогда формула (2.5) может быть переписана

$$\omega^2 = \frac{mg(r_2 - r_1)}{I_0 + m(r_1^2 + r_2^2) + 2mr^2}, \quad (2.6)$$

где  $I_0$  – момент инерции маятника без пружин.

Введя обозначение  $I_1 = I_0 + m(r_1^2 + r_2^2)$ ,  $r_2 - r_1 = l$ , и разрешая (2.6) относительно периода  $T$ , получаем рабочую формулу

$$T^2 = \frac{4\pi^2 I_1}{mgl} + \frac{8\pi^2}{gl} r^2. \quad (2.7)$$

Массы маятника и пружин приведены в разделе 3, а величину  $l$  предлагается найти, измеряя соответствующие расстояния.

### 3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ.

SLAMMAD AL-KHAYRILAHY NOMID,  
TOSHKENT Axborot  
TEKNOLOGIYALARI UNIVERSITETI

Установка (рис. 3.1) представляет собой маятник Обербека, включающий в себя четыре симметрично расположенных стержня 1, закрепленных в барабане 2. На стержнях размещены привески 3.

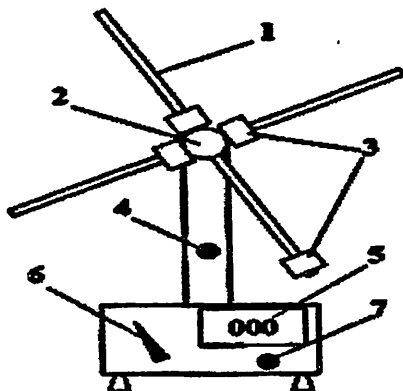


Рисунок 3.1. Схема установки

Для определения периода колебаний служит электронный секундомер, сигнал в который поступает с оптоэлектронной пары 4. Показания времени полных ( $2N$ ) колебаний считываются с цифрового табло 5. Следует иметь в виду, что первая цифра – секунды. Число колебаний  $N$  устанавливается с помощью рукоятки 6, а обнуление показаний секундомера – кнопкой «Сброс» 7.

**Примечание:** *Масса одной привески – 80 г, масса стержня – 30 г, масса барабана – 60 г.*

#### 4. ЗАДАНИЕ

4.1. Наблюдать изменение периода  $T$  колебаний крестообразного маятника в зависимости от радиуса  $r$  расположения двух симметричных привесок.

4.2. Убедиться в линейности зависимости  $T^2$  от  $r^2$ .

4.3. Из параметров прямой определить момент инерции  $I_0$  маятника без привесок.

4.4. Рассчитать момент инерции  $I_0$ , пользуясь формулами механики, и сравнить его с расчетным значением.

## 5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

5.1. Три привески разместить в ближнем к оси положении, а одну – в крайнем. Измерить расстояния  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r$  и занести их в таблицу 5.1. Указатель рукоятки 5 установить на значение  $N$ .

5.2. Отклонив маятник от положения равновесия на небольшой (не более  $30^\circ$ ) угол, обнулить показания секундомера кнопкой «Сброс», после чего отпустить маятник, предоставляя ему возможность совершать колебания. Отсчет времени прекращается после совершения  $2N$  полных колебаний. Записать показания секундомера в таблицу 5.1. Повторить не менее пяти раз. В случае выполнения работы на установке, сопряженной с компьютером, следовать инструкциям, приведенным в разделе 6.

Таблица 5.1. Результаты измерений

№ опыта	$r$ , см	$t$ , с	$\langle t \rangle$ , с	$2N$	$T$ , с	$T^2$ , с <sup>2</sup>	$r^2$ , м <sup>2</sup>	$r_1$ , см	$r_2$ , см
1.									
...	...	...	...	...	...	...	...		
10									

5.3. Изменить  $r$ , передвинув привески 3 и 4 (рис. 2.1).

Повторить действия по п.5.2.

5.4. Повторить п.5.3 для 8÷10 значений  $r$ .

5.5. Рассчитать величины  $\langle t \rangle$ ,  $T$ ,  $T^2$ ,  $r^2$ .

5.6. Рассчитать доверительные интервалы для величин  $T^2$  и  $r^2$ .

**Примечание:** Для расчёта доверительных интервалов рекомендуется ознакомиться с разделами 2.1, 2.4÷2.6, пунктами 3 и 4 раздела 3.1, главой 4 и разделом 7.1 методического указания<sup>1</sup> «Оценка погрешностей измерений».

5.7. Нанести экспериментальные точки с доверительными интервалами на график в координатах  $T^2$ ,  $r^2$ .

5.8. Рассчитать по графику момент инерции маятника без привесок, сравнивая стандартное уравнение прямой  $y = ax + b$  с формулой (2.7) и имея в виду, что  $b = \frac{4\pi^2 I_1}{mgl}$ .

**Примечание:** При выполнении задания по пункту 5.8 рекомендуется ознакомиться с разделом 7.2 методического указания<sup>1</sup> «Оценка погрешностей измерений».

5.9. Вычислить момент инерции маятника без привесок на основании измерений конструктивных размеров стержней и барабана и их масс, указанных в разделе 3.

5.10. Сравнить полученные результаты.

5.11. Сформулировать выводы.

5.12. Оформить отчет.

<sup>1</sup> Мухачев В.А. Оценка погрешностей измерений. Методические указания. – Томск: ТУСУР, 2009. – 24 с.

**Примечание:** Для оформления отчета воспользоваться методическим указанием<sup>2</sup> «Общие требования и правила оформления отчета о лабораторной работе по физике».

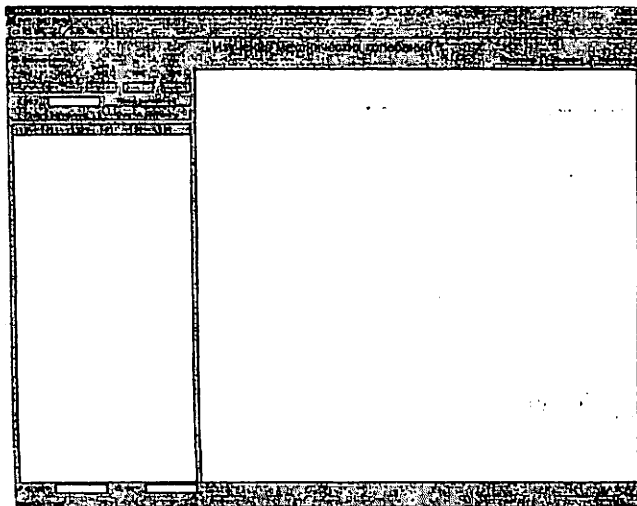
## **6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ НА УСТАНОВКЕ, СОПРЯЖЕННОЙ С КОМПЬЮТЕРОМ.**

**6.1.** Включить компьютер.

**6.2.** Войти в среду «Лаборатория», для чего нажать комбинацию клавиш *Ctrl-Alt-Del*, ввести имя пользователя «student», нажать «ОК».

**6.3.** Войти в папку «Лаборатория», размещенную на рабочем столе компьютера.

**6.4.** Выбрать и запустить работу «Изучение механических колебаний». На экране появится стенд (рис. 6.1).



<sup>2</sup> Чужков Ю.П. Общие требования и правила оформления отчета о лабораторной работе по физике. Методические указания. – Томск: ТУСУР, 2006. – 12 с.

## Рисунок 6.1. Внешний вид стенда «Изучение механических колебаний»

6.5. Включить питание лабораторной установки выключателем на шнуре питания. Индикатор в верхнем левом углу стенда поменяет цвет с красного на желтый, а надпись рядом с индикатором с «Включите макет» на «Поставьте маятник в исходное положение».

6.6. Три привески разместить в ближнем к оси положении, а одну – в крайнем. Измерить расстояния  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r$  и занести их в таблицу в рабочей тетради. Записать значение  $r$  в соответствующее окно таблицы на экране.

*Примечание: Положение рукоятки N на передней панели установки не имеет значения и может быть любым.*

6.7. Отклонив маятник от положения равновесия на угол  $\sim 30^\circ$ , обнулить показания секундомера кнопкой «Сброс», убедиться, что цвет индикатора на экране изменился с желтого на зеленый, после чего отпустить маятник, предоставляя ему возможность совершать колебания. Дождаться, когда появятся отсчеты времени во всех пяти окнах. Нажать мышью кнопку «Запомнить результат». При этом в столбце Э1 таблицы на экране появится значение времени совершения десяти полных колебаний маятника.

6.8. Повторить действия по п. 6.7 еще четыре раза при том же значении  $r$ . Строка таблицы на экране окажется полностью заполненной. Программа позволит произвести измерения для другого значения  $r$ .



6.9. Изменить значение  $r$  на установке, измерить его и занести в соответствующее окно таблицы на экране. Нажать кнопку «Новый эксперимент». При этом значение  $r$  окажется записанным в новую строку.

6.10. Пять раз совершить действия по п.6.9.

6.11. Повторить действия по пп.6.9–6.10 для 8–10 значений  $r$ .

6.12. Удаление строки или всей таблицы может быть осуществлено выделением мышью строки и нажатием кнопки «Удалить эксперимент» или кнопкой «Очистить результаты», соответственно.

6.13. Результаты измерений переписать в таблицу 5.1 в рабочей тетради и произвести обработку результатов в соответствии с пп.5.5–5.12 раздела 5.

6.14. Обработку результатов можно производить с помощью программы EXCEL. Для этого следует мышью нажать кнопку «Скопировать данные в буфер обмена» в верхней части экрана, после чего открыть EXCEL и вставить данные из буфера.

6.15. По окончании работы выйти из среды «Лаборатория» и **выключить установку.**

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

7.1. Что называется физическим маятником, и в чем его отличие от математического маятника?

7.2. Что называется моментом инерции тела?

7.3. Чем определяется период колебаний физического маятника?

7.4. Почему в работе предлагается изменять момент инерции маятника, передвигая симметрично привески 3 и 4 и не трогая привески 1 и 2?

7.5. Почему предлагается отклонять маятник на малый угол?

7.6. Какую информацию можно извлечь из наклона экспериментальной прямой?

7.7. Как оценить погрешность, вносимую в измерения периода неучтенным затуханием?

7.8. Что может быть причиной различия времени колебаний для одного и того же значения  $r$ ?

## Лабораторная работа № 3

# ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАКСВЕЛЛА

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В физических системах, состоящих из большого числа движущихся по законам классической механики частиц, в состоянии равновесия устанавливается некоторое стационарное распределение частиц по скоростям. Это распределение подчиняется вполне определенному статистическому закону, установленному Максвеллом. При выводе закона распределения частиц по скоростям Максвелл использовал теоретическую модель идеального газа, т.е. он предполагал, что между частицами отсутствуют силы взаимодействия. Реальные газы хорошо описываются моделью идеального газа и, соответственно, подчиняются закону Максвелла, если они достаточно разрежены. Некоторые газы, такие как гелий, водород, азот, кислород и даже воздух уже при обычных условиях, т.е. при комнатной температуре и атмосферном давлении мало отличаются по свойствам от идеального газа.

Другим примером физической системы, для которой справедливо максвелловское распределение частиц по скоростям, является система электронов, эмитированных термокатодом в вакуум. Электронный газ вне термокатада практически всегда настолько разрежен, что можно пренебречь кулоновскими силами взаимодействия между электронами и считать электронный газ

идеальным. То же самое можно сказать во многих случаях и о системе электронов плазмы газового разряда.

Целью данной работы является изучение распределения по скоростям электронов, эмитированных термокатодом, и сравнения полученного распределения с максвелловским.

## 2. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Источником электронов термоэмиссии в данной работе является нагретый катод электронной лампы. Электроны, преодолевшие поверхностный потенциальный барьер, образуют в промежутке катод-анод электронное облако. В силу различных причин концентрация электронов  $n$  в различных точках этого промежутка может быть различной даже в установившемся состоянии. Однако в любой точке промежутка распределение частиц по скоростям подчиняется закону Максвелла, который определяет величину  $dn_{v_x}$  - число электронов в единице объема, имеющих скорости, проекции которых на ось  $x$  заключены интервале от  $v_x$  до  $v_x+dv_x$ :

$$dn_{v_x} = n \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{1/2} \exp \left[ -\frac{mv_x^2}{2kT} \right] dv_x, \quad (2.1)$$

где  $m$  - масса электрона;  $k$  - постоянная Больцмана;  $T$  - абсолютная температура;  $n$  - концентрация электронов.

Основным методом, применяющимся для экспериментального изучения распределения термоэлектронов по скоростям, является метод задерживающего поля. Схема включения электронной лампы

для исследования распределения термоэлектронов по скоростям указанным методом представлена на рис.2.1

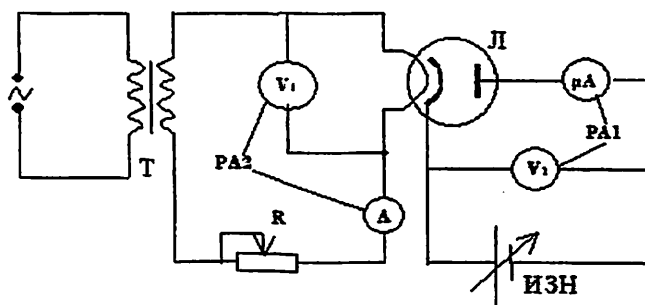


Рисунок 2.1. Электрическая схема установки.

В случае, если между катодом и анодом лампы Л приложена от источника питания ИЭН задерживающая разность потенциалов, т.е. «плюс» на катод, анода могут достигать лишь те электроны, чья кинетическая энергия  $W$  больше задерживающей разности потенциалов  $U$ , т.е.  $W \geq eU$ . Измеряя зависимость анодного тока от величины задерживающей разности потенциалов, можно узнать распределение электронов по кинетической энергии, а следовательно, и по скоростям. Поскольку одной из целей работы является сравнение полученного распределения с максвелловским, то рассмотрим предпосылки и процедуру такого сравнения. Предположим, что эмитированные катодом лампы электроны подчиняются распределению Максвелла. Получим выражение для электронного тока  $I_a$  на анод. Рассмотрим случай плоских электродов, каждый из которых имеет площадь  $S$ . Считая линейные

размеры электродов много большими, чем расстояние между ними, и пренебрегая краевыми эффектами, можем записать

$$I_a = j_a S, \quad (2.2)$$

где  $j_a$  – плотность тока термоэлектронов на анод.

Выберем ось  $x$  перпендикулярной плоским электродам.

Для определения плотности тока термоэлектронов  $j_a$  необходимо знать распределение частиц по скоростям в потоке. Найдем  $d\Phi_x$  – число электронов, проходящих от катода к аноду за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную оси  $x$ , и имеющих скорости вдоль оси  $x$  в интервале от  $v_x$  до  $v_x + dv_x$ . Из определения потока следует, что

$$d\Phi_x = dn_x \cdot v_x = n \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{mv_x^2}{2kT}\right) v_x dv_x. \quad (2.3)$$

Тогда плотность тока  $j_0$  вблизи катода (строго говоря, на границе катод-вакуум) всех термоэлектронов, имеющих скорости в интервале от 0 до  $\infty$ , определится соотношением

$$j_0 = e \int_0^{\infty} d\Phi_{0x} = en_0 \left( \frac{kT}{2\pi m} \right)^{1/2}. \quad (2.4)$$

Индексами «0» обозначены значения параметров вблизи катода. Часть этих электронов, имеющих скорости  $v_x$  в интервале от  $v_{x\min} = \sqrt{2eU/m}$  до  $\infty$ , преодолеют тормозящую разность потенциалов  $U$  и достигнут анода. В связи с этим, выражение для плотности анодного тока  $j_a$  можно записать в виде

$$j_a = e \int_{\sqrt{2eU/m}}^{\infty} dv_{0x} = en_0 \left( \frac{kT}{2\pi m} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{eU}{kT}\right) = j_0 \exp\left(-\frac{eU}{kT}\right), \quad (2.5)$$

а анодный ток  $I_a$  с учетом формулы (2.2) определится соотношением

$$I_a = I_0 \exp\left(-\frac{eU}{kT}\right), \quad (2.6)$$

где  $I_0 = j_0 S$ . Логарифмируя выражение (2.6), получим

$$\ln I_a = \ln I_0 - \frac{eU}{kT}. \quad (2.7)$$

Как видно из соотношения (2.7), зависимость логарифма анодного тока от задерживающего потенциала линейна. Соотношение (2.7) получено в предположении, что скорости термоэлектронов подчиняются распределению Максвелла, поэтому экспериментальная проверка этого соотношения позволяет судить о применимости распределения Максвелла по скоростям к системе термоэлектронов.

Заметим, что в данной работе используется электронная лампа, у которой форма электродов отличается от плоской. Это меняет, как показывает анализ, значение величины  $j_0$  в соотношении (2.4), но не меняет экспоненциальной зависимости  $j_a$  от  $U$ , поэтому формула (2.7) остается справедливой.

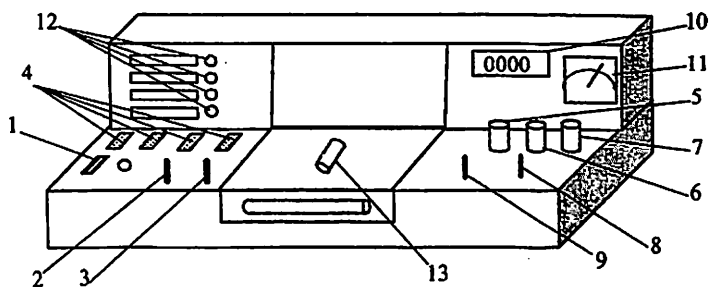
### 3. ЗАДАНИЕ

Измерить зависимость анодного тока лампы от задерживающего напряжения для трех значений мощности накала. Линеаризовать полученные зависимости и убедиться в максвелловском характере распределения электронов по энергиям. Рассчитать температуры электронного газа.

#### 4. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка для проведения экспериментов представляет собой настольный блок, внешний вид которого схематически представлен на рис. 4.1. На горизонтальной панели расположены органы управления, на вертикальной – контрольно-измерительные приборы. К органам управления относятся: выключатель 1 «Сеть»; рукоятки 2, 3 «Давление», «Реверс» управления электроприводом (в данной работе не используются); кнопки 4 выбора лабораторной работы, рукоятки 5 «Накал лампы», 6 «Напряжение анода», 7 «Нагрев нити» (не используется); переключатели 8, 9 режимов работы измерительных приборов 10, 11. Лампочки 12 служат для индикации выбранной лабораторной работы. Электронная лампа 13, с помощью которой проводится эксперимент, расположена в средней части установки под оргстеклом. Схема включения электронной лампы представлена на рис. 4.2. Переменный резистор  $R$  служит для регулировки тока накала катода, а приборы  $V_1$  и  $A$  – для измерения напряжения и тока накала, соответственно. Источник задерживающего напряжения ИЗН позволяет регулировать задерживающую разность потенциалов, измеряемую вольтметром  $V_2$ . Рукоятка 5 управления резистором  $R$  и рукоятка 6 управления задерживающим напряжением находятся на горизонтальной панели установки.





**Рисунок 4.1. Внешний вид лабораторной установки.**

Ток анода измеряется микроамперметром. В настоящей установке измерения напряжения и тока накала осуществляются одним прибором 11 (РА2) (Рис. 4.1), который с помощью переключателя 8 включается в режим вольтметра (положение 1) либо амперметра (положение 2). Задерживающее напряжение и анодный ток измеряются цифровым прибором 10 (РА1), изменение режимов которого осуществляется переключателем 9. В положении 1 прибор измеряет задерживающее напряжение, а в положении 2 – анодный ток лампы. Средний столбец таблички под прибором РА1 на установке содержит коэффициенты, на которые следует умножать показания прибора.

## 5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

**5.1.** Включить установку кнопкой 1 «Сеть». При этом должна загореться сигнальная лампочка.

**5.2.** Выбрать работу «Распределение Максвелла», нажав соответствующую кнопку 4. Установить рукояткой 5 «Накал

лампы» максимальные значения тока и напряжения накала и записать их в таблицу 5.1 в качестве параметров. Дать возможность лампе прогреться (при выходе на установившийся тепловой режим через окно в передней панели наблюдается светящийся термокатод, ток в анодной цепи перестает расти).

**5.3.** Снять зависимость тока анода от напряжения задержки. Регулировку задерживающего напряжения производить рукояткой 6 «Напряжение анода». Измерения проводить, начиная с минимального значения задерживающего напряжения и равномерно увеличивая его до максимального значения так, чтобы зависимость содержала не менее десяти точек. Данные рекомендуется занести в таблицу 5.1. В эту же таблицу записать значения  $\ln I_a$ .

**Примечание.** Если эксперимент проводится на установке, сопряженной с компьютером, то значения тока и напряжения накала лампы, а также анодного тока и задерживающего анодного напряжения считываются из соответствующих окон на экране монитора. При выполнении работы следовать инструкциям, приведенным в разделе 6.

**5.4.** Повторить измерения по п. 3 для двух других значений напряжения и тока накала. При выборе тока накала исходить из условия, чтобы при минимальном задерживающем напряжении анодный ток не был менее 90 - 100 мкА. Данные занести в таблицы, аналогичные таблице 5.1.

Таблица 2.1. Результаты измерений

$\bar{U}_n, В$	$I_n, А$	$U_z, мВ$	$I_a, мА$	$\ln I_a$

5.5. Три серии экспериментальных точек нанести на график в координатах  $\ln I_a, U$ . Рассчитать погрешности измерений и нанести их на график в виде доверительных интервалов. Убедиться в возможности проведения прямой по экспериментальным точкам, что и будет означать наличие максвелловского распределения термоэлектронов по скоростям. При построении графиков рекомендуется использовать метод наименьших квадратов.

5.6. Учитывая, что угловые коэффициенты линеаризованных зависимостей в данной работе равны  $e/kT$ , а также используя табличные значения постоянных  $e$  и  $k$ , вычислить три различные температуры катода  $T$ , соответствующие трем различным напряжениям накала электронной лампы.

5.7. Используя формулы метода наименьших квадратов для расчета погрешностей коэффициентов линейной зависимости, оценить погрешности в определении температуры катода.

5.8. Определить среднеквадратичную, среднюю и наиболее вероятную скорости электронов для одного из найденных в работе значений температуры.

## **6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ НА УСТАНОВКЕ, СОПРЯЖЕННОЙ С КОМПЬЮТЕРОМ.**

**6.1.** Включить компьютер.

**6.2.** Войти в среду «Лаборатория», для чего нажать комбинацию клавиш Cntrl-Alt-Del, ввести имя пользователя "student", нажать "OK". На экране высветится меню.

**6.3.** Установить указатель мыши на значок «Лаборатория» и нажать дважды на левую кнопку мыши. При этом открывается меню с перечнем работ.

**6.4.** Выбрать строку с названием работы и щелкнуть мышью. На экране появится стенд с окнами (Рис. 6.1), в которых отображаются измеряемые величины, таблица и график.

**6.5.** Включить питание лабораторной установки кнопкой 1 «Сеть» (Рис. 6.3). При этом загорится сигнальная лампочка, расположенная рядом с кнопкой 1. Одной из кнопок 4 включить работу «Распределение Максвелла», после чего загорится одна из сигнальных лампочек 12, и в окнах стенда «Напряжение анода», «Ток анода», «Напряжение накала», «Ток накала» появятся соответствующие величины.

**6.6.** Рукояткой 5 «Накал лампы» установить максимальные значения тока и напряжения накала. Рукояткой 6 «Напряжение анода» установить минимальное значение напряжения анода и подождать 1 – 2 минуты до достижения анодным током установившегося значения. Нажать мышью кнопку «Новый эксперимент», а затем – кнопку «Добавить результат». При этом в таблице появятся значения тока и напряжения анода, а в правом

окне – точка на графике зависимости тока от напряжения анода. Для наблюдения точки на графике следует нажать мышью кнопку «Показать/скрыть точки» в верхней левой части экрана монитора.

6.7. Снять зависимость тока анода от анодного напряжения, для чего повторить измерения по п. 6.6 не менее десяти раз, увеличивая при каждом измерении напряжение анода так, чтобы анодный ток уменьшался на 5 – 10 мкА. Появляющийся на стенде график зависимости тока анода от напряжения анода позволяет контролировать ход эксперимента. Экспериментальные точки должны укладываться на плавную спадающую кривую, не имеющую перегибов. Точки, выпадающие из такой зависимости, должны быть расценены, как промахи и удалены из таблицы. Удаление производится выделением соответствующей строки и нажатием кнопки «Удалить результат». Буквы *и* *т* рядом с цифрами на осях графика означают приставки «микро» и «милли», соответственно.

6.8. Повторить измерения по п. 6.6 и 6.7 для двух других значений напряжения и тока накала. При выборе тока накала исходить из условия, чтобы при минимальном задерживающем напряжении анодный ток не был менее 90 – 100 мкА.

6.9. Перенести результаты измерений в таблицу 5.1 в рабочей тетради и произвести обработку в соответствии с пп. 5.5 – 5.8.

6.10. Для проведения вычислений можно воспользоваться программой EXCEL. Для этого следует нажать мышью кнопку «Копировать данные в буфер», расположенную в верхней левой части экрана. Запустить EXCEL и вставить данные из буфера.

6.11. По завершении работы следует установить минимальный ток накала лампы и выключить установку кнопками 4 и 1 (Рис. 2.3), последовательно. Затем выйти из среды «Лаборатория», закрыв ее мышью, и выйти из системы, нажав последовательно «Пуск» и «Выход из системы».

**Изучение распределения Максвелла**

Напряжение анода, мВ  Ток анода, мА   
 Напряжение накала, В  Ток накала, А

Добавить результат      Новый эксперимент  
 Удалить результат      Опыт 1

Напряжение анода, мВ	Ток анода, мА	Зависимость тока анода от напряжения анода

**Рисунок 6.1. Стенд на экране монитора**

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

7.1. Какой газ является объектом исследования в данной работе. o

7.2. Каким образом определяется распределение заряженных частиц по скорости.

7.3. Какова полярность напряжения, приложенного к катоду и аноду.

7.4. Каков вид распределения Максвелла по абсолютным значениям скорости и по проекциям скорости на ось  $x$ ?

7.5. Как сопоставить измеренное распределение с максвелловским.

7.6. Какой вид имеет рабочая формула в данной работе? Запишите ее.

7.7. В каких переменных строится график в данной работе?

7.8. Что служит причиной возникновения тока в анодной цепи?

7.9. Каким образом изменяют температуру катода в данной работе?

7.10. Укажите несоответствия между используемыми модельными представлениями и реальными условиями эксперимента.

## Лабораторная работа № 4

### ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БОЛЬЦМАНА

#### ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является изучение распределения Больцмана на примере исследования температурной зависимости тока термоэлектронов, а также определение работы выхода электронов из металла в вакуум.

#### 1. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Под распределением Больцмана понимают зависимость концентрации частиц газа от их потенциальной энергии во внешнем поле

$$n(\vec{r}) = n_0 e^{-\frac{U(\vec{r})}{kT}}, \quad (1.1)$$

где  $n(\vec{r})$  - концентрация частиц в точке пространства, заданной радиус вектором  $\vec{r}$ ;  $n_0$  - концентрация частиц в точке, где потенциальная энергия частицы равна нулю;  $U(\vec{r})$  - потенциальная энергия частицы в точке пространства, заданной радиус вектором  $\vec{r}$ ;  $k$  - постоянная Больцмана;  $T$  - абсолютная температура газа.

Наиболее логичным экспериментальным способом изучения распределения Больцмана было бы измерение концентрации частиц изотермического газа в различных точках потенциального поля. В то же время экспериментальная реализация поля, в котором потенциальная энергия частиц изменялась бы непрерывно или хотя бы принимала ряд дискретных значений, есть весьма непростая



задача. Гораздо проще выглядит ситуация, когда потенциальная энергия частиц может иметь всего два значения. Такая ситуация реализуется в двухфазных системах, например, металл-вакуум, если в качестве исследуемого газа выбран электронный газ. Потенциальные энергии электронов в металле и в вакууме отличаются на величину работы выхода. Под работой выхода понимают потенциальный барьер, который должен быть преодолен электронами, прежде чем они выйдут из металла в вакуум (рис. 1.1.). Пока металл имеет комнатную температуру, число электронов, имеющих кинетическую энергию, достаточную для преодоления работы выхода, чрезвычайно мало. С увеличением температуры число таких электронов существенно возрастает. Измеряя зависимость концентрации электронов в вакууме (электронов термоэмиссии или термоэлектронов) от температуры металла, можно судить о выполнении соотношения (1.1) и определить работу выхода электронов из металла.

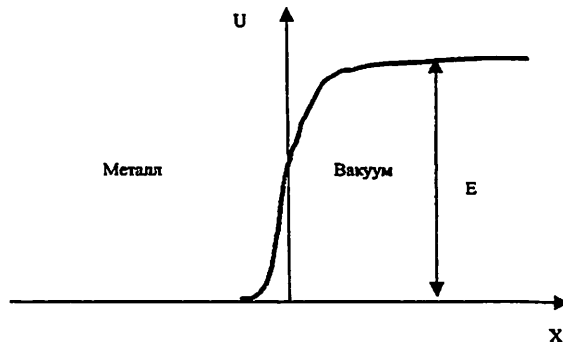


Рисунок 1.1. Зависимость потенциальной энергии  $U$  электронов от их пространственной координаты  $x$  на границе металл-вакуум.

Непосредственное измерение концентрации термоэлектронов есть трудновыполнимая задача, поэтому обычно измеряют ток термоэлектронов, который связан с концентрацией соотношением

$$I = \frac{1}{4} envS, \quad (1.2)$$

где  $e$  - заряд электрона;  $v$  - средняя скорость направленного движения;  $S$  - площадь эмитирующей поверхности металла.

Множитель  $\frac{1}{4}$  появляется в силу равновероятности всех направлений движения электронов. В выражении (1.2) от температуры зависит не только концентрация, но и средняя скорость. Согласно молекулярно-кинетической теории, эта зависимость дается выражением  $v = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$ , где  $m$  - масса частицы.

С учетом этого для тока термоэмиссии получаем

$$I = C\sqrt{T}n_{Me}e^{-\frac{E}{kT}}, \quad (1.3)$$

где  $C$  - константа;  $n_{Me}$  - концентрация электронов в металле;  $E$  - работа выхода.

Выражение (1.3) известно под названием формулы Ричардсона. Выражение (1.3) приближенно, так как исходит из представления об электронном газе, как газе классическом. Квантовая теория металлов приводит к более точному выражению

$$I = BT^2n_{Me}e^{-\frac{E}{kT}}, \quad (1.4)$$

в котором  $B$  – константа, а вместо  $\sqrt{T}$  присутствует  $T^2$ . Это различие, однако не столь существенно, ибо зависимость тока эмиссии от температуры определяется главным образом экспоненциальным множителем. Применимость выражения (1.4) к описанию поведения термоэлектронов в системе металл-вакуум и требуется проверить в ходе лабораторной работы. Показав, что экспериментальная зависимость совпадает с зависимостью, предсказываемой выражением (1.4), мы тем самым подтвердим применимость закона Больцмана (1.1) для описания изучаемой системы. Для подтверждения какой-либо зависимости требуется свести ее к линейной. В данном случае это достигается логарифмированием выражения (1.4)

$$\ln I = \ln B + \ln T^2 + \ln n_{Mc} - \frac{E}{k} \frac{1}{T} \quad (1.5)$$

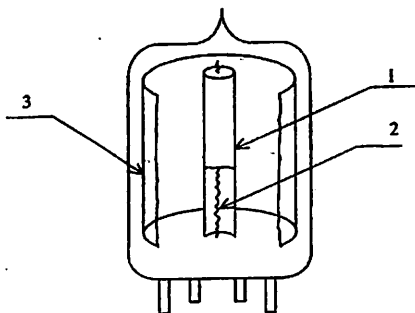
Поскольку  $\ln T^2$  изменяется очень медленно по сравнению с последним членом выражения (1.5), то с достаточной степенью точности можно положить

$$\ln I = \text{const} - \frac{E}{k} \frac{1}{T}. \quad (1.6)$$

Это означает, что экспериментальные точки, нанесенные на график в координатах  $\ln I$ ,  $\frac{1}{T}$ , должны укладываться на прямую в пределах погрешности измерений. Производя сравнение этой прямой с ее уравнением (1.6), можно определить работу выхода  $E$ .

## 2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Система металл-вакуум в данной работе реализуется в двухэлектродной электронной лампе (рис. 2.1). Один из электродов лампы – катод 1 подогревается с помощью спирали 2, по которой пропускается ток  $I_n$ , называемый током накала. Эмитированные катодом электроны собираются вторым электродом лампы – анодом 3.



1 – катод; 2 – спираль подогрева; 3 – анод.

Рисунок 2.1. Двухэлектродная электронная лампа

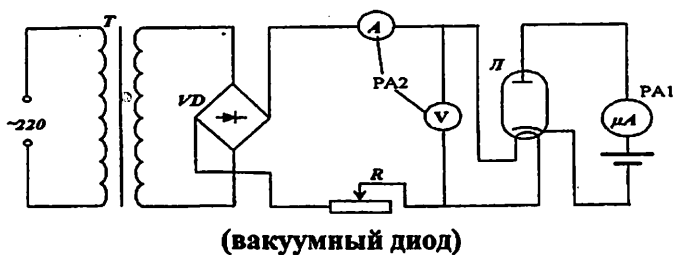
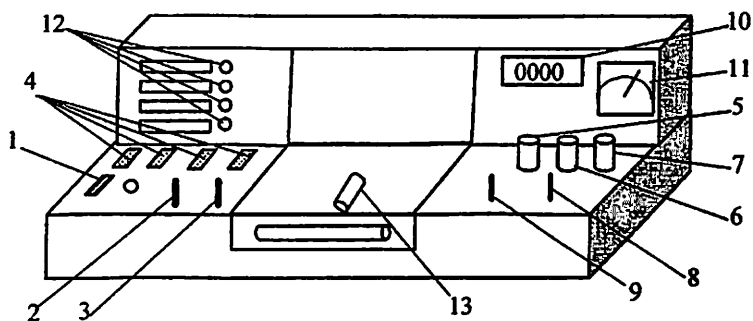


Рисунок 2.2. Схема экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.2. Первичная обмотка трансформатора  $T$  питается от сети

переменного тока напряжением 220 В. Вторичная обмотка подключена к диодному мосту  $VD$ , выпрямленное напряжение с которого через переменный резистор  $R$  и амперметр  $A$  подается на накальную спираль лампы  $L$ . Резистор  $R$  позволяет регулировать ток накала и, следовательно, температуру катода. В анодную цепь включен в прямом направлении источник питания, что позволяет регистрировать ток насыщения, т.е. ток всех электронов, эмитированных катодом.

Все элементы схемы конструктивно размещены в настольной установке «Молекулярная физика», внешний вид которой показан на рис. 2.3.



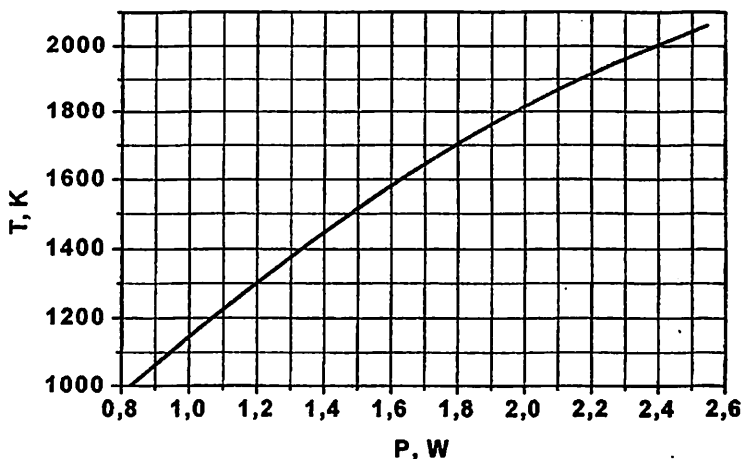
**Рисунок 2.3.** Внешний вид экспериментальной установки.

На горизонтальной панели установки расположены органы управления, на вертикальной – контрольно-измерительные приборы. К органам управления относятся: выключатель 1 «Сеть»; рукоятки 2, 3 «Давление», «Реверс» управления электроприводом (в настоящей работе не используются); кнопки 4 выбора

лабораторной работы, рукоятки 5 «Накал лампы», 6 «Напряжение анода», 7 «Нагрев нити»; переключатели 8, 9 режимов работы измерительных приборов 10, 11. Лампочки 12 служат для индикации выбранной лабораторной работы. Электронная лампа 13, с помощью которой проводится эксперимент, расположена в средней части установки под оргстеклом. Цифровой прибор 10 (РА1) служит для измерения тока анода, а с помощью стрелочного прибора 11 можно измерять ток и напряжение накала катода. Рукоятка 5 «Накал лампы» предназначена для регулировки тока и напряжения накала катода. Рукоятки «Напряжение анода» и «Нагрев нити» в данной работе не используются. Переключатель 8 позволяет с помощью прибора 11 (РА2) поочередно измерять напряжение  $U$  (положение 1) и ток  $I$  (положение 2) накала лампы. В табличке под прибором РА2 указаны коэффициенты, на которые следует умножать показания прибора. Переключатель 9 режима работы прибора РА1 должен находиться в положении 2. В этом случае прибор РА1 измеряет анодный ток. В средней колонке таблички под прибором РА1 указан коэффициент 0,01, на который следует умножать показания прибора для определения анодного тока в миллиамперах. Для определения температуры катода используется факт соответствия между температурой катода и мощностью  $P=I \times U$ , подводимой к нити накала. Это отражено градуировочной кривой, представленной на рис. 2.4. Кривая описывается выражением

$$T=187+1103,7 \times P-144 \times P^2, \quad (2.1)$$

где  $P$  - мощность накала в ваттах,  $T$  - температура в Кельвинах.



**Рисунок 2.4. Градуировочная кривая для определения температуры катода**

### 3. ЗАДАНИЕ

Измерить зависимость тока термоэлектронов от температуры катода. Нанести экспериментальные точки на график в координатах  $\ln I_a, \frac{1}{T}$ . Убедиться в наличии линейной зависимости. Определить работу выхода электронов из металла.

### 4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

4.1. Включить установку кнопкой 1 «Сеть» (Рис. 2.3). При этом должна загореться сигнальная лампочка.

4.2. Выбрать работу «Распределение Больцмана», нажав соответствующую кнопку 4. Установить минимальные значения тока и напряжения накала и записать их в таблицу. Дать возможность лампе прогреться (при выходе на установившийся

тепловой режим через окошечко в макете наблюдается светящийся термокатод, ток в анодной цепи перестает расти). Если в анодной цепи ток не наблюдается, то следует увеличить ток накала до  $\sim 0,4$  А и подождать две-три минуты, пока не появится анодный ток. Записать показания в таблицу 4.1.

**Таблица 4.1 Экспериментальные значения**

Опыт	$I_n$ , А	$U_n$ , В	$P$ , Вт	$I_a$ , мА	$\ln I_a$	$T$ , К	$1/T$ , К <sup>-1</sup>
1.							
2.							
.							
.							
.							
8.							

**Примечание.** Если эксперимент проводится на установке, сопряженной с компьютером, то значения тока и напряжения накала лампы, а также анодного тока считываются из соответствующих окон на экране монитора. При выполнении работы следовать инструкциям, приведенным в разделе 5.

4.3. Повторить измерения  $\sim 10$  раз, устанавливая каждый раз новое значение тока накала и выжидая 1 - 2 минуты для стабилизации температуры катода и анодного тока.

4.4. Определить с помощью градуировочной кривой (рис. 2.4) или формулы (2.1) значения температуры катода и занести их в таблицу 4.1, вычислить величины  $1/T$  и также занести в таблицу.



4.5. Вычислить значения  $\ln I_a$  и занести их в таблицу.

4.6. Нанести экспериментальные точки на график в координатах  $\ln I_a, 1/T$ .

4.7. Определить погрешности измерения экспериментальных точек и нанести их на график.

4.8. Провести интерполирующую прямую. По указанию преподавателя следует воспользоваться методом наименьших квадратов.

4.9. Определить работу выхода электронов из металла.

## 5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ НА УСТАНОВКЕ, СОПРЯЖЕННОЙ С КОМПЬЮТЕРОМ

5.1. Включить компьютер.

5.2. Войти в среду «Лаборатория», для чего нажать комбинацию клавиш Cntrl-Alt-Del, ввести имя пользователя "student", нажать "ОК". На экране высветится меню.

5.3. Установить указатель мыши на значок «Лаборатория» и нажать дважды на левую кнопку мыши. При этом открывается меню с перечнем работ.

5.4. Выбрать строку с названием работы и щелкнуть мышью. На экране появится стенд с окнами (Рис. 5.1), в которых отображаются измеряемые величины, таблица и график.

5.5. Включить питание лабораторной установки кнопкой 1 «Сеть» (Рис. 2.3). При этом загорится сигнальная лампочка, расположенная рядом с кнопкой 1. Одной из кнопок 4 включить

работу «Распределение Больцмана», после чего загорится одна из сигнальных лампочек 12, и в окнах стенда «Напряжение накала», «Ток накала», «Ток анода» появятся соответствующие величины.

5.6. Рукояткой 5 «Накал лампы» установить минимальные значения тока и напряжения накала. Медленно вращая рукоятку 5, довести значения тока накала до  $\sim 0,4$  А и убедиться, что анодный ток появился, т.е. в окне «Ток анода» показания превысили 0,001 А. Зафиксировать измеренные величины, нажав мышью кнопку «Зафиксировать» (Рис. 5.1), после чего определить температуру катода, пользуясь градуировочной кривой (Рис. 2.4), либо формулой (2.1). Записать значение температуры в окно «Температура» и перенести результаты в таблицу на стенде, нажав кнопку «Добавить результат».

5.7. Повторить измерения по п. 5.6 примерно десять раз, увеличивая при каждом измерении ток накала на  $\sim 0,02$  А и выжидая 1 – 2 минуты после каждого увеличения накала. Появляющийся на стенде график зависимости тока анода от температуры позволяет контролировать ход эксперимента. Экспериментальные точки должны укладываться на плавную растущую кривую, не имеющую перегибов. Точки, выпадающие из такой зависимости, должны быть расценены, как промахи и удалены из таблицы. Удаление производится выделением соответствующей строки и нажатием кнопки «Удалить результат».

5.8. Перенести результаты измерений в таблицу 4.1 в рабочей тетради и произвести обработку в соответствии с пп. 4.4 – 4.9.

5.9. Для проведения вычислений можно воспользоваться программой EXCEL. Для этого следует нажать мышью кнопку «Копировать данные в буфер», расположенную в верхней левой части экрана. Запустить EXCEL и вставить данные из буфера.

5.10. По завершении работы следует установить минимальный ток накала лампы и выключить установку кнопками 4 и 1 (Рис. 2.3), последовательно. Затем выйти из среды «Лаборатория», закрыв ее мышью, и выйти из системы, нажав последовательно «Пуск» и «Выход из системы».

**Изучение распределения Больцмана**

Напряжение накала, В  Ток накала, А

Ток анода, мА

Температура, К

Температура, К	Ток анода, мА

Зависимость тока анода от температуры

**Рисунок 5.1. Стенд на экране монитора**

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. Что называется распределением Больцмана, и какие системы подчиняются этому распределению?

6.2. Сколько значений потенциальной энергии частиц реализуется в экспериментальной установке, применяемой в данной работе?

6.3. Представить распределение Больцмана графически и указать на графике область изменения параметров системы в данной работе.

6.4. В чем сходство и в чем различие распределений Больцмана, Максвелла?

6.5. Какова физическая причина существования работы выхода электронов из металла? Что было бы, если бы работа выхода равнялась нулю или была отрицательной?

6.6. В чем Вы усматриваете несоответствие между рассматриваемой идеальной моделью и условиями эксперимента.

## Лабораторная работа № 5

### ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЗДУХА

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является изучение явления теплопроводности, установление основных закономерностей этого явления и определение коэффициента теплопроводности воздуха.

#### 2. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Рассмотрим газ, заключенный между двумя поверхностями, имеющими температуры  $T_1$  и  $T_2$ . Если эти температуры поддерживаются постоянными, то через газ устанавливается стационарный поток теплоты. Для простоты, чтобы рассмотреть одномерную задачу, поместим газ между двумя параллельными плоскостями (Рис.2.1) и ось  $X$  направим перпендикулярно к этим плоскостям. Тогда вдоль оси  $X$  будет градиент температуры  $\frac{dT}{dx}$ .

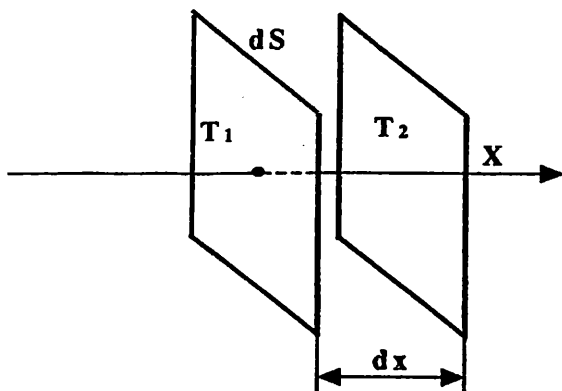


Рисунок 2.1. Схема рассматриваемого явления теплопроводности.

Вдоль осей  $Y$  и  $Z$ , расположенным параллельно к ограничивающим газ поверхностям, температура не меняется. Рассмотрим поток теплоты через площадку  $dS = dydz$ , помещенную перпендикулярно к оси  $X$ . Согласно закону Фурье, количество теплоты  $\delta Q$ , перенесенное через площадку  $dS$  за время  $dt$ , равно

$$\delta Q = -\chi \frac{dT}{dx} dS dt. \quad (2.1)$$

Здесь  $\chi$  - коэффициент теплопроводности, определяемый как сортом газа, так и условиями: давлением, температурой.

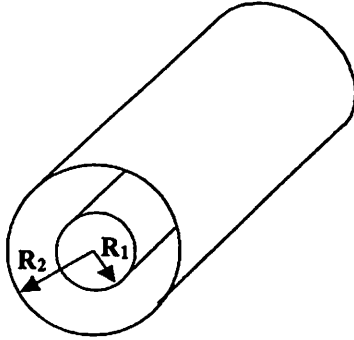
Выражение для  $\delta Q$  слегка изменяется, если рассмотреть вместо плоской цилиндрическую конфигурацию. Пусть источником тепла служит цилиндр радиуса  $R_1$  и длины  $l$  много большей радиуса (Рис. 2.2). В этом случае поток тепла через цилиндрическую поверхность единичной длины и радиуса  $r$  ( $R_1 < r < R_2$ ) равен

$$\frac{\delta Q}{dt} = -\chi \frac{dT}{dr} 2\pi r l \quad (2.2)$$

Введя обозначение  $P = \frac{\delta Q}{dt}$ , перепишем (2.2)

$$P = -\chi \frac{dT}{dr} 2\pi r l \quad (2.3)$$

Полагая теперь, что приемником тепла является цилиндрическая поверхность радиуса  $R_2$ , а температуры внутреннего и внешнего цилиндров равны, соответственно,  $T_1$  и  $T_2$ , можно проинтегрировать (2.3) по  $r$  в пределах от  $R_1$  до  $R_2$ . В результате интегрирования получим



**Рисунок 2.2. Рассмотрение теплопроводности в цилиндрической конфигурации.**

$$\ln \frac{R_2}{R_1} = \chi \frac{2\pi l}{P} (T_1 - T_2) \quad (2.4)$$

Отсюда может быть получено выражение:

$$(T_1 - T_2) = \frac{1}{\chi} \frac{P}{2\pi l} \ln \frac{R_2}{R_1}. \quad (2.5)$$

Выражение (2.5) следует рассматривать как рабочую формулу для выполнения настоящей лабораторной работы.

### 3. ЗАДАНИЕ

Реализовать в эксперименте состояние баланса между теплом, выделяющимся в накаливаемой нити и теплом, передающимся за счет теплопроводности воздуха от накаливаемой нити внешнему цилиндру. По результатам эксперимента убедиться в наличии линейной зависимости между выделяемой мощностью и разностью

температур нити и цилиндра, рассчитать коэффициент теплопроводности воздуха.

#### 4. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка для проведения экспериментов представляет собой настольный блок, внешний вид которого схематически представлен на рис. 4.1. На горизонтальной панели расположены органы управления, на вертикальной – контрольно-измерительные приборы. К органам управления относятся: выключатель 1 «Сеть»; рукоятки 2, 3 «Давление», «Реверс» управления электроприводом (в данной работе не используются); кнопки 4 выбора лабораторной работы, рукоятки 5 «Накал лампы», 6 «Напряжение анода», 7 «Нагрев нити»; переключатели 8, 9 режимов работы измерительных приборов 10, 11. Лампочки 12 служат для индикации выбранной лабораторной работы. Цилиндр 13 с нитью, используемый в настоящей работе, находится под оргстеклом в передней части установки. Электрическая схема узла, предназначенного для проведения эксперимента, показана на рис. 4.2.

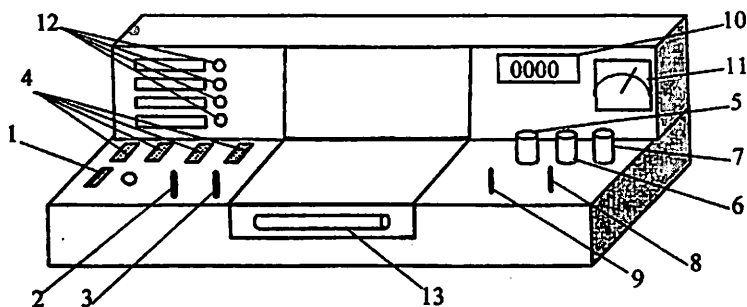
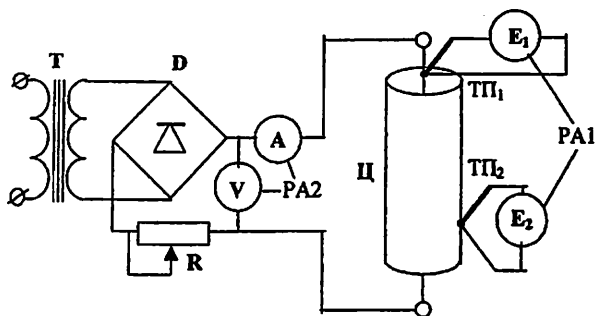


Рисунок 4.1. Внешний вид лабораторной установки.





**Рисунок 4.2.** Электрическая схема рабочего узла.

Основные элементы схемы взаимодействуют следующим образом. Трансформатор  $T$  выдает напряжение порядка 1 В на диодный мост  $D$ . Выпрямленное напряжение поступает на нить накала, расположенную на оси приемного цилиндра  $\mathcal{C}$ . Ток накала и напряжение на нити измеряются амперметром  $A$  и вольтметром  $V$ , соответственно. Функции вольтметра и амперметра в установке выполняет один прибор 11 PA2, который измеряет напряжение в положении 1 переключателя 8 и ток – в положении 2. Температуры нити и цилиндра измеряются термопарами  $ТП$  (медь – константан), подключенными к милливольтметрам  $mV$ . Функции милливольтметров выполняет цифровой прибор 10 PA1, который подсоединяется к термопаре  $ТП_1$  (нить) в положении 2 переключателя 9 и к термопаре  $ТП_2$  (цилиндр) в положении 1. Переменный резистор  $R$ , управляемый рукояткой 7 «Нагрев нити», служит для регулировки тока нагрева нити.

## 5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

5.1. Убедиться, что все органы управления находятся в исходном состоянии: выключатель 1 и кнопки 4 (Рис. 4.1) выключены.

5.2. Вставить штепсель в розетку и включить установку выключателем 1. При этом должна загореться сигнальная лампочка, расположенная рядом с выключателем.

5.3. С помощью одной из кнопок 4 включить работу «Теплопроводность воздуха». О включении свидетельствует одна из лампочек 12.

5.4. Вращая рукоятку «Нагрев нити» против часовой стрелки, установить минимальный ток через нить накала. Выждать 2 – 3 минуты и занести значения тока  $I$ , напряжения  $U$  с прибора 11 (рис.4.1) и показания термопар  $E_1, E_2$  с прибора 10 в таблицу 5.1.

Таблица 5.1. Результаты измерений.

№ измерения	$U$ , В	$I$ , А	$P$ , Вт	$E_1$ , мВ	$E_2$ , мВ	$T_1$ , °С	$T_2$ , °С	$T_1 - T_2$ , °С	Примеч.
1.		0							$\ln(R_2/R_1) =$
2.									
---									

Примечание. Если эксперимент проводится на установке, сопряженной с компьютером, то значения тока, напряжения, э.д.с. считываются из соответствующих окон на экране монитора. При

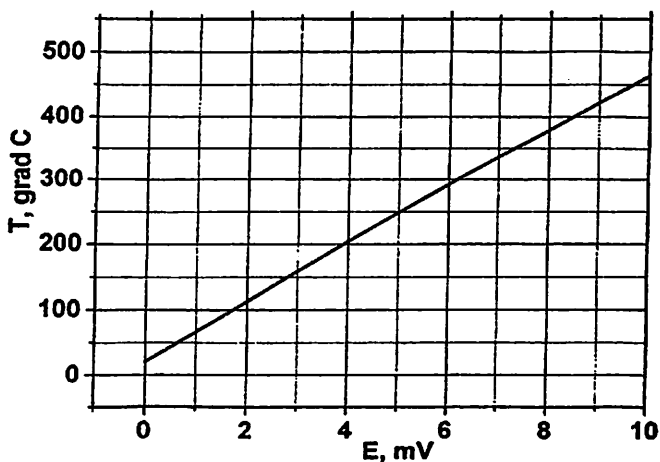
выполнении работы следовать инструкциям, приведенным в разделе 6.

5.5. Повторить пункт 5.4 для 7 - 8 значений тока нагрева нити, постепенно увеличивая его.

5.6. Пользуясь градуировочной кривой (рис. 5.1), вычислить температуры  $T_1$  и  $T_2$  по измеренным  $E_1$ ,  $E_2$  и занести полученные значения в таблицу 5.1. Вместо градуировочной кривой можно использовать формулу

$$T=20,7+47 E - 0,27 E^2, \quad (5.1)$$

где  $T$  в градусах Цельсия,  $E$  – соответствующая термо-э.д.с.в мВ.



**Рисунок 5.1. Градуировочная кривая термопары медь – константан. Опорная температура 20° C.**

5.7. По измеренным значениям  $I$ ,  $U$  рассчитать мощность  $P$  и занести значения в соответствующие ячейки Табл. 5.1.

5.8. Используя геометрические параметры  $R_1 = 0,6$  мм,  $R_2 = 9$  мм,  $l = 120$  мм, рассчитать  $\ln \frac{R_2}{R_1}$  и также занести в таблицу.

5.9. Нанести измеренные и рассчитанные величины на график в координатах  $(T_1 - T_2), P$ .

5.10. Рассчитать погрешности и нанести на график доверительные интервалы. Провести прямую в пределах доверительных интервалов.

5.11. По наклону прямой вычислить угловой коэффициент и рассчитать коэффициент теплопроводности воздуха и его погрешность.

5.12. Сравнить полученное значение с табличным ( $0,0257 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$ ) и сделать выводы по работе.

## 6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ НА УСТАНОВКЕ, СОПРЯЖЕННОЙ С КОМПЬЮТЕРОМ

6.1. Включить компьютер.

6.2. Войти в среду «Лаборатория», для чего нажать комбинацию клавиш  $\text{Ctrl-Alt-Del}$ , ввести имя пользователя «student», нажать «ОК». На экране высветится меню.

6.3. Установить указатель мыши на значок «Лаборатория» и нажать дважды на левую кнопку мыши. При этом открывается меню с перечнем работ.

6.4. Выбрать строку с названием работы и щелкнуть мышью. На экране появится стенд с окнами, в которых отображаются измеряемые величины, таблица и график.

6.5. Включить питание лабораторной установки кнопкой 1 «Сеть» (Рис. 4.1). При этом загорится сигнальная лампочка, расположенная рядом с кнопкой 1. Одной из кнопок 4 включить работу «Теплопроводность воздуха», после чего загорится одна из сигнальных лампочек 12, и в окнах стенда  $U_n$ ,  $I_n$ ,  $P_n$ ,  $TЭДС_{нити}$ ,  $TЭДС_{цил}$  появятся соответствующие величины.

6.6. Вращая рукоятку 7 «Нагрев нити» против часовой стрелки, установить минимальный ток через нить накала. Выждать 2 – 3 минуты, убедиться, что цифры в окнах  $U_n$ ,  $I_n$ ,  $P_n$ ,  $TЭДС_{нити}$ ,  $TЭДС_{цил}$  не изменяются и зафиксировать показания, нажав мышью кнопку «Зафиксировать». Вычислить температуры нити  $T_n$  и цилиндра  $T_{ц}$ , пользуясь градуировочным графиком (Рис. 4.5), либо формулой (5.1). Использование формулы предпочтительнее, поскольку позволяет повысить точность вычислений. Использование программы EXCEL делает эту процедуру простой и не утомительной. Найденные значения температур следует занести в соответствующие окна стенда. После этого нажатием кнопки «Добавить результат» записать значения температур и мощности в таблицу на стенде.

6.7. Повторить пункт 6.6 для 7 - 8 значений тока нагрева нити, постепенно увеличивая его. Рекомендуется использовать интервал изменения напряжения 0,25 В. Появляющиеся в правой части стенда графики позволяют оценить качество проведенных измерений. Экспериментальные точки должны укладываться на плавные кривые. Причем кривая  $T_n$  должна быть расположена выше кривой  $T_{ц}$ . Наличие резко выпадающих точек означает

промахи измерений. Эти точки следует удалить, выделив мышью соответствующую строку таблицы и нажав кнопку «Удалить результат».

6.8. Для проведения вычислений можно воспользоваться программой EXCEL. Для этого следует нажать мышью кнопку «Копировать данные в буфер», расположенную в верхней левой части экрана. Запустить EXCEL и вставить данные из буфера.

6.9. По завершении работы следует установить минимальный ток накала лампы и выключить установку кнопками 4 и 1 (Рис. 2.3), последовательно. Затем выйти из среды «Лаборатория», закрыв ее мышью, и выйти из системы, нажав последовательно «Пуск» и «Выход из системы».

Изучение теплопроводности воздуха

$U_n, В$         $I_n, А$         $P_n, Вт$    
 $T_{эдс} \text{ нити, мВ}$         $T_n, ^\circ C$    
 $T_{эдс} \text{ шил, мВ}$         $T_{ш}, ^\circ C$

$T_n, ^\circ C$	$T_{ш}, ^\circ C$	$P_n, Вт$
○		

Зависимость температуры от мощности

Рисунок 6.1. Стенд на экране монитора.

6.10. Перенести результаты измерений в таблицу 5.1 в рабочей тетради и произвести обработку в соответствии с пп. 5.8 – 5.12.

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

7.1. Какова цель работы?

7.2. В чем состоит суть явления теплопроводности?

7.3. Физический смысл и размерность коэффициента теплопроводности.

7.4. Зависимость коэффициента теплопроводности от параметров газа.

7.5. Закон Фурье. Его физическое толкование.

7.6. Как экспериментально определяется коэффициент теплопроводности?

7.7. О чем свидетельствует линейность графика в координатах  $(T_1 - T_2)$ ,  $P$  и, наоборот, как может быть истолковано отклонение экспериментальных точек от прямой.

7.8. В чем преимущество использования линеаризованного графика для определения коэффициента теплопроводности?

7.9. В чем отличие теплопроводности как механизма передачи тепла от конвекции.

7.10. Какие условия должны быть соблюдены для обеспечения возможности использования приведенных в разделе 2 модельных представлений?

7.11. Какие погрешности могут возникнуть при отклонении экспериментальной ситуации от модели?

## Лабораторная работа № 6

# ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

- изучение адиабатического процесса;
- изучение изотермического процесса.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Термодинамический процесс представляет собой переход газа из одного состояния в другое, характеризующееся иным, по сравнению с исходным, набором параметров. Среди огромного многообразия процессов особое значение имеют так называемые изопроцессы, т.е. процессы, в которых один из параметров состояния остается неизменным. К таким процессам относятся: изобарический, изохорический, изотермический и адиабатический процессы. Целью настоящей работы является изучение последних двух из вышеперечисленных процессов.

### 2. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Состояния большинства реальных газов при давлениях от атмосферного и ниже удовлетворительно описываются уравнением состояния идеального газа (уравнение Менделеева-Клапейрона):

$$pV = \frac{M}{\mu} RT, \quad (2.1)$$

где  $p$  – давление,  $V$  – объем,  $M$  – масса газа,  $\mu$  – молярная масса,  $T$  – температура,  $R$  – газовая постоянная. В условиях постоянства температуры связь между давлением и объемом дается соотношением:

$$pV = const. \quad (2.2)$$



Или, разрешая (2.2) относительно  $p$ , получаем  $p = C/V$ , где  $C = (M/\mu)RT$  - константа. Изучая в реальном эксперименте зависимость  $p$  от  $V$  в условиях, когда постоянство температуры обеспечено, можно не только убедиться в характере зависимости, но и, зная температуру, оценить количество вещества. Необходимым условием осуществления изотермического процесса является его медленное протекание, ибо только при этом условии возможно установление теплового равновесия между рабочим газом и окружающей средой, т.е. установление равенства температур между ними.

Признаком адиабатического процесса является, как известно, отсутствие теплообмена с окружающей средой. Поэтому первое начало термодинамики может быть записано следующим образом:

$$0 = dU + pdV, \quad (2.3)$$

где  $dU$  - изменение внутренней энергии газа.

Используя величину  $C_V$  - молярную теплоемкость при постоянном объеме, уравнение (2.3) можно переписать

$$0 = \nu C_V dT + pdV, \quad (2.4)$$

где  $\nu = M/\mu$  - число молей вещества.

Выражение (2.4) представляет собой дифференциальное уравнение, для решения которого необходимо выполнить известную процедуру разделения переменных. Для этого выразим  $p$  из уравнения состояния, подставим в (2.4) и поделим уравнение на  $T$ :

$$0 = \nu C_V \frac{dT}{T} + \nu R \frac{1}{V} dV, \quad (2.5)$$

После деления (2.5) на  $\nu C_V$ , приводим уравнение к виду

$$0 = \frac{dT}{T} + \frac{R}{C_V} \frac{dV}{V}. \quad (2.6)$$

Интегрирование уравнения дает соотношение

$$TV^{\frac{R}{C_V}} = \text{const} \quad (2.7)$$

С учетом известного уравнения Майера  $C_p = C_V + R$ , а также используя коэффициент Пуассона  $\gamma = C_p/C_V$ , получаем уравнение адиабаты (уравнение Пуассона) в виде

$$TV^{\gamma-1} = \text{const}. \quad (2.8)$$

Выражая  $T$  из (2.1) и подставляя в (2.8), получаем уравнение Пуассона в переменных  $p, V$ :

$$pV^\gamma = \text{const}. \quad (2.9)$$

Изучая зависимость между переменными  $p, V$  в адиабатическом процессе, можно определить коэффициент Пуассона  $\gamma$  (показатель адиабаты), который, как известно, связан с числом степеней свободы  $i$  молекулы газа соотношением

$$\gamma = \frac{i+2}{i}. \quad (2.10)$$

Знание  $i$  позволяет судить о конфигурации молекулы газа. Необходимым условием осуществления адиабатического процесса является его быстрое протекание, поскольку в этом случае теплообмен между газом и окружающей средой не успевает произойти, и таким образом выполняется условие теплоизоляции.

Уравнения (2.2) и (2.9) могут быть обобщены в виде уравнения

$$pV^n = \text{const}, \quad (2.11)$$

где  $n$  принимает значения 1 либо  $\gamma$ .

Показатель  $n$  связан с теплоемкостью  $C$  в изучаемом процессе и теплоемкостями  $C_V$  и  $C_p$  соотношением

$$n = \frac{C - C_p}{C - C_V} \quad (2.12)$$

Процесс, описываемый уравнением (2.11) с любым постоянным показателем степени  $n$  называется политропным процессом, характеризуемым постоянством теплоемкости. Зависимость типа (2.11) может быть легко сведена к линейной зависимости путем логарифмирования

$$\ln p = C - n \ln V. \quad (2.13)$$

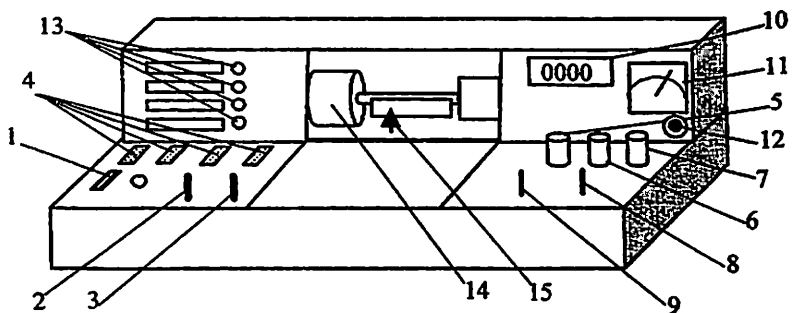
Из наклона экспериментальной прямой, построенной в координатах  $\ln p$ ,  $\ln V$ , можно определить показатель  $n$  и сделать вывод относительно характера процесса.

### 3. ЗАДАНИЕ

Осуществить на экспериментальной установке медленное и быстрое изменение объема газа. Измерить характер зависимостей между параметрами  $p$ ,  $V$  в этих процессах. Убедиться, что реализованные процессы могут быть признаны изотермическим и адиабатическим. Оценить количество вещества и коэффициент Пуассона, сделать вывод о конфигурации газовых молекул.

### .. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка для проведения экспериментов представляет собой настольный блок, внешний вид которого схематически представлен на рис. 4.1. На горизонтальной панели расположены органы управления, на вертикальной – контрольно-измерительные приборы. К органам управления относятся: выключатель 1 «Сеть»; рукоятки 2, 3 «Давление», «Реверс» управления электроприводом; кнопки 4 выбора лабораторной работы, рукоятки 5 «Накал лампы», 6 «Напряжение анода», 7 «Нагрев нити» (в данной работе не используются); переключатели 8, 9 режимов работы измерительных приборов 10, 11. В настоящей работе сигнал с датчика давления поступает на стрелочный 11 прибор (РА2). В табличке под прибором указан коэффициент, на который следует умножать показания прибора. Под прибором расположена рукоятка 12, служащая для установки нуля прибора РА2 в нулевом положении толкателя. Лампочки 13 служат для индикации выбранной лабораторной работы. На задней стенке блока в левой средней части расположена кнопка клапана, служащего для выравнивания давления внутри сосуда с атмосферным давлением. Рабочий узел 14 установки, включающий в себя сосуд переменного объема и электропривод, размещен под оргстеклом в средней части установки. Указатель 15, расположенный перед линейкой с миллиметровыми делениями, позволяет судить об изменении длины горизонтально расположенного гофрированного сосуда, а следовательно, об изменении его объема.



**Рисунок 4.1. Внешний вид лабораторной установки.**

Схема рабочего узла, предназначенного для проведения эксперимента, приведена на рис. 4.2. Рабочим телом, участвующим в термодинамическом процессе, является воздух, заключенный в гофрированный пластмассовый сосуд 1, сжимаемый толкателем 2, присоединенным к электроприводу 3. Изменение объема  $V$  сосуда контролируется указателем 4 и линейкой 5. В нулевом положении указателя 4 сосуд обладает исходным объемом  $V_0$ . Сигнал для измерения давления формируется датчиком 6. Датчик 6 обладает линейной характеристикой. Это означает, что вырабатываемый им электрический сигнал  $dp'$  прямо пропорционален разности  $\Delta p$  между давлением  $p$  внутри сосуда и давлением  $p_0$  вне его. Клапан 7 служит для выравнивания давления внутри сосуда с атмосферным давлением  $p_0$ .

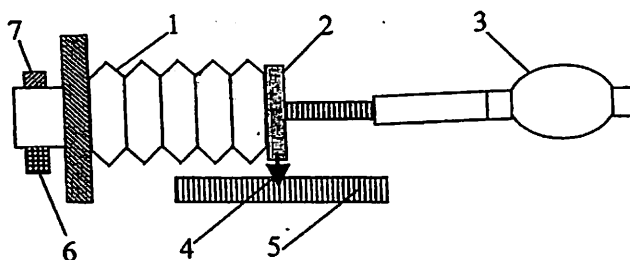


Рисунок 4.2. Схема рабочего узла, используемого для проведения термодинамического процесса.

## 5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

5.1. Убедиться, что все органы управления находятся в исходном состоянии: выключатель 1 и кнопки 4 (Рис. 4.1) выключены.

5.2. Вставить штепсель в розетку и включить установку выключателем 1. При этом должна загореться сигнальная лампочка, расположенная рядом с выключателем.

5.3. С помощью одной из кнопок 4 включить работу «Термодинамические процессы». О включении свидетельствует одна из лампочек 13.

**Примечание.** Если эксперимент проводится на установке, сопряженной с компьютером, то сигнал датчика давления считывается из соответствующего окна на экране монитора. При выполнении работы следовать инструкциям, приведенным в разделе 6.

5.4. Убедиться, что указатель 15 (Рис. 4.1) находится в нулевом положении. Если это не так, то следует установить указатель в нулевое положение, манипулируя рукоятками 2 «Давление» и 3 «Реверс» (Рис. 4.1). Нажать кнопку клапана на задней стенке установки и убедиться, что гофрированный сосуд 1 (Рис. 4.2) полностью восстановил исходную форму. Установить стрелку прибора 11 PA2 на ноль рукояткой 12 (Рис. 4.1). Сделать необходимые записи в табл. 7.1.

5.5. Осуществить изотермическое сжатие, передвинув толкатель на 5 мм с помощью рукоятки 2 «Давление». Выждать 1 – 2 минуты и занести значения  $L$  и  $dp'$  в табл. 7.1.

5.6. Повторить несколько раз процедуру предыдущего пункта, передвигая каждый раз толкатель примерно на 5 мм, пока он не дойдет до крайнего левого положения.

5.7. Рукояткой 3 «Реверс» вернуть толкатель в нулевое положение и уравновесить давления клапаном на задней стенке установки. Выждать 1 – 2 минуты. Рукояткой 12 «Установка нуля» вывести стрелку прибора 11 на ноль.

5.8. Провести эксперимент по адиабатическому сжатию. Для этого рукояткой 2 «Давление» передвинуть толкатель на ~ 5 мм, фиксируя глазом максимальное показание прибора 11 PA2. Внести в табл. 7.2 максимальное показание прибора PA2 и реальное значение  $L$ , считанное с линейки.

5.9. Повторить несколько раз процедуру пунктов 5.7 и 5.8, передвигая толкатель на большее расстояние (~5, 10, 15 мм и т.д.), пока толкатель не дойдет до крайнего левого положения. Всякий

раз фиксировать и заносить в таблицу максимальные показания прибора 11 PA2 и величину  $L$ , определяемую по линейке.

## 6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ НА УСТАНОВКЕ, СОПРЯЖЕННОЙ С КОМПЬЮТЕРОМ

6.1. Включить компьютер.

6.2. Войти в среду «Лаборатория», для чего нажать комбинацию клавиш Ctrl-Alt-Del, ввести имя пользователя "student", нажать "OK". На экране высветится меню.

6.3. Установить указатель мыши на значок «Лаборатория» и нажать дважды на левую кнопку мыши. При этом открывается меню с перечнем работ.

6.4. Выбрать строку с названием работы и щелкнуть мышью. На экране появится стенд с окнами (Рис. 6.1), в которых отображаются измеряемые величины, таблица и график.

6.5. Включить питание лабораторной установки кнопкой 1 «Сеть» (Рис. 4.1). При этом загорится сигнальная лампочка, расположенная рядом с кнопкой 1. Одной из кнопок 4 включить работу «Изучение термодинамических процессов», после чего загорится одна из сигнальных лампочек 13, и в окне стенда «Давление» появится значение величины сигнала, снимаемого с датчика давления. Проконтролировать, что включен режим «Изотермический», о чем свидетельствует надпись в соответствующем окне стенда на экране. Если это не так, то включить режим «Изотермический», нажав мышью кнопку ◀, расположенную рядом с окном.



6.6. Убедиться, что указатель 15 (Рис. 4.1) находится в нулевом положении. Если это не так, то следует установить указатель в нулевое положение, манипулируя рукоятками 2 «Давление» и 3 «Реверс». Нажать кнопку клапана на задней стенке установки и убедиться, что гофрированный сосуд 1 (Рис. 4.2) полностью восстановил исходную форму.

6.7. Нажать мышкой клавишу «Установка нуля» и свести показание в окне «Давление» к минимально возможному.

6.8. Нажать мышкой клавишу «Зафиксировать», внести в окно «Расстояние» нулевое смещение толкателя от крайнего положения и нажать клавишу «Добавить результат». В таблице окажется заполненной первая строка.

6.9. Осуществить изотермическое сжатие, передвинув толкатель на 5 мм с помощью рукоятки 2 «Давление» (Рис. 4.1). Передвижение можно осуществлять короткими нажатиями на рукоятку 2 «Давление». Выждать 1 – 2 минуты, и вновь нажать мышкой клавишу «Зафиксировать», внести в окно «Расстояние» смещение толкателя от крайнего положения и опять нажать клавишу «Добавить результат».

6.10. Повторить несколько раз процедуру предыдущего пункта, передвигая толкатель примерно на 5 мм от предыдущего положения, пока толкатель не дойдет до крайнего левого положения. Таблица на стенде окажется заполненной, и собственно экспериментальная часть изучения изотермического процесса на этом завершается.

**6.11.** Рукояткой 3 «Реверс» вернуть толкатель в нулевое положение и уравновесить давления клапаном на задней стенке установки. Изменить режим на адиабатический, нажав кнопку ► так, чтобы в окне появилась надпись «Адиабатический». Выждать 1 – 2 минуты. Нажатием клавиши «Установка нуля» свести показание в окне «Давление» к минимально возможному.

**6.12.** Зафиксировать исходные показания, нажав клавишу «Начать эксперимент», записав в окне «Расстояние» цифру 0 и нажав клавишу «Добавить результат». В таблице появится первая строка.

**6.13.** Нажать клавишу «Начать эксперимент». Осуществить адиабатическое сжатие, передвинув рукояткой «Давление» толкатель примерно на 5 мм в один прием. Занести в окно «Расстояние» величину, определяемую указателем и нажать клавишу «Добавить результат».

**Примечание.** В режиме «Адиабатический» в окне «Давление» автоматически регистрируется максимальное показание датчика.

**6.14.** Вернуть толкатель в нулевое положение рукояткой 3 «Реверс» (Рис. 4.1), уравновесить давления клапаном. Выждать 1 – 2 минуты. Нажатием клавиши «Установка нуля» свести показание в окне «Давление» к минимально возможному.

**6.15.** Повторить действия по пп. 6.13 – 6.14, увеличивая всякий раз на ~ 5 мм расстояние, на которое перемещается толкатель. Следует помнить, что процесс может быть признан адиабатическим только при быстром осуществлении. Это означает, что сжатие следует производить в один прием. После того, как

перемещение толкателя будет произведено до крайнего левого положения, экспериментальная часть исследования заканчивается. Таблица оказывается заполненной, а на графике в правой части стенда присутствуют две кривых зависимостей сигнала датчика давления от смещения толкателя.

6.16. Графики позволяют контролировать качество эксперимента. При правильном проведении всех манипуляций экспериментальные точки должны укладываться на плавные кривые, не содержащие изломов и перегибов. Точки появляются на графике при нажатии клавиши , расположенной в левой верхней части экрана монитора. Кривая, соответствующая адиабатическому процессу, должна идти заметно выше изотермической кривой. Если какие-либо точки не соответствуют указанным условиям, то они должны быть признаны промахами, и соответствующие им результаты должны быть удалены из таблицы. Удаление осуществляется выделением мышью строки таблицы и нажатием клавиши «Удалить результат». Соответствующий эксперимент может быть проведен заново.

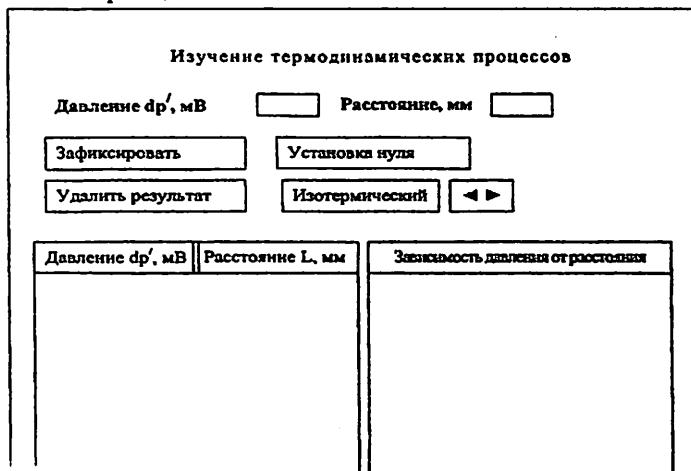


Рисунок 6.1. Стенд на экране монитора

## 7. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

7.1. Переписать результаты измерений из таблицы на стенде в таблицы 7.1 и 7.2 в рабочей тетради. Заполнить все строки таблиц 7.1 и 7.2. Для этого использовать:  $p_0=100$  кПа или по указанию преподавателя, а также соотношение между показаниями прибора ( $dp'$ , мВ) и действительным превышением ( $\Delta p$ , Па) давления в сосуде над давлением окружающей среды

$$\Delta p = dp'K, \quad (7.1)$$

где  $K = 0,118$  кПа/мВ. При вычислении объема сосуда руководствоваться формулой,

$$V = V_0 - SL, \quad (7.2)$$

где  $V_0$  – начальный объем,  $S$  – площадь поперечного сечения сосуда,  $L$  – смещение толкателя. Использовать  $S = 80$  см<sup>2</sup> и значения  $V_0$ , указанные на табличках, размещенных на каждой из установок. Вычисление давления  $p$  производить по формуле

$$p = (p_0 + \Delta p) \quad (7.3)$$

7.2. Убедиться, что проведенные процессы являются изотермическим и адиабатическим. Для этого нанести экспериментальные точки из таблиц 7.1 и 7.2 на график в координатах  $\ln p$ ,  $\ln V$ .

**Таблица 7.1. Результаты измерений параметров в  
изотермическом процессе**

№	1	2	3	4	5	6	7
$dp'$ , мВ							
$\Delta p$ , кПа							
$L$ , см							
$V=V_0-SL$ , см <sup>3</sup>							
$p=(p_0+\Delta p)$ , кПа							
$\ln p$							
$\ln V$							

**Таблица 7.2. Результаты измерений параметров в  
адиабатическом процессе**

№	1	2	3	4	5	6	7
$dp'$ , мВ							
$\Delta p$ , кПа							
$L$ , см							
$V_0-SL$ , см <sup>3</sup>							
$p=(p_0+\Delta p)$ , кПа							
$\ln p$							
$\ln V$							

7.3. Провести прямые по этим точкам с учетом погрешностей измерений и определить показатели  $n$  в уравнении  $pV^n = const$  в обоих случаях. Если точки на графике адиабатического процесса не укладываются на прямую, то следует ограничиться несколькими (4 - 5) точками на начальном участке сжатия.

7.4. При условии, что первый эксперимент дает  $n \approx 1$ , нанести экспериментальные точки на график в координатах  $p, 1/V$ . Провести прямую с учетом погрешностей измерений.

7.5. Сравнивая эту прямую с уравнением  $p = C/V$ , полученным из (2.1), определить количество вещества в сосуде, приняв за  $T$  комнатную температуру.

7.6. Учитывая, что для второго эксперимента  $n = \gamma$ , определить число степеней свободы в молекуле газа и сделать вывод о числе атомов в молекуле. Если  $n$  получается заметно меньше 1,33 – наименьшего значения, предсказываемого теорией, то это означает, что исследуемый процесс является не адиабатическим, но политропным. В этом случае следует принять число степеней свободы газа  $i=5$  и по выражению (2.12) оценить молярную теплоемкость газа в изучаемом процессе, после чего сравнить ее с  $C_v$  и  $C_p$ .

7.7. Для проведения вычислений можно воспользоваться программой EXCEL. Для этого следует нажать мышью кнопку «Копировать данные в буфер», расположенную в верхней левой части экрана. Запустить EXCEL и вставить данные из буфера.

7.8. По завершении работы следует установить толкатель на нулевую отметку, выключить работу и выключить установку кнопкой «Сеть». После этого следует выйти из среды «Лаборатория», закрыв ее мышью, и выйти из системы, нажав последовательно «Пуск» и «Выход из системы».

## 8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 8.1. Чем задается состояние газа?
- 8.2. Что называется количеством вещества, и в каких единицах оно измеряется?
- 8.3. Что называется термодинамическим процессом?
- 8.4. Перечислите изопрцессы и охарактеризуйте их.
- 8.5. Укажите условия реализации изотермического и адиабатического процессов. Обоснуйте ответ.
- 8.6. Дайте определение теплоемкости и приведите ее значение в изопрцессах.
- 8.7. Какие из термодинамических параметров, используемых в данной работе, являются аддитивными?
- 8.8. Какие из термодинамических параметров, используемых в данной работе, являются не аддитивными?
- 8.9. Что такое обратимые процессы?
- 8.10. Какой процесс называется политропным, и каковы его признаки?
- 8.11. В чем отличия молекулярно-кинетического и термодинамического методов описания вещества?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Q.P. Abduraxmanov, V.S.Xamidov, N.A. Axmedova. "FIZIKA" Darslik. Toshkent. 2018.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. В 3 т. Том 1. Механика. Молекулярная физика. –М.: ООО Издательство «Лань», 2018.
3. Physics: Principles with Applications 6th Edition by Douglas C.Giancoli, 2014.
4. Иродов И.Е. Физика макросистем. –М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. §§ 2.1, 2.2.
5. П.А.Типлер, Р.А.Ллуэллин Современная физика (Лучший зарубежный учебник в двух томах). (1том). М.: Мир, 2007.
6. П.А.Типлер, Р.А. Ллуэллин Современная физика (Лучший зарубежный учебник в двух томах). (2том). М.: Мир, 2007.
7. Трофимова Т.И. Физика (справочник с примерами решения задач). Учебное пособие. М.Высшее образование. 2008. с.447.
8. Ландау Л.Д., Ахиезер А.И., Лифшиц Е.М. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика. –М.: Наука, 1969.
9. Трофимова Т. И. Физика в таблицах и формулах, Издательство: Академия, с. 448, 2010 г.
10. Абдурахманов К.П., Тигай О.Э., Хамидов В.С. Курс мультимедийных лекций по физике. 2012.
11. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М. Издательский центр «Академия». 2003. 720 с.
12. Иродов И.Е. Механика. Основные законы. 5-е Изд., испр. М.: Лаборатория базовых знаний. 2000. 320 с



## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1	
<b>ИЗУЧЕНИЕ КИНЕМАТИКИ И ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ МАЯТНИКА ОБЕРБЕКА .....</b>	<b>3</b>
Лабораторная работа № 2	
<b>ИЗУЧЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ ФИЗИЧЕСКОГО МАЯТНИКА НА ПРИМЕРЕ МАЯТНИКА ОБЕРБЕКА .....</b>	<b>15</b>
Лабораторная работа № 3	
<b>ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАКСВЕЛЛА .....</b>	<b>25</b>
Лабораторная работа № 4	
<b>ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БОЛЬЦМАНА .....</b>	<b>38</b>
Лабораторная работа № 5	
<b>ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЗДУХА .....</b>	<b>51</b>
Лабораторная работа № 6	
<b>ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ .....</b>	<b>62</b>
Литература .....	78

Формат 60x84 1/16. Печ. лист 5.

Заказ № 55. Тираж 20.

Отпечатано в «Редакционно издательском»  
отделе при ТУИТ.

Ташкент ул. Амир Темур, 108.

360000

**Механика. Молекулярная физика.**  
**Методическое пособие по выполнению**  
**лабораторных работ на многомодульном**  
**лабораторном устройстве по физике.**  
**Предназначена для студентов**  
**Ташкентского университета**  
**информационных технологий имени**  
**Мухаммада ал-Харазмий.**

**Рассмотрено и одобрено на заседании**  
**кафедры физики протокол**  
**№ 19 от 10.01.2023 г.**

**Утверждено на заседании НМС**  
**факультета Телевизионных технологий**  
**протокол № 4 от 13.01.2023 г.**

**Рекомендовано к тиражированию НМС**  
**ТУИТ имени Мухаммада ал-Харазмий**  
**протокол № 7 (164) от 29.03.2023 г.**

**Составители:**

**К.П. Абдурахманов, Х.М. Холмедов,**  
**Н.А.Ахмедова, У.Х. Тахиров**

**Рецензент: доц. О.О. Очилова**