

Б.К.Лаптенков

**ПРИЛОЖЕНИЕ №1  
К ВИРТУАЛЬНОМУ ПРАКТИКУМУ ПО ФИЗИКЕ  
ДЛЯ ВУЗОВ**

**ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ**  
по курсу физики

**С КОМПЬЮТЕРНЫМИ МОДЕЛЯМИ**

*для студентов всех специальностей  
всех форм обучения*

**МОСКВА - 2020**

Б.К.Лаптенков

Приложение №1 к Виртуальному практикуму по физике для ВУЗов. Лабораторные работы по курсу физики с компьютерными моделями.

Учебное пособие для студентов высших технических учебных заведений дневной, вечерней и заочной (дистанционной) форм обучения. -М.:2020.-64 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.6.....	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.7.....	9
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.8.....	14
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.9.....	17
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.10.....	23
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.11.....	29
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.12.....	32
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.13.....	35
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.14.....	39
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.15.....	44
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.16.....	48
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.17.....	52
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.5.....	59
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.5.....	63
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.6.....	67
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.7.....	73

## **ВВЕДЕНИЕ**

Методическое пособие: «Приложение №1 к Виртуальному практикуму по физике для ВУЗов» разработано кандидатом физико-математических наук, доцентом кафедры общей физики Волжского филиала МАДИ (ГТУ), доцентом кафедры общей физики ЧувГУ Лаптенковым Б.К. Пособие подготовлено на базе обучающей программы ООО «ФИЗИКОН» «Открытая Физика 1.1» и является дополнением к комплекту лабораторных работ, вошедших в состав «Виртуального практикума по физике для ВУЗов» и разработанных профессором МГТУГА Тихомировым Ю.В. В стилевом оформлении и методическом подходе описание работ Приложения полностью соответствует описанию работ Виртуального практикума.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.6

### ПРОВЕРКА ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и в учебниках 1. Трофимова Т.И. Курс физики. Гл.3, §§12,13. 2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. Гл.3, §§3.1-3.4. Выберите «Механика» и «Движение тела по наклонной плоскости». Нажмите кнопку с изображением страницы во внутреннем окне. Прочитайте теорию и запишите основные сведения в свой конспект лабораторной работы. Закройте окно теории, нажав кнопку с крестом в правом верхнем углу внутреннего окна.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- Знакомство с применением физических моделей - консервативная и диссипативная механическая система.
- Экспериментальная проверка закона сохранения механической энергии в консервативных и диссипативных системах.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

РАБОТУ ПОСТОЯННОЙ СИЛЫ  $\vec{F}$  на перемещение  $\vec{s}$  её точки приложения измеряют произведением

$$A = F s \cos \alpha, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол между направлением силы и перемещения. Если на тело действует несколько сил, каждая из которых совершает над ним работу, то вся произведённая работа равна алгебраической сумме работ отдельных сил:

$$A = \sum_{i=1}^n A_i \quad (2)$$

ЭНЕРГИЯ – универсальная мера различных форм движения и взаимодействия материи. Часть энергии тела, соответствующую механическим формам движения материи называют *механической* энергией. Её принято делить на *кинетическую* и *потенциальную*. В случае движения материальной точки или поступательного движения твёрдого тела

КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ равна  $W_k = \frac{mv^2}{2}$ . (3)

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ  $W_n$  – часть механической энергии, обусловленная взаимным расположением тел или частей тела и их взаимодействием друг с другом.

ПОЛНАЯ МЕХАНИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ СИСТЕМЫ ТЕЛ равна арифметической сумме кинетических и потенциальных энергий всех тел, входящих в данную систему:  $W_{полн} = \sum W_k + \sum W_n$ . (4)

КОНСЕРВАТИВНЫМИ называются силы, работа которых при перемещении тела из одного состояния в другое не зависит от того, по какой траектории произошло это перемещение.

Если работа по перемещению тела зависит от траектории перемещения из одной точки в другую, то такая сила называется **ДИССИПАТИВНОЙ**.

**ТЕОРЕМА О КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ:** *Изменение кинетической энергии равно работе всех сил, действующих на это тело.*

**ТЕОРЕМА О ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ:** *Работа консервативных сил равна изменению потенциальной энергии системы, взятому с противоположным знаком.*

$$A_{\text{конс}} = -(W_{n2} - W_{n1}). \quad (5)$$

**ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ:** в системе тел, между которыми действуют только консервативные силы, полная механическая энергия сохраняется.

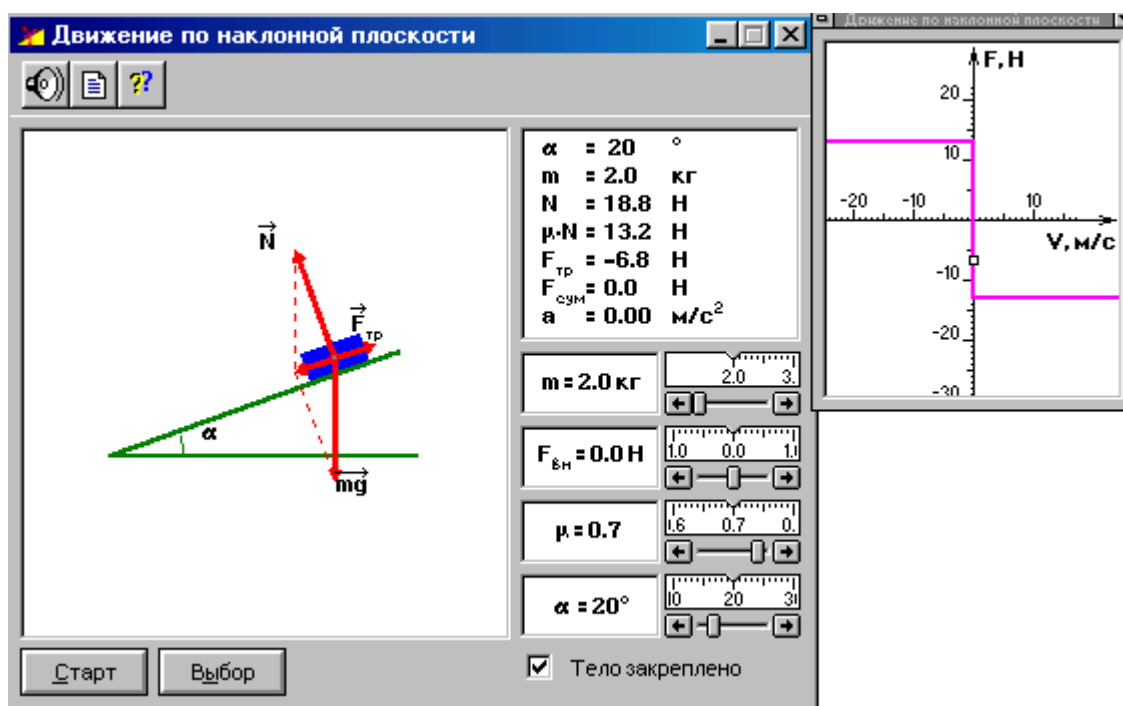
$$W_{\text{полн}} = \text{const}. \quad (6)$$

Если на тело в процессе его перехода из одного состояния в другое кроме консервативных сил (сил тяготения и упругости) действуют другие силы, то изменение полной механической энергии равно работе этих сил:

$$W_{\text{полн2}} - W_{\text{полн1}} = \sum A. \quad (7)$$

### МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ:

Внимательно рассмотрите окно опыта. Найдите все регуляторы и другие основные элементы. Зарисуйте в свой конспект схему опыта.



После нажатия мышью кнопки «Выбор» установите с помощью движков регуляторов значения массы тела  $m$ , угла наклона плоскости  $\alpha$ , внешней силы  $F_{\text{вн}}$ , коэффициента трения  $\mu$  и ускорения  $a$ , указанных в табл.1 для вашей бригады.

Потренируйтесь в синхронном включении секундомера и снятия метки «тело закреплено» одиночным щелчком курсора мыши на кнопке в правом нижнем углу окна опыта

Одновременно включите секундомер и снимите метку «тело закреплено». Выключите секундомер в момент остановки тела в конце наклонной плоскости.

Проделайте этот опыт 10 раз и результаты измерения времени соскальзывания тела с наклонной плоскости запишите в табл. 2.

**ТАБЛИЦА 1. Исходные параметры опыта**

№ брига.	1	2	3	4	5	6	7	8
$m, \text{ кг}$	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	2,9	2,7
$\mu$	0,10	0,14	0,18	0,22	0,26	0,30	0,34	0,38
$\alpha, \text{ град}$	20	24	26	30	34	38	42	46
$F_{\text{вн}}, \text{ Н}$	-4	-3	-2	-1	1	2	3	4
$a, \text{ м/с}^2$								

**ТАБЛИЦА 2. Результаты измерений и расчётов**

№ изм.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Сред. знач.	$\delta$
$t, \text{ с}$												
$v, \text{ м/с}$												
$S, \text{ м}$												
$W_{\kappa}, \text{ Дж}$												
$W_n, \text{ Дж}$												
$A_{\text{тр}}, \text{ Дж}$												
$A_{\text{вн}}, \text{ Дж}$												
$W_{\text{полн}}, \text{ Дж}$												

**ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА:**

Вычислите по формулам:

а)  $vt$  - скорость тела в конце наклонной плоскости;

б)  $S = \frac{at^2}{2}$  - длину наклонной плоскости;

в)  $W_{\kappa} = \frac{mv^2}{2} = \frac{m^2 a^2 t^2}{2}$  - кинетическую энергию тела, в конце наклонной плоскости;

г)  $W_n = mgh = mgS \sin \alpha = mg \frac{at^2}{2} \sin \alpha$  - потенциальную энергию тела в верхней точке наклонной плоскости;

д)  $A_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} S \cos \vartheta = \mu NS \cos \vartheta = -\mu mg \cos \alpha \frac{at^2}{2}$  - работу силы трения на участке спуска;

е)  $|A_{\text{вн}}| = |F_{\text{вн}} S \cos \vartheta| = \left| F_{\text{вн}} \frac{at^2}{2} \right|$  - работу внешней силы на участке спуска

и запишите эти значения в соответствующие строки табл. 2.

Вычислите средние значения этих параметров и запишите их в столбец «средние значения» табл.2.

По формуле (7) проверьте выполнение закона сохранения механической энергии при движении тела по наклонной плоскости, рассчитайте погрешности и сделайте выводы по результатам проведённых опытов.

## Вопросы и задания для самоконтроля

1. В чём заключается закон сохранения механической энергии?
2. Для каких систем выполняется закон сохранения механической энергии?
3. В чём состоит различие между понятиями энергии и работы?
4. Чем обусловлено изменение потенциальной энергии?
5. Чем обусловлено изменение кинетической энергии?
6. Необходимо ли выполнение условия замкнутости механической системы тел для выполнения закона сохранения механической энергии?
7. Какие силы называются консервативными?
8. Какие силы называются диссипативными?
9. Тело медленно втаскивают в гору. Зависят ли от формы профиля горы: а) работа силы тяжести; б) работа силы трения? Начальная и конечная точки перемещения тела фиксированы.
10. Тело соскальзывает с вершины наклонной плоскости без начальной скорости. Зависит ли работа силы трения на всём пути движения тела до остановки на горизонтальном участке: а) от угла наклона плоскости; б) от коэффициента трения?
11. По наклонной плоскости с одной и той же высоты соскальзывают два тела: одно массой  $m$ , другое массой  $2m$ . Какое из тел пройдёт до остановки по горизонтальному участку путь больший и во сколько раз? Коэффициенты трения для обоих тел одинаковы.
12. Санки массой  $m$  скатились с горы высотой  $H$  и остановились на горизонтальном участке. Какую работу необходимо совершить для того, чтобы поднять их на гору по линии скатывания.
13. С одинаковой начальной скоростью тело проходит: а) впадину; б) горку, имеющие одинаковые дуги траекторий и одинаковые коэффициенты трения. Сравните скорости тела в конце пути в обоих случаях.



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.7

### ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ТЕЧЕНИЯ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и в учебниках 1. Трофимова Т.И. Курс физики. Гл.6, §§28,29,30. 2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. Гл.3, §§3.5. Выберите «Механика» и «Течение идеальной жидкости». Нажмите кнопку с изображением страницы во внутреннем окне. Прочитайте теорию и запишите основные сведения в свой конспект лабораторной работы. Закройте окно теории, нажав кнопку с крестом в правом верхнем углу внутреннего окна.

#### **ЦЕЛЬ РАБОТЫ:**

- Знакомство с компьютерной моделью течения идеальной жидкости.
- Экспериментальная проверка уравнений неразрывности и Бернулли.
- Экспериментальное определение расхода жидкости.

#### **КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:**

**ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТЬЮ** называется жидкость, в которой отсутствует внутреннее трение.

**ЛИНИЕЙ ТОКА** называется мысленно проведённая в потоке линия, касательная к которой в любой её точке совпадает по направлению с вектором скорости жидкости в этой точке.

**ТРУБКОЙ ТОКА** называется поверхность, образованная линиями тока, которые проведены через все точки замкнутого контура.

**ДАВЛЕНИЕМ  $p$  жидкости** называется физическая величина, определяемая нормальной силой, действующей со стороны жидкости на единицу площади

$$p = \frac{F}{\Delta S}. \quad (1)$$

Если жидкость несжимаема, то её плотность не зависит от давления. Тогда при поперечном сечении  $S$  столба жидкости на глубине  $h$  при плотности  $\rho$  вес будет равен  $P = \rho gSh$ , а давление на нижнее основание

$$p = \frac{P}{S} = \frac{\rho gSh}{S} = \rho gh, \quad (2)$$

которое называется *гидростатическим давлением*.

**УРАВНЕНИЕ НЕРАЗРЫВНОСТИ** для несжимаемой жидкости имеет вид:

$$Sv = \text{const}. \quad (3)$$

**УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ:**

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = \text{const}, \quad (4)$$

где  $p$  называется статическим давлением,  $\frac{\rho v^2}{2}$  - динамическим давлением.

Для горизонтальной трубки тока ( $h_1=h_2$ ) выражение (4) принимает вид

$$\frac{\rho v^2}{2} + p = \text{const} \quad (5) \text{ и называется полным давлением.}$$

Из уравнения (5) следует, что давление и скорость течения жидкости в двух точках 1 и 2 на одной и той же линии тока связаны соотношением:

$$\rho g(h_2 - h_1) = \frac{\rho}{2}(v_1^2 - v_2^2) \text{ или } g = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2(h_2 - h_1)} \quad (6)$$

РАСХОДОМ ЖИДКОСТИ называется объём жидкости  $Q$ , протекающий за 1 с через поперечное сечение трубы

$$Q = vS. \quad (7)$$

Пусть  $S_1$  и  $S_2$  – площади поперечного сечения широкого и узкого участков трубы, а  $p_1$  и  $p_2$  – статические давления в этих сечениях трубы, измеряемые с помощью манометрических трубок. Тогда уравнение Бернулли (5) можно записать в виде

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + p_2 \quad (8)$$

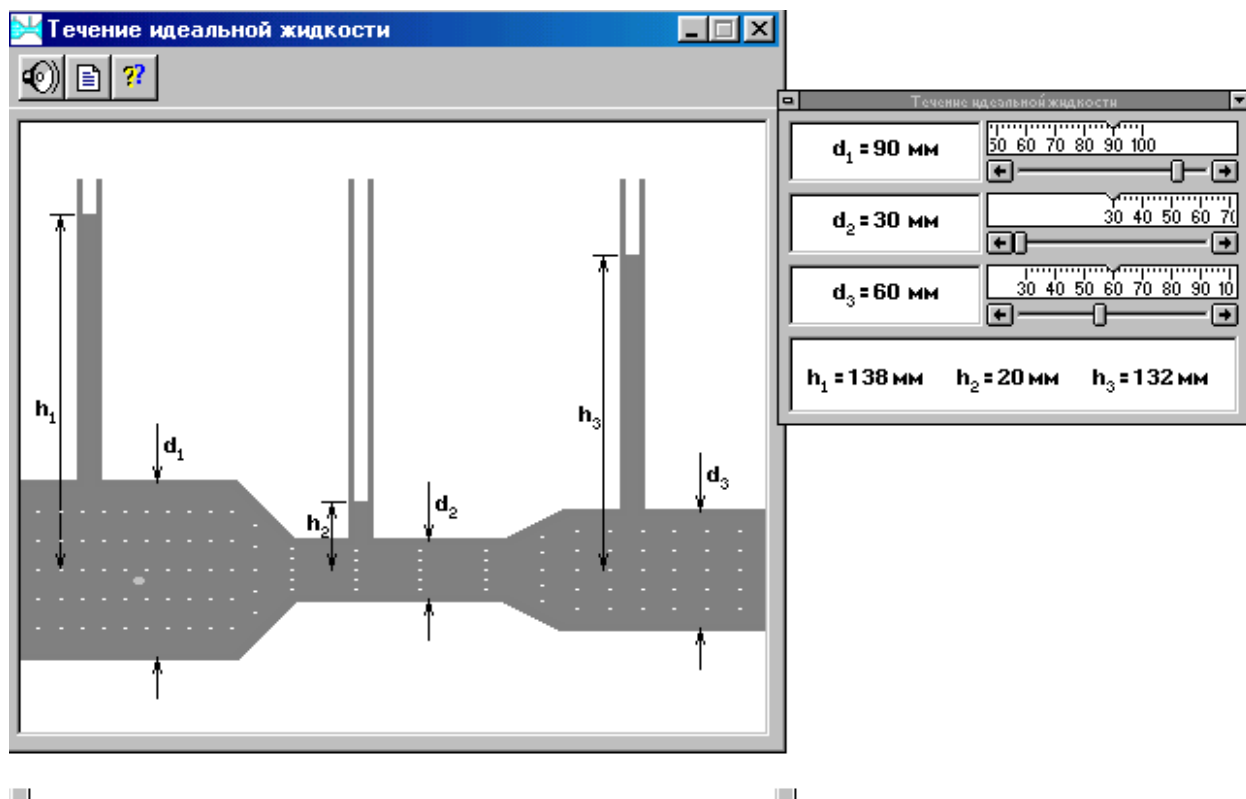
Так как жидкость несжимаема, то  $\rho v_1 S_1 = \rho v_2 S_2$ ,  $v_2 = v_1 \frac{S_1}{S_2}$ . С другой

стороны:  $p_2 - p_1 = \rho g \Delta h$ , и  $\frac{\rho v_1^2}{2} \left(1 - \frac{S_1^2}{S_2^2}\right) = \rho g \Delta h$ . Откуда получим:  $v_1 = \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - \frac{S_1^2}{S_2^2}}}$  и

$$Q = v_1 S_1 = S_1 \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - \frac{S_1^2}{S_2^2}}}. \quad (9)$$

### МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ:

Внимательно рассмотрите рисунок опыта и зарисуйте необходимое в свой конспект лабораторной работы.



1. Установите с помощью мыши одинаковое значение диаметров трубы  $d_1 = d_2 = d_3$  на всех трёх её участках, равное величине  $D_1$ , указанное в табл.1 для вашей бригады.
2. С помощью миллиметровой линейки измерьте всю длину трубы от левого края окна опыта до правого  $L_{\text{экс}}$  и её диаметр  $D_{\text{экс}}$
3. Определите «модельную» длину трубы  $L_m$  по формуле  $L_m = \frac{D_1}{D_{\text{экс}}} L_{\text{экс}} = k L_{\text{экс}}$  и запишите эти значения в табл. 2.
4. Нажатием кнопки II в верхней части окна опыта остановите течение жидкости.
5. Зафиксируйте своё внимание на пунктирной линии в жидкости (5 вертикальных светлых точек в трубе), находящейся на входе в трубу. Нажатием кнопки ► возобновите течение жидкости по трубе и одновременно включите секундомер. Не выпуская из внимания выделенную линию и сопровождая визуально её течение по трубе, выключите секундомер в момент прохождения ей выходного сечения трубы. Запишите это время в таблицу 2.
6. Проведите этот опыт 10 раз и каждое значение  $t_i$  запишите в таблицу 2.
7. Запишите в табл. 2 значения  $H_1 = h_1 = h_2 = h_3$ .
8. С помощью курсора мыши установите второе, одинаковое для всех трёх секций трубы, значение диаметра  $D_2$ , указанное в таблице 1 для вашей бригады, и повторите измерения по п.п. 1-7.

**ТАБЛИЦА 1. Значения диаметров трубы**

Номер бригады	D1 мм	D2 мм	Номер бригады	D1 мм	D2 мм
1	30	70	5	38	86
2	32	74	6	40	90
3	34	78	7	42	94
4	36	82	7	44	98

**ТАБЛИЦА 2. Результаты измерений**

Номер измерения	$D_1=$ ____ $H_1=$ ____			$D_2=$ ____ $H_2=$ ____		
	$t_i$	$v_i$	$g_i$	$t_i$	$v_i$	$g_i$
1						
2						
...						
10						
Средние значения						

**ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА:**

1. По формуле  $v_i = \frac{L_m}{t_i}$  определите скорость течения жидкости в каждом опыте и её

среднее значение  $\langle v_1 \rangle = \frac{\sum_{i=1}^{10} v_i}{10}$  и  $\langle v_1 \rangle^2$ .

2. По формуле  $g = \frac{\langle v_1 \rangle^2 - \langle v_2 \rangle^2}{2(H_2 - H_1)}$  определите экспериментальное значение ускорения свободного падения и сравните его с теоретическим значением.

3. По формуле  $D_1^2 \langle v_1 \rangle = D_2^2 \langle v_2 \rangle$  проверьте выполнение в вашем опыте уравнения неразрывности.

4. По формуле (9) рассчитайте объём жидкости, протекающей через сечение трубы за 1 с.

5. Определите погрешность проведённых измерений.

### **Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Каков физический смысл уравнения неразрывности для несжимаемой жидкости и как его вывести?
2. Выведите уравнение Бернулли.
3. Как в потоке жидкости можно измерить статическое, динамическое и полное давление?
4. Сформулируйте и объясните законы Архимеда и Паскаля.
5. Какое течение жидкости называется ламинарным и турбулентным?
6. Каким критерием определяется переход режима течения жидкости от ламинарного к турбулентному?
7. Какое явление называется вязкостью жидкости?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.8

### ИЗУЧЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СТРУНЫ («Механические колебания и волны», «Нормальные моды струны»)

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- Изучение колебаний в системах с распределёнными параметрами на примере поперечных стоячих волн в упругой горизонтальной струне.
- Наблюдение картины распределения амплитуд колебаний точек струны при образовании стоячих волн.
- Количественная проверка формулы скорости распространения колебаний вдоль струны.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ – это особый случай интерференции, возникающий при наложении двух бегущих волн, распространяющихся навстречу друг другу с одинаковыми частотами и амплитудами:

$$\xi_1 = A \cos(\omega t - kx), \quad \xi_2 = A \cos(\omega t + kx) \quad (1)$$

Сложив эти уравнения и учитывая, что  $k = 2\pi/\lambda$ , получим уравнение стоячей волны:

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = 2A \cos kx \cos \omega t = 2A \cos(2\pi x/\lambda) \cos \omega t. \quad (2)$$

Из уравнения (2) следует, что в каждой точке этой волны происходят колебания с одной и той же частотой  $\omega$  и амплитудой  $2A \cos(2\pi x/\lambda)$ , зависящей от координаты  $x$  рассматриваемой точки.

В точках среды, где  $2\pi x/\lambda = \pm m\pi$  ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ), амплитуда колебаний достигает максимального значения, равного  $2A$ . В точках среды, где  $2\pi x/\lambda = \pm(m + 1/2)\pi$ , амплитуда колебаний обращается в нуль.

Точки, в которых амплитуда максимальна, называются *пучностями стоячей волны*, а точки, в которых амплитуда колебаний равна нулю, называются *узлами стоячей волны*.

В гибкой однородной струне, натянутой между двумя точками и выведенной из положения равновесия, могут установиться стоячие волны. При этом на длине струны  $L$  всегда должно укладываться целое число стоячих волн. При этом струна делится неподвижными точками – узлами – на несколько равных отрезков, длина которых равна половине длины бегущей волны. Следовательно, можно записать

$$L = n(\lambda/2), \quad (3)$$

где  $n$  – целое число, определяющее количество полуволн, уложившихся на всей длине струны  $L$ .

Так, как длина волны  $\lambda$  связана со скоростью распространения волны  $v$  и частотой  $\nu$

соотношением  $v = \lambda\nu$ , то, учитывая (3), имеем

$$\nu = \frac{n}{2L} v. \quad (4)$$

Струна, следовательно, может колебаться не с одной частотой, а с целым спектром частот, соответствующим собственным (нормальным)

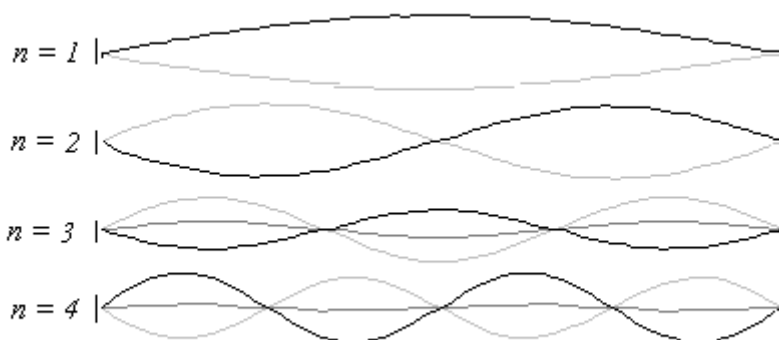


Рис. 1

колебаниям струны. В общем случае любые сложные колебания в струне можно представить как суперпозиция нескольких собственных колебаний, отличающихся не только своими частотами, но и своими амплитудами для отдельных точек струны. Распределение амплитуд отдельных точек волны при собственных колебаниях для различных значений  $n$  имеет вид, изображённый на рис.1.

Опыт показывает, что скорость распространения импульса деформаций (колебаний) вдоль струны определяется силой натяжения струны  $F$  и линейной плотностью  $\mu$  материала струны:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}. \quad (5)$$

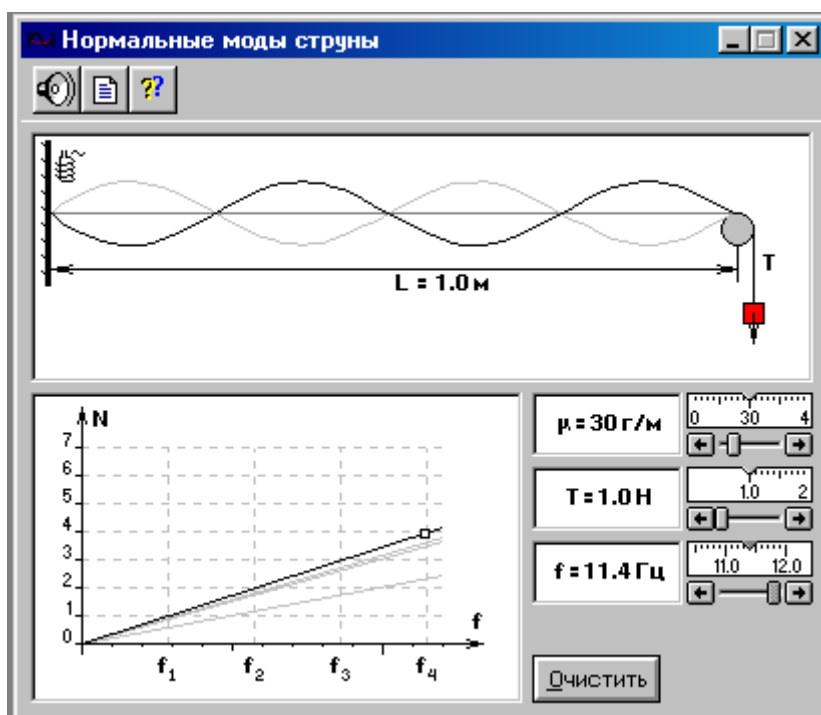
Тогда с учётом формулы (5) формула (4) примет вид:

$$v = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}. \quad (6)$$

### МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ:

1. Установите с помощью движков регуляторов постоянные значения линейной плотности материала и силы натяжения струны, указанных в таблице 1 для вашей бригады.

2. Установите начальную частоту колебания струны  $f = 1,0$  Гц и, постепенно увеличивая её значение, получите устойчивые колебания струны при  $n = 1$  (см распределение амплитуд точек струны при  $n = 1$ ).



3. Аналогичным образом получите стоячие волны соответствующие различным значениям  $n$  и заполните табл.2.

4. Установите второе значение линейной плотности материала струны из табл.1 для вашей бригады и проделайте измерения п.2 и 3 ещё раз и заполните табл.3.

**Таблица 1.**

№ бригады	1	2	3	4	5	6	7	8
Т, Н	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
μ, г/м	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8
	9,1	9,2	9,3	9,4	9,5	9,6	9,7	9,8

**Таблицы 2, 3. Результаты измерений и расчётов**

n <sub>i</sub>	1	2	3	4	5	6	7	8
v <sub>i</sub>								
v <sub>i</sub> <sup>2</sup>								

### **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА:**

1. Результаты измерений представьте в виде двух графиков, откладывая по оси абсцисс значения  $v_i^2$ , а по оси ординат – соответствующие им значения  $n_i^2$ .

2. По тангенсу угла наклона к оси абсцисс каждого графика определите, используя формулу  $\mu = \frac{T}{4L^2} \frac{\Delta n^2}{\Delta v^2}$ , значения линейной плотности материала струны и сравните его значение с установочным.

3. Оцените погрешность измерений и сделайте выводы по графикам и ответу.

### **Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Что такое волна?
2. Какая волна называется продольной?
3. Какая волна называется поперечной?
4. Что такое волновой фронт и волновая поверхность?
5. Что называется длиной волны, волновым числом?
6. Какая волна является: а) бегущей; б) стоячей; в) плоской; г) сферической?
7. При каких условиях возникают стоячие волны?
8. Запишите уравнение стоячей волны.
9. Запишите волновое уравнение.
10. Чем стоячая волна отличается от бегущей?
11. Что такое пучность и узел стоячей волны?
12. Чему равно расстояние между двумя ближайшими пучностями стоячей волны?
13. Запишите формулы определения координат пучностей и узлов стоячей волны.
14. Объясните механизм образования стоячих волн при отражении бегущей волны от границы раздела двух сред различной плотности.
15. От чего зависит скорость распространения упругой волны в струне?
16. Что такое основная частота струны?
17. Что такое гармоники основной частоты?
18. Запишите соотношение между частотой и волновым числом нормальных мод струны.
19. Какие волны называют диспергирующими?
20. Что такое Фурье-анализ?

### **ЛИТЕРАТУРА**



1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2001, Гл.19, §157.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 2000, Гл.29, §§29.6



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.9

### ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЛН («Механические колебания и волны», «Механические волны»)

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- Определение фазовой скорости распространения поперечных волн на натянутом жгуте.
- Проверка формулы фазовой скорости распространения волн на поверхности жидкости.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

Процесс распространения колебаний в сплошной среде называется механическим ВОЛНОВЫМ ПРОЦЕССОМ ИЛИ ВОЛНОЙ.

Основное свойство всех волн состоит в том, что в волне происходит перенос энергии без переноса вещества.

Каждый тип механических волн может быть возбужден в определенном веществе или среде. При распространении волны частицы среды в зависимости от природы волны испытывают смещения различного рода.

Если частицы среды испытывают смещения в направлении, перпендикулярном направлению распространения, такая волна называется поперечной. Примером волны такого рода может служить волна в натянутой струне.

Если смещения частиц среды происходят в направлении распространения волны, такая волна называется продольной. Волны в упругом стержне или звуковые волны в газе являются примерами продольных волн.

Волны на поверхности воды имеют как поперечную, так и продольную компоненты.

В каждом типе бегущих волн возмущение распространяется через среду с определенной скоростью, зависящей от типа волны и свойств среды.

Скорость поперечных волн в струне зависит от ее погонной массы  $\mu$  (масса единицы длины) и силы натяжения  $T$ :

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}.$$

Скорость распространения продольных волн зависит от модуля сжатия  $B$  и плотности среды:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}.$$

В случае твердого стержня модуль сжатия равен модулю Юнга  $Y$ , поэтому

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}.$$

Процесс распространения звуковых волн в газе можно считать адиабатическим, поэтому формула для скорости звука в газе имеет вид:  $v = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}}$ ,

где  $p$  – давление в газе,  $\gamma$  – показатель адиабаты.

Гидродинамическая теория волн на поверхности жидкости приводит к следующей формуле для фазовой скорости их распространения:

$$v = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}},$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\lambda$  – длина волны.

Уравнение плоской бегущей волны имеет вид:

$$\xi(x, t) = A \cos(\omega t - kx + \varphi_0),$$

где  $\xi(x, t)$  – смещение частиц среды от положения равновесия;

$A$  – амплитуда волны;

$\omega$  – циклическая частота волны ( $\omega = 2\pi f$ )

$k$  – волновое число ( $k = 2\pi/\lambda = v/\omega$ );

$x$  – координата точки среды;

$\varphi_0$  – начальная фаза волны.

Гармонические волны в однородных средах распространяются с некоторой постоянной скоростью  $v$ , равной

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k} = \lambda v = \frac{\lambda}{T},$$

которая называется *фазовой скоростью волны*. Если фазовая скорость волн в среде зависит от их длины, то это явление называют **ДИСПЕРСИЕЙ ВОЛН**.

Выражение, определяющее  $\omega = f(k)$  называется *законом дисперсии* или *дисперсионным соотношением*.

Уравнение сферической волны имеет вид:

$$\xi(k, r) = \frac{A_0}{r} \cos(\omega t - kr + \varphi_0),$$

где  $r$  – расстояние от центра волны до рассматриваемой точки среды.

**ВОЛНОВОЕ УРАВНЕНИЕ** – дифференциальное уравнение в частных производных, которое описывает процесс распространения волн в однородной изотропной среде:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}.$$

## **МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ:**

### **ЭКСПЕРИМЕНТ 1. Исследование зависимости фазовой скорости распространения упругой волны от частоты**

1. Откройте окно «Механические волны» и нажмите кнопку «Тип волн» – «Поперечные в верёвке».

2. Установите частоту колебаний 1,00 Гц и амплитуду колебания волны по таблице 1.

**Таблица 1.**

Бригада	1, 8	2, 7	3, 6	4, 5
Амплитуда, м	0,4	0,35	0,30	0,25

3. Определите фазовую скорость распространения поперечной волны на натянутой верёвке. Для этого:

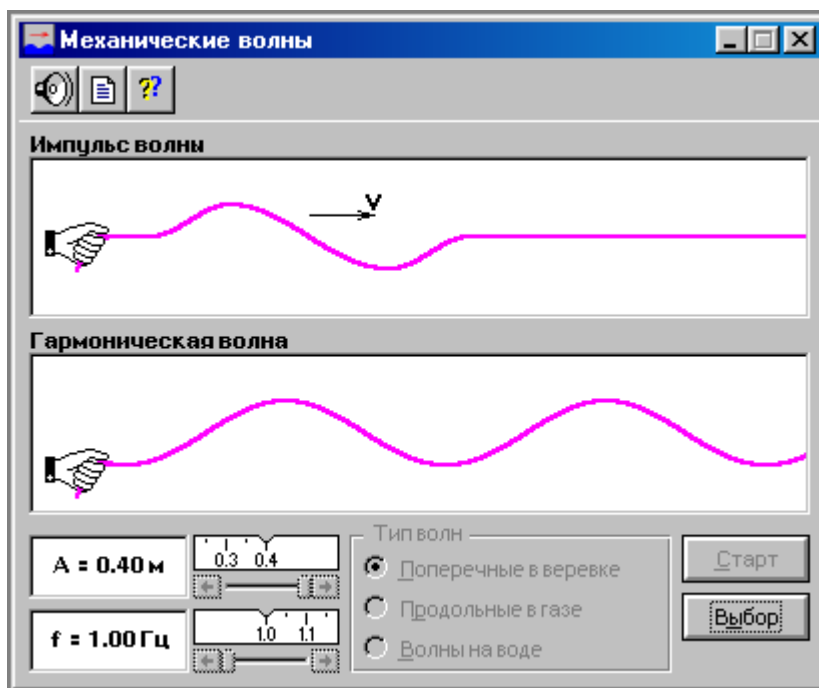


Рис.1

а) с помощью секундомера определите время  $t$  прохождения цуга волны длиной  $10\lambda$  видимого на экране участка (рис.1) и запишите результат измерения в первую ячейку первой строки таблицы 2. *Полезный совет: включите секундомер при пересечении любого (нулевого) гребня волны правой стороны рамки окна опыта «Гармоническая волна» и выключите при его пересечении этой стороны десятого по счёту гребня волны.*

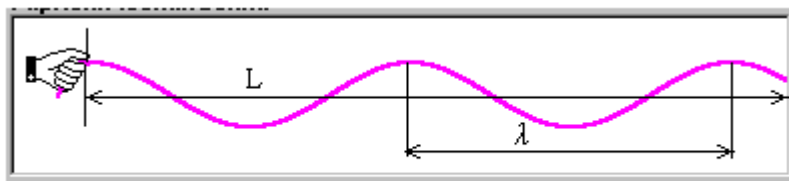


Рис.1


б) повторите это измерение ещё 4 раза и заполните первую строку табл. 2.

**Таблица 2. Измерение времени распространения цуга волны**

Частота волны, $f$ Гц	Время распространения цуга волны $t$ , с					
	1	2	3	4	5	$\langle t \rangle$
1,00						
1,10						
1,20						
...						
2,00						

в) нажатием кнопки **II** на экране монитора остановите волновой процесс и с помощью миллиметровой линейки измерьте длину волны  $\lambda$ .

г) по формуле  $\langle v \rangle = \frac{10\lambda}{\langle t \rangle}$  определите среднюю фазовую скорость волны при частоты 1,00 Гц и запишите это значение в табл. 2 и 3 в столбец  $v_3$ .

1. Нажмите кнопку  и, последовательно увеличивая частоту волны на 0,1 Гц, проделайте эти измерения для всего диапазона частот (1,00 – 2,00 Гц) и заполните таблицы 2 и 3.

### **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА:**

1. По формуле  $v = \lambda \nu$  вычислите для каждой частоты расчётную фазовую скорость волны  $v_m$  и запишите это значение в табл. 3 в строку  $v_m$ .

2. Постройте на одном графике зависимости экспериментальной  $v_3$  и расчетной  $v_m$  фазовой скоростей распространения волн от частоты колебаний  $f$ .

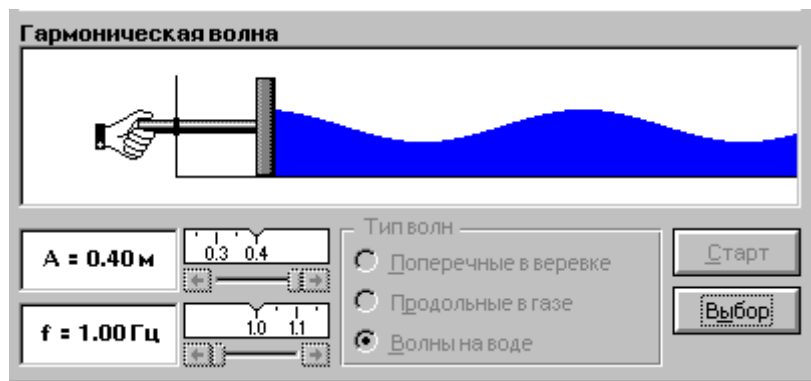
3. Из полученного графика определите зависимости  $\frac{dv_3}{df}$  и  $\frac{dv_m}{df}$  от частоты волны (дисперсию волн).

4. Сделайте выводы по результатам работы.

**Таблица 3. Результаты измерений и расчётов**

$f$ , Гц	1,00	1,10	1,20	...	2,00
$\lambda$ , см					
$v_3$ , см/с					
$v_m$ см/с					

### **ЭКСПЕРИМЕНТ 2. Экспериментальная проверка формулы фазовой скорости распространения гидродинамических поверхностных волн**



1. Откройте окно «Механические волны» и нажмите кнопку «Тип волн» – «Волны на воде».

2. Выполните измерения аналогичные измерениям п.п. 2-4 эксперимента 1 и запишите результаты измерений и расчётов в табл.4 и 5, аналогичные табл. 2 и 3 эксперимента 1.

### **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА:**

1. По формуле  $v = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$  рассчитайте теоретическую фазовую скорость распространения волны для каждой измеренной длины волны и запишите эти значения в табл. 5 в строку  $v_m$ .

2. Постройте на одном графике зависимости экспериментальной  $v_3$  и расчетной  $v_m$  фазовой скоростей распространения волн от частоты колебаний  $f$ .

3. Из полученного графика определите зависимости  $\frac{dv_g}{df}$  и  $\frac{dv_m}{df}$  от частоты волны (дисперсию волн).
4. Сделайте выводы по результатам работы.

### Вопросы и задания для самоконтроля

1. Определите, какую волну – продольную или поперечную – описывает уравнение  $\xi = A \cos(\omega t - kx)$ ?
2. Что такое фазовая скорость волны? Напишите выражения для фазовой скорости волны.
3. Упругая волна переходит из среды, в которой фазовая скорость равна  $v$  в среду, в которой фазовая скорость в два раза больше. Определите, что при этом происходит с длиной волны и частотой?
4. Вдоль оси  $x$  распространяется плоская волна с длиной  $\lambda$ . Определите наименьшее расстояние между точками среды, в которых колебания совершаются в противофазе.
5. На рис.4 показана «моментальная фотография» смещений частиц среды, в которой распространяется вдоль оси  $x$  упругая волна. Укажите направления скоростей частиц в точках А, В и С в случае: а) продольной волны; б) поперечной волны.

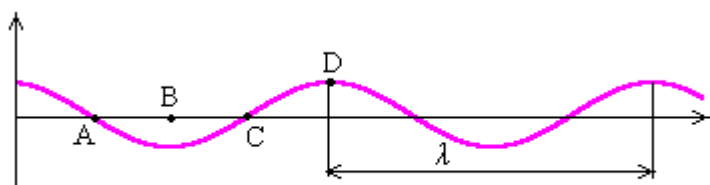


Рис. 4

6. На рис.4 показана «моментальная фотография» смещений частиц среды, в которой распространяется вдоль оси  $x$  упругая волна. Укажите точки, в которых деформация среды: а) равна нулю; б) принимает максимальное значение. Укажите точки, в которых скорость смещения частиц среды: а) максимальна; б) минимальна.

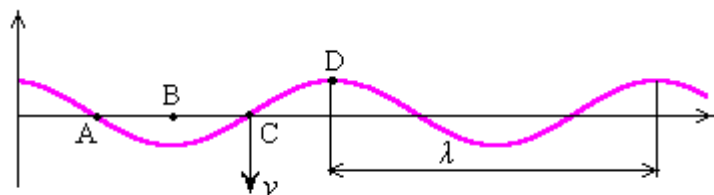


Рис. 5

7. В бегущей поперечной волне, показанной на рис.5, частица С имеет направление скорости, указанное на рисунке. Определите: а) какое направление скорости будут иметь частицы А и D в этот момент; б) в каком направлении распространяется волна?
8. Совпадают ли дисперсионные соотношения для бегущих и стоячих волн?
9. Наблюдается ли дисперсия звуковых волн?
10. Что такое волновой пакет?
11. Что такое групповая скорость? Напишите выражение для групповой скорости волн.
12. Морские волны, приближаясь к наклонному берегу, увеличивают свою высоту в несколько раз, а на них образуются пенистые гребни. Объясните это явление.
13. На рис.6 а), б), в) показаны направления скоростей двух точек волны. Определите, какие это волны?

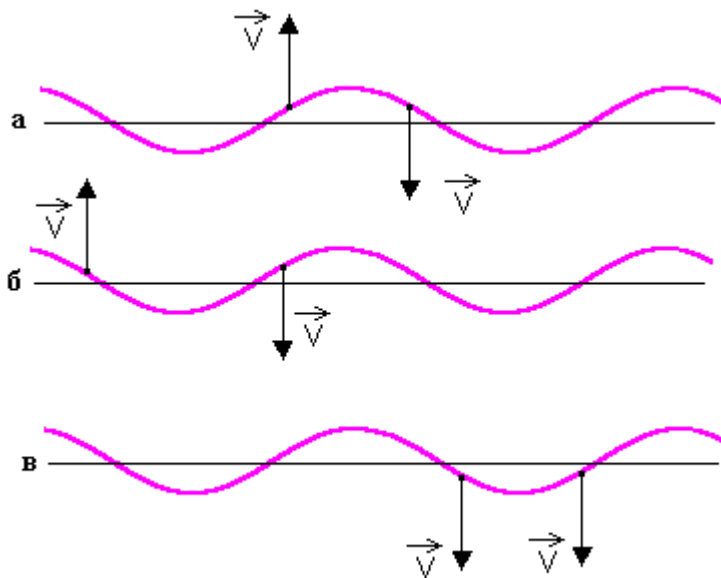


Рис. 6

14. Вдоль упругого шнура распространяется поперечная волна со скоростью 15 м/с. Период колебаний точек шнура  $T = 1,2$  с, амплитуда колебаний  $A = 0,02$  м. Определите длину волны, фазу и смещение точки, отстоящей на расстоянии 45 м от источника волн в момент времени  $t = -4$  с.
15. Волна распространяется от источника колебаний вдоль прямой. Смещение точки для момента времени  $0,5 T$  составляет 5 см. Точка удалена от источника колебаний на расстояние  $\lambda/3$ . Определите амплитуду колебаний.
16. Волны распространяются вдоль шнура со скоростью 3 м/с при частоте 2 Гц. Чему равна разность фаз колебаний двух точек шнура, находящихся на расстоянии 75 см друг от друга?
17. Скорость звука в воде равна 1450 м/с. Определите расстояние между точками, совершающими колебания в противофазах, если частота колебаний 725 Гц.
18. Мимо неподвижного наблюдателя за 10 с прошло 4 гребня волны. Определите период колебаний частиц среды.
19. Разность хода двух когерентных волн с равными амплитудами колебаний равна 15 см, а длина волны 10 см. Определите, каков результат интерференции этих волн?
20. Расстояние между первым и четвёртым узлами стоячей волны равно 24 см. Определите длину бегущей волны.

## ЛИТЕРАТУРА



1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2001, Гл.19, §157.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 2000, Гл.29, §§29.1-29.3.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2.10

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и в учебниках: 1. Трофимова Т.И. Курс физики. § 166. 2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики § 32.7.

Запустите программу «Оптика», «Зрительная труба Кеплера» и «Микроскоп». Нажмите вверху внутренних окон указанных разделов кнопки с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения об этих оптических системах и запишите их в свой конспект.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- Ознакомление с оптическими схемами зрительной трубы Кеплера и микроскопа.
- Моделирование этих схем из простых линз.
- Проверка формул увеличения зрительной трубы Кеплера и микроскопа.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

1. Зрительная труба Кеплера представляет собой оптическую систему, предназначенную для наблюдения удалённых предметов. Если лучи от предмета приходят в трубу в виде параллельных пучков, то оптическая система трубы называется телескопической.

На рис. 1 представлена оптическая схема зрительной трубы Кеплера. Она состоит из длиннофокусного объектива 1 и окуляра 2 – линзы с меньшим фокусным расстоянием.

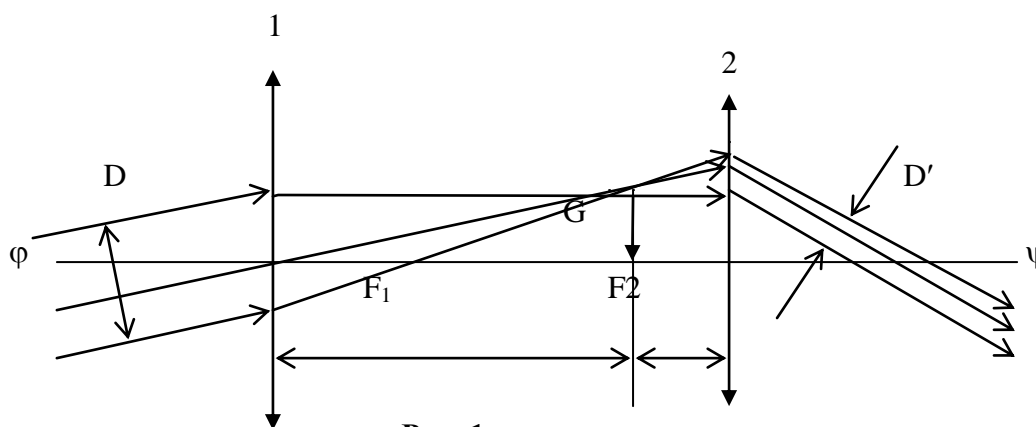


Рис. 1

Второй главный фокус  $F_1$  объектива совпадает с первым главным фокусом  $F_2$  окуляра, благодаря чему падающий в объектив параллельный пучок лучей выходит

из окуляра также параллельным пучком. Как показано на рисунке 1, объектив 1 зрительной трубы образует обратное действительное изображение  $G$  бесконечно удалённого предмета, которое рассматривается в окуляр 2.

Увеличение трубы  $\Gamma$  является *угловым увеличением* и равно отношению

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \psi}{\operatorname{tg} \varphi}, \quad (1)$$

где  $\psi$  – угол, под которым предмет наблюдается в трубу (согласно правилу знаков, этот угол отрицательный);  $\varphi$  – угол, под которым предмет виден невооружённым глазом (если глаз поместить вместо объектива трубы на оптической оси).

Ширина параллельного пучка лучей  $D$ , входящих в объектив, обычно равна диаметру объектива. Ширина пучка  $D'$ , выходящего из окуляра, определяется диаметром выходного зрачка системы. Выходной зрачок является изображением входного зрачка, даваемого окуляром.

Из рис. 1 имеем для увеличения  $\Gamma$ :

$$\Gamma = -\frac{F_1}{F_2} \quad (2), \quad \Gamma = -\frac{D}{D'} \quad (3)$$

Соотношение (2) показывает, во сколько раз увеличиваются угловые размеры изображения в сравнении с угловыми размерами предмета при наблюдении через трубу.

Линейное увеличение  $\beta$  находится по формулам геометрической оптики:

$$\Gamma\beta = 1 \quad (4), \quad \text{следовательно} \quad \beta = -\frac{F_2}{F_1} = -\frac{D'}{D}. \quad (5)$$

Так как  $D' < D$ , то зрительная труба даёт уменьшение линейных размеров наблюдаемых объектов.

2. Микроскоп предназначен для наблюдения мелких предметов, не различимых глазом. На рис. 2 показана оптическая схема микроскопа.

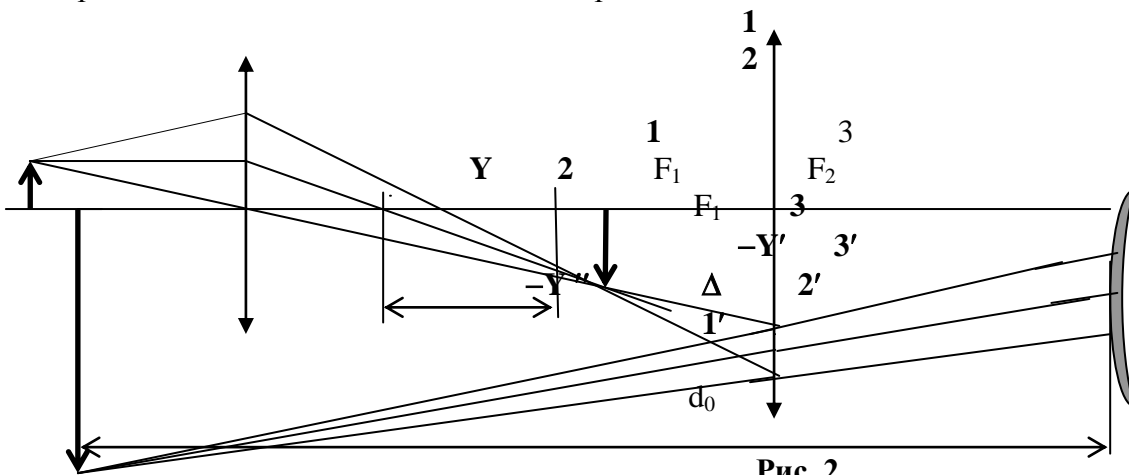


Рис. 2

Микроскоп состоит из двух линз: короткофокусного объектива 1 и окуляра 2, фокусное расстояние которого больше, чем у объектива. Предмет  $Y$  располагается вблизи первого фокуса  $F_1$  объектива так, что действительное увеличенное обратное изображение  $-Y'$  получается вблизи первого фокуса  $F_2$  окуляра 2 – между ним и окуляром. Окуляр действует как лупа, давая мнимое изображение  $-Y''$  на расстоянии наилучшего зрения  $d_0$  ( $d_0 = 0,25$  м) от глаза 3, который находится непосредственно за окуляром 2. Лучи 1, 2, 3 позволяют получить изображение  $-Y'$ ; лучи 1', 2', 3', попадая в систему глаза 3, сходятся на сетчатке глаза, где дают изображение, соответствующее мнимому изображению  $-Y''$ , даваемому окуляром как лупой. Без участия глаза изображения не видно, а из окуляра выходит расходящийся пучок лучей. Расстояние  $\Delta$  между вторым фокусом объектива и первым фокусом окуляра называется *оптическим интервалом*.

Если предмет  $Y$  поместить на расстоянии  $d_1$  от объектива микроскопа, его изображение  $Y'$  будет находиться от объектива на расстоянии  $f_1$ , удовлетворяющем уравнению

$$\frac{1}{F_{об}} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{f_1}.$$



Изображение предмета будет увеличено при этом в

$$k_{об} = \frac{f_1}{d_1} \text{ раз.} \quad (6)$$

Окуляр располагают относительно изображения  $Y'$  так, чтобы оно рассматривалось через него как через лупу. Окончательное изображение  $Y''$  будет мнимым и будет отстоять от окуляра на расстоянии  $f_2$ . Если расстояние  $d_2$  от окуляра до промежуточного изображения  $Y'$  подобрано так, что оно удовлетворяет уравнению

$$\frac{1}{F_{ок}} = \frac{1}{d_2} - \frac{1}{f_2},$$

то увеличение изображения  $Y'$ , даваемое окуляром, при этом окажется равным

$$k_{ок} = \frac{f_2}{d_2}. \quad (7)$$

Увеличение микроскопа  $\Gamma$  вычисляется как произведение увеличений объектива и окуляра:

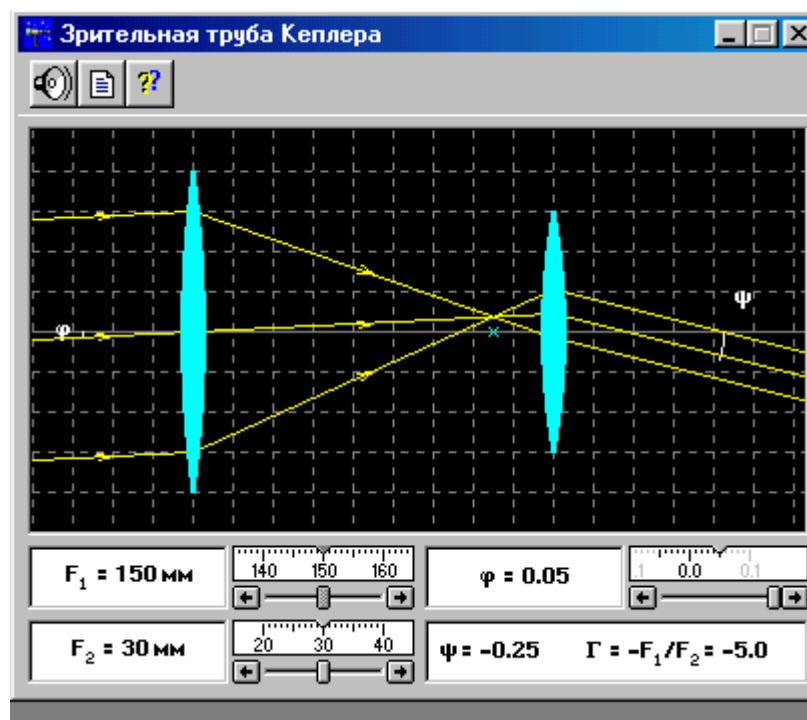
$$\Gamma = k_{об} k_{ок} \quad (8)$$

В случае, когда  $F_1$  и  $F_2$  много меньше оптического интервала  $\Delta$ , увеличение микроскопа выражается простой формулой :

$$\Gamma = \frac{d_0 \Delta}{F_1 F_2}. \quad (9)$$

## ИЗМЕРЕНИЯ:

### ЭКСПЕРИМЕНТ1. Зрительная труба Кеплера



1. Подведите маркер мыши к движку регулятора  $F_1$ , нажмите левую кнопку мыши и, удерживая её в нажатом состоянии, двигайте движок до установки значения  $F_1$ , взятого из таблицы 1 для вашей бригады.
2. Установите аналогичным образом  $F_2$  и  $\varphi$ .

3. Запишите в таблицу 2 значение  $\Gamma_T = -\frac{F_1}{F_2}$ , взятое из нижнего правого окна схемы зрительной трубы Кеплера.
4. С помощью миллиметровой линейки измерьте на экране монитора  $D$  и  $D'$  и запишите эти значения в таблицу 2.
5. Рассчитайте значение  $\Gamma_3 = -\frac{D}{D'}$  и запишите это значение в таблицу 2.
6. Сравните полученное значение  $\Gamma_3$  со значением  $\Gamma_T$ .
7. Устанавливая вторые значения  $F_1$  и  $F_2$ , взятые из таблицы 1 для вашей бригады, повторите измерения по п. 2-6, записывая результаты измерений в табл. 2.
8. Оцените абсолютную погрешность измерений.

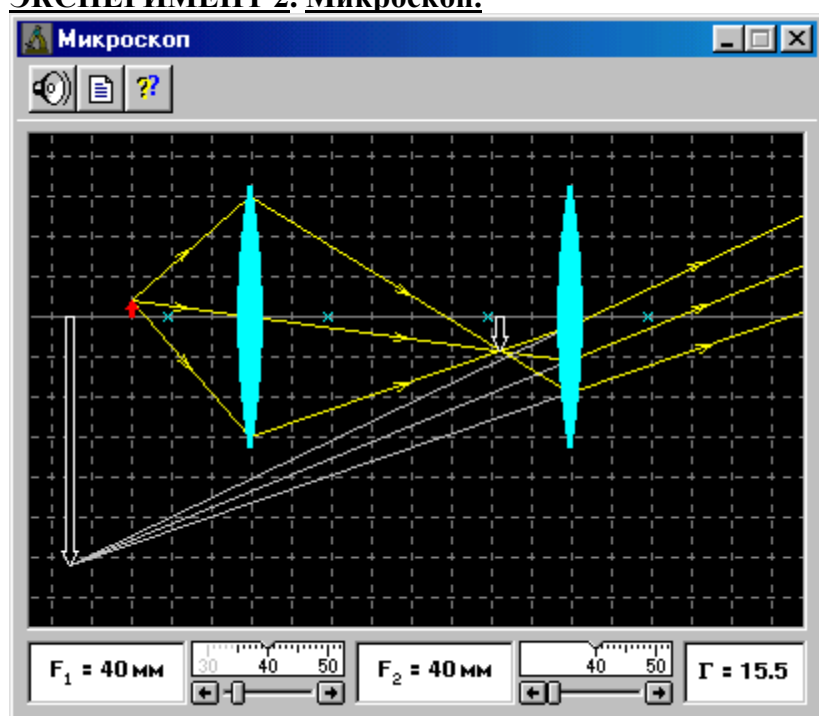
**ТАБЛИЦА 1.**

Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8
F1 мм	100 105	110 115	120 125	130 135	140 145	150 155	160 165	170 175
F2 мм	20 21	22 23	24 25	26 27	28 29	30 32	34 35	36 38
$\varphi$	0,00	0,01	0,02	0,03	-0,01	-0,02	-0,03	-0,04

**ТАБЛИЦА 2.**

$\Gamma_T$	$D$ мм	$D'$ мм	$\Gamma_3$	$\Delta\Gamma_3$

## **ЭКСПЕРИМЕНТ 2. Микроскоп.**



1. Подведите маркер мыши к движку регулятора фокусного расстояния объектива микроскопа, нажмите левую кнопку мыши и, удерживая её в нажатом состоянии, перемещайте движок до установки  $F_1$ , взятого из таблицы 1 для вашей бригады.
2. Установите аналогичным образом фокусное расстояние окуляра  $F_2$  и запишите эти значения в табл. 2.
4. С помощью миллиметровой линейки измерьте расстояния  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $f_1$ ,  $f_2$  и запишите их в таблицу 2.
5. По формулам (6) и (7) и (8) рассчитайте  $k_{об}$ ,  $k_{ок}$  и  $\Gamma$  и запишите эти значения в табл. 2.
4. Рассчитайте по формуле (9) теоретическое значение оптического интервала  $\Delta t$  по параметрам, указанным в нижней части окна.
6. Определите масштаб шкалы окна оптической схемы микроскопа. Для этого измерьте с помощью миллиметровой линейки на экране монитора фокусное расстояние  $F_1$  и сопоставьте его со значением, указанным в левом нижнем прямоугольнике окна оптической схемы.
7. Измерьте с помощью миллиметровой линейки на экране монитора оптический интервал микроскопа, приведите его в соответствие с масштабом шкалы окна и запишите полученное значение интервала в табл. 2 (графа  $\Delta z$ ).
8. Сопоставьте полученные экспериментальные значения оптического интервала и увеличения микроскопа с указанными в окошке опыта значениями и сделайте анализ опыта.
9. Сделайте оценку погрешности измерений.

**ТАБЛИЦА 1.**

Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8
$F_1$ мм	35	39	43	47	51	55	59	63
	37	41	45	49	53	57	61	65
$F_2$ мм	40	42	44	46	48	50	52	54
	41	43	45	47	49	51	53	55

**ТАБЛИЦА 2.**

$F_1$ мм	$F_2$ мм	$d_1$ мм	$d_2$ мм	$f_1$ мм	$f_2$ мм	$k_{об}$	$k_{ок}$	$\Gamma$	$\Delta z$ мм

### Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что называется линзой?
2. Какая линза называется тонкой?
3. Что такое главная и побочная оптические оси?
4. Что называется фокусом линзы?
5. Как можно построить изображение произвольной точки в любой линзе?
6. Можно ли с помощью рассеивающей линзы получить увеличенное изображение?
7. Можно ли с помощью собирающей линзы получить уменьшенное изображение предмета?
8. Сформулируйте принцип Ферма.

9. Что называется оптической силой линзы, в каких единицах эта сила измеряется?
10. Запишите формулу тонкой линзы.
11. Назовите aberrации оптических систем.
12. Постройте ход лучей в микроскопе, зрительной трубе Кеплера и фотоаппарате.
13. Какая оптическая система называется телескопической?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.11

### ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ ФРАУНГОФЕРА ОТ ОДНОЙ ЩЕЛИ

Ознакомьтесь с теорией в конспекте лекций и в учебниках: 1. Трофимова Т.И. Курс физики. § 179; 2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. Гл. 32, § 32.3.

Запустите программы: «Оптика» и «Дифракция света». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте и запишите краткие теоретические сведения в свой конспект.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- Знакомство со схемой дифракции Фраунгофера от одной щели в когерентном свете.
- Определение углов дифракции в параллельных лучах.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

Дифракция Фраунгофера наблюдается в том случае, когда источник света и точка наблюдения бесконечно удалены от препятствия, вызвавшего дифракцию. Схема наблюдения дифракции Фраунгофера от одной щели показана на рис. 1.

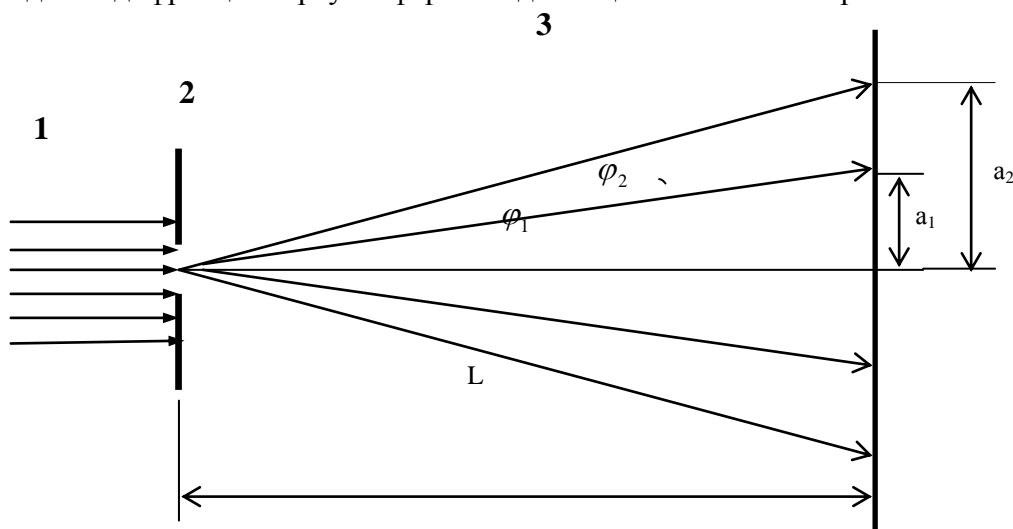


Рис. 1.

Параллельный монохроматический пучок света 1 падает нормально на щель 2, длина которой много больше её ширины  $d$ . Согласно принципу Гюйгенса, каждая точка плоскости щели, до которой дошло световое колебание, становится источником вторичных волн, распространяющихся во все стороны под углами дифракции  $\varphi_1, \varphi_2, \dots$ , т.е. свет дифрагирует при прохождении через щель. Дифрагированные пучки являются когерентными и могут интерферировать при наложении. Результат интерференции в виде полос с периодическим распределением интенсивности наблюдается на экране 3, находящемся на расстоянии  $L$ . Условие дифракционного максимума на основе метода зон Френеля определяется формулой

$$d \sin \varphi = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (m = 1, 2, \dots).$$

Более точный расчёт интерференционной картины от одной щели даёт следующие формулы, определяющие углы дифракции, соответствующие дифракционным максимумам:

$$\begin{aligned} \text{первого порядка} \quad d \sin \varphi_1 &= \pm 1,43\lambda; \\ \text{второго порядка} \quad d \sin \varphi_2 &= \pm 2,46\lambda; \\ \text{третьего порядка} \quad d \sin \varphi_3 &= \pm 3,47\lambda. \end{aligned} \quad (1)$$

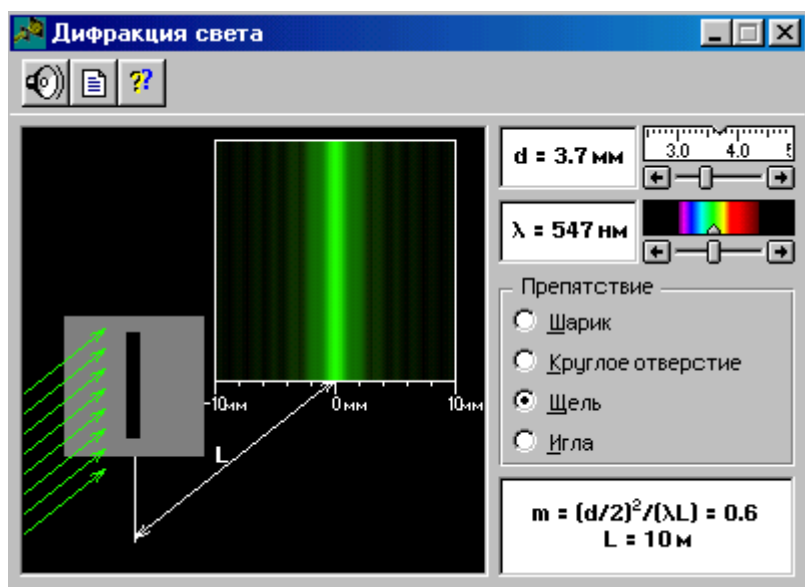
Из этих формул, зная ширину щели  $d$  и длину волны света  $\lambda$ , можно теоретически рассчитать направления на точки экрана, в которых амплитуда, а, следовательно, и интенсивность света максимальна. Аналогичные расчеты можно сделать из экспериментальных данных по измеренным на опыте значениям  $a_1$ ,  $a_2$ , и  $a_3$  и заданному расстоянию между щелью и экраном  $L$ :

(для малых углов допускаем:  $\sin \alpha \approx \tan \alpha$ ). Тогда:

$$\sin \varphi_1 \approx \frac{a_1}{L}; \quad \sin \varphi_2 \approx \frac{a_2}{L}; \quad \sin \varphi_3 \approx \frac{a_3}{L}. \quad (2)$$

### **МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ**

Закройте окно теории. Внимательно рассмотрите рисунок, найдите все регуляторы и другие элементы эксперимента и зарисуйте их в конспект. Получите у преподавателя допуск для выполнения лабораторной работы.



### **ИЗМЕРЕНИЯ:**

1. Подведите маркер мыши к движку регулятора вблизи картинке спектра, нажмите левую кнопку мыши и, удерживая её в нажатом состоянии, двигайте движок до установки значения длины волны  $\lambda_1$ , взятого из таблицы 1 для вашей бригады.
2. Аналогичным образом, зацепив мышью движок регулятора расстояния между щелями, установите минимальное расстояние  $d = 2$  мм. Измерьте, используя шкалу на экране, расстояние  $a_1$  между нулевым и первым максимумами,  $a_2$  – между нулевым и вторым максимумами и т. д., до четвёртого максимума. Запишите эти значения в таблицу 2. Увеличивая  $d$  на 0,5 мм, проведите эти измерения ещё 4 раза.
3. Согласно таблице 1, устанавливая новые числовые значения длины волны  $\lambda$  для вашей бригады, повторите измерения по п.2, записывая результаты измерения в таблицы 3,4,5.

**ТАБЛИЦА 1. Значения длины волны  $\lambda$  ( в нм)**

Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8
$\lambda_1$	400	405	410	415	420	425	430	435
$\lambda_2$	500	505	510	515	520	525	530	540
$\lambda_3$	580	585	590	595	600	605	610	615
$\lambda_4$	630	635	640	645	650	655	660	665

**ТАБЛИЦЫ 2-5 Результаты измерений при  $\lambda = \text{_____ нм}$**

d, мм	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
$a_1$ , мм					
$a_2$ , мм					
$a_3$ , мм					
$a_4$ , мм					
$\sin \varphi_1 \times 10^3$					
$\sin \varphi_2 \times 10^3$					
$\sin \varphi_3 \times 10^3$					
$\sin \varphi_4 \times 10^3$					

### **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА:**

1. Измерьте по шкале экрана и внесите в таблицы значения  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$ .
2. Рассчитайте по формулам (2) и внесите в таблицы значения синусов углов дифракции.
3. Сравните полученные результаты с теоретическими, рассчитанными по формулам (1).
4. Оцените абсолютную ошибку измерений углов дифракции.
5. Проведите качественные наблюдения изменения дифракционной картины при увеличении размера щели от минимального до его максимального значения при неизменной длине волны и запишите результаты этих наблюдений в свой отчёт.

### **Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Что называется дифракцией Фраунгофера?
2. Что называется дифракцией Френеля?
3. Что такое световая волна?
4. Что такое зона Френеля?
5. Что такое пятно Пуассона и почему оно возникает?
6. Запишите условия максимумов и минимумов при дифракции Френеля и дифракции Фраунгофера.
7. Решите задачу, предложенную в работе под знаком вопроса в верхней части экрана.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.12

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ С ПОМОЩЬЮ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и в учебниках: 1. Трофимова Т.И. Курс физики. Гл. 22, §174; 2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. Гл. 31, § 31.3. Запустите программу «Открытая физика 1.1». Выберите «Оптика» и «Кольца Ньютона». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект. (Если вы забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ стр.5 еще раз).

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- Знакомство с моделированием явления интерференции света в тонких плёнках.
- Изучение интерференции полос равной толщины в схеме колец Ньютона.
- Определение радиуса кривизны линзы.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

Классическим примером полос равной толщины являются кольца Ньютона. Они наблюдаются при отражении света от воздушного зазора, образованного плоскопараллельной пластинкой и соприкасающейся с ней плосковыпуклой линзой с большим радиусом кривизны (рис.1).

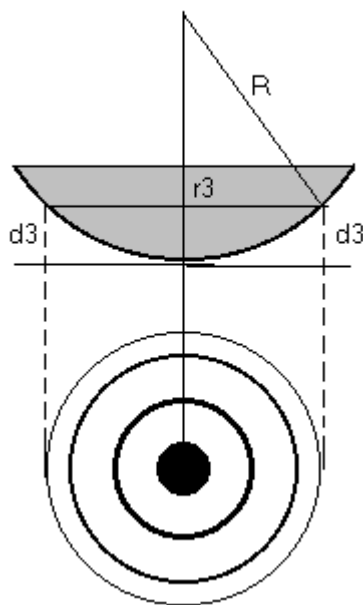


Рис.1

Если на линзу падает пучок монохроматического света, то световые волны, отражённые от верхней и нижней поверхностей воздушной прослойки, будут интерферировать между собой. При этом образуются интерференционные полосы, имеющие форму concentric светлых и тёмных колец, убывающей ширины.

В отражённом свете оптическая разность хода с учётом потери полуволны будет равна

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

где  $d$  - толщина воздушного зазора. Из рис.1 следует, что

$$r^2 = R^2 - (R - d)^2 = 2Rd - d^2. \quad (2)$$



Учитывая, что  $d^2$  является величиной второго порядка малости, то из (2) получим

$$d = \frac{r^2}{2R}. \quad (3)$$

Следовательно,

$$\Delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2}. \quad (4)$$

В точках, для которых оптическая разность хода равна

$$\Delta = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}, \quad (5)$$

возникают тёмные кольца. Из формул (4) и (5) радиус  $k$ -ого тёмного кольца будет равен

$$r_k^2 = kR\lambda \quad (6)$$

Формула (6) позволяет определить радиус кривизны линзы

$$R = \frac{r^2}{k\lambda}.$$

Вследствие деформации стекла, а также наличия на стекле пылинок невозможно добиться плотного примыкания линзы и пластины в одной точке. Поэтому при определении радиуса кривизны линзы пользуются другой формулой, в которую входит комбинация из двух значений радиусов интерференционных колец  $r_m$  и  $r_n$ , что позволяет исключить возможный зазор в точке контакта линзы и стеклянной пластины:

$$R = \frac{r_m^2 - r_n^2}{(m - n)\lambda}. \quad (7)$$

### МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

1. Внимательно рассмотрите окно опыта, показанное на рисунке 2, и зарисуйте необходимое в свой конспект лабораторной работы.
2. Зацепите мышью движок регулятора длины волны монохроматического света и установите первое значение длины волны из таблицы 1 для вашей бригады. Аналогичным образом установите первое значение радиуса кривизны линзы  $R$ .

*ВНИМАНИЕ! Цель работы - проверить соответствие установочного значения радиуса кривизны линзы и рассчитанного по формуле (7).*

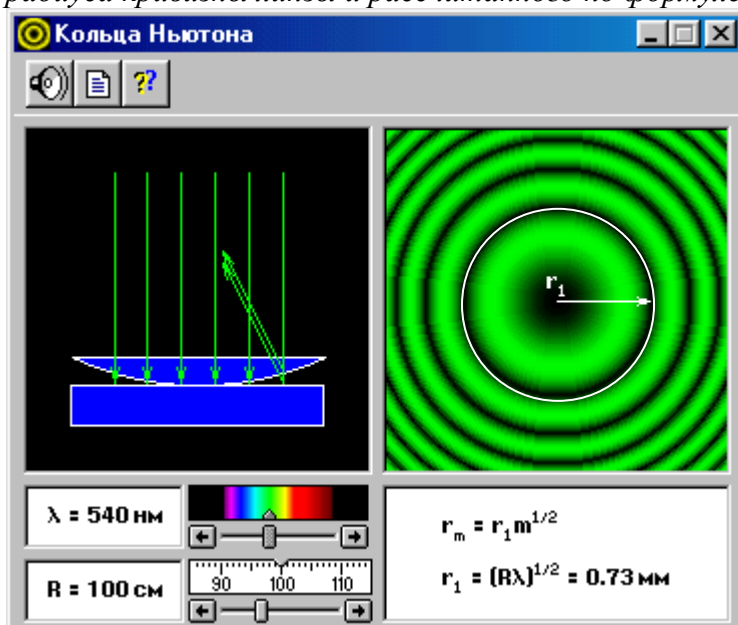


Рис.2

3. По формуле  $r_m = r_1 m^{\frac{1}{2}}$  и указанному значению  $r_1$  в правом нижнем прямоугольнике окна опыта рассчитайте значения радиусов 3, 4, 5 и 6-ого тёмных колец Ньютона и запишите эти значения в таблицу 2.
4. По формуле (7) для  $m_1 = 3$  и  $n_1 = 5$  и  $m_2 = 4$  и  $n_2 = 6$  рассчитайте радиусы кривизны линзы  $R_1^*$  и  $R_2^*$  и запишите эти значения в табл.2 .
5. Установите мышью вторые значения радиуса кривизны линзы и длины волны из таблицы 1 и выполните измерения п.п. 3 и 4.
6. Проанализируйте полученные результаты и оцените погрешность проведённых измерений.

**Таблица 1. Значения длины волны и радиуса кривизны линзы.**

Бригады	$\lambda_1$ , нм	$\lambda_2$ , нм	$R_1$ , см	$R_2$ , см
1,5	400	640	50	180
2,6	460	680	70	160
3,7	520	730	90	140
4,8	560	760	110	120

**Таблица 2. Результаты измерений и расчетов.**

$\lambda_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ $R_1 = \underline{\hspace{1cm}}$				$\lambda_2 = \underline{\hspace{1cm}}$ $R_2 = \underline{\hspace{1cm}}$			
$r_3$	$r_5$	$r_4$	$r_6$	$r_3$	$r_5$	$r_4$	$r_6$
$R_1^* =$		$R_2^* =$		$R_3^* =$		$R_4^* =$	

### Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое полосы равной толщины и равного наклона? Где они локализованы?
2. Проведите расчёт интерференционной картины в тонкой плёнке.
3. Что называется временем когерентности монохроматической волны?
4. Что называется длиной когерентности?
5. Почему для монохроматического света число видимых интерференционных колец будет ограниченным? От чего будет зависеть это число?
6. Объясните, почему расстояние между кольцами изменяется с изменением радиуса кривизны линзы при неизменной длине волны?
7. Как изменится картина колец Ньютона, если воздушный зазор между линзой и пластиной заполнить водой?
8. Почему в отражённом свете в центре наблюдается тёмное кольцо?
9. Как изменится картина колец Ньютона, если наблюдение проводить в проходящем свете?
10. Почему масляное пятно на поверхности жидкости имеет радужную окраску?
11. Объясните, как явление интерференции света в тонких плёнках используется для просветления оптики?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.13

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ И К.П.Д. ИСТОЧНИКА ПОСТОЯННОГО ТОКА ОТ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебниках: 1. Трофимова Т.И. Курс физики. Гл. 12, §99. 2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. Гл. 19, §19.2. Запустите программу «Электричество и магнетизм». Выберите: «Цепи постоянного тока». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект. (Если вы забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ стр.5 еще раз).

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- Знакомство с компьютерным моделированием цепей постоянного тока.
- Исследование зависимости мощности и к.п.д. источника постоянного тока от сопротивления внешней цепи.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ ЦЕПИ:

$$I = \frac{E}{R + r}, \quad (1)$$

$I$  – сила тока в цепи;  $E$  – электродвижущая сила источника тока, включённого в цепь;  $R$  – сопротивление внешней цепи;  $r$  – внутреннее сопротивление источника тока.

МОЩНОСТЬ, ВЫДЕЛЯЕМАЯ ВО ВНЕШНЕЙ ЦЕПИ:

$$P_1 = I^2 R = \frac{E^2}{(R + r)^2} R. \quad (2)$$

Из формулы (2) видно, что при коротком замыкании цепи ( $R \rightarrow 0$ ) и при  $R \rightarrow \infty$  эта мощность равна нулю. При всех других конечных значениях  $R$  мощность  $P_1 > 0$ . Следовательно, функция  $P_1$  имеет максимум. Значение  $R_0$ , соответствующее максимальной мощности, можно получить, дифференцируя  $P_1$  по  $R$  и приравнявая первую производную к нулю:

$$\frac{dP_1}{dR} = \frac{E^2 [(R_0 + r)^2 - 2(R_0 + r)R]}{(R_0 + r)^4} = 0. \quad (3)$$

Из формулы (3), с учётом того, что  $R$  и  $r$  всегда положительны, а  $E \neq 0$ , после несложных алгебраических преобразований получим:

$$R_0 = r. \quad (4)$$

Следовательно, мощность, выделяемая во внешней цепи, достигает наибольшего значения при сопротивлении внешней цепи равном внутреннему сопротивлению источника тока.

При этом сила тока в цепи 
$$I = \frac{E}{2r} = \frac{I_{кз}}{2} \quad (5)$$

равна половине тока короткого замыкания. При этом мощность, выделяемая во внешней цепи, достигает своего максимального значения, равного

$$P_{1max} = \frac{E^2}{4r}. \quad (6)$$

Когда источник замкнут на внешнее сопротивление, то ток протекает и внутри источника и при этом на внутреннем сопротивлении источника выделяется некоторое количество тепла. Мощность, затрачиваемая на выделение этого тепла равна

$$P_2 = I^2 r . \quad (7)$$

Следовательно, полная мощность, выделяемая во всей цепи , определится формулой

$$P_{полн} = P_1 + P_2 = I^2 R + I^2 r = I^2 (R+r) = IE \quad (8)$$

КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ источника тока равен

$$\eta = \frac{P_1}{P_{полн}} = \frac{R}{R+r} . \quad (9)$$

Из формулы (8) следует, что

$$P_1 = P_{полн} - P_2 = EI - I^2 r , \quad (10)$$

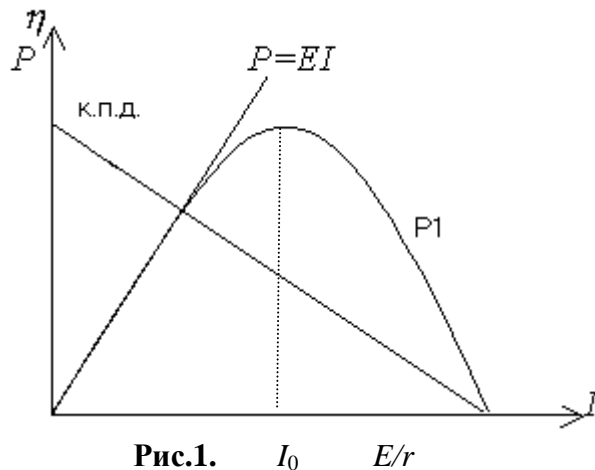
т.е.  $P_1$  изменяется с изменением силы тока в цепи по параболическому закону и принимает нулевые значения при  $I = 0$  и при  $I = \frac{E}{r}$ . Первое значение соответствует

разомкнутой цепи ( $R \gg r$ ), второе – короткому замыканию ( $R \ll r$ ). Зависимость к.п.д. от силы тока в цепи с учётом формул (8), (9), (10) примет вид

$$\eta = 1 - \frac{r}{R} I \quad (11)$$

Таким образом, к.п.д. достигает наибольшего значения  $\eta = 1$  в случае разомкнутой цепи ( $I = 0$ ), а затем уменьшается по линейному закону, обращаясь в нуль при коротком замыкании.

Зависимость мощностей  $P_1$ ,  $P_{полн} = EI$  и к.п.д. источника тока от силы тока в цепи показаны на рис.1.



Из графиков видно, что получить одновременно полезную мощность и к.п.д. невозможно. Когда мощность, выделяемая на внешнем участке цепи  $P_1$ , достигает наибольшего значения, к.п.д. в этот момент равен 50%.

## МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ:

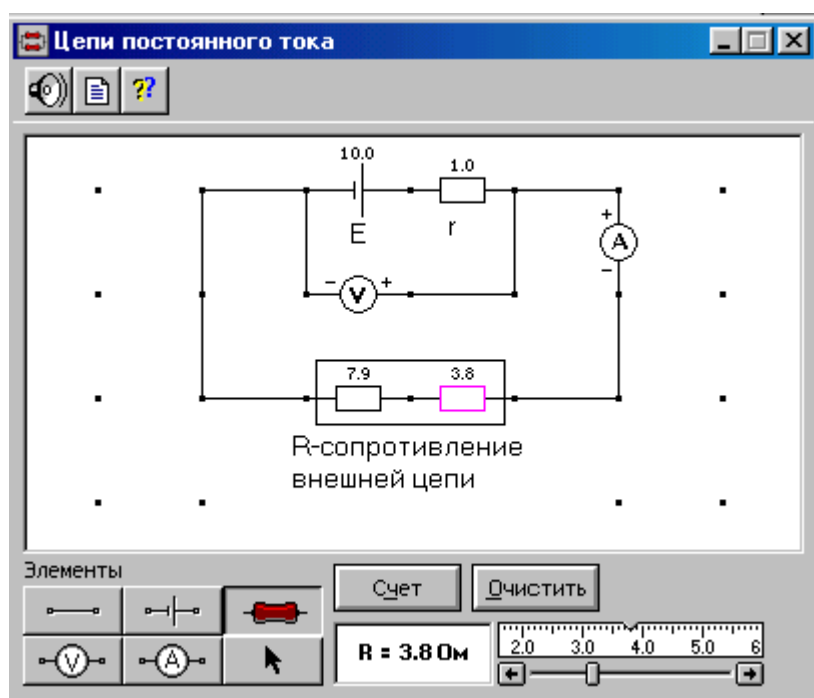
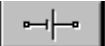







Рис. 2.

Соберите на экране цепь, показанную на рис. 2. Для этого сначала щелкните левой кнопкой мыши над кнопкой  э.д.с. в нижней части экрана. Переместите маркер мыши на рабочую часть экрана, где расположены точки. Щелкните левой кнопкой мыши в рабочей части экрана, где будет расположен источник э.д.с.

Разместите далее последовательно с источником резистор, изображающий его внутреннее сопротивление (нажав предварительно кнопку  в нижней части экрана) и амперметр (кнопка  там же). Затем расположите аналогичным образом резисторы нагрузки и вольтметр , измеряющий напряжение на нагрузке.

Подключите соединительные провода. Для этого нажмите кнопку провода  внизу экрана, после чего переместите маркер мыши в рабочую зону схемы. Щелкайте левой кнопкой мыши в местах рабочей зоны экрана, где должны находиться соединительные провода.

4. Установите значения параметров для каждого элемента. Для этого щелкните левой кнопкой мыши на кнопке со стрелкой . Затем щелкните на данном элементе. Подведите маркер мыши к движку появившегося регулятора, нажмите на левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, меняйте величину параметра и установите числовое значение, обозначенное в таблице 1 для вашей бригады.

**Таблица 1. Исходные параметры электрической цепи**

Номер бригады	1	2	3	4	5	6	7	8
E, В	10,0	9,5	9,0	8,5	8,0	8,5	9,0	9,5
r, Ом	4,8	5,7	6,6	7,5	6,4	7,3	8,2	9,1

- Установите сопротивление внешней цепи 2 Ом, нажмите кнопку «Счёт» и запишите показания электроизмерительных приборов в соответствующие строки таблицы 2.
- Последовательно увеличивайте с помощью движка регулятора сопротивление внешней цепи на 0,5 Ом от 2 Ом до 20 Ом и, нажимая кнопку «Счёт», записывайте показания электроизмерительных приборов в таблицу 2.
- Вычислите по формулам (2), (7), (8), (9)  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_{\text{полн}}$  и  $\eta$  для каждой пары показаний вольтметра и амперметра и запишите рассчитанные значения в табл.2.
- Постройте на одном листе миллиметровой бумаге графики зависимости  $P_1 = f(R)$ ,  $P_2 = f(R)$ ,  $P_{\text{полн}} = f(R)$ ,  $\eta = f(R)$  и  $U = f(R)$ .
- Рассчитайте погрешности измерений и сделайте выводы по результатам проведённых опытов.

**Таблица 2. Результаты измерений и расчётов**

R, Ом	2,0	2,5	3,0	...			20
U, В							
I, А							
$P_1$ , Вт							
$P_2$ , Вт							
$P_{\text{полн}}$ , Вт							
$\eta$							

**Вопросы и задания для самоконтроля**

- Запишите закон Джоуля-Ленца в интегральной и дифференциальной формах.
- Что такое ток короткого замыкания?
- Что такое полная мощность?
- Как вычисляется к.п.д. источника тока?
- Докажите, что наибольшая полезная мощность выделяется при равенстве внешнего и внутреннего сопротивлений цепи.
- Верно ли утверждение, что мощность, выделяемая во внутренней части цепи, постоянна для данного источника?
- К зажимам батарейки карманного фонаря присоединили вольтметр, который показал 3,5 В.
- Затем вольтметр отсоединили и на его место подключили лампу, на цоколе которой было написано:  $P=30$  Вт,  $U=3,5$  В. Лампа не горела.
- Объясните явление.
- При поочерёдном замыкании аккумулятора на сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  в них за одно и то же время выделилось равное количество тепла. Определите внутреннее сопротивление аккумулятора.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.14

### ТЕОРЕМА ОСТРОГРАДСКОГО – ГАУССА ДЛЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ВАКУУМЕ

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и в учебниках: 1. Трофимова Т.И. Курс физики. Гл. 11, §81,82; 2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. Гл. 14, § 14.1, 14.2. Запустите программу «Открытая физика 1.1». Выберите «Электричество и магнетизм» и «Электрическое поле точечного заряда». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект. (Если вы забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ стр.5 еще раз).

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

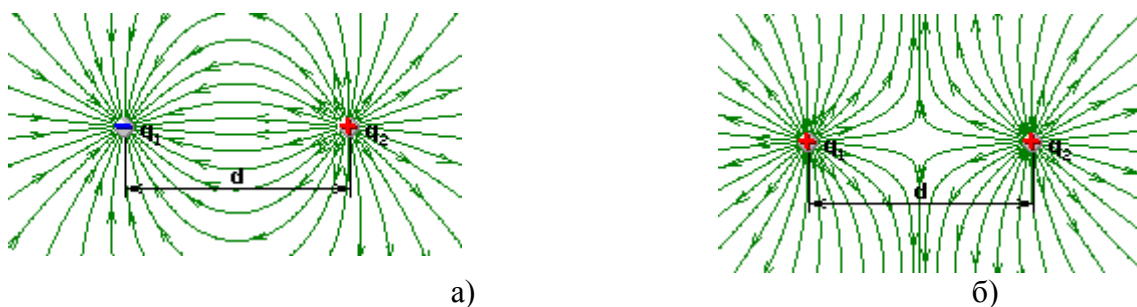
- Знакомство с графическим моделированием электростатических полей.
- Экспериментальная проверка теоремы Остроградского-Гаусса.
- Экспериментальное определение величины электрической постоянной.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

**НАПРЯЖЁННОСТЬ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ** в данной точке есть векторная физическая величина, равная отношению силы  $\vec{F}$ , действующей со стороны поля на неподвижный точечный заряд  $q_0$ , помещённый в данную точку поля, к величине этого заряда:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}.$$

**ЛИНИЯМИ НАПРЯЖЁННОСТИ** (силовыми линиями) называются линии, проведённые в поле так, что касательные к ним в каждой точке совпадают по направлению с вектором напряжённости. Линии напряжённости проводят так, что они начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных или уходят в бесконечность. (Рис. 1)



**Рис.1. Линии напряжённости двух точечных зарядов: а) разноимённых; б) одноимённых**

**ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ:** напряжённость электростатического поля систем точечных зарядов равна векторной сумме напряжённостей полей каждого из этих зарядов в отдельности:

$$\vec{E} = \sum \vec{E}_i.$$

**ПОТОК ВЕКТОРА НАПРЯЖЁННОСТИ.**

Силовая линия, определяя направление вектора напряжённости, сама по себе не определяет величину модуля вектора напряжённости. Введём условие, связывающее величину модуля вектора напряжённости с числом проводимых линий напряжённости через единицу площади. Для этого выделим в электростатическом поле малую область, в пределах которой электростатическое поле можно считать однородным. Проведём в этой области элементарную площадку  $dS_0$ , перпендикулярную к линиям напряжённости. Условимся через эту площадку проводить такое число  $d\Phi$  линий напряжённости, чтобы число линий, приходящихся на единицу поверхности площадки  $dS_0$ , равнялось величине модуля вектора напряжённости в области этой площадки, т.е. потребуем выполнения условия:

$$\frac{d\Phi}{dS_0} = E. \quad (1)$$

При выполнении этого условия графического изображения электростатических полей численное значение вектора напряжённости будет связано с густотой линий напряжённости. Тогда число линий напряжённости, пронизывающих элементарную площадку  $dS$ , нормаль  $\vec{n}$  которой образует угол  $\alpha$  с вектором  $\vec{E}$ , равно

$$d\Phi = EdS \cos \alpha, \quad (2)$$

где величина  $d\Phi$  называется потоком вектора напряжённости через площадку  $dS$ . Число линий напряжённости  $\Phi$ , пронизывающих некоторую поверхность  $S$ , назовём *поток вектора напряжённости через эту поверхность*. Для произвольной замкнутой поверхности  $S$  поток вектора  $E$  сквозь эту поверхность будет равен

$$\Phi = \oint_S EdS \cos \alpha. \quad (3)$$

Для замкнутой поверхности принято считать положительным направление нормали к элементу поверхности, выходящее из объёма, ограничиваемого поверхностью. Тогда линии напряжённости, выходящие из объёма, создадут положительный поток  $\Phi_+$ , линии, входящие в объём, создадут отрицательный поток  $\Phi_-$ , а результирующий поток будет равен алгебраической сумме этих потоков.

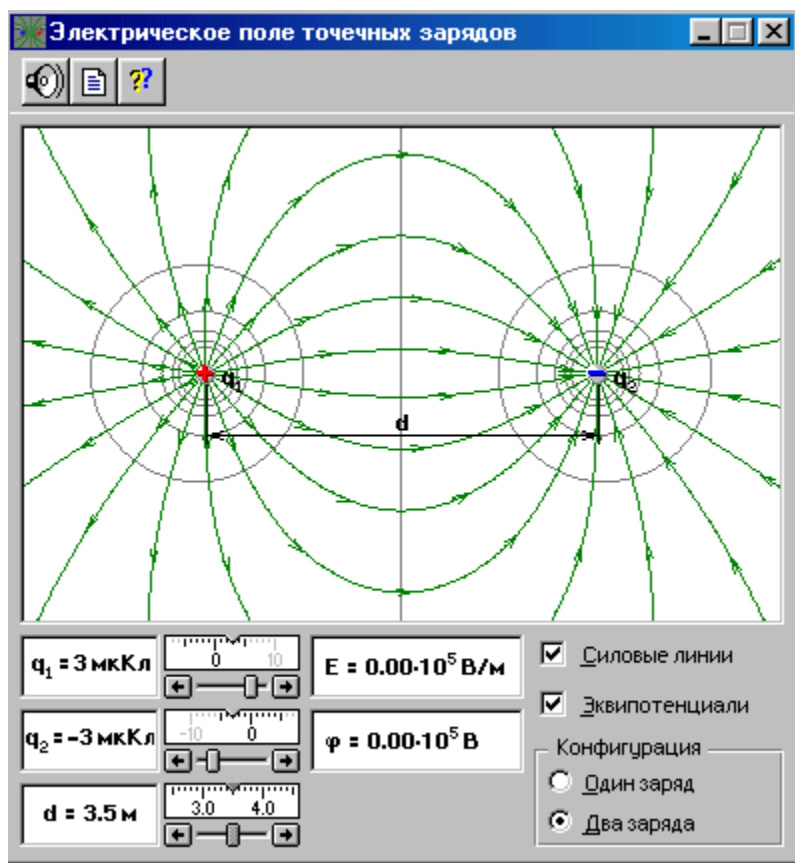
**ТЕОРЕМА ОСТРОГРАДСКОГО-ГАУССА:** *поток вектора напряжённости электростатического поля в вакууме через произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключённых внутри этой поверхности зарядов, делённой на  $\epsilon_0$ .*

$$\Phi_+ + \Phi_- = \Phi = \oint EdS \cos \alpha = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i \quad (4)$$

### **МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ:**

Рассмотрите внимательно схему опыта и зарисуйте необходимое в свой конспект лабораторной работы.





**Рис. 2**

Как известно, электростатическое поле в вакууме изотропное. Следовательно, количество силовых линий, пересекающих произвольную замкнутую поверхность, содержащую внутри себя электрические заряды, будет пропорционально количеству силовых линий, пересекающих замкнутый контур, ограничивающий площадь сечения, в которой находятся электрические заряды этой замкнутой поверхности.

Такое допущение даёт возможность привести в количественное соответствие реальное трёхмерное электростатическое поле с его графической интерпретацией в плоской компьютерной модели, которая показана на рис. 2. Для этого определим число силовых линий  $\Phi$ , которые фактически должны пересекать произвольную замкнутую поверхность, внутри которой находится электрический заряд  $q = 1 \text{ мкКл}$ . По теореме Остроградского-Гаусса имеем:

$$\Phi = \frac{q}{\epsilon_0} = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{8,85 \cdot 10^{-12}} = 1,13 \cdot 10^5.$$

Откройте окно опыта. В нижнем правом прямоугольнике «Конфигурация» щёлкните мышью на кнопке «Один заряд». Зацепив мышью, перемещайте движок регулятора величины заряда и установите значение  $q_1 = +1 \text{ мкКл}$ . Подсчитайте число силовых линий, выходящих из заряда. Их должно быть 6. Следовательно, силовая линия в плоской компьютерной модели опыта соответствует

$$N = \frac{1,13 \cdot 10^5}{6} = 1,88 \cdot 10^4 \quad (5)$$

линиям реального трёхмерного кулоновского поля. На основании таких допущений и оценок создаётся возможность экспериментальной проверки теоремы Остроградского-Гаусса с помощью графического компьютерного моделирования электростатических полей в данной лабораторной работе.

**ЭКСПЕРИМЕНТ 1.** (Постоянное пространственное распределение переменного заряда внутри замкнутой поверхности)

1. В нижнем правом прямоугольнике «Конфигурация» нажмите мышью кнопку «Два заряда».
2. Зацепив мышью, перемещайте движок регулятора первого заряда до установления значения, указанного в табл. 1 для вашей бригады.
3. Аналогичным образом установите заданное в табл. 1 расстояние  $d$  между зарядами.
4. Установите мышью на кнопке «Силовые линии» флажок.
5. Установите величину второго заряда 0 и подсчитайте число силовых линий  $\Phi_+$  выходящих и  $\Phi_-$  входящих через границы замкнутого контура, которым в нашем опыте будет являться прямоугольная рамка окна опыта. При этом внимательно смотрите за направлением стрелок на силовых линиях поля. Запишите эти данные и разность  $\Phi = \Phi_+ - \Phi_-$  в таблицу 2.
- 6.
6. Последовательно устанавливайте заряды:  $q_2 = +1, +2, +3, +4, +5$  мкКл и выполните п.5 ещё 5 раз.

**ЭКСПЕРИМЕНТ 2.** (Переменное пространственное распределение постоянного заряда внутри замкнутой поверхности)

1. Установите значения  $q_1$  и  $q_2$  соответствующие значениям, указанным в таблице 1 для вашей бригады.
2. Установите также минимальное расстояние между зарядами  $d = 2$  м и на экране окна эксперимента, подсчётом определите числа  $\Phi_+$ ,  $\Phi_-$  и  $\Phi$ .
3. Последовательно увеличивая расстояние между зарядами с шагом 0,5 м, выполните п. 2 ещё 6 раз.
4. Результаты измерений запишите в табл. 3.

**Таблица 1. Установочные значения физических параметров для проведения экспериментов**

Бригады	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>ЭКСПЕРИМЕНТ 1</b>								
$q_1$ , мкКл	-1	-2	-3	-4	-5	-4	-3	-2
$d$ , м	2	3	4	5	5	4	3	2
<b>ЭКСПЕРИМЕНТ 2</b>								
$q_1$ , мкКл	-5	-5	-5	-5	-5	-4	-4	-4
$q_2$ , мкКл	+1	+2	+3	+4	+5	+4	+3	+2

**Таблица 2. Результаты измерений в эксперименте 1**

$q_1 = \underline{\hspace{2cm}}$      $d = \underline{\hspace{2cm}}$

$q_2 = 0$ мкКЛ			$q_2 = +1$ мкКЛ			$q_2 = +2$ мкКЛ			$q_2 = +3$ мкКЛ			$q_2 = +4$ мкКЛ			$q_2 = +5$ мкКЛ		
$\Phi_+$	$\Phi_-$	$\Phi$	$\Phi_+$	$\Phi_-$	$\Phi$	$\Phi_+$	$\Phi_-$	$\Phi$	$\Phi_+$	$\Phi_-$	$\Phi$	$\Phi_+$	$\Phi_-$	$\Phi$	$\Phi_+$	$\Phi_-$	$\Phi$

**Таблица 3. Результаты измерений в эксперименте 2.**

$q_1 = \underline{\hspace{2cm}}$      $q_2 = \underline{\hspace{2cm}}$

$d = 2\text{м}$			$d = 3\text{м}$			$d = 4\text{м}$			$d = 5\text{м}$			$d = 4,5\text{ м}$			$d = 3,5\text{ м}$		
$\Phi_+$	$\Phi_-$	$\Phi$	$\Phi_+$	$\Phi_-$	$\Phi$	$\Phi_+$	$\Phi_-$	$\Phi$	$\Phi_+$	$\Phi_-$	$\Phi$	$\Phi_+$	$\Phi_-$	$\Phi$	$\Phi_+$	$\Phi_-$	$\Phi$

### **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА**

1. Постройте по данным табл.2 график зависимости потока вектора напряжённости  $\Phi$  от величины заряда  $q$ .
2. По котангенсу угла наклона графика и используя ф-лы (4) и (5), определите электрическую постоянную  $\epsilon_0$ .
3. По данным, приведённым в табл.3, постройте график зависимости потока вектора напряжённости  $\Phi$  от расстояния между зарядами  $d$ .
4. По построенным графикам сделайте анализ результатов и оцените погрешность проведённых измерений.

### **Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Какие поля называют электростатическими?
2. Что такое напряжённость электростатического поля?
3. Как определяется направление вектора напряжённости?
4. Что такое поток вектора напряжённости?
5. Какая линия называется силовой? Почему они не могут пересекаться?
6. Какая линия называется эквипотенциальной?
7. Докажите, что эквипотенциальные и силовые линии ортогональны.
8. От чего зависит густота силовых и эквипотенциальных линий?
9. В чём заключается физический смысл теоремы Остроградского-Гаусса?
10. Рассчитайте, используя теорему О-Г,
  - а) поле равномерно заряженной бесконечной плоскости;
  - б) поле двух бесконечных параллельных разноимённо заряженных плоскостей;
  - в) поле равномерно заряженной сферической поверхности;
  - г) поле объёмно заряженного шара;
  - д) поле равномерно заряженного бесконечного цилиндра (нити);
11. Каким образом теорема О-Г и следствия из неё могут быть косвенным подтверждением справедливости закона Кулона?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.15

### ЗАКОН ОМА ДЛЯ НЕОДНООДНОГО УЧАСТКА ЦЕПИ

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебниках: 1. Трофимова Т.И. Курс физики. Гл. 12, §100. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. Гл. 19, §19.1. Запустите программу «Электричество и магнетизм». Выберите: «Цепи постоянного тока». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект. (Если вы забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ стр.5 еще раз).

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- Знакомство с компьютерным моделированием цепей постоянного тока.
- Экспериментальное подтверждение закона Ома для неоднородного участка цепи.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ (СИЛЫ) ТОКА  $I = \frac{dq}{dt}$ .

ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ: величина (сила) тока, текущего по однородному (в смысле отсутствия сторонних сил) металлическому проводнику, пропорциональна падению напряжения  $U$  на проводнике  $I = \frac{1}{R} U$ , где  $R$  - сопротивление проводника.

РЕЗИСТОРОМ называется устройство, обладающее заданным постоянным сопротивлением.

РЕОСТАТОМ называется переменное сопротивление.

НАПРЯЖЕНИЕМ НА УЧАСТКЕ ЦЕПИ 1-2 называется физическая величина, определяемая выражением

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + E_{12}.$$

ЗАКОН ОМА ДЛЯ НЕОДНОРОДНОГО УЧАСТКА ЦЕПИ:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + E_{12}}{R}, \text{ где } \varphi_1 \text{ и } \varphi_2 - \text{потенциалы концов участка, } E_{12} - \text{э.д.с., действующая}$$

на данном участке цепи.

Применяя закон Ома для неоднородного участка цепи, необходимо помнить о правиле выбора знаков: *произведение  $IR$  следует брать со знаком «+», если направление обхода совпадает с направлением тока на этом участке, э.д.с.  $E_{12}$  будет иметь знак «+», если её направление (от минуса к плюсу) совпадает с направлением обхода.* При этом надо иметь в виду, что вольтметр, подключённый к концам любого участка цепи, будет показывать разность потенциалов между точками подключения прибора, а направление отклонения стрелки прибора будет определяться параметрами внешней цепи.

Таким образом, закон Ома для полной цепи можно записать в виде

$$I(R + r) = \pm V + E_{12} \quad (1)$$

Из формулы (1) видно, что при  $I = 0$  вольтметр покажет э.д.с. источника, включённого в данный участок цепи.

## МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ:

В данной лабораторной работе изучается модель электрической цепи, содержащей на одном из своих участков источник электродвижущей силы (э.д.с.). На этом участке, в зависимости от соотношений между параметрами цепи, разность потенциалов между его крайними точками может менять знак, переходя через 0.

## ИЗМЕРЕНИЯ:

Соберите на экране опыта замкнутую цепь, показанную на рис.1.

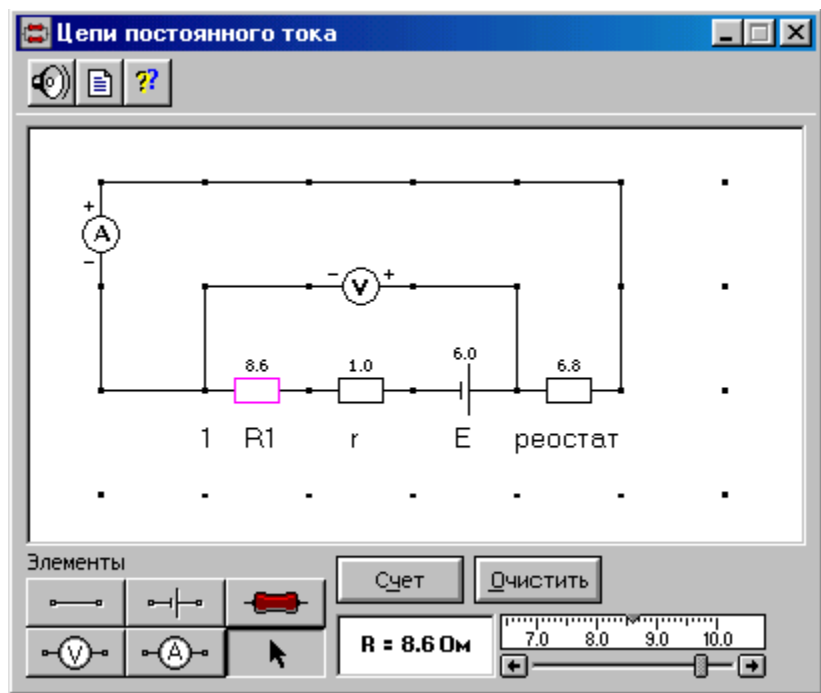








Рис.1.

Для этого сначала щелкните левой кнопкой мыши на кнопке э.д.с.  в нижней части экрана. Переместите маркер мыши на рабочую часть экрана, где расположены точки. Щелкните левой кнопкой мыши в рабочей части экрана, где должен быть расположен источник э.д.с.

Разместите далее последовательно с источником резисторы, выполняющие функции его внутреннего сопротивления  $r$  и сопротивления неоднородного участка  $R_1$  (нажав предварительно кнопку  в нижней части экрана), и амперметр (кнопка  там же). Затем расположите резистор нагрузки (реостат) и последовательно соединенный с ним амперметр. Над участком цепи расположите вольтметр , измеряющий разность потенциалов на этом неоднородном участке цепи.

Соедините все указанные приборы в замкнутую цепь. Для этого нажмите кнопку соединительного провода  внизу экрана, после чего переместите маркер мыши в рабочую зону схемы. Щелкайте левой кнопкой мыши в необходимых местах рабочей зоны и сформируйте замкнутую цепь, показанную на рис. 1.

Установите заданные значения параметров для каждого прибора цепи. Для этого щелкните левой кнопкой мыши на кнопке со стрелкой . Затем щелкните на данном приборе. Подведите маркер мыши к движку появившегося регулятора, нажмите на левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, установите значения  $R_1$ ,  $r$ ,  $E$ , которые указаны в таблице 1 для вашей бригады.

Установите сопротивление реостата  $R = 1 \text{ Ом}$ . Измерьте значения тока и разности потенциалов (щелкнув мышью по кнопке «Счет») и запишите их в таблицу 2.

Увеличивая сопротивление реостата  $R$  каждый раз на  $1 \text{ Ом}$ , повторите измерения силы тока и разности потенциалов по п.5 и заполните таблицу 2.

Включите в схему второй источник питания, как показано на рис.2, и установите значение  $E_2$ , соответствующее номеру вашей бригады.

Проведите на второй схеме все измерения п.п. 5,6.

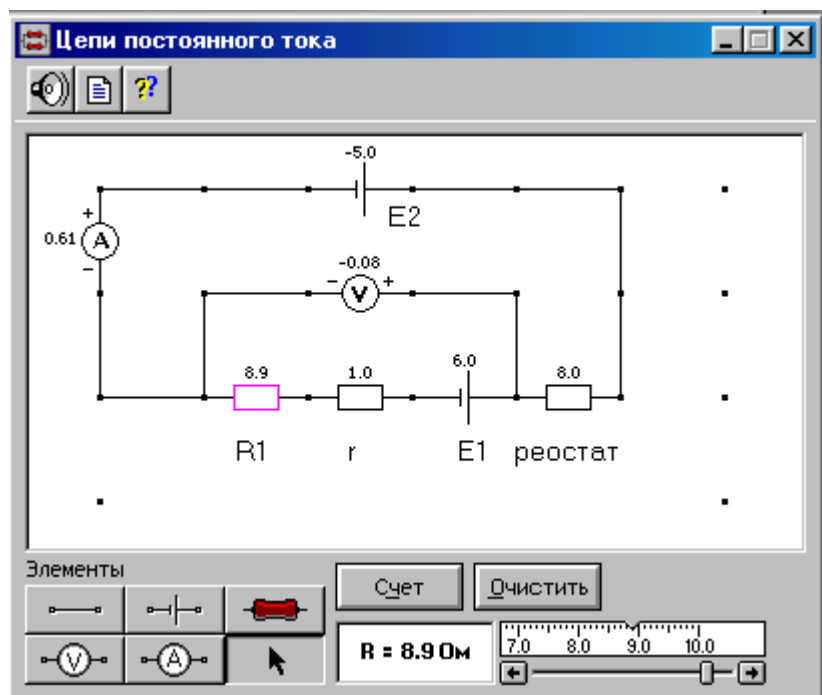


Рис.2

Таблица 1. Значения э.д.с. ( $E_1$  и  $E_2$ ), внутреннего сопротивления источника ( $r$ ) и  $R_1$

Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8
$E_1, \text{В}$	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
$E_2, \text{В}$	-2,5	-3,5	-4,0	-3,5	-3,0	-4,5	-5,0	-5,5
$r, \text{Ом}$	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4
$R_1, \text{Ом}$	8,0	7,5	7,0	6,5	8,5	9,0	9,5	10,0

Таблица 2. Результаты измерений

Номер измерения	$E_1 = \_\_\_\ R_1 = \_\_\_\ r = \_\_\_\$			$E_1 = \_\_\_\ E_2 = \_\_\_\ R_1 = \_\_\_\ r = \_\_\_\$		
	$R$ Ом	$U$ В	$I$ А	$R$ Ом	$U$ В	$I$ А
1						
2						
...						
10						

## **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА:**

На одном графике покажите зависимость показаний вольтметра (ось ординат) от силы тока для первой и второй схем (ось абсцисс).

Экстраполируя оба графика до пересечения с осью ординат, определите по формуле (1) экспериментально установленное значение э.д.с. ( $E_1$ ) источника тока, включённого в неоднородный участок цепи, и сравните его с установочным значением.

По тангенсу наклона прямой к оси  $I$  определите полное сопротивление участка для двух схем и сравните его значение с установочным.

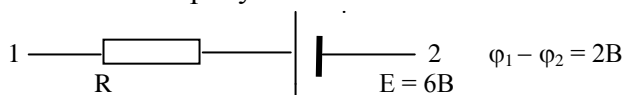
Рассчитайте погрешности измерений и запишите окончательный результат.

## **Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Дайте определения понятий: разность потенциалов, э.д.с. источника тока, напряжение на участке цепи.

2. Что называется сторонней силой? Какова её природа?

3. Укажите правильное выражение закона Ома для неоднородного участка цепи, показанного на рисунке:



- 1)  $IR = (\varphi_1 - \varphi_2) + E$ ; 2)  $IR = (\varphi_1 - \varphi_2) - E$ ; 3)  $IR = E - (\varphi_1 - \varphi_2)$ ; 4)  $IR = E$ ;  $= (\varphi_1 - \varphi_2)$ .

4. Выведите Закон Ома в дифференциальной форме.

5. Что называется удельным сопротивлением проводника? От чего оно зависит?

6. Сформулируйте правила Кирхгофа для разветвлённых цепей.

7. Выведите формулы сопротивлений батарей последовательно и параллельно соединённых резисторов.

8. Сформулируйте закон Ома для полной цепи.

9. Объясните принцип действия экспериментальной установки. В чём принципиальная разница первого и второго варианта схем?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.16

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЧАСТИЦЫ МЕТОДОМ ОТКЛОНЕНИЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебниках: 1. Трофимова Т.И. Курс физики. Гл. 14, §115. 2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. Гл. 23, §23.3. Запустите программу «Электричество и магнетизм». Выберите: «Масс-спектрометр». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект. (Если вы забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ стр.5 еще раз).

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- Знакомство с компьютерным моделированием движения заряженных частиц в магнитном поле.
- Ознакомление с принципом работы масс-спектрометра.
- Определение удельного заряда частиц.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

1. СИЛА ЛОРЕНЦА- сила, действующая на движущуюся со скоростью  $v$  в однородном магнитном поле с индукцией  $B$  частицу с зарядом  $q$ :

$$\vec{F} = q[\vec{v}\vec{B}] \quad (1)$$

Модуль этой силы равен

$$F = qvB\sin\alpha, \quad (2)$$

где  $\alpha$ - угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ . Сила Лоренца направлена перпендикулярно скорости частицы, сообщает ей только нормальное ускорение и вызывает искривление траектории частицы.

Если частица влетает в однородное магнитное поле в направлении, перпендикулярном линиям магнитной индукции, то частица будет двигаться по дуге окружности, плоскость которой перпендикулярна линиям индукции. Радиус окружности можно найти из второго закона динамики:

$$m\frac{v^2}{R} = qvB. \quad (3)$$

УДЕЛЬНЫМ ЗАРЯДОМ ЧАСТИЦЫ называется отношение заряда частицы к её массе. Тогда из формулы (3) удельный заряд будет равен:

$$\frac{q}{m} = \frac{v}{RB}. \quad (4)$$

Период обращения частицы  $T = \frac{2\pi R}{v}$  равен

$$T = \frac{2\pi m}{qB}, \quad (5)$$

и не зависит от скорости.

МАСС-СПЕКТРОМЕТРОМ называется прибор, для разделения ионизованных молекул и атомов (изотопов) по их массам, основанный на воздействии электрических и магнитных полей на пучки ионов, летящих в вакууме.

Простейшая модель масс-спектрографа показана на рис. 1.



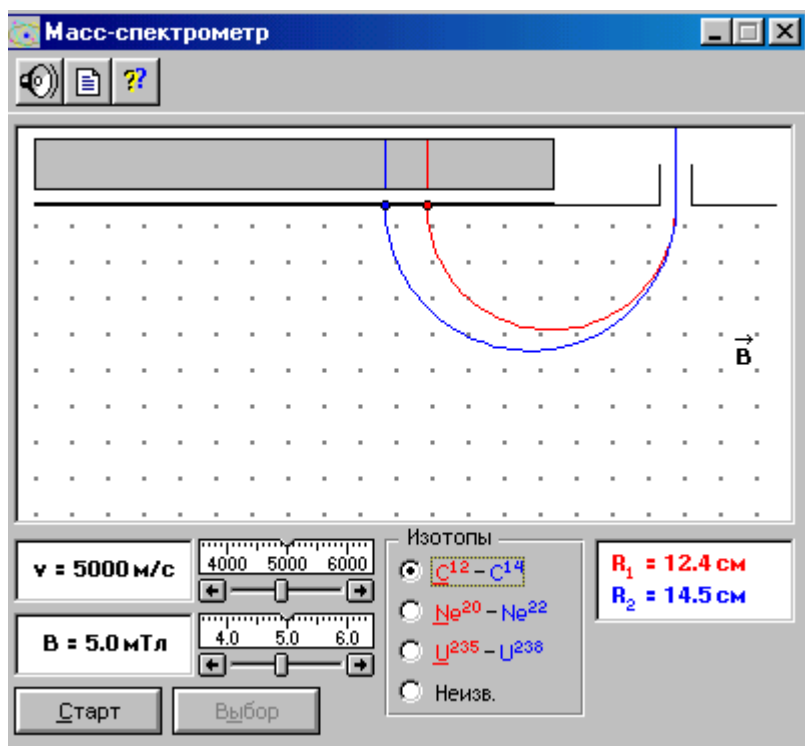


Рис. 1.

### **МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ:**

1. Подведите маркер мыши к движку регулятора величины магнитной индукции, нажмите левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, двигайте движок, установив числовое значение  $B$ , взятое из таблицы 1 для вашей бригады.
2. Аналогичным образом, зацепив мышью движок регулятора скорости, установите минимальное значение  $10^3$  м/с.
3. Нажмите мышью кнопку «Изотопы  $C^{12}-C^{14}$ »
4. Нажмите мышью кнопку «Старт» и синхронно секундомер. Проследите за движением двух изотопов в магнитном поле модельного масс-спектрометра и по секундомеру определите время этого движения.
5. Запишите в таблицу 2 значения радиусов окружностей, по которым двигались эти изотопы (они показаны красным и синим цветом в правом углу окна) и время движения изотопов в вакуумной камере масс-спектрометра.
6. Последовательно увеличивая скорость частиц на  $10^3$  м/с, проделайте п.п.4-5 ещё 9 раз и заполните таблицу 2.
7. Нажмите мышью кнопку «Изотопы  $Ne^{20}-Ne^{22}$  », проведите измерения п.п.4-6 и заполните таблицу 3.
8. Проведите аналогичные измерения с изотопами урана и неизвестного химического элемента и заполните таблицы 4 и 5.

**Таблица 1. Значения магнитной индукции  $B$**

Номер бригады	1	2	3	4	5	6	7	8
$B$ , мТл (табл.2,3)	1	2	3	4	5	6	7	8
$B$ , мТл (табл.4,5)	9,0	9,1	9,2	9,3	9,4	9,5	9,6	9,7

## Таблицы 2-5. Результаты измерений и расчётов

**B =**

$v \cdot 10^3, \text{м/с}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_1, \text{см}$										
$R_2, \text{см}$										
$T_{1/2}, \text{с}$										
$q_1/m_1, \text{Кл/кг}$										
$q_2/m_2, \text{Кл/кг}$										
Табличные значения: $q_1/m_1 =$ $q_2/m_2 =$										

### **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА:**

1. Вычислите по формуле (4) удельные заряды изотопов углерода, неона, урана и неизвестного химического элемента и запишите полученные значения в соответствующие таблицы.
2. Используя справочные материалы по физике и химии, определите табличные значения удельных зарядов исследованных изотопов и сравните их с полученными в опыте.
3. Постройте график зависимости времени пролёта изотопов в камере масс-спектрометра от их скорости и сделайте выводы по результатам анализа этого графика.
4. Проведите оценку погрешностей проведённых измерений.

### **ПОЛЕЗНЫЕ СВЕДЕНИЯ:**

Атомная единица массы (а.е.м.) =  $1,660 \cdot 10^{-27}$  кг.

Элементарный заряд  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл.

### **Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Как определяется направление действия силы Лоренца?
2. Почему сила Лоренца не совершает работы?
3. Как будет двигаться заряженная частица в магнитном поле, если угол  $\alpha$  между векторами  $\vec{B}$  и  $\vec{v}$  меньше  $\pi/2$ ?
4. Ионы двух изотопов с массами  $m_1$  и  $m_2$ , имеющие одинаковый заряд и прошедшие в электрическом поле одинаковую ускоряющую разность потенциалов, влетают в магнитное поле перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Найдите отношение радиусов окружностей, по которым будут двигаться ионы в магнитном поле.
5. Определите, во сколько раз изменится радиус окружности, по которой заряженная частица движется в однородном магнитном поле, если её кинетическую энергию увеличить в  $n$  раз?
6. Определите удельный заряд иона, который в масс-спектрометре совершает один оборот за 628 мкс в однородном магнитном поле с индукцией 50 мТл.
7. Пучок ионов, влетающих в вакуумную камеру масс-спектрометра перпендикулярно силовым линиям однородного магнитного поля, расщепляется (рис.2). Определите, какая траектория соответствует: а) большему импульсу,

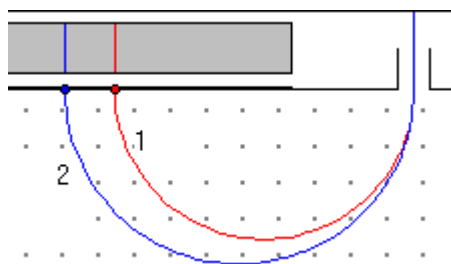


Рис.2

если ионы имеют одинаковые заряды, но разные импульсы; б) большему заряду, если частицы имеют одинаковые импульсы, но разные заряды?

8. Два электрона движутся в одном и том же однородном магнитном поле по орбитам с радиусами  $R_1$   $R_2$  ( $R_1 > R_2$ ). Сравните их угловые скорости.

9. В однородном магнитном поле движутся по окружностям протон и  $\alpha$ -частица, имея равные кинетические энергии. Какая из этих частиц будет иметь орбитальный магнитный момент и период вращения больше и во сколько раз?

10. Заряженная частица влетела в однородное магнитное поле под углом  $\alpha < \pi/2$  между векторами  $\vec{B}$  и  $\vec{v}$ . Определите, отличны ли от нуля тангенциальная и нормальная составляющие ускорения частицы?

11. Заряженная частица летит прямолинейно и равномерно в однородном электромагнитном поле, представленном суперпозицией взаимно перпендикулярных электрических (напряжённостью  $E$ ) и магнитных (индукцией  $B$ ) полей. Найдите скорость движения частицы.

12. Заряженная частица вращается в однородном магнитном поле с индукцией  $B$  по окружности радиуса  $R$ . Параллельно магнитному полю возбуждается электрическое поле напряжённостью  $E$ . Определите, сколько времени должно действовать электрическое поле, чтобы кинетическая энергия частицы возросла в два раза?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.17

### ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА С КОНДЕНСАТОРОМ

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и в учебниках 1. Трофимова Т.И. Курс физики. Гл.11, §94. 2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. Гл.16, §16.3. Выберите: «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ» и «Конденсаторы в цепях постоянного тока». Нажмите кнопку с изображением страницы во внутреннем окне. Прочитайте теорию и запишите основные сведения в свой конспект лабораторной работы. Закройте окно теории, нажав кнопку с крестом в правом верхнем углу внутреннего окна.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- Знакомство с компьютерным моделированием переходных процессов в цепях постоянного тока.
- Проверка закона сохранения энергии в цепях постоянного тока с конденсатором.
- Определение ёмкости конденсатора методом разрядки.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

ПЕРЕХОДНЫМ ПРОЦЕССОМ называется процесс перехода от одного установившегося в цепи режима к другому. Примером такого процесса является зарядка и разрядка конденсатора. В ряде случаев законы постоянного тока можно применять и к изменяющимся токам, когда изменение тока происходит не слишком быстро. В этих случаях мгновенное значение силы тока будет практически одно и то же во всех поперечных сечениях цепи. Такие токи называют *квазистационарными*

РАЗРЯДКА КОНДЕНСАТОРА. Если обкладки заряженного конденсатора ёмкости  $C$  замкнуть через сопротивление  $R$ , то через это сопротивление потечёт ток. Согласно закону Ома для однородного участка цепи

$$IR=U,$$

где  $I$  и  $U$  – мгновенные значения силы тока в цепи и напряжения на обкладках конденсатора. Учитывая, что  $I = -\frac{dq}{dt}$  и  $U = \frac{q}{C}$ , преобразуем закон Ома к виду

$$\frac{dq}{dt} + \frac{q}{RC} = 0 \quad (1)$$

В этом дифференциальном уравнении переменные разделяются, и после интегрирования получим закон изменения заряда конденсатора со временем

$$q = q_0 e^{-\frac{t}{RC}}, \quad (2)$$

где  $q_0$  – начальный заряд конденсатора,  $e$  – основание натурального логарифма. Произведение  $RC$ , имеющее размерность времени, называется *временем релаксации*  $\tau$ . Продифференцировав выражение (2) по времени, найдём закон изменения тока:

$$I = -\frac{dq}{dt} = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (3)$$

где  $I_0$  – сила тока в цепи в момент времени  $t = 0$ . Из уравнения (3) видно, что  $\tau$  есть время, за которое сила тока в цепи уменьшается в  $e$  раз.

Зависимость от времени количества теплоты, выделившегося на сопротивлении  $R$  при разряде конденсатора можно найти из закона Джоуля-Ленца:

$$Q = \int_0^t I^2 R dt = \frac{q_0^2}{2C} \left( 1 - e^{-\frac{2t}{\tau}} \right) = \frac{C \mathcal{E}^2}{2} \left( 1 - e^{-\frac{2t}{\tau}} \right). \quad (4)$$

## ЗАРЯДКА КОНДЕСАТОРА.

Считаем, что первоначально конденсатор не заряжен. В момент времени  $t = 0$  ключ замкнули, и в цепи пошёл ток, заряжающий конденсатор. Увеличивающиеся заряды на обкладках конденсатора будут всё в большей степени препятствовать прохождению тока, постепенно уменьшая его. Запишем закон Ома для этой замкнутой цепи:

$$\mathcal{E} = IR + U = \frac{dq}{dt} R + \frac{q}{C}.$$

После разделения переменных уравнение примет вид:

$$\frac{dt}{CR} = \frac{dq}{C\mathcal{E} - q}.$$

Проинтегрировав это уравнение с учётом начального условия

$q = 0$  при  $t = 0$  и с учётом того, что при изменении времени от 0 до  $t$  заряд изменяется от 0 до  $q$ , получим

$$\frac{t}{CR} = -\ln \frac{C\mathcal{E} - q}{C\mathcal{E}}, \text{ или после потенцирования}$$

$$q = C\mathcal{E} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \right]. \quad (4)$$

Анализ этого выражения показывает, что заряд приближается к своему максимальному значению, равному  $C\mathcal{E}$ , асимптотически при  $t \rightarrow \infty$ .

Подставляя в формулу (4) функцию  $I(t) = dq/dt$ , получим

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} \exp\left(-\frac{t}{RC}\right). \quad (5)$$

Из закона сохранения энергии следует, что при зарядке конденсатора для любого момента времени работа источника тока  $dA_{\text{ист}}$  равна сумме количества джоулевой теплоты  $dQ$ , выделившейся на резисторе  $R$  и изменению энергии конденсатора  $dW$ :

$$dA_{\text{ист}} = dQ + dW,$$

где  $dA_{\text{ист}} = \mathcal{E} Idt$ ,  $dQ = I^2 R dt$ ,  $dW = d\left(\frac{q^2}{2C}\right) = \left(\frac{q dq}{C}\right)$ . Тогда для произвольного момента времени  $t$  имеем:

$$A_{\text{ист}}(t) = \int_0^t \mathcal{E} Idt = \frac{\mathcal{E}^2}{R} \int_0^t e^{-\frac{t}{RC}} dt = C\mathcal{E}^2 \left( 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right). \quad (6)$$


$$Q(t) = \frac{\mathcal{E}^2}{R} \int_0^t e^{-\frac{2t}{RC}} dt = C\mathcal{E}^2 \left( 1 - e^{-\frac{2t}{RC}} \right). \quad (7)$$

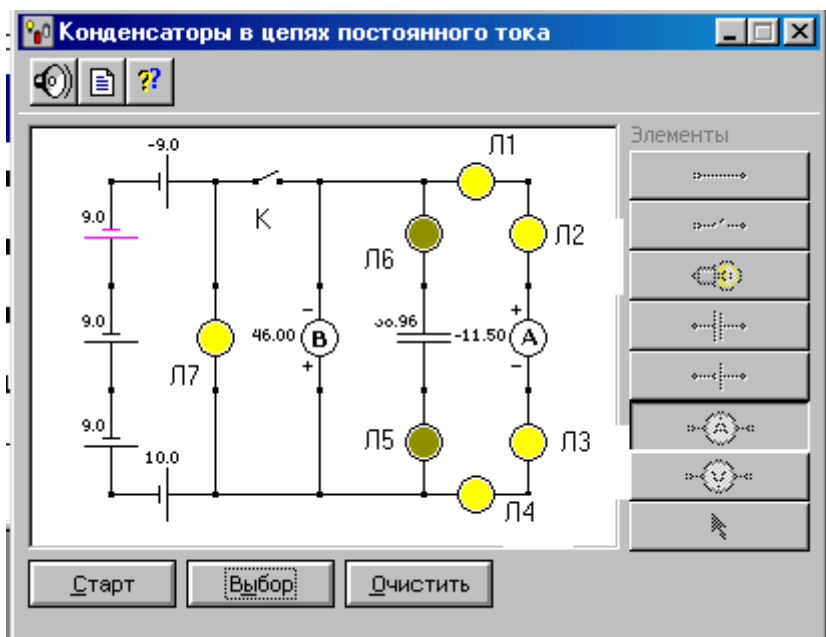
$$W(t) = \frac{1}{2C} \int_0^t q^2 dt = \frac{1}{2C} \int_0^t q^2 dt = \frac{C\mathcal{E}^2}{2} \int_0^t \left( 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right)^2 dt = \frac{CU_t^2}{2}. \quad (8)$$



## МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ:

В реальных электрических цепях постоянного тока, содержащих конденсаторы, переходные процессы разрядки и зарядки конденсаторов проходят за время порядка  $10^{-6} - 10^{-3}$  с. Для того, чтобы сделать доступными для наблюдения и измерения электрические параметры при переходных процессах в настоящей компьютерной модели это время значительно увеличено за счёт увеличения ёмкости конденсатора.







## ЭКСПЕРИМЕНТ 1. Определение ёмкости конденсатора методом разрядки

1. Соберите на рабочей части экрана замкнутую электрическую цепь, показанную ниже на рис.2. Для этого сначала щёлкните мышью на кнопке  э.д.с., расположенной в правой



части окна эксперимента. Переместите маркер мыши на рабочую часть экрана, где расположены точки, и щёлкните маркером мыши в виде  вытянутого указательного пальца в том месте, где должен быть расположен источник тока. Подведите маркер мыши к движку  появившегося регулятора э.д.с., нажмите на левую кнопку мыши, удерживая её в нажатом состоянии, меняйте величину э.д.с. и установите 10 В. Аналогичным образом включите в цепь 4 других

источника тока. Суммарная величина э.д.с. батареи должна соответствовать значению, указанному в таблице 1 для вашей бригады.

Таким же образом разместите далее на рабочей части экрана 7 ламп Л1-Л7 (кнопка ) , Ключ К (кнопка ) , вольтметр (кнопка ) , амперметр (кнопка ) , конденсатор (кнопка ) . Все элементы электрической цепи соедините по схеме рис.1 с помощью монтажных проводов (кнопка ) .

2. Щёлкните мышью на кнопке «Старт». Должна засветиться лампа Л7, а надпись на кнопке измениться на «Стоп». Курсором мыши замкните ключ К.

3. После установления в цепи стационарного тока (должны погаснуть лампы Л5 и Л6 и светиться лампы Л1-Л4) запишите показания электроизмерительных приборов в таблицу 2.

4. Нажмите на кнопку «Стоп» и курсором мыши разомкните ключ К.

5. Двумя короткими щелчками мыши на кнопке «Старт» запустите и остановите процесс разрядки конденсатора. Показания амперметра будут соответствовать начальному току разрядки конденсатора  $I_0$ . Запишите это значение в таблицу 3.

6. Вновь замкните ключ, зарядите конденсатор и повторите п.п. 5, 6 ещё 4 раза.

7. Для каждого опыта рассчитайте  $I_{\tau} = I_0/2$ , т.е. силу тока, которая должна быть в цепи разрядки конденсатора через время релаксации  $\tau$  и запишите эти значения в таблицу 3.

8. При разомкнутом ключе нажатием кнопки «Старт» запустите процесс разрядки конденсатора и одновременно включите секундомер.

9. Внимательно наблюдайте за изменением показаний амперметра в процессе разрядки конденсатора. Остановите секундомер и синхронно нажмите кнопку «Стоп» при показании амперметра, равном или близким к  $I_{\tau}$ . Запишите это значение времени  $\tau_1$  в таблицу 3.

10. Проведите опыты п.п.8, 9 ещё 4 раза.

**Таблица 1. Суммарное значение э.д.с. источников тока**

Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8
Э.д.с., В	50	49	48	47	46	45	44	43

**Таблица 2. Определение сопротивления лампы.**

№п/п	$I$ , А	$U$ , В	$R$ , Ом

**Таблица 3. Результаты измерений и расчётов.**

Номер опыта	1	2	3	4	5	Среднее значение
$I_0$ , А						
$I_{\tau}$ , А						
$\tau$ , с						
$C$ , Ф						

**ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ:**

1. По закону Ома для участка цепи Л1-Л4:  $R = \frac{1}{4} \frac{U}{I}$  и результатам измерений, приведённым в таблице 2, определите сопротивление одной лампы.

2. По формуле  $C = \frac{\tau}{6R}$  (при разрядке конденсатора квазистационарный ток протекает по 6 последовательно соединённым лампам) определите ёмкость конденсатора и запишите эти значения в таблицу 3.

3. Рассчитайте погрешности измерений и сформулируйте выводы по результатам проделанной работы.

**ЭКСПЕРИМЕНТ 2. Изучение зависимости от времени количества тепла, выделившегося на нагрузке при разряде конденсатора**

1. Выполняя действия, аналогичные описанным в эксперименте 1, зарядите конденсатор до напряжения, соответствующего суммарному значению э.д.с. для вашей бригады.

2. Нажмите кнопку «Стоп» и отключите ключ К.

3. Проведите 5-ти секундный процесс частичного разряда конденсатора через подключённые лампы. Для этого нажмите синхронно кнопку «Старт» и кнопку запуска секундомера и через 5 секунд нажатием кнопки «Стоп» остановите процесс разрядки конденсатора.

4. Запишите показания амперметра в таблицу 4 и вновь зарядите конденсатор до первоначального напряжения.

5. Последовательно увеличивая длительность процесса разрядки конденсатора на 5 с, сделайте эти опыты до времени разрядки, соответствующему полному исчезновению заряда на конденсаторе. (Напряжение на конденсаторе и ток разрядки через лампы должен быть близким к нулю). Результаты измерений тока разрядки запишите в соответствующие ячейки таблицы 4.

**Таблица 4. Результаты измерений и расчетов**

Время разрядки $t$ , с	5	10	15	20	...	$5n$
Ток разряда $I$ через $t$ с, А						
Кол-во тепла $Q$ за $t$ с, Дж						

### **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ:**

1. Для каждого времени разрядки вычислите по формуле (4) количество тепла, выделившегося на шести лампах и запишите эти значения в соответствующие ячейки третьей строки табл.4.

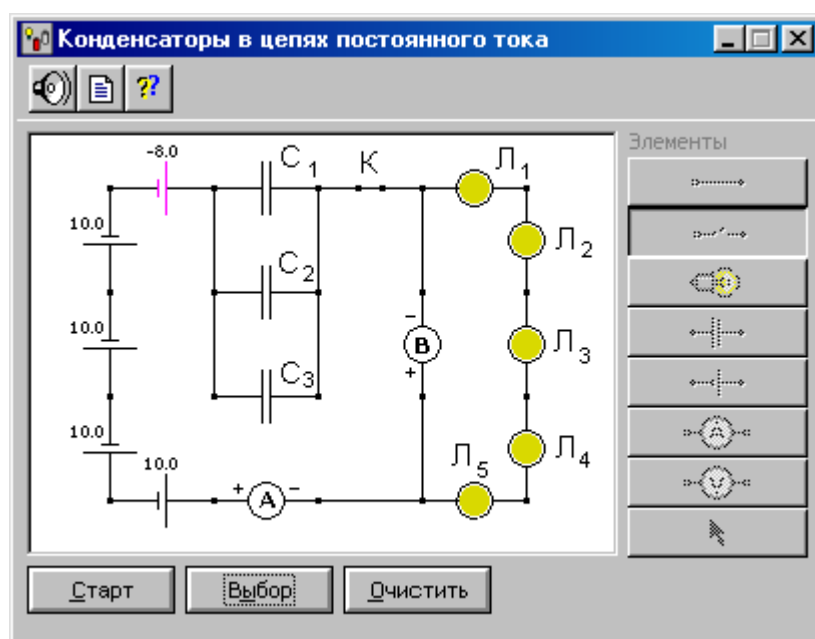
*Полезный совет: для расчёта  $Q$  воспользуйтесь программой MS Excel.*

2. Постройте график зависимости количества выделившегося тепла  $Q$  к данному моменту времени от длительности процесса разрядки конденсатора  $t$ .

3. Сравните рассчитанное количество тепла, выделившееся к моменту полного разряда конденсатора с его теоретическим значением, равным  $Q = \frac{C\varepsilon^2}{2}$ .

4. Сделайте выводы по графику и ответу и проведите расчёт погрешностей измерений.

### **ЭКСПЕРИМЕНТ 3. Проверка закона сохранения энергии в процессе зарядки конденсатора через сопротивление**



**Рис.3**

1. Соберите в рабочей части экрана опыта схему, показанную на рис.3. Вольтметр, включённый параллельно 5-ти лампам, будет показывать напряжение на внешнем сопротивлении, а амперметр – силу тока через нагрузку и источники тока. Напряжение на конденсаторе определяется программой автоматически и указывается в вольтах на экране монитора над конденсатором.

2. Установите суммарную э.д.с. источников тока, соответствующую значению, приведённому в табл.1 для вашей бригады.

3. При разомкнутом ключе К нажмите кнопку «Старт».

4. Нажатием кнопки мыши замкните ключ К и начните процесс зарядки конденсаторов. Одновременно с замыканием ключа включите секундомер.



5. Через время релаксации  $\tau = RC$  нажатием кнопки «Стоп» остановите процесс и запишите показания электроизмерительных приборов в таблицу 5.

6. Нажмите кнопку «Выбор» и обнулите показания напряжений на всех конденсаторах и на электроизмерительных приборах.

7. Повторите эти измерения ещё 4 раза и заполните две верхних строки таблицы 5.

**Таблица 5. Результаты измерений и расчетов**

№ опыта	1	2	3	4	5	Среднее
$I, A$						
$U_c, B$						
$U_R, B$						
$A_{ист}, Дж$						
$\Delta W, Дж$						
$Q, Дж$						

### **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ:**

1. По формулам 6, 7, 8 и измеренным значениям напряжения на конденсаторе  $U_c$  рассчитайте величины работу источника тока  $A_{ист}$ , изменение энергии конденсатора  $\Delta W$  и выделившегося на нагрузке количества тепла  $Q$  через время заряда, равного времени релаксации.

2. Проверьте выполнение закона сохранения энергии в процессе зарядки конденсатора по формуле:  $A_{ист} = \Delta W + Q$ .

3. Сделайте выводы по итогам работы.

### **Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Что представляет собой конденсатор и от чего зависит его ёмкость?
2. Выведите формулы ёмкости плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов.
3. Как изменяется разность потенциалов на обкладках конденсатора при его зарядке и разрядке?
4. Какой ток называется квазистационарным?
5. Выведите формулы электроёмкости батареи последовательно и параллельно соединённых конденсаторов
6. Что такое время релаксации?
7. Объясните принцип работы экспериментальной установки.
8. Нарисуйте графики зависимости силы тока и напряжения от времени при зарядке и разрядке конденсатора.
9. Соберите на мониторе такую цепь, состоящую из источника тока, двух ламп, выключателя и соединительных проводов, чтобы с выключением лампы в одной цепи загоралась лампа в другой.

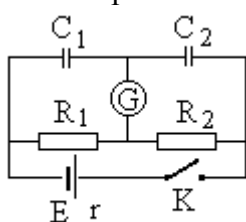


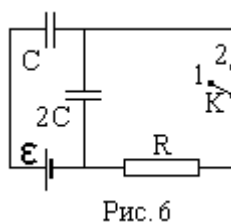
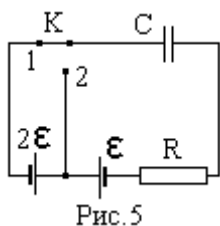
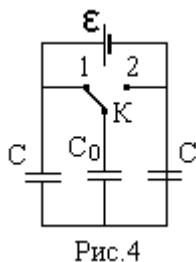
Рис.2

10. Определите заряд, который пройдёт через гальванометр в схеме, показанной на рис. 2, при замыкании ключа.

11. Конденсатор ёмкости  $C = 300$  пФ подключается через сопротивление  $R =$

500 Ом к источнику постоянного напряжения  $U_0$ . Определите: а) время, по истечению которого напряжение на конденсаторе составит  $0,99 U_0$ ; в) количество тепла, которое выделится на этом

- сопротивлении при разрядке конденсатора за это же время.
12. Имеется ключ, соединительные провода и две электрические лампочки. Составьте на мониторе электрическую схему включения в сеть этих лампочек, которая должна удовлетворять следующему условию: при замкнутом ключе горит только первая лампочка, при размыкании ключа первая гаснет, а вторая загорается.
  13. Конденсатору ёмкостью  $C$  сообщают заряд  $q$ , после чего обкладки конденсатора замыкают через сопротивление  $R$ . Определите: а) закон изменения силы тока, текущего через сопротивление; б) заряд, прошедший через сопротивление за время  $t$ ; в) количество тепла, выделившееся в сопротивлении за это время.
  14. Определите количество тепла, выделившегося в цепи (рис. 4-6) при переключении ключа  $K$  из положения 1 в положение 2. Параметры цепи обозначены на рисунках.



## ЛИТЕРАТУРА



1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2001, Гл.11, §94.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 2000, Гл.16, §16.3.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.5

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДА КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЁТКИ МЕТОДОМ ДИФРАКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебниках: 1. Трофимова Т.И. Курс физики. Гл. 28, §213. 2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. Гл. 37, §37.1. Запустите программу «Квантовая физика». Выберите: «Дифракция электронов». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект. (Если вы забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ стр.5 еще раз).

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- Изучение волновых свойств электронов
- Знакомство с компьютерной моделью дифракции электронов при их рассеянии на одномерной монокристаллической решётке (электронография).
- Определение периода кристаллической решётки «плёнки металла».

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

ПЕРИОД КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЁТКИ - расстояние между атомами в элементарной ячейке кристалла.

ВОЛНЫ ДЕ БРОЙЛЯ - волны, связанные с любой свободно движущейся микрочастицей и отражающие её квантовую природу. Длина волны и частота волн де Бройля связаны соотношениями

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \quad \nu = \frac{E}{h}. \quad (1)$$

КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ - лежащее в основе квантовой теории представление о том, что в поведении микрочастиц проявляются как корпускулярные, так и волновые свойства.

ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ - рассеяние электронов веществом, при котором из начального пучка частиц возникают дополнительно отклонённые пучки этих частиц. Дифракция электронов может быть объяснена только на основе квантовомеханических представлений о микрочастице (электроне) как о волне. Основные геометрические закономерности дифракции электронов ничем не отличаются от закономерностей дифракции волн других диапазонов. Общим условием дифракции волн любой природы является соизмеримость длины падающей волны с расстоянием между рассеивающими центрами:

$$\lambda \leq d. \quad (2)$$

Образование дифракционной картины при рассеянии электронов веществом в квантовой физике интерпретируется как распределение вероятности попадания электрона в различные точки экрана. Прошедший через кристалл электрон в результате взаимодействия с кристаллической решёткой образца отклоняется от первоначального направления движения и попадает в некоторую точку фотопластинки, установленной за кристаллом. При длительной экспозиции постепенно возникает упорядоченная картина дифракционных максимумов и минимумов в распределении электронов, прошедших через кристалл. Точно предсказать, в какое место фотопластинки попадёт данный электрон, нельзя, но можно указать вероятность его попадания после рассеяния в ту или иную точку пластинки. Эта вероятность определяется квадратом модуля волновой функции электрона  $|\Psi(x, y, z, t)|^2$ , а дифракционная картина на экране возникает как результат

вероятностного процесса. ЭЛЕКТРОНОГРАФИЯ – метод исследования структуры кристаллических веществ, основанный на дифракционном рассеянии ускоренных электрическим полем электронов. Он применяется для изучения атомной структуры кристаллов, аморфных тел и жидкостей, молекул газов и паров. При прохождении через вещество электроны, обладающие волновыми свойствами, взаимодействуют с атомами, в результате чего образуются дифрагированные пучки, интенсивность и расположение которых связаны с атомной структурой вещества и другими структурными параметрами. Рассеяние электронов определяется электростатическим потенциалом атомов, максимумы которого отвечают положениям атомных ядер.

Сильное взаимодействие электронов с веществом ограничивает толщину просвечиваемых образцов десятками долями мкм. Поэтому методами электронографии изучают атомную структуру мелкокристаллических веществ, структуру поверхностей твёрдых тел, например, при исследовании явлений коррозии металлов, адсорбции и катализа.

В основе расчёта элементов кристаллической ячейки и определения симметрии кристалла лежит измерение упорядоченного расположения дифракционных максимумов - точек или пятен («рефлексов») на электронограммах. С волновой точки зрения дифракция электронов полностью эквивалентна дифракции света на дифракционной решётке. Поэтому при рассеянии электронов на кристаллах положение главных максимумов определяется формулой дифракционной решётки:

$$d \sin \Theta = m\lambda . \quad (3)$$

При малых углах дифракции

$$\Theta \approx \frac{m\lambda}{d} . \quad (4)$$

Если на некотором расстоянии  $L$  от решётки поместить фотопластинку, то на ней будет зарегистрирована дифракционная картина в виде узких дифракционных полос – рефлексов, положения которых определяются при малых углах дифракции соотношением

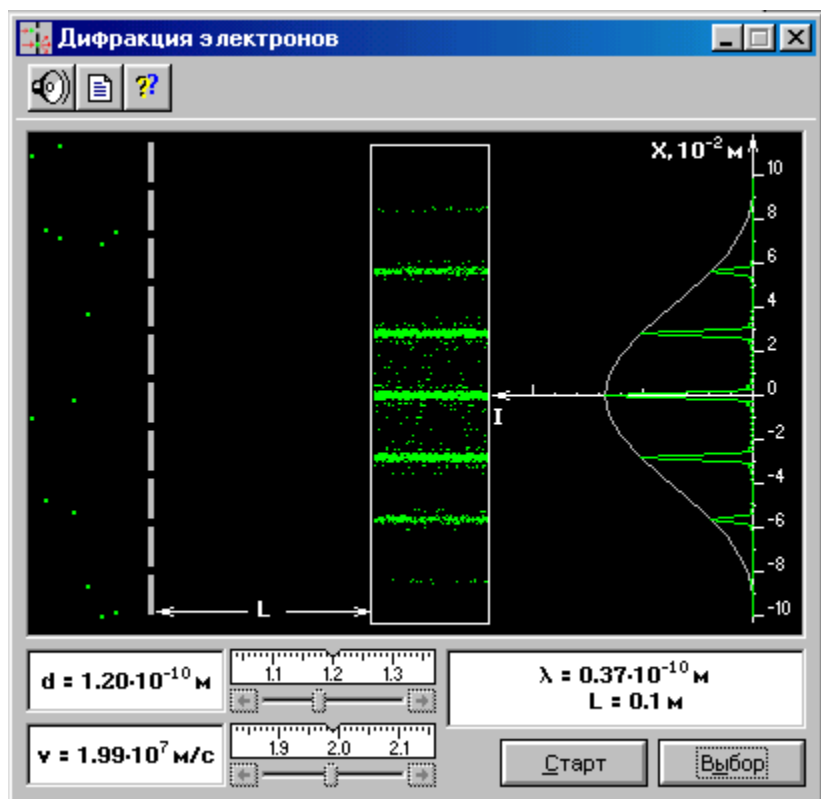
$$x_m \approx L\Theta \approx \frac{mL\lambda}{d} , \quad (5)$$

откуда период кристаллической решётки (межплоскостное расстояние)

$$d \approx \frac{mL\lambda}{x_m} . \quad (6)$$

### МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ:

Внимательно рассмотрите схему опыта на экране монитора и зарисуйте необходимое в свой конспект лабораторной работы.



**Рис.1**

1. Нажмите мышью кнопку «Выбор» и, зацепив мышью движок регулятора периода решётки, установите значение  $d = 1,5 \cdot 10^{-10}$  м.
2. Аналогичным образом установите первое значение скорости электронов, указанное в табл.1 для вашей бригады.
3. Нажмите мышью кнопку «Старт» и наблюдайте движение электронов через одномерную модель дифракционной кристаллической решётки и их регистрацию на фотопластинке.
4. Определите по шкале, расположенной в правой части окна, координаты первых трёх максимумов интенсивности дифракционной картины и запишите эти значения в таблицу 2.
5. Установите второе значение скорости для вашей бригады и повторите эти измерения ещё раз.

**Таблица 1. Значения скорости электронов**

Номер бригады	1	2	3	4	5	6	7	8
$v \cdot 10^7$ , м/с	1,50 2,00	1,55 2,05	1,60 2,10	1,65 2,15	1,70 2,20	1,80 2,25	1,85 2,30	1,90 2,35

**Таблица 2. Результаты измерений и расчётов**

$V_1 =$					$V_2 =$				
$\lambda$	$X_{m1}$	$X_{m2}$	$X_{m3}$	$d_{\text{э сред}}$	$\lambda$	$X_{m1}$	$X_{m2}$	$X_{m3}$	$d_{\text{э сред}}$
$d_{\text{э}}$					$d_{\text{э}}$				

**ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА:**

1. Рассчитайте для каждого значения  $x_m$  по формуле (6) период дифракционной решётки  $d_{\text{э}}$ , запишите эти данные в табл.2 и сравните полученное среднее значение с установочным.
2. Проведите оценку погрешности измерений.

**Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Назовите основные отличия кристаллических тел от аморфных.
2. Что такое кристаллическая решётка?
3. Что такое узлы кристаллической решётки?
4. Чем отличаются монокристаллы от поликристаллов?
5. Как можно классифицировать кристаллы?
6. Что такое ионная связь?
7. Что такое ковалентная связь?
8. Какие типы кристаллографических систем Вы знаете?
9. Определите основные свойства волн де Бройля.
10. В чём заключается соотношение неопределённостей?
11. Что такое волновая функция и в чём заключается её статистический смысл?
12. Запишите уравнение Шрёдингера для стационарных состояний.
13. Что такое дифракция микрочастиц?
14. Каковы особенности дифракции на пространственной решётке?
15. Сформулируйте условие Брэгга-Вульфа. Что оно определяет?
16. Кем и когда впервые была доказана возможность дифракции электронов?
17. Какую информацию можно получить из анализа электронограммы?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.5

### ЦИКЛ КАРНО

Ознакомьтесь с теорией в конспекте лекций и в учебниках: 1. Трофимова Т.И. Курс физики. Гл.9, §59; 2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. Гл.11, §11.2. Запустите программу «Термодинамика и молекулярная физика», «Цикл Карно». Нажмите кнопку с изображением страницы во внутреннем окне. Прочитайте теорию и запишите краткие сведения в свой конспект лабораторной работы. Закройте окно теории, нажав кнопку с крестом в правом верхнем углу внутреннего окна.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- Знакомство с компьютерной моделью, иллюстрирующей цикл Карно в идеальном газе.
- Экспериментальное определение работы, совершённой газом за цикл.
- Экспериментальная проверка теоремы Карно.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

ЦИКЛОМ КАРНО называется круговой процесс, состоящий из двух изотермических процессов и двух адиабатических процессов. (См. окно теории.)

РАБОЧИМ ТЕЛОМ называется термодинамическая система, совершающая процесс и предназначенная для преобразования одной формы передачи энергии - теплоты или работы - в другую. Например, в тепловом двигателе рабочее тело, получая энергию в форме тепла, часть её передаёт в форме работы.

НАГРЕВАТЕЛЕМ (ТЕПЛООТДАТЧИКОМ) называется устройство, сообщаемое рассматриваемой термодинамической системе энергию в форме тепла.

ХОЛОДИЛЬНИКОМ (ТЕПЛОПРИЁМНИКОМ) называется система (окружающая среда или специальные устройства для охлаждения и конденсации отработанного пара), поглощающая часть тепла рабочего тела.

ПРЯМЫМ ЦИКЛОМ называется круговой процесс, в котором рабочее тело совершает положительную работу:  $\oint p dV > 0$ . На графике  $p$ - $V$  прямой цикл изображается в виде замкнутой кривой, проходимой рабочим телом по часовой стрелке.

РАБОТА любого теплового двигателя состоит из повторяющихся циклов, каждый из которых включает в себя получение рабочим телом энергии от нагревателя, расширение рабочего тела и совершение им работы, передачу части энергии холодильнику и возвращение рабочего тела в исходное состояние. Работа, совершаемая рабочим телом за один полный цикл, складывается из работы, совершённой им при расширении, и работы, совершённой им при сжатии:  $A = A_{\text{расш}} + A_{\text{сж}}$ . Учитывая, что при сжатии газ совершает отрицательную работу, последнее равенство можно переписать в виде:

$$A = A_{\text{расш}} - |A_{\text{сж}}|.$$

При наличии холодильника газ перед сжатием или во время сжатия охлаждается, и потому процесс совершения им работы при сжатии протекает при меньшем давлении, чем при расширении. Поэтому  $|A_{\text{сж}}| < A_{\text{расш}}$ , и, следовательно,  $A > 0$ . Принцип действия теплового двигателя приведён на рис.1.

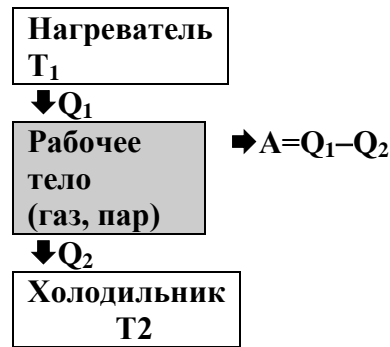


Рис.1

От нагревателя с температурой  $T_1$  за цикл отнимается количество теплоты  $Q_1$ , а холодильнику с температурой  $T_2$  за цикл передаётся количество теплоты  $Q_2$ . Рабочее тело при этом совершает полезную работу  $A = Q_1 - Q_2$ . Цикл Карно изображён на рис.2,

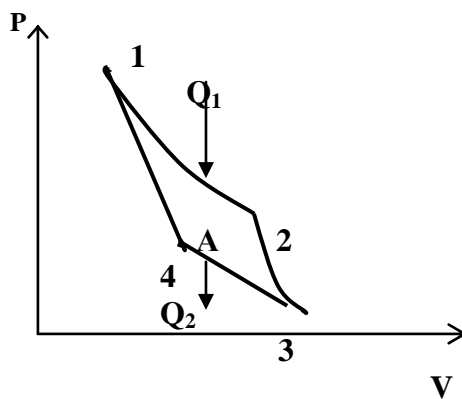


Рис.2

где изотермическое расширение и сжатие изображены соответственно кривыми 1-2 и 3-4, а адиабатическое расширение и сжатие – кривыми 2-3 и 4-1. При изотермическом процессе  $U = \text{const}$ , поэтому количество теплоты  $Q_1$ , полученное газом от нагревателя, равно работе расширения  $A_{12}$ , совершаемой газом при переходе из состояния 1 в состояние 2:

$$A_{12} = \frac{m}{M} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = Q_1 \quad (1)$$

При адиабатическом расширении 2-3 теплообмен с окружающей средой отсутствует, и работа расширения 2-3 совершается за счёт изменения внутренней энергии газа:

$$A_{23} = -\frac{m}{M} C_v (T_2 - T_1). \quad (2)$$

Количество теплоты  $Q_2$ , отданное газом холодильнику при изотермическом сжатии, равно работе сжатия  $A_{34}$ :

$$A_{34} = \frac{m}{M} RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} = -Q_2. \quad (3)$$

Работа адиабатического сжатия



$$A_{41} = -\frac{m}{M} C_v (T_1 - T_2) = -A_{23}. \quad (4)$$

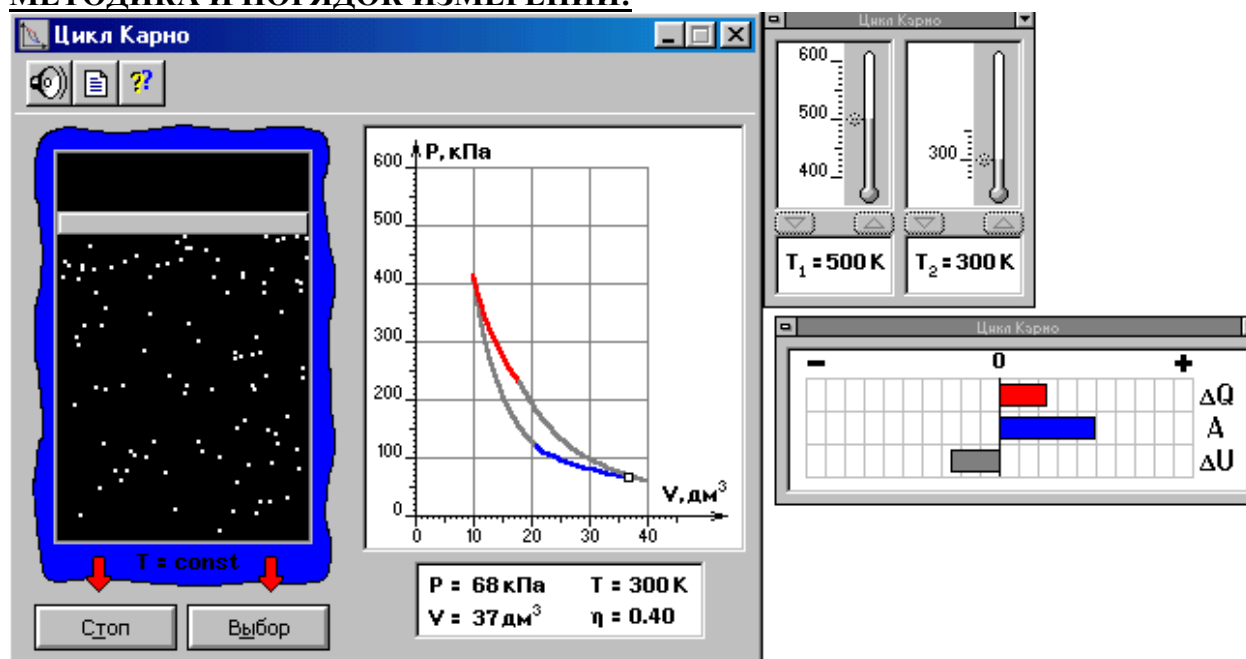
Работа, совершаемая в результате прямого кругового цикла Карно

$$A = A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41} = Q_1 + A_{23} - Q_2 - A_{23} = Q_1 - Q_2. \quad (5)$$

Тогда термический к.п.д. цикла Карно будет равен

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{\frac{m}{M} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - \frac{m}{M} RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{\frac{m}{M} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (6)$$

### МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ:



Установите температуры  $T_1$  и  $T_2$ , указанные в табл.1 для вашей бригады. Для этого нажмите кнопку «ВЫБОР», переместите маркер мыши так, чтобы его остриё находилось на кнопках регуляторов термометров  $\nabla$  или  $\triangle$ . Последовательными короткими нажатиями на эти кнопки установите заданные температуры нагревателя и холодильника. Нажмите мышью кнопку «СТАРТ» и наблюдайте перемещение точки по замкнутой кривой цикла Карно. Остановите процесс нажатием кнопки «СТОП» вблизи точки 1, обозначенной на рис.2, т.е. в месте перехода изотермического расширения газа в адиабатическое.

Запишите в табл.2 значение  $V_2$ , которое в момент остановки процесса в точке 1 будет обозначено в нижнем прямоугольнике окна опыта.

Аналогичные измерения проведите для точек 3,4 и 1 и запишите значения объёмов газа в соответствующие столбцы таблицы 2.

Установите вторые значения температуры нагревателя и холодильника, указанные в табл.1, и проделайте все измерения по п.п. 2- 4 ещё раз. Результаты опытов занесите в табл.3.

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА:

1. Для любой произвольной точки цикла запишите значения давления, объёма и температуры, указанные в прямоугольнике окна опыта.

2. С помощью уравнения состояния идеального газа  $pV = \frac{m}{M}RT$  определите число молей газа, находящихся в цилиндре под поршнем.

Используя уравнения 1, 3 и 5 рассчитайте  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $A$  и запишите эти значения в табл.2.

По формуле (6) рассчитайте к.п.д. цикла Карно и сравните его со значением, приведённым в окне опыта.

Вычислите среднее значение работы цикла Карно и абсолютную погрешность измерения  $A$ .

**Таблица 1. Значения температуры нагревателя  $T_1$  и холодильника  $T_2$**

Номер бригады	1	2	3	4	5	6	7	8
$T_1$	400	410	420	430	440	450	460	470
	500	510	520	530	540	550	560	570
$T_2$	270	280	290	300	310	320	330	340
	350	340	330	320	310	300	290	280

**Таблицы 2,3. Результаты измерений (количество измерений и строк = 3)**

$T_1 =$

$T_2 =$

Номер измерения	$V_1$ дм <sup>3</sup>	$V_2$ дм <sup>3</sup>	$V_3$ дм <sup>3</sup>	$V_4$ дм <sup>3</sup>	$Q_1$ кДж	$Q_2$ кДж	$A$ кДж	$\Delta A$ кДж	$\eta$ %
1									
2									
3									

### Вопросы и задания для самоконтроля

1. Какие устройства называют тепловыми двигателями?
2. Из каких основных элементов состоит тепловой двигатель?
3. Зачем в тепловом двигателе нужен холодильник?
4. Что является холодильником в двигателе внутреннего сгорания?
5. Чем отличаются обратимые и необратимые процессы? Почему все реальные процессы необратимы?
6. Дайте понятие энтропии (определение, размерность и математические выражения изменения энтропии для различных изопроцессов идеальных газов).
7. В каком направлении может изменяться энтропия замкнутой системы? незамкнутой системы?
8. В чём заключается теорема Карно?
9. Выведите формулу к.п.д. цикла Карно.
10. Изобразите в системе координат  $T-S$  изотермический и адиабатический процессы и цикл Карно в целом.
11. Докажите, что к.п.д. теплового двигателя, работающего по произвольному обратимому циклу, всегда меньше, чем к.п.д. цикла Карно, работающего между максимальной и минимальной температурой этого цикла.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.6

### ИЗУЧЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ В ИДЕАЛЬНОМ ГАЗЕ

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и в учебниках 1. Трофимова Т.И. Курс физики. Гл.8. §43, 44, 46. 2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. Гл.10, §10.1, 10.2, 10.3, 10.6. Выберите «Термодинамика и молекулярная физика» и «Кинетическая модель идеального газа». Нажмите кнопку с изображением страницы во внутреннем окне. Прочитайте теорию и запишите основные сведения в свой конспект лабораторной работы. Закройте окно теории, нажав кнопку с крестом в правом верхнем углу внутреннего окна.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- Знакомство с компьютерной моделью идеального газа.
- Экспериментальное подтверждение основных формул молекулярно-кинетической теории, по которым определяются скорости газовых молекул.
- Экспериментальное изучение зависимостей среднего числа столкновений и средней длины свободного пробега молекул от температуры.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

ИДЕАЛЬНЫМ ГАЗОМ называется физическая модель, в которой газ рассматривается как совокупность хаотически движущихся молекул, взаимодействующих между собой лишь при непосредственном ударе, носящем упругий характер.

Скорости, характеризующие состояние идеального газа:

1. средняя:  $\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}};$  (1)

2. наиболее вероятная:  $v_g = \sqrt{\frac{2RT}{M}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}};$  (2)

3. средняя квадратичная:  $\langle v_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}.$  (3)

Давление газа - макроскопическое проявление теплового движения и столкновений молекул газа со стенками сосуда. В результате каждого соударения стенке сосуда передаётся определённый импульс.

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ молекулярно-кинетической теории для давления:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v_{кв} \rangle^2. \quad (4)$$

ДЛИНА СВОБОДНОГО ПРОБЕГА - расстояние  $l_i$ , которое молекула пролетает от одного столкновения до следующего.

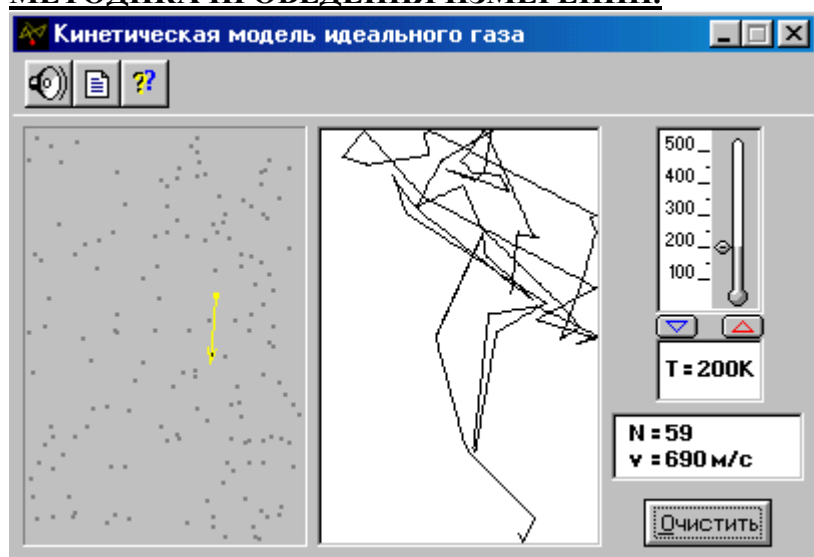
СРЕДНЯЯ ДЛИНА СВОБОДНОГО ПРОБЕГА МОЛЕКУЛЫ:

$$\langle l \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N l_i}{N} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n}. \quad (5)$$

СРЕДНЕЕ ЧИСЛО СОУДАРЕНИЙ МОЛЕКУЛЫ В ЕДИНИЦУ ВРЕМЕНИ:

$$\langle Z \rangle = \sqrt{2} \pi d^2 n \langle v \rangle \quad (6)$$

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ.



Нажмите кнопку «СТАРТ» во внутреннем окне экрана и проследите за хаотическим движением выделенной молекулы в замкнутом объёме слева во внутреннем окне экрана, вектор скорости которой изменяется при каждом упругом соударении с другими молекулами (их около 100) и со стенками сосуда. Данная молекулярная система является «механической» моделью идеального газа, находящегося при достаточно низком давлении. В правой части внутреннего окна происходит непрерывная регистрация ломаной линии – траектории движения выделенной молекулы - состоящей из отдельных *длин свободного пробега молекулы*.

В процессе исследований можно в любой момент времени остановить движение всех молекул нажатием кнопки **II**, расположенной в правом верхнем углу внешнего окна опыта, и получить «мгновенную фотографию» всех молекул газа и траектории движения выделенной частицы. Продолжить наблюдение движения молекул в непрерывном режиме можно нажатием кнопки **►►** или в «пошаговом» режиме последовательными нажатиями кнопки **►**. Обе кнопки расположены рядом.

**ЭКСПЕРИМЕНТ 1.** Исследование зависимости скоростей газовых молекул от температуры

### **ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА:**

1. На мониторе щёлкните мышью кнопку «**II**» в верхнем ряду кнопок.
2. В нижнем внутреннем окне щёлкните мышью кнопку «ОЧИСТИТЬ» и установите с помощью маркера мыши на термометре температуру 100K.
3. Запишите в табл.1 начальное значение скорости ( $v_1$ ) выделенной молекулы, указанное в нижнем прямоугольнике окна опыта.
4. Отдельными отрывистыми щелчками нажимайте мышью кнопку **►** до момента соударения выделенной молекулы с любой другой движущейся молекулой и изменения скорости выделенной молекулы.
5. Запишите в табл.1 второе значение скорости.
6. Продолжите действия по п.4, 5 ещё 18 раз и заполните табл.1.

7. Увеличивая последовательно температуру на 50К, проведите аналогичные измерения скоростей для температур 150К, 200К, 250К, 300К, 350К, 400К, 450К, 500К и заполните табл.2-9.

8. По формулам  $\langle v \rangle = \frac{\sum_{i=1}^{20} v_i}{20}$  (7) и  $\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2}$  (8) для каждого значения

температуры рассчитайте среднюю арифметическую и среднюю квадратичную скорости газовых молекул и запишите эти величины в табл. 10.

9. Постройте графики  $\langle v \rangle^2 = f(T)$  и  $\langle v_{\text{кв}} \rangle^2 = f(T)$ , по ним определите значение массы молекулы  $m_0$ :

$$m_0 = \frac{8k}{\pi} \frac{\Delta T}{\Delta \langle v \rangle^2} \quad (9)$$

$$m_0 = 3k \frac{\Delta T}{\Delta \langle v_{\text{кв}} \rangle^2} \quad (10)$$

10. Определите химическую формулу газа, масса молекулы которого наиболее близка к измеренной массе молекулы.

11. Оцените погрешность проведённых измерений массы молекулы.

### **ТАБЛИЦЫ 1-9. Результаты измерений скорости молекулы при заданной температуре**

T=100.....500K

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$v_i$ , м/с										
№ опыта	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$v_i$ , м/с										

### **ТАБЛИЦА 10. Результаты расчёта скоростей молекул**

T, K	100	150	200	250	300	350	400	450	500
$\langle v \rangle$									
$\langle v \rangle^2$									
$\langle v_{\text{кв}} \rangle$									
$\langle v_{\text{кв}} \rangle^2$									

**ЭКСПЕРИМЕНТ 2.** Исследование зависимости среднего импульса, передаваемого молекулами при соударении стенкам сосуда, от температуры

**ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА:**

1. На мониторе щёлкните мышью кнопку II в верхнем ряду кнопок.
2. В нижнем ряду кнопок щёлкните мышью кнопку «ОЧИСТИТЬ» и установите с помощью маркера мыши на термометре температуру 100К.
3. В момент начала отсчёта времени на секундомере щёлкните мышью на мониторе в верхнем ряду кнопку ► и через 1 мин. остановите движение молекул нажатием кнопки II.
4. На «моментальной фотографии» траектории движения выделенной частицы подсчитайте N – число ударов этой молекулы о стенки сосуда за одну минуту. Повторите это измерение ещё 2 раза и запишите результаты измерений в табл.11.
5. Увеличивая последовательно температуру на 50К, проведите аналогичные измерения N для температур в интервале 100- 500К и запишите все результаты измерений в табл.11.
6. По формуле  $\langle P \rangle = 2\langle N \rangle m_0 \langle v \rangle$  рассчитайте среднее значение импульса, передаваемого молекулами при соударении стенкам сосуда для каждого значения температуры. Значения  $m_0$  и  $\langle v \rangle$  возьмите из данных опыта 1.
7. Постройте по данным таблицы 11 график  $\langle P \rangle = f(T)$  и проведите анализ соответствия качественного вида этого графика с выводами молекулярно- кинетической теории и с законами идеального газа.

**ТАБЛИЦА 11.** Результаты измерений числа соударений молекулы о стенки сосуда за 1 мин.

T, K	100	150	200	250	300	350	400	450	500
N1									
N2									
N3									
$\langle N \rangle$									
$\langle P \rangle$									

**ЭКСПЕРИМЕНТ 3.** Исследование зависимости средней частоты взаимных столкновений молекул от температуры

**ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА:**

1. На мониторе щёлкните мышью кнопку II в верхнем ряду кнопок.
2. В нижнем ряду кнопок щёлкните мышью кнопку «ОЧИСТИТЬ» и установите с помощью маркера мыши на термометре температуру 100К.
3. В момент начала отсчёта времени на секундомере щёлкните мышью на мониторе в верхнем ряду кнопку ► и через 30с остановите движение молекул нажатием кнопки II.

4. На «моментальной фотографии» траектории движения выделенной частицы подсчитайте  $Z$  – число её взаимных соударений с другими молекулами. Повторите это измерение ещё 2 раза и запишите результаты измерений в табл.12.
5. Увеличивая последовательно температуру на 50К, проведите аналогичные измерения  $Z$  для температур в интервале 100- 500К и запишите все результаты измерений в табл.12.
6. По данным таблицы 12 постройте график зависимости  $\langle Z \rangle = f(T)$  и проведите анализ соответствия качественного вида этого графика с выводами молекулярно- кинетической теории и с законами идеального газа.

**ТАБЛИЦА 12.** Результаты измерений числа взаимных столкновений молекул

T, K	100	150	200	250	300	350	400	450	500
$Z_1$									
$Z_2$									
$Z_3$									
$\langle Z \rangle$									

**ЭКСПЕРИМЕНТ4.** Исследование зависимости средней длины свободного пробега молекул от температуры

**ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА:**

1. На мониторе щёлкните мышью кнопку II в верхнем ряду кнопок.
2. В нижнем ряду кнопок щёлкните мышью кнопку «ОЧИСТИТЬ» и установите с помощью маркера мыши на термометре температуру 100К.
3. В момент начала отсчёта времени на секундомере щёлкните мышью на мониторе в верхнем ряду кнопку ► и через 30с остановите движение молекул нажатием кнопки II .
4. С помощью миллиметровой линейки измерьте на экране монитора все отрезки  $l_i$  ломаной линии – траектории движения выделенной молекулы - от одного столкновения до последующего. При этом имейте в виду, что изменения направления движения молекулы при её ударах о стенки сосуда не должны учитываться при измерении длины свободного пробега.
5. Повторите это измерение ещё 2 раза и запишите результаты измерений в табл.13.
5. Увеличивая последовательно температуру на 50К, проведите аналогичные измерения  $l_i$  для температур в интервале 100- 500К и запишите все результаты измерений в табл.13.
6. По данным таблицы 13 постройте график зависимости  $\langle l \rangle = f(T)$  и проведите анализ соответствия качественного вида этого графика с выводами молекулярно- кинетической теории и с законами идеального газа.

**Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Перечислите основные положения молекулярно-кинетической теории идеального газа.
2. Чем обусловлено давление газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории?
3. Зависит ли давление газа: а) от плотности газа; б) от температуры; в) от массы молекул?
4. Как изменяются при изотермическом расширении идеального газа: а) средняя кинетическая энергия молекул; б) средняя длина свободного пробега молекул?
5. Как изменяется средняя длина свободного пробега молекул газа: а) при изобарном нагревании; б) при изотермическом увеличении давления?
6. Что называется эффективным диаметром молекулы?
7. Выведите уравнение, связывающее давление идеального газа со средней кинетической энергией его молекул.
8. Сравните изменения числа ударов молекул о стенку сосуда в единицу времени при уменьшении объёма идеального газа в изотермическом и адиабатическом процессах.
9. Как изменяется эффективный диаметр молекулы при увеличении температуры?
10. Как сказывается ограниченное число молекул, участвующих в тепловом движении в компьютерной модели опыта, на его результатах?



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.7

### ПОЛИТРОПИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и в учебниках 1. Трофимова Т.И. Курс физики. Гл.9, §55. 2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. Гл.9, §9.6. Выберите «Термодинамика и молекулярная физика» и «Работа газа». Нажмите кнопку с изображением страницы во внутреннем окне. Прочитайте теорию и запишите основные сведения в свой конспект лабораторной работы. Закройте окно теории, нажав кнопку с крестом в правом верхнем углу внутреннего окна.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- Ознакомление с основами анализа и моделирования термодинамических процессов в идеальных газах.
- Определение молярной теплоёмкости в политропических процессах идеального газа.
- Определение показателя адиабаты и работы газа в политропическом процессе.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

ПОЛИТРОПНЫМ называется процесс, в котором молярная теплоёмкость  $C$  остаётся постоянной. Уравнение политропического процесса имеет вид:

$$pV^n = \text{const}, \quad (1)$$

где 
$$n = \frac{C - C_p}{C - C_v}. \quad (2)$$

МОЛЯРНОЙ ТЕПЛОЁМКОСТЬЮ называется физическая величина  $C$ , численно равная теплоте  $\delta Q$ , которую нужно сообщить одному молю вещества для изменения его температуры на 1К в рассматриваемом термодинамическом процессе:

$$C = \frac{M}{m} \frac{\delta Q}{dT}, \quad (3) \quad (M - \text{молярная масса, } m - \text{масса газа}).$$

Выражение (3) теперь можно записать в форме

$$\delta Q = \frac{m}{M} C dT. \quad (4)$$

или в интегральной форме  $Q_{1 \rightarrow 2} = \frac{m}{M} C (T_2 - T_1)$ .

Таким образом, если количество тепла, полученное в некотором термодинамическом процессе  $1 \rightarrow 2$  при  $m = \text{const}$ , прямо пропорционально разности температур  $\Delta T = T_2 - T_1$ , то теплоёмкость газа постоянна и процесс является политропическим.

$$C = \frac{Q_{1 \rightarrow 2}}{\frac{m}{M} (T_2 - T_1)}.$$

ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ для *любого* равновесного процесса изменения состояния идеального газа имеет вид

$$\frac{m}{M} C dT = \frac{m}{M} C_v dT + p dV. \quad (5)$$

Тогда из уравнения (5) имеем:  $C = C_v + \frac{Mp}{m} \frac{dV}{dT}. \quad (6)$

Связь между объёмом газа и его температурой в политропном процессе можно найти из выражения (1) и уравнения Клапейрона – Менделеева

$$pV = \frac{m}{M} RT :$$

$$V^{(n-1)}T = const .$$

Дифференцируя последнее выражение, получим:

$$(n-1)V^{(n-2)}TdV + V^{n-1}dT = 0 ,$$

$$\frac{dV}{dT} = -\frac{V}{(n-1)T} .$$

Тогда уравнение (6) примет вид:

$$C = C_v - \frac{pV}{(n-1)\frac{m}{M}T} = C_v - \frac{R}{n-1} .$$

Учитывая, что  $C_v = \frac{R}{\gamma-1}$ , где  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$  показатель адиабаты, получим:

$$C = \frac{n-\gamma}{(\gamma-1)(n-1)}R .$$

или

$$C = \left( \frac{i}{2} - \frac{1}{n-1} \right) R . \quad (7)$$

Таким образом, если термодинамический процесс идеального газа действительно является политропным, т.е. молярная теплоёмкость в ходе процесса не изменяется, то её величина рассчитывается по формуле (7).

В настоящей работе используется модель одноатомного газа ( $i = 3$ ), поэтому в политропных процессах при  $n = -1$  согласно выражению (7) молярная теплоёмкость  $C$  должна быть равна 16,6 Дж/моль·К, а при  $n = -2$ ,  $C = 15,2$  Дж/моль·К.

Частными случаями политропного процесса являются:

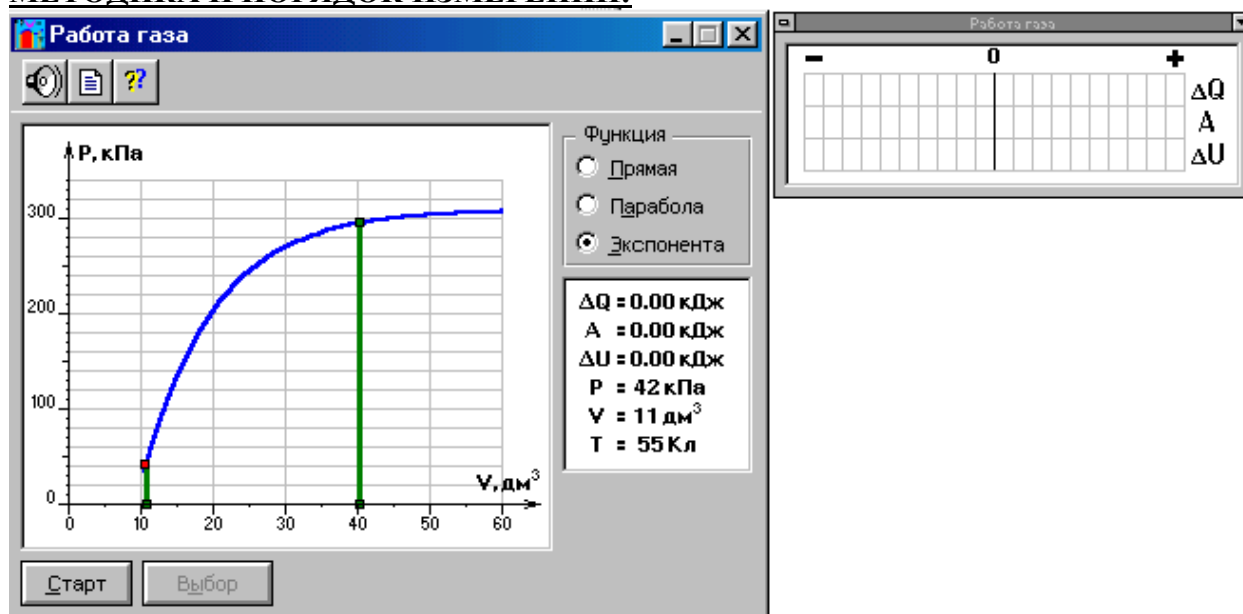
изотермический:  $n = 1$ ,  $C = \pm \infty$ ;

изобарический:  $n = 0$ ,  $C = C_p$ ;

изохорический:  $n = \pm \infty$ ,  $C = C_v$ ;

4) адиабатический:  $n = \gamma$ , где  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ ,  $C = 0$ .

## МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ:



В прямоугольном окошке «Функция» нажмите маркером мыши кнопку «Прямая». Подведите маркер мыши к выделенной левой точке графика  $p = f(V)$  на экране монитора, нажмите левую кнопку мыши, и, удерживая её в нажатом состоянии, переместите начало графика в точку с координатами  $(P_1, V_1, T_1)$ , взятыми из таблицы 1 для вашей бригады. Аналогичным образом переместите выделенную крайнюю правую точку графика в точку с координатами  $(P_{20}, V_{20})$ .

На мониторе щёлкните мышью кнопку II в верхнем ряду кнопок, а в нижней части экрана кнопку «СТАРТ».

Нажмите два раза кнопку ► в верхнем ряду кнопок и запишите в первый столбец таблицы 2 значения  $\Delta Q$  и  $T$ .

Последовательно повторяя действия п.5 20 раз, заполните таблицу 2.

В прямоугольном окошке «Функция» нажмите маркером мыши кнопку «Парабола», проделайте измерения п.п. 2-6 и запишите результаты опытов в табл.3.

В прямоугольном окошке «Функция» нажмите маркером мыши кнопку «Экспонента», проделайте измерения п.п. 2-6 и запишите результаты опытов в табл.4.

**ТАБЛИЦА 1. Начальные и конечные параметры для трёх термодинамических процессов**

Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8
$P_1$ , кПа	100	90	80	70	60	50	40	30
$P_{20}$ , кПа	300	290	280	270	260	250	240	230
$V_1$ , дм <sup>3</sup>	10	10	10	10	10	10	10	10
$V_{20}$ , дм <sup>3</sup>	50	50	50	50	50	50	50	50
$T_1$ , К	124	111	99	86	74	62	49	37

**ТАБЛИЦЫ 2,3,4. Результаты измерений температуры и количества выделения тепла в ходе термодинамического процесса расширения газа**

Табл.2, функция «прямая»

Табл.3, функция «парабола»

Табл.4, функция «экспонента»

№ опыта (i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T_i$										
$T_i - T_1$										
$\Delta Q$										
№ опыта (i)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$T_i$										
$T_i - T_1$										
$\Delta Q$										

**ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА**

1. Вычислите и запишите во вторую строку таблиц 2, 3, 4 разности температур  $T_i - T_1$ .

3. На миллиметровой бумаге или на листе в клетку формата А4 постройте по экспериментальным точкам графики в виде линейной зависимости  $\Delta Q$  от разности температур  $T_i - T_1$  для трёх исследуемых процессов. (Каждый график на отдельном листе!).

4. По тангенсу угла наклона прямой линии графика к оси разности температур, используя

формулу  $C = \frac{Q_{20} - Q_1}{\frac{m}{M}(T_{20} - T_1)}$ , определите молярную теплоёмкость политропического

процесса и сравните её с теоретическим значением, рассчитанным по формуле (7).

5. Рассчитайте работу газа в этих процессах по формуле

$$A = \frac{1}{n-1}(p_1 V_1 - p_{20} V_{20})$$

и сравните эти значения со значениями, указанными в нижнем окне монитора при  $p_{20}$  и  $V_{20}$ .

Проанализируйте полученные результаты, сделайте оценку погрешности измерений.

**Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Сформулируйте закон Больцмана о равнораспределении энергии по степеням свободы молекул.
2. Почему колебательная степень свободы молекулы обладает вдвое большей энергией, чем поступательная и вращательная?
3. В чём состоит качественная неравноценность между работой и теплообменом как формами передачи энергии?
4. Что такое внутренняя энергия идеального газа?

5. В результате каких процессов может изменяться внутренняя энергия идеального газа?
6. Что называется молярной теплоёмкостью газа?
7. Почему  $C_v$  больше, чем  $C_p$ ?
8. Покажите применение первого начала термодинамики к изопроцессам в идеальных газах.
9. Чему равна работа изобарного расширения моля идеального газа при нагревании на 1К?
10. Чему равна работа изохорного расширения моля газа при нагревании на 1К?
11. Нагревается или охлаждается идеальный газ, если он расширяется при постоянном давлении?
12. Температура газа в сосуде постоянна. Запишите на основе первого начала термодинамики соотношение между сообщённым количеством теплоты и совершённой работой.
13. Газ переходит из одного и того же состояния ❶ в одно и тоже состояние ❷ в результате следующих процессов: 1) изотермического; 2) изобарного; 3) изохорного; 4) адиабатного. Рассмотрев эти процессы графически, показать: 1) в каком процессе работа расширения максимальна? 2) в каком случае газу сообщается большее количество тепла?
14. Какой процесс называется политропным?
15. Показатель политропы  $n > 1$ . Нагревается или охлаждается идеальный газ при сжатии?
16. Определите, больше или меньше нуля молярная теплоёмкость газа в термодинамическом процессе  $\frac{T^2}{V} = const$ , если а) газ одноатомный; 2) газ двухатомный.