

ГБОУ ВПО УРАЛЬСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ МЕДИЦИНСКАЯ АКАДЕМИЯ  
МИНЗДРАВА РОССИИ  
КАФЕДРА МЕДИЦИНСКОЙ ФИЗИКИ, ИНФОРМАТИКИ И  
МАТЕМАТИКИ

КОЛЧАНОВА С.Г., ШМЕЛЁВА М.А.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ  
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ФИЗИКЕ  
ДЛЯ СТУДЕНТОВ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА

г. Екатеринбург  
2013

Колчанова С.Г., Шмелёва М.А.

Учебно-методическое пособие к лабораторным работам по физике для студентов фармацевтического факультета. – Екатеринбург: Изд. УГМА, 2013 - 52 стр.

Пособие разработано в помощь студентам фармацевтического факультета при подготовке к лабораторному практикуму.

Во введении рассмотрены вопросы, связанные с оценкой погрешностей физических измерений. Основная часть содержит методические пояснения к лабораторным работам в физическом практикуме, проводимом на базе измерительной лаборатории кафедры общей и молекулярной физики Института естественных наук УрФУ, а также к работам в виртуальном практикуме на кафедре медицинской физики, математики и информатики УГМА.

Пособие рассчитано на студентов фармацевтического факультета медицинской академии.

Рецензент:

Рекомендовано к изданию ЦМС ГБОУ УГМА Росздрава .....

@Уральская государственная  
медицинская академия, 2013

## ВВЕДЕНИЕ.

### 1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН.

Что значит познать материальный мир? Это значит ввести характеристики явлений, протекающих в материальном мире, и установить связь между ними. Отсюда возникает *необходимость измерений*. Ибо измерение есть нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

*Сущность измерений* - в сравнении измеряемой величины с единицей измерения (с другой однотипной величиной, принятой за единицу измерения, эталон). Основное уравнение измерения

$$X = x[X],$$

где  $X$  - измеряемая величина;  $[X]$  - единица измерения, именованная величина;  $x$  - числовой результат измерения - отвлеченное число, показывающее, сколько раз единица измерения содержится в измеряемой величине. Например,  $m = 5,6$  кг.

*Задача измерений* - получить  $x$ , указать границы его возможных значений и вероятность попадания его в эти границы.

#### 1.1. Характеристика измерений

Все измерения можно разбить на два типа: прямые измерения и косвенные.

*Прямыми* называются такие измерения, при которых измеряется (сравнивается с мерой, эталоном) непосредственно интересующая нас физическая величина. Например, измерение длины тела линейкой, измерение массы тела на рычажных весах, измерение времени с помощью часов, измерение температуры с помощью термометра.

*Косвенными* измерениями называются такие, при которых измеряется не сама интересующая нас величина, а другие величины, закономерно связанные с ней. Например, плотность шара

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{6m}{\pi d^3}.$$

Непосредственно измеряется масса шара  $m$  и его диаметр  $d$ , а плотность подсчитывается по вышеприведенной формуле. На практике с косвенными измерениями имеют дело очень часто.

Общей чертой любых измерений является то, что ни одно из них невозможно произвести абсолютно точно. Иначе говоря, результат измерений всегда выражается приближенным числом или, как принято говорить, отягощен погрешностью. Под точностью измерений понимают

величину, обратную погрешности. Иначе: чем меньше погрешность измерений, тем выше точность этих измерений.

## 1.2. Абсолютная и относительная погрешности измерений.

Пусть в результате измерения некоторой физической величины мы получили числовой результат  $x$  (в единицах  $[X]$ ). Пусть истинное значение этой величины  $x_{ист}$  (которого мы никогда не знаем) в тех же единицах. Тогда разность  $\Delta x = |x_{ист} - x|$  называется *абсолютной погрешностью* измерения величины  $X$ . Нетрудно сообразить, что абсолютная погрешность  $\Delta x$  есть величина именованная, измеряемая в тех же единицах, что и  $x$ . Абсолютная погрешность характеризует точность метода измерений, но плохо характеризует точность, с которой мы измерили данную физическую величину.

Под *относительной погрешностью* измерения понимают отношение абсолютной погрешности к результату измерения. 
$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x_{ист}} \cdot 100\% .$$

Относительную погрешность измеряют в относительных единицах или в процентах, так как она есть величина безразмерная. Относительная погрешность характеризует качество уже не метода, а данного конкретного измерения.

## 1.3. Источники погрешностей измерений

**1. Погрешность инструмента.** Измерительный прибор невозможно изготовить абсолютно точно хотя бы потому, что при его настройке и градуировке приходится производить измерения, а они, как мы уже отметили, всегда отягощены погрешностями.

**2. Погрешность метода измерений.** Например, при взвешивании тела мы не учитываем выталкивающую силу воздуха, а она по-разному влияет на тела, обладающие различной плотностью.

**3. Погрешности, связанные с физиологией наблюдателя.** Например, отсчитывая показания по стрелочному прибору, наблюдатель смотрит правым глазом, а прибор расположен прямо перед ним.

**4. Погрешности, связанные с особенностями объекта,** например, поверхность образца сильно шероховатая.

**5. Погрешности, связанные с влиянием неконтролируемых внешних условий.** Например, при взвешивании тела на аналитических весах это потоки воздуха, электрические поля, пылинки, сажающиеся на взвешиваемое тело и гири.

## 1.4. Классификация погрешностей

Обычно погрешности подразделяют на: а) систематические; б) случайные; в) грубые или промахи.

*Систематические погрешности* ( $\Delta_c$ ) обусловлены в основном погрешностями средств измерений и несовершенством методов измерений. Другими словами, приборы, используемые вами, имеют какие-то особенности. Например, градуировка линейки произведена не совсем точно (деревянные линейки могут усыхать, разбухать или изгибаться), часы могут отставать или торопиться. Поэтому вместо 1 см линейка может показывать 1,1 см, а часы вместо 60 секунд-56 сек и т.д. Но при наличии только лишь систематических погрешностей результаты измерений **смещены всегда в одну сторону от истинного значения: они либо больше, либо меньше его.**

*Случайные погрешности* ( $\Delta^0$ ) всегда присутствуют в эксперименте при измерении какой-либо величины. Это погрешности, определяемые неглавными, второстепенными условиями измерения и большим числом условий, проконтролировать которые невозможно: они могут появиться при данном наблюдении, а могут и не появиться, могут быть больше или меньше по величине, могут быть положительными или отрицательными. При отсутствии систематических погрешностей случайные служат причиной разброса результатов повторных измерений относительно истинного значения.

*Грубые погрешности, или промахи* - погрешности, резко выделяющие результат наблюдения из серии результатов, полученных в одинаковых условиях. Например, вы неправильно записали показания прибора, спутали метры с сантиметрами, перепутали строчки, произвели неверный отсчет показаний (1 вместо 7; 3 вместо 8 и т.д.), не обратили внимания на резко изменившиеся условия измерения (резкое изменение напряжения питания).

Задача обработки результатов измерений - получить результат измерения, наиболее близкий к истинному значению измеряемой величины (в пределах требуемой точности) и оценить возможную величину отклонения.

### 1.5. Порядок обработки и правила записи результатов измерений

При записи результата измеренной величины с учетом погрешности используется следующая схема:

$X = (\bar{x} \pm \Delta x)[X]$ , где  $\bar{x}$  - среднее арифметическое значение измеряемой величины,  $\Delta x$  - полная погрешность измерения величины  $x$ ,  $[X]$  - единица измерения.

#### ***Последовательность действий при обработке результатов измерений:***

1. Вычислить среднее арифметическое значение  $\bar{x}$  по формуле  $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ , где N-число измерений величины  $x$ .

2. Вычислить случайную погрешность ( $\Delta^0$ ) после многократного проведения измерений величины  $x$  по формуле:

$$\Delta^0 = t_{N,p} \cdot S_x = t_{N,p} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N(N-1)}}, \text{ где}$$

$S_x$  - среднее квадратичное отклонение результата измерения. Эта величина характеризует случайное отклонение  $\bar{x}$  относительно истинного значения величины  $x$ .

$t_{N,p}$  - коэффициент Стьюдента, который определяется по таблице, если задана доверительная вероятность  $p$  и, известно число измерений  $N$ .

*Таблица. Коэффициенты Стьюдента*

$n$	$p$			$n$	$p$		
	0,9	0,95	0,99		0,9	0,95	0,99
3	2,92	4,30	9,92	7	1,94	2,45	3,71
4	2,35	3,18	5,94	8	1,90	2,36	3,50
5	2,13	2,78	4,60	9	1,86	2,31	3,35
6	2,02	2,57	4,03	10	1,83	2,26	3,25

Доверительная вероятность ( $p$ ) - вероятность, с которой погрешность измерений лежит в границах между минимальным и максимальным значениями погрешности. При обработке результатов физического эксперимента обычно задают  $p=0,95$ , при обработке результатов измерений, связанных со здоровьем человека доверительную вероятность увеличивают, например 0,99 или выше.

3. Записать систематическую погрешность ( $\Delta_c$ ) величины  $x$ . При прямых измерениях данная величина определяется как цена деления шкалы прибора.

4. Рассчитать полную погрешность ( $\Delta x$ ) измерения величины  $x$  через случайную и систематическую погрешности следующим образом:  
 $\Delta = \sqrt{(\Delta_c)^2 + (\Delta^0)^2}$ .

5. Записать результат по форме:  $x = (\bar{x} \pm \Delta x)[x]$ ,  $p=0,95$ .

Все вычисления производятся, как правило, с помощью калькулятора. В зависимости от разрядности используемого калькулятора на экране появляется 8, либо 12, либо более цифр. Нужно ли их все переписывать в отчёт?

Очевидно, что запись массы  $M=(29,85768452 \pm 0,35)$  кг бессмысленна. При погрешности измерения массы 0,35 кг последние шесть цифр ничего не значат. Поэтому среднее значение следовало бы производить с точностью до второго (или максимум до третьего, чтобы понять, чему равен второй знак) знака после запятой. Лишних цифр писать не нужно. В данном случае запись результата должна быть  $M=(29,86 \pm 0,35)$  кг.

Окончательный результат вычислений должен быть представлен с округлением до того разряда, которым заканчивается число, выражающее границу погрешности измерений  $M=(29,86\pm 0,35)$  кг. Для записи результата измерений и погрешности используют одну и ту же величину, которая указывается за скобками.

### 1.6. Пример обработки результатов измерений.

В данном разделе приведем пример обработки результатов измерений диаметра стального шарика с помощью микрометра с ценой деления барабана 0,01 мм.

При пользовании микрометром, согласно его паспорту, необходимо проверить нулевую отметку. При измерении микрометром обязательно пользоваться трещоткой, вращая ее плавно, без рывков.

#### 1) Измерение нуля микрометра $d_0$

Запишем результаты измерений в таблицу:

№ п/п	$d_{oi}$ , мм
1	0,17
2	0,17
3	0,17

Используя план обработки результатов измерений, описанный в п.1.5, вычислим

#### 1.1) среднее арифметическое значение $\bar{d}_0$

$$\bar{d}_0 = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 d_{oi} = \frac{1}{3} (0,17 + 0,17 + 0,17) = 0,170 \text{ мм}$$

*Примечание.* Результат очевиден, так как мы получили три одинаковых значения. Однако мы пишем  $\bar{d}_0 = 0,170$  мм - на один знак больше, потому что, во-первых, среднее всегда точнее, так как случайные погрешности частично компенсируются, во-вторых, расчеты рекомендуется вести на порядок точнее, чем окончательный результат, чтобы погрешность округления не внесла заметный вклад.

#### 1.2) случайную погрешность ( $\Delta^0(d_0)$ ) вычислим по формуле:

$$\Delta^0 = t_{3,p=0,95} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N(N-1)}}$$

$$\Delta^0(d_0) = 4,30 \cdot S_x = 4,30 \cdot \sqrt{\frac{(0,17 - 0,170)^2 + (0,17 - 0,170)^2 + (0,17 - 0,170)^2}{3(3-1)}} = 0,00 \text{ мм}$$

#### 1.3) записываем систематическую погрешность ( $\Delta_c(d_0)$ ), равную цене деления барабана микрометра: $\Delta_c(d_0) = 0,01 \text{ мм}$

1.4) Рассчитываем полную погрешность ( $\Delta d_0$ ) следующим образом:

$$\Delta d_0 = \sqrt{(\Delta_c(d_0))^2 + (\Delta^0(d_0))^2} = \sqrt{(0,01)^2 + (0,00)^2} = 0,01 \text{ мм}.$$

1.5) Записываем результат по форме:  $d_0 = (0,17 \pm 0,01) \text{ мм}$ ,  $p=0,95$ .

2) Проводим измерение диаметра стального шарика  $d_k$

При измерении диаметра стремимся возможное различие в диаметре в зависимости от места измерения свести к случайной погрешности. Результаты измерения заносим в таблицу (первый и второй столбцы).

№ п/п	$d_{ki}$ , мм	$(d_{ki} - \bar{d}_k)$ , мм $\bar{d}_k = 4,922 \text{ мм}$	$(d_{ki} - \bar{d}_k)^2$ , мм <sup>2</sup>
1	4,92	-0,002	0,000004
2	4,90	-0,022	0,000484
3	4,92	-0,002	0,000004
4	4,92	-0,002	0,000004
5	4,95	+0,028	0,000784
	<b>Σ</b>	<b>0,000</b>	<b>0,001280</b>

2.1) вычислим среднее арифметическое значение  $\bar{d}_k$ :

$$\bar{d}_k = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 d_{ki} = \frac{1}{5} (4,92 + 4,90 + 4,92 + 4,92 + 4,95) = \frac{24,61}{5} = 4,922 \text{ мм}$$

2.2) определим случайную погрешность ( $\Delta^0(d_k)$ ). Для удобства вычисления случайной погрешности в таблице добавляем два последних столбца: в третьем столбце таблицы построчно рассчитываются значения разности  $(d_{ki} - \bar{d}_k)$  с учетом знака, а во втором – квадрат значения, полученного в третьем столбце  $(d_{ki} - \bar{d}_k)^2$ . Проверкой правильности вычислений найдем сумму значений в третьем ( $\sum_{i=1}^N (d_{ki} - \bar{d}_k)$ ) и четвертом ( $\sum_{i=1}^N (d_{ki} - \bar{d}_k)^2$ ) столбцах.

Если значение суммы в третьем столбце равно нулю, значит, вычисления выполнены верно, и можно приступить к расчету случайной погрешности.

$$\Delta^0 = t_{5,p=0,95} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_{ki} - \bar{d}_k)^2}{N(N-1)}}$$

$$\Delta^0(d_k) = 2,78 \cdot S_x = 2,78 \cdot \sqrt{\frac{0,001280}{5(5-1)}} = 0,02224 \text{ мм}$$

2.3) записываем систематическую погрешность  $\Delta_c(d_k)$ , равную цене деления барабана микрометра:  $\Delta_c(d_k) = 0,01 \text{ мм}$

2.4) Рассчитываем полную погрешность ( $\Delta d_k$ ) следующим образом:

$$\Delta d_k = \sqrt{(\Delta_c(d_k))^2 + (\Delta^0(d_k))^2} = \sqrt{(0,01)^2 + (0,02224)^2} = 0,024385 \text{ мм}.$$

2.5) Записываем результат по форме:  $d_k = (4,922 \pm 0,024) \text{ мм}$ ,  $p=0,95$ .

3) Вычисление диаметра стального шарика  $d$  с учетом смещения нуля прибора (используем результаты, полученные в п.1) и п.2)

$$d = \overline{d_k} - \overline{d_0} = 4,922 - 0,170 = 4,752 \text{ мм}$$

$$\Delta d = \sqrt{(\Delta d_0)^2 + (\Delta d_k)^2} = \sqrt{(0,01)^2 + (0,024)^2} = 0,026356 \text{ мм} \approx 0,026 \text{ мм}$$

Ответ:  $d = (4,752 \pm 0,026) \text{ мм}$

### 1.7. Косвенные измерения, вычисление погрешности

В большинстве экспериментов искомая величина непосредственно не измеряется. Вместо этого независимо измеряется набор величин  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и т.д. (прямые измерения), для которых ранее были показаны правила вычисления погрешности. Если искомая величина  $x$  связана с переменными  $A$  и  $B$  определенным образом (см таблицу, первый столбец), то погрешность  $\Delta x$  будет определяться через погрешности  $\Delta A$  и  $\Delta B$  определенным образом (см таблицу, второй столбец).

Связь между  $x$ ,  $A$ ,  $B$

$$x = A + B$$

$$x = A - B$$

$$x = A \cdot B$$

$$x = \frac{A}{B}$$

$$x = A^n$$

Выражение для погрешности  $\Delta x$   
через погрешности  $\Delta A$  и  $\Delta B$

$$\Delta x^2 = \Delta A^2 + \Delta B^2$$

$$\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 = \left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta B}{B}\right)^2$$

$$\left(\frac{\Delta x}{x}\right) = n \left(\frac{\Delta A}{A}\right)$$

В случае, если связь между  $x$  и переменными  $A$ ,  $B$  и  $C$  более сложная, тогда вводят дополнительные переменные и применяют правила, описанные выше. Например,  $x = \frac{A}{B+C} = [B+C=D] = \frac{A}{D}$ . Погрешность  $\Delta D$  определяется как показано для суммы, а погрешность для  $x$ , как для частного.

### 1.8. Графическое представление результатов.

Результаты экспериментов обычно представляются не только в виде таблиц, но и в графической форме. Назначение графиков – наглядное представление результатов, поэтому основное требование к ним – аккуратное и четкое исполнение.

Для построения графиков используют миллиметровую бумагу, на которую наносятся координатные оси. Для независимой переменной всегда используется ось абсцисс. Оси графика должны иметь четкие обозначения, должны быть указаны единицы измерения. Обычно туда же выносятся и порядок масштаба ( $10^{\pm n}$ , где  $n$  - целое число). Масштаб по осям выбирают так, чтобы экспериментальные точки располагались по всей площади графика. Графики должны легко читаться, для этого необходимо, чтобы клеточка графика соответствовала 1, 2, 5, 10, 0,1, 0,01, 0,001 и т.д. При этом начало отсчета не обязательно начинать с нуля, иногда удобнее выбирать округленное число, отличное от нуля, и таким образом увеличить масштаб, но погрешность при этом по-прежнему должна составлять одно-два мелких деления.

Через экспериментальные точки всегда следует проводить самую простую плавную кривую. При этом кривая проводится не по точкам. Точки должны располагаться как выше, так и ниже кривой.

Проще всего проводить прямые линии. Поэтому надо стремиться к тому, чтобы зависимость, которую нужно представить графически, была бы линейной. Это означает, что по оси откладывается не сама величина, а ее функция (логарифм, обратная величина и т.д.) так, чтобы полученный график был линейным.

Исключение составляет градуировочный график прибора, на котором точки соединяются последовательно прямыми линиями, так как при этом считаем значения величин точными, а кривая служит для определения промежуточных значений линейной интерполяцией.

Точки, полученные при разных условиях удобно наносить разными цветами и значками. Если к моменту построения графика погрешности измерений определены, то экспериментальные данные лучше наносить не в виде точек, а в виде прямоугольников или крестов. Сторона такого прямоугольника равна удвоенной абсолютной погрешности измерения величины (см рисунок ниже). Если погрешность одной величины слишком мала, то результаты изображаются на графике просто черточками, вытянутыми в том направлении, где погрешность измерения больше.

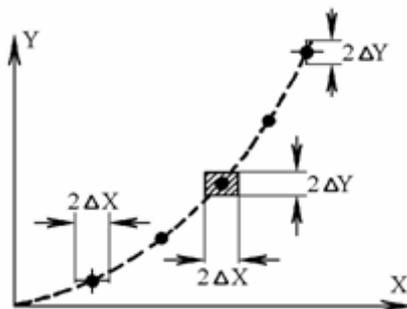


Рис. 1

Окончив построение графика, пишут подрисуночную надпись, которая должна содержать точное и краткое описание того, что показывает график.

## 1.9. Измерение линейных размеров тел с помощью штангенциркуля и

## микрометра

Штангенциркуль - это обычная миллиметровая линейка, с которой скреплено дополнительное устройство - так называемый нониус. Оно названо так по имени придумавшего его португальского математика Нуниша.

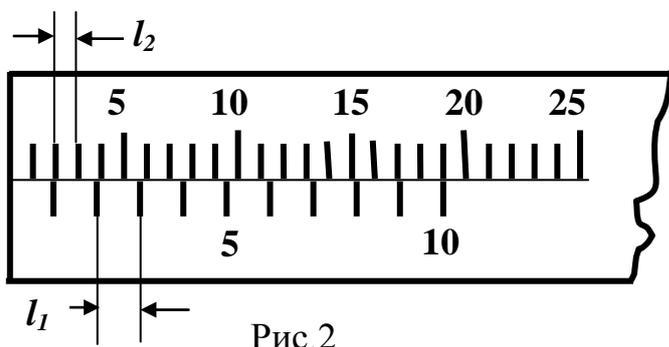


Рис.2

Нониус представляет собой короткую линейку с нанесенными на ней делениями, скользящую вдоль шкалы основной линейки. Но длина делений нониуса  $l_1$  не равна длине делений на линейке  $l_2$  ( $l_2 = 1\text{мм}$ ). Число же  $n$  делений на нониусе бывает

либо 10, либо 20.

Если число делений на нониусе равно 10, то точность нониуса  $\delta$  равна 0,1 мм. Если  $n=20$ , то она равна 0,05 мм.

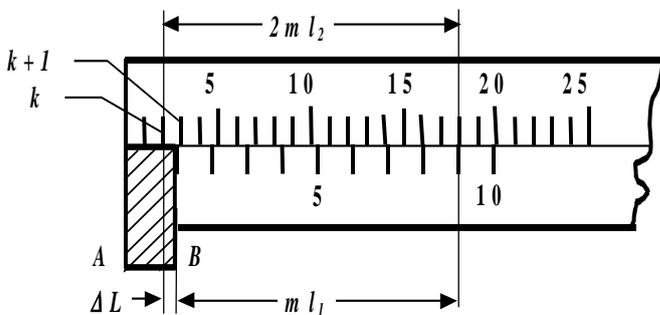


Рис.3

При измерении длины какого-нибудь тела линейкой с нониусом тело помещают так, чтобы один его конец  $A$  (рис.3) совпал с нулевой отметкой линейки. К другому концу  $B$  подводят нулевое деление шкалы нониуса. Так как длины делений нониуса и линейки неодинаковы,

то при любом положении нониуса относительно шкалы линейки одно из делений нониуса непременно совпадет с каким-нибудь делением линейки. На этом и основан отсчет длин по линейке с нониусом.

В самом деле, пусть конец тела  $B$  оказался между  $k$ -ым и  $(k+1)$ -ым делениями шкалы линейки. Длина  $AB$  тела, следовательно, равна  $k+\Delta L$ , где  $k$  - целое число миллиметров, а  $\Delta L$  - неизвестная доля  $(k+1)$  миллиметра. Допустим, что с каким-то делением линейки совпало  $m$ -ое деление нониуса. Это расхождение и есть искомая величина  $\Delta L$ . Это видно из рисунка 3. Итак,  $\Delta L = 2ml_2 - ml_1 = m(2l_2 - l_1) = m\delta$ . Значит, длина тела  $AB$  равна  $L = (kl_2 + m\delta)$ .

Таким образом, отсчет длины тела выполняется следующим образом:

1. по шкале линейки отсчитывается целое число миллиметров от нуля линейки до нуля нониуса.
2. находят то деление шкалы нониуса, которое совпадает с каким-либо делением линейки, и умножают номер этого деления на точность нониуса  $\delta$ . Это дает число десятых и сотых долей миллиметра.

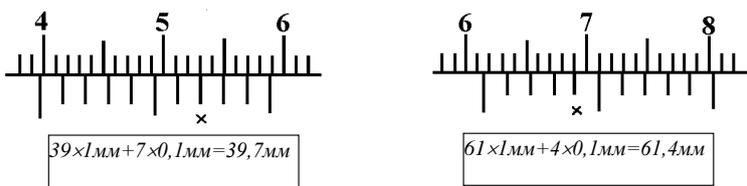
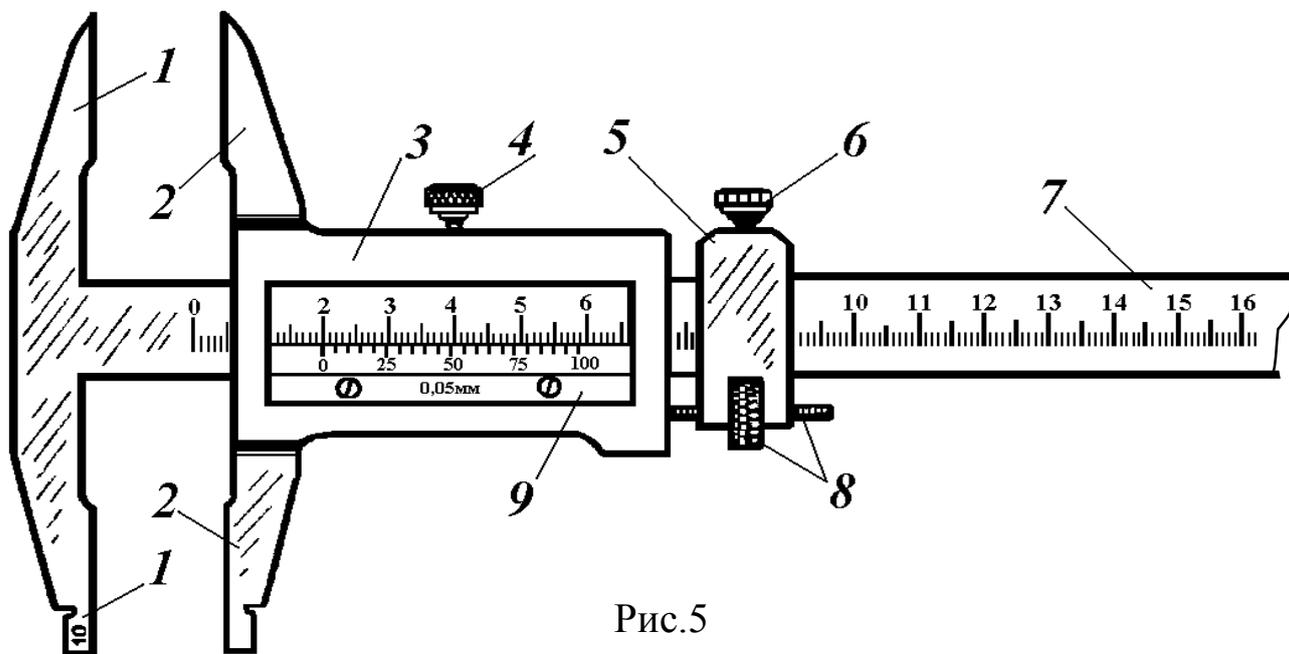


Рис.4

Примеры отсчета по нониусу, для которого  $l_2=1\text{мм}$  и  $\delta=0,1\text{мм}$ , приведены на рис.4.

Штангенциркуль (рис.5) состоит из стальной линейки 7 с неподвижными измерительными губками 1, между которыми и подвижными измерительными губками 2 зажимается измеряемый предмет. Губки 2 сделаны зацело с подвижной рамкой 3, которая может стопориться винтом 4. Рамка 3 при помощи винта и гайки микрометрической подачи 8 соединена с рамкой 5, имеющей стопорный винт 6. На нижнем краю рамки 3 нанесены деления нониуса (10 или 20).



Когда губки 1 и 2 соприкасаются, нулевые деления линейки и нониуса совпадают. Чтобы измерить длину предмета, его помещают между губками 1 и 2 и сдвигают их до соприкосновения с предметом (но без сильного нажима). Стопорный винт 4 позволяет зафиксировать расстояние между ножками 1 и 2, т.е. измеряемую длину. Затем по линейке и нониусу отсчитывают длину так, как описано выше.

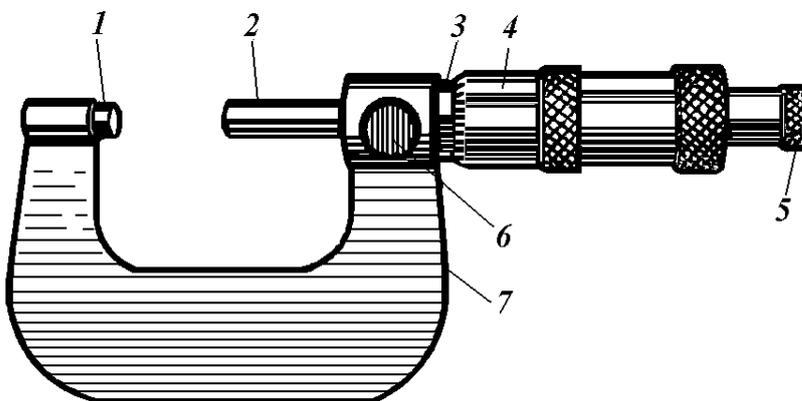


Рис.6

Для измерения длины с еще большей точностью - до 0,01 мм - используется микрометр (рис.6). Главная его часть - микрометрический

винт 2 с шагом, равным 0,5 мм, который проходит через стебель 3. Другой конец винта скреплен внутри с полым цилиндром - барабаном 4, который скреплен, в свою очередь, с трещоткой 5. Вращением барабана винт перемещается, ввинчиваясь во внутреннюю резьбу стебля 3, закрепленного в скобе 7. На другой стороне скобы имеется упор 1. Винт 2 и упор 1 образуют как бы тиски, в которые и зажимается измеряемое тело.

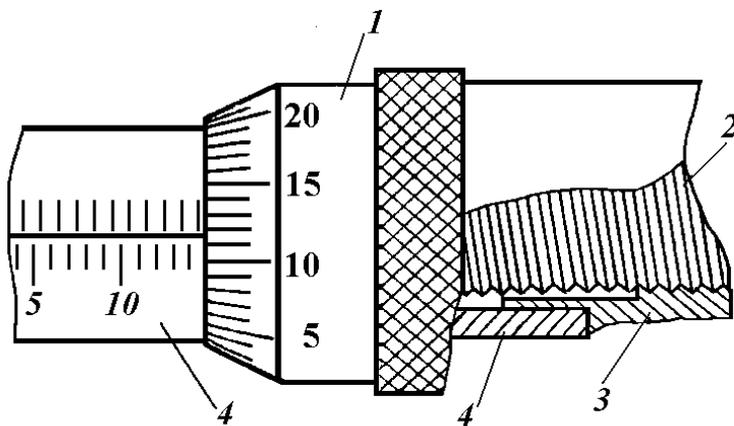


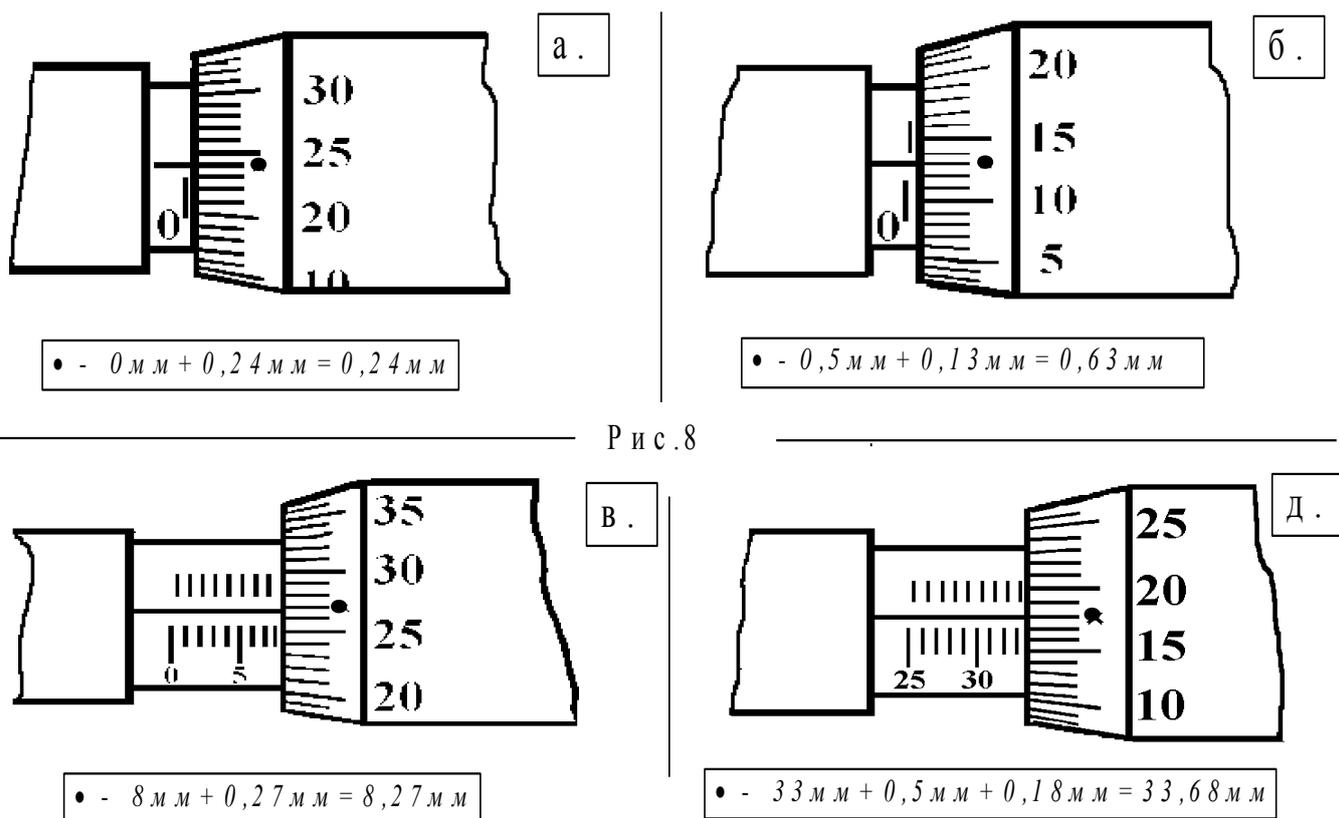
Рис.7

На рис.7 стебель и барабан показаны более детально. На скошенном срезе барабана 1 по его окружности нанесена круговая шкала, имеющая 50 делений. При вращении барабана в резьбовой втулке 3 микровинт 2 скользит вдоль неподвижного стебля 4, на котором нанесена

горизонтальная ось. Ниже этой оси миллиметровые деления, а выше нее - точно такие же деления, но сдвинутые относительно нижних на 0,5 мм вправо. Когда стебель винта и упор соприкасаются, край барабана должен совпасть с нулевым делением нижней линейной шкалы, а нулевое деление барабана должно в точности совпасть с осью линейной шкалы. Так как шаг микрометрического винта равен 0,5 мм, а на барабане 50 делений, то поворот на одно деление соответствует смещению винта по горизонтали на 0,01 мм. Эта цифра дает точность микрометра.

Как уже сказано выше, при измерении какого-либо линейного размера, тело помещают между стеблем винта и упором. Затем вращают барабан, пользуясь насечкой и трещоткой 5 до тех пор, пока тело не окажется "зажатым". При этом нужно помнить, что заканчивать вращение барабана нужно обязательно трещоткой 5. При первом же звуке трещотки вращение нужно прекратить и сделать отсчет показания микрометра. Трещотка обеспечивает равномерность нажатия и предотвращает появление неисправностей, возникающих из-за слишком сильного "сдавливания" предмета. При необходимости микровинт может быть закреплен при помощи стопора 6.

Отсчет показания микрометра делается так: по нижней линейной шкале отсчитывается число  $n$  - номер деления нижней линейной шкалы, ближайшего к краю барабана. Этот номер дает целое число миллиметров. Если между ним и краем барабана не видно деления верхней шкалы (рис.8а, 8в), то измеряемая длина определяется по формуле  $L=(n+0,01n')$ мм, где  $n'$  - номер того деления на круговой шкале барабана, которое совпало с осью линейной шкалы. Если же между  $n$ -ым делением нижней шкалы и краем барабана видно деление верхней шкалы (рис.8б, 8д), то длина тела определяется выражением:  $L=(n+0,5+0,01n')$ мм.



Р и с . 8

Автор выражает искреннюю благодарность доктору физико-математических наук, профессору кафедры общей и молекулярной физики Института естественных наук УрФУ Надежде Александровне Скулкиной за помощь в подготовке материалов

#### Список литературы

Яковлев Г.П. Краткие сведения по обработке результатов физических измерений. Методические указания для студентов физического факультета // Издательство Уральского университета, Екатеринбург, 2001

### 2.ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ РАБОТЫ И СТРУКТУРА ОТЧЁТА

Лабораторная работа выполняется в учебной лаборатории. При выполнении лабораторной работы необходимо соблюдать правила техники безопасности, с которыми студентов ознакомит преподаватель в начале практикума.

Выполнение лабораторной работы предваряет домашняя подготовка, которая предполагает изучение теоретического материала по теме предстоящей работы, порядка выполнения измерений и подготовки начала отчета.

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующие основные пункты:

- **название лабораторной работы;**
- **цель и задачи работы;**
- **краткая теория;**
- **оборудование;**
- **ход работы;**
- **обработка результатов;**
- **выводы по результатам работы.**

«*Название работы*» переписывается из описания к данной работе.

«*Цель и задачи работы*» должны быть кратко сформулированы из описания, данного к лабораторной работе.

В разделе «*Оборудование*» необходимо перечислить оборудование и измерительные приборы с указанием их пределов измерений, цены деления и систематической погрешности.

«*Краткая теория*» должна содержать только ту информацию, которая имеет непосредственное отношение к выполнению лабораторной работы. Должны быть приведены определения основных величин, основные формулы, которые будут использоваться для расчетов. Обязательно делать чертежи и поясняющие рисунки.

Раздел «*Ход работы*» должен содержать описание основных этапов измерения величин, то есть методику эксперимента. В этом разделе приводятся экспериментальные результаты, оформленные в виде таблиц.

Раздел «*Обработка результатов*» может существовать как отдельно, так и объединен с разделом «*Ход работы*». В этом разделе приводятся необходимые расчеты по формулам, которые были приведены в разделе «*Краткая теория*». Здесь же проводится оценка систематических и случайных погрешностей величин, измеренных прямыми и косвенными методами.

«*Выводы*» формулируются из постановки задач работы, которые были сформулированы для достижения цели исследования. В этом разделе необходимо проанализировать полученные результаты с позиции соответствия той цели и задачам, которые были сформулированы ранее. Если в ходе работы возникли проблемы либо с теоретической моделью, либо с методикой эксперимента, то обязательно следует на это указать, не забыв рассмотреть причины возникновения этих сложностей. В этом разделе приводится сравнение теоретических расчетов с экспериментальными результатами. Если есть несоответствия, то анализируются причины их появления. Если приводится табличное значение физической величины из справочника, то обязательно указывается информация о справочнике: автор, название, издательство, год.

## Лабораторная работа № 1.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ПАРОВ И ГАЗОВ

#### **Цель работы:**

- изучить теорию метода качественного спектрального анализа;
- познакомиться с принципом действия монохроматора УМ-2 и провести его градуировку;
- определить состав неизвестного газа по его спектру испускания.

#### **Краткая теория**

Спектральный анализ является физическим методом определения качественного и количественного состава вещества на основе изучения его спектра. Спектр вещества показывает распределение энергии исследуемого излучения по частотам (длинам волн). Спектром испускания, или эмиссионным спектром, называется совокупность монохроматических волн, на которые может быть разложено исследуемое излучение. Различают сплошные, полосатые и линейчатые спектры испускания.

*Сплошной спектр* получается при свечении раскаленных твердых и жидких тел. Сплошной спектр содержит волны всех частот видимого света и поэтому выглядит как цветная полоса с плавным переходом от одного цвета к другому в таком порядке: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый.

*Полосатые спектры* испускаются возбужденными молекулами газа, поэтому их называют молекулярными спектрами. Изолированные атомы всех веществ излучают свойственные только им наборы волн вполне определенных частот. Как у каждого человека свои личные отпечатки пальцев, так и у атома данного вещества свой, характерный только для него спектр. Молекулярные спектры состоят из отдельных групп, полос, каждая из которых включает в себя большое число тесно расположенных линий, сбегających к определенной границе, называемой кантом полосы.

*Линейчатые спектры* наблюдаются при свечении изолированных атомов, например атомов разреженных газов или паров металла. Природа линейчатых спектров объясняется тем, что у атомов конкретного вещества существуют только ему свойственные стационарные состояния со своей характерной энергией, а, следовательно, и свой набор пар энергетических уровней, которые может менять атом, т. е. электрон в атоме может переходить только с одних определенных орбит на другие, вполне определенные орбиты для данного химического вещества. Линейчатые спектры излучения выглядят как цветные линии, разделенные промежутками.

Поскольку атомам разных веществ соответствуют свойственные только им спектры, то существует способ определения химического состава вещества методом изучения его спектров. Этот способ называется **спектральным анализом**. Спектральный анализ применяется для определения химического состава ископаемых руд при добыче полезных ископаемых, для определения химического состава атмосфер планет; является основным методом контроля состава вещества в металлургии, машиностроении, фармакологии. Спектральный анализ электромагнитного излучения звезд — единственный способ определения их химического состава. Кроме этого анализ спектров позволяет определять температуру звезд, скорость их движения.

Спектром поглощения называется распределение по частотам (длинам волн) интенсивности поглощаемого телом электромагнитного излучения. Спектры поглощения наблюдаются том случае, когда на пути излучения источника, дающего сплошной спектр, оказывается поглощающее вещество. В прошедшем через вещество излучении имеются темные полосы или линии в тех местах, которые соответствуют поглощенному излучению. Характер поглощения определяется природой и строением поглощающего вещества. *Линейчатые спектры* поглощения получаются в

том случае, когда поглощающее вещество состоит из атомов; *полосатые* – при поглощении веществом в конденсированном состоянии.

Длины волн или частоты при обычных условиях получения спектров остаются постоянными, вполне определенными для каждого химического элемента. Качественный спектральный анализ состоит в обнаружении в спектре анализируемого вещества спектральных линий, принадлежащих искомому элементу.

Для проведения качественного анализа элементного состава вещества необходимо определить длины волн линий спектра и сравнить полученные данные с соответствующими спектральными таблицами.

### Экспериментальная установка

Для анализа спектра исследуемого образца используют спектральные приборы. Основными частями спектрального прибора являются входной коллиматор, или просто коллиматор, диспергирующая система и выходной коллиматор. Коллиматор, состоящий из объектива О и входной щели S, находящейся в его фокальной плоскости формирует параллельный пучок исследуемого света (Рис.1).

Коллиматорный объектив О должен быть ахроматическим, то есть положение его фокуса не должно зависеть от длины волны излучения, попадающего на щель S спектрального прибора. Если же объектив не исправлен на хроматическую абберацию, т.е. положение его фокуса зависит от длины волны, то в

Рис. 1. Функциональная схема спектрального прибора

спектральном приборе предусматривается возможность перемещения объектива вдоль главной оптической оси при переходе от одной области спектра к другой. **Диспергирующая система** формирует из одного пучка ряд параллельных монохроматических пучков. В качестве диспергирующего элемента служат либо призмы, либо дифракционные решетки. Действие призмы как диспергирующего элемента основано на явлении дисперсии света, т.е. на зависимости показателя преломления вещества призмы от длины волны падающего излучения I. Такая зависимость показателя преломления может быть представлена в виде ряда по степеням длины волны падающего излучения (формула Коши):

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} + \dots$$

Вследствие существования такой зависимости параллельный пучок, падающий на призму, по выходе из нее распадается на ряд параллельных пучков, каждый из которых характеризуется определенной длиной волны. Монохроматические пучки каждый под своим углом к главной оптической оси попадают в объектив О **выходного коллиматора**. В фокальной плоскости объектива О получаются монохроматические изображения выходной щели (спектральные линии). Эти изображения можно либо рассматривать глазами, либо регистрировать фотодатчиком.

В данной работе применяется визуальное наблюдение спектров. Спектральным прибором является монохроматор УМ-2. Принципиальная оптическая схема монохроматора УМ-2 отличается от функциональной схемы тем, что диспергирующая призма имеет особую конструкцию. Призма не только разлагает свет в спектр, но поворачивает его на 90° (Рис.2).

В качестве входной щели коллиматора в монохроматоре УМ-2 применяется стандартная симметричная щель с шириной раскрытия 0 – 4 мм, высотой 15 мм. Цена деления на барабанчике раскрытия щели составляет 0.01 мм. Для того, чтобы щель 1 всегда находилась в фокальной плоскости коллиматорного объектива (иначе не получить

резкого изображения щели), в монохроматоре предусмотрена возможность перемещения объектива 2 вдоль оптической оси. Смещение производится микровинтом, расположенным на внешней стороне корпуса монохроматора. Положение объектива фиксируется линейной шкалой с нониусом. Шкала расположена над микровинтом и видна через стеклянное окошечко в корпусе прибора.



Такую корректировку нужно производить, если он не исправлен на хроматическую aberrацию, т.е. если положение его фокуса зависит от длины волны. Чаще всего коллиматорный объектив является ахроматическим.



Диспергирующая призма расположена внутри прибора на столике, снабженном поворотными механизмами. Поворотный механизм приводится в действие барабаном, соединенным с призмным столиком микрометрическим винтом. Барабан проградуирован в относительных единицах – углах поворота барабана; цена деления – 2 градуса. Отсчет угла поворота производится против риски на ползунке, скользящем по спиральной канавке на барабане. В фокальной плоскости выходного

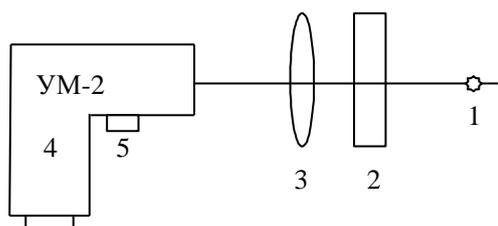
коллиматора расположен указатель 6 (рис.2). При повороте призмного столика линия определенной длины (значит, и цвета) совмещается с указателем 6. Для того, чтобы с помощью монохроматора можно было измерять длины волн, необходимо иметь градуировочный график, связывающий длину волны и отсчет по барабану поворотного механизма. Зависимость эта нелинейная.

Типичный вид градуировочной кривой приведен на рис. 3. Для его построения используется спектр излучения паров ртути, который содержит яркие линии, расположенные во всей видимой области спектра. Длины волн приведены в таблице 1.

### Порядок выполнения работы

Принципиальная схема установки приведена на рис. 4. В качестве источника света для градуировки монохроматора используется ртутная лампа ДРШ-250, для

спектрального анализа - лампа с неизвестным газом. Включение спектральных ламп производится только под руководством преподавателя.



- 1 — источник излучения;
- 2 — защитное стекло кожуха лампы;
- 3 — конденсорная линза;
- 4 — монохроматор УМ-2;
- 5 — барабан диспергирующей призмы монохроматора.

Рис. 4. Принципиальная схема установки

### Задание 1 Градуировка монохроматора УМ-2

1. Поставить на оптическую скамью ртутную лампу и включить ее. Дать лампе прогреться 2-3 мин.

2. Перемещая по оптической скамье конденсорную линзу 3 получить равномерное освещение щели. При этом монохроматические изображения щели, наблюдаемые в окуляр, должны быть яркими и равномерно освещенными по высоте.

3. Отрегулировать величину входной щели. Величина входной щели должна быть такой, чтобы линии имели небольшую ширину, оставаясь резкими и яркими. При этом линии желтого дублета ртути должны быть видимы раздельно.

4. Вращая барабан 5 поворотного механизма последовательно совместить спектральные линии, указанные в таблице 1, с указателем 6 (рис.2) и снять соответствующие отсчеты угла поворота барабана. Данные измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1.

Цвет линии в спектре	Длина волны, нм	Отсчет по барабану, градус			
		1	2	3	средн ее
красная слабая	692,0				
красная яркая	623,0				
желтая правая	577,0				
зеленая яркая	546,1				
зелено-голубая яркая	491,6				
синяя яркая	435,8				
фиолетовая яркая	404,6				

5. Отключить ртутную лампу.

6. Построить градуировочный график на миллиметровой бумаге. Обратите внимание, что график должен занимать всю площадь графика.

### Задание 2 Определение элементного состава неизвестного газа.

1. Поставить на оптическую скамью лампу с неизвестным газом и включить ее в сеть 220В, 50Гц.

2. По барабану поворотного механизма монохроматора определить положение наиболее характерных линий наблюдаемого спектра.

3. По градуировочному графику найти соответствующие наблюдавшимся линиям значения длин волн.

4. Внести результаты измерений в таблицу 2.

Цвет линии	Отсчет по барабану, градус	Длина волны по градуировочному графику, нм	Длина волны по таблице и название элемента

5. В таблице эмиссионных спектров газов найти элементы, имеющие длины волн, отличающиеся от найденных по графику не более чем на  $\pm 5$  нм.

6. Определить, какие элементы входят в состав газа, наполняющего баллон лампы, предложенной для исследования.

#### Контрольные вопросы

1. Что такое спектральный анализ?
2. Нарисовать принципиальную схему спектрографа и объяснить назначение составных частей.
3. Объяснить, как определить состав неизвестного газа в спектре излучения лампы

## Лабораторная работа № 2

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ

#### Цель работы:

- ознакомиться с методом определения показателя преломления с помощью рефрактометра;
- определить зависимость показателя преломления растворов глицерина от концентрации.

#### Краткая теория

Преломлением или рефракцией называется изменение направления прямолинейного распространения света при переходе из одной среды в другую. Рефрактометрия как способ, измеряющий преломление света, включает все методы количественной оценки этого явления. Преломление света оценивается по величине показателя преломления, который в свою очередь зависит от состава веществ, от их концентрации и молекулярной структуры. На этой зависимости и построен рефрактометрический анализ.

Рефрактометрия широко распространена в самых различных областях химии и соприкасающихся наук. Она применяется в фармацевтическом, биохимическом анализе, анализе пищевых продуктов и т.д. Этот метод считается старейшим из применяемых в химии оптических методов исследования. Основываясь на величинах показателей преломления и плотности, Исаак Ньютон сделал интересные заключения о составе солей, этилового спирта и др. веществ. Рефрактометрия находит применение также при определении чистоты дистиллированной воды, определении сахарозы в водных растворах, концентрации общего белка сыворотки крови, для идентификации различных веществ и т. д. Измерение показателя преломления является простой процедурой, требует очень малых количеств исследуемого вещества и минимальной затраты времени.

Все выпускаемые в настоящее время рефрактометры, независимо от их назначения, построены на принципе рефрактометров типа Аббе или типа Пульфриха, но и в тех и в других измерения основаны на определении величины *предельного угла преломления*.

### Теоретические основы рефрактометрии

При пересечении границы раздела двух прозрачных однородных сред 1 и 2 (рис. 2.1) направление луча света изменяется в соответствии с установленным еще в начале XVII в. законом преломления. Согласно этому закону, отношение синусов углов падения  $\alpha$  и преломления  $\beta$ , равное отношению скорости распространения света  $V_1$  и  $V_2$  в двух соприкасающихся средах есть величина постоянная:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (2.1)$$

где  $n$  – называется относительным показателем (или коэффициентом) преломления.

Показатель преломления зависит от ряда факторов:

- природы вещества;
- концентрации раствора;
- природы растворителя;
- температуры;
- длины волны света;

При работе с растворами веществ сначала измеряют показатель преломления растворителя, который вычитают из показателя преломления раствора.

Определение проводят при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  и длине волны линии D спектра натрия 589,3 нм, и показатель преломления обозначают с индексами –  $n_D^{20}$ .

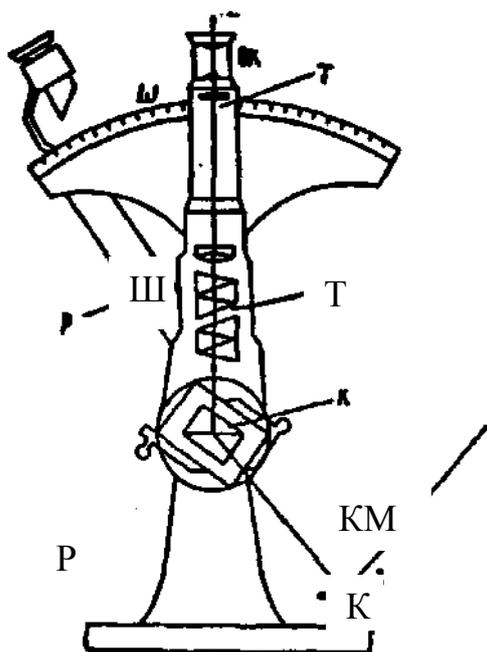
Ниже приведены показатели преломления наиболее часто применяемых растворителей: вода – 1,3330; метанола – 1,3286; этанол – 1,3613; ацетон – 1,3591; хлороформ – 1,4456.

Влияние температуры в рефрактометрии исключают, термостатированием призмных блоков. При температурах, отличающихся от  $20^{\circ}\text{C}$  на  $5 - 7^{\circ}$  можно не термостатировать призмы рефрактометра, а при расчетах вводить поправку.

Рефрактометрический метод в фармацевтическом анализе применяется для решения следующих задач:

1. Установление подлинности (идентификация) лекарственных веществ.
2. Оценка чистоты лекарственных веществ.
3. Определение концентраций лекарственных веществ в растворах этилового спирта, в спиртоводных растворах, настойках.

### Устройство рефрактометра РЛУ



Рефрактометр РЛУ применяется во многих отраслях пищевой промышленности для быстрого анализа вещества при незначительной затрате последнего (2-3 капли). Вертикальный разрез рефрактометра РЛУ приведен на рис. 2.2. Камера К состоит из двух прямоугольных, совершенно одинаковых призм (с преломляющими углами примерно  $64^{\circ}$ ), сделанных из стекла флинт с большим показателем преломления. Призмы обращены одна к другой своими диагональными сторонами (Рис. 2.3). Между этими сторонами остается узкое плоскопараллельное пространство (около 0,1 мм), в которое при измерении вводится несколько капель исследуемой жидкости, растекающейся тонким слоем. Нижняя призма служит источником рассеянного света, так как диагональная грань его матовая. Камера К вращается вокруг горизонтальной оси, направленной перпендикулярно к оптической оси

Рис. 2.2 Рефрактометр РЛУ

зрительной трубы Т при помощи рычага Р и кремальеры. Камера имеет окна для направления света. Свет направляется зеркалом 3, укрепленным на подвижном кронштейне, который может быть установлен в определенном положении.



Рис. 2.3. Схема камеры К:  
1 – измерительная призма;  
2 – осветительная призма;  
3 – слой исследуемой жидкости

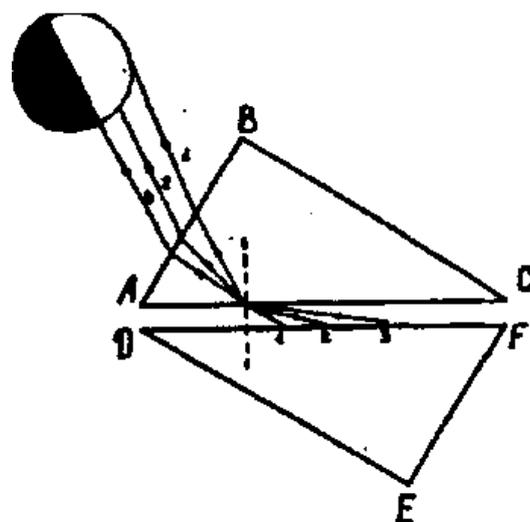


Рис. 2.4

Зрительная труба Т служит для наблюдения границы между светлым и темным полем. Лучи проходят через измерительную призму и попадают в зрительную трубу, в которой видна граница, отделяющая лучи, падающие под углами, большими предельного угла (*темная* часть поля зрения) от лучей, падающих под углами, меньшими предельного угла (*светлая* часть поля зрения) (Рис. 2.4). Зрительная труба укреплена подвижно со шкалой Ш показателей преломления. Рычаг Р окуляра шкалы соединяется неподвижно с камерой К. Поэтому они поворачиваются относительно шкалы на один и тот же угол. По шкале отсчитывают показатели преломления в интервале от 1,300 до 1,700 с точностью до единицы третьего знака.

На трубе имеется винт для установки прибора на нуль и компенсатор КМ с рукояткой для устранения дисперсии. Компенсатор позволяет производить измерения, пользуясь светом не монохроматическим, а, например, дневным или светом обыкновенной лампы накаливания, дающей непрерывный спектр. Так как для разных цветов (разных длин волн) показатели преломления различны, то при отсутствии компенсатора граница между освещенной и неосвещенной областью, наблюдаемая в рефрактометре, будет не резкой, а в виде широкой красной или синей полосы. Компенсатор КМ состоит из двух призм прямого зрения, рассчитанных для линии натрия. Эти призмы можно установить так, чтобы дисперсия их компенсировала дисперсию жидкости и призм рефрактометра. Компенсатор при этом сводит все предельные лучи (для всех длин волн) в то место поля зрения, которое совпадает с границей светотени для желтых лучей натрия, и линия раздела будет бесцветной и отчетливой. Следовательно, измеряется на рефрактометре РЛУ показатель преломления жидкости. Для придания призме горизонтального положения, в момент нанесения испытуемого раствора камера вместе со зрительной трубой, сектором и рычагом поворачивается в требуемое положение.

По оптической оси зрительной трубы на линзу окуляра нанесено перекрестье, с ним совмещается граница света и тени (предельный луч).

Совмещение оптической оси с предельным лучом производится поворотом призмы.

С поворачиваемым блоком связано отсчетное устройство рефрактометра.

После работы на рефрактометре необходимо тщательно промыть водой или спиртом обе призмы, а затем протереть их досуха фильтровальной бумагой или мягкой салфеткой.

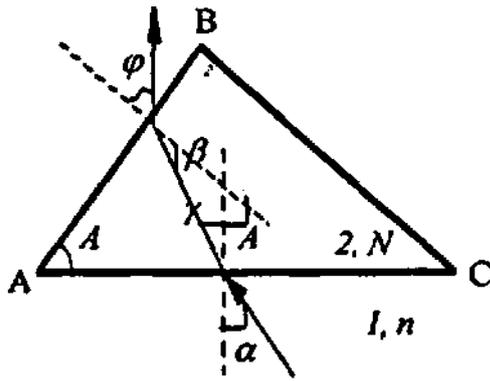


Рис. 2.5

Рассмотрим прохождение света через призму (рис.2.5). Луч света, падая из среды с показателем преломления  $n$ , оптически менее плотной, на грань AC стеклянной призмы ABC рефрактометра под углом  $\alpha^0$ , преломляется в ней и выходит из грани AB под углом  $\varphi$  в воздух. Обозначим показатель преломления призмы через  $N$  (причем  $N > n$ ), а показатель преломления воздуха примем равным единице. Используя закон преломления и геометрию (рис. 2.5), получим соотношения

$$\begin{cases} \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{N}{n} \Rightarrow \sin \gamma = \sin \alpha \frac{n}{N} \\ \frac{\sin \beta}{\sin \varphi} = \frac{N}{1} \Rightarrow \sin \beta = N \sin \varphi \\ \beta = \pm(\gamma - A) \end{cases}$$

Тогда исключение угла  $\gamma$ , получаем  $\sin \varphi = \sqrt{N^2 - n^2 \sin^2 \alpha} \sin A - n \cos A \sin \alpha$

При скользющем луче угол  $\varphi_0$  будет минимальным. Следовательно, если на грань AC призмы будут падать лучи под всеми всевозможными углами, то, смотря со стороны грани AB в трубу, установленную на бесконечность, увидим, что одна часть поля зрения будет темной, другая - светлой. Направление, по которому будет видна граница между светлым и темным полем, и есть направление скользющего луча по выходе его из призмы. Из приведенных выше формул легко выводится формула для показателя преломления исследуемой жидкости:

$$n = \sin A \sqrt{N^2 - \sin^2 \varphi_0} \pm \cos A \sin \varphi$$

Эта формула показывает, что для определения показателя преломления жидкостей необходимо определить преломляющий угол  $A$  призмы, показатель преломления  $N$  стекла призмы и угол  $\varphi_0$ , минимальный угол, при котором луч света, падающий на грань AC, испытывал бы полное внутреннее отражение. Вычисления показателей преломления по этой формуле достаточно сложны, поэтому на секторе С рефрактометра РЛУ нанесена шкала показателей преломления в интервале от 1,300 до 1,700. В этом случае все измерения сводятся к единственному отсчету показаний прибора при установке его на предельный угол. Следует только в начале измерений предварительно проверить правильность шкалы прибора с помощью дистиллированной воды, показатель преломления которой при температуре 20° равен 1,333.

#### Методика измерений

Показатель преломления жидкости определяется при помощи рефрактометра двумя способами. При первом способе пучок света посредством специального зеркала направляется на грань EF осветительной призмы DEF (рис. 2.4). Вследствие того, что грань DF матовая, происходит рассеяние света, и лучи в жидкости падают на грань AC измерительной призмы под различными углами, наибольший из которых равен 90°. Эти скользящие вдоль поверхности AC лучи после преломления определяют границу распространения света – границу преломления. Положение этой границы определяется величиной предельного угла  $\varphi_0$ . При втором способе пучок света направляют на грань BC измерительной призмы (рис. 2.6). Он преломляется на границе воздух – стекло и падает на грань AC. В этом случае лучи света переходят из оптически более плотной среды

(призмы) в оптически менее плотную среду (жидкость). Лучи, которые падают на поверхность грани AC под углом, меньшим предельного угла, пройдут через жидкость и призму DEF; наоборот, те лучи, которые падают на слой жидкости под углом, большим предельного, претерпят в призме полное отражение.

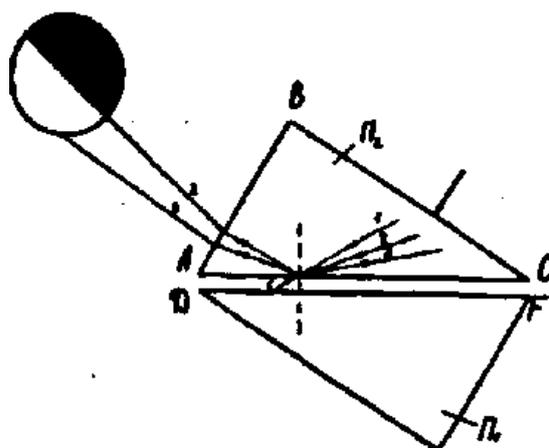


Рис. 2.6

Лучи, направление которых соответствует величине предельного угла полного отражения  $\varphi_0$ , определяют границу распространения света. В обоих случаях в поле зрения трубы, поставленной на пути лучей, прошедших через грань АВ, наблюдается две области: одна ярко освещенная, другая – темная. Положение границы между этими областями определяется величиной предельного угла, а, следовательно, зависит от величины показателя преломления

жидкости. Из двух рассмотренных вариантов определения показателей преломления для малопрозрачных и непрозрачных жидкостей применяется только второй – наблюдение границы полного отражения. Для прозрачных жидкостей применимы оба варианта, но преимущество первого в том, что граница преломления более резкая, чем граница полного отражения.

### Порядок выполнения работы

**Задание 1** Установка нуля рефрактометра. Определение показателя преломления дистиллированной воды (0% глицерина)

Перед началом работы с рефрактометром проверяется нулевая точка прибора дистиллированной водой. Прибору придают такое положение, при котором грань AC призмы ABC была бы горизонтальной. Приподнимают призму с матовой поверхностью и помещают с помощью оплавленной палочки или пипетки 1-2 капли дистиллированной воды на грань AC призмы ABC. При этом *не следует касаться* призмы пипеткой или палочкой, чтобы не поцарапать ее. Затем опускают призму DEF с матовой поверхностью на призму ABC и закрепляют ее защелкой. Повертывают прибор в вертикальное положение.

Направляют с помощью зеркала луч света через одно из окон на систему призм. Окуляр шкалы и окуляр зрительной трубы устанавливают на резкость изображения поля зрения и визирных линий.

Если при установке на резкость изображения границы светотени в окуляре зрительной трубы будет наблюдаться дисперсия, ее устраняют вращением рукоятки лимба дисперсии. При помощи кремольеры КР вращают коробку К с призмами до тех пор, пока визирная линия окуляра трубы Т не станет на линию раздела светлой и темной грани поля.

Если визирная линия окуляра шкалы при этом устанавливается на 1,333, то прибор установлен на нуль. Если этого нет, то при дальнейших измерениях учитывают разницу между показаниями прибора и действительным значением  $n$ .

1. Помещают между призмами прибора несколько капель дистиллированной воды (0% глицерина). Вращая камеру К с призмами и соответственным образом освещая её, получают резкую границу светотени.

2. Совмещают границу светотени с нитью, расположенной в окулярной части трубы, и определяют по шкале Ш показатель преломления раствора.

3. Измерения проводят 3-5 раз. Результаты занести в таблицу.

№ п/п	$n_i$ (0%)	$(n_i - \bar{n})$ $\bar{n} = \underline{\hspace{2cm}}$	$(n_i - \bar{n})^2$
1			
2			
3			
4			
5			
	$\Sigma$		

4. После установки рефрактометра на нуль опускают нижнюю половину камеры, вытирают обе половины камеры фильтровальной бумагой, а затем досуха мягкой неворсистой салфеткой.

5. По данным таблицы определить показатель преломления дистиллированной воды (0% глицерина). Записать результат по форме  $n_0 = (\bar{n}_0 \pm \Delta n_0)$ ,  $p=0,95$ .

### Задание 2 Определение показателя преломления глицерина

1. Помещают между призмами прибора несколько капель неразбавленного глицерина (100%). Вращая камеру К с призмами и соответственным образом освещая её, получают резкую границу светотени.

2. Совмещают границу светотени с нитью, расположенной в окулярной части трубы, и определяют по шкале Ш показатель преломления раствора.

3. Измерения проводят 3-5 раз. Результаты занести в таблицу.

№ п/п	$n_i$ (100%)	$(n_i - \bar{n})$ $\bar{n} = \underline{\hspace{2cm}}$	$(n_i - \bar{n})^2$
1			
2			
3			
4			
5			
	$\Sigma$		

4. После определения показателя преломления раствора опускают нижнюю половину камеры, вытирают обе половины камеры фильтровальной бумагой, а затем досуха мягкой неворсистой салфеткой.

5. По данным таблицы определить показатель преломления глицерина. Записать результат по форме  $n_{100} = (\bar{n}_{100} \pm \Delta n_{100})$ ,  $p=0,95$ .

6. Построить график зависимости показателя преломления глицерина от концентрации, используя значения из задания 1 ( $n_0$ ) и задания 2 ( $n_{100}$ ).

### Задание 3 Определение концентрации водного раствора глицерина

1. Для растворов с неизвестной концентрацией определить значения  $n_1, n_2, n_3$  (см. задание 2 п 1-4). Записать результаты по форме  $n_{1,2,3} = (\bar{n}_{1,2,3} \pm \Delta n_{1,2,3})$ ,  $p=0,95$ .

2. По графику найти значение концентрации (%) исследуемых растворов.

3. Сравнить полученные значения с таблицей. Найти относительную погрешность метода определения концентрации раствора. Сделать вывод о точности определения показателя преломления раствора глицерина и его концентрации с помощью рефрактометра.

### Контрольные вопросы

1. В чем состоит явление полного отражения?
2. Как устроен рефрактометр РЛУ?
3. Как измеряется показатель преломления жидкости рефрактометром РЛУ?
4. Как зависит показатель преломления раствора глицерина в воде от концентрации раствора?
5. Где применяется рефрактометр РЛУ?

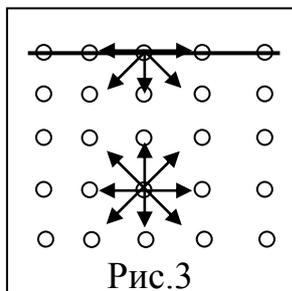
### Лабораторная работа №3.

#### ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ

##### Цель работы:

- провести измерение коэффициента поверхностного натяжения воды методом Жюли.

##### Краткая теория



В отличие от газа, молекулы которого почти не взаимодействуют, жидкость состоит из молекул, весьма интенсивно взаимодействующих между собой. Следствием этого является очень малая сжимаемость жидкости. Этим же объясняется и характерная особенность жидкости – наличие у нее свободной поверхности, граничащей с газом (точнее, с паром самой жидкости).

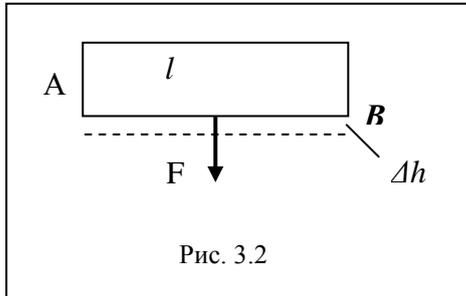
Молекулы, находящиеся на поверхности жидкости, существуют в условиях, отличных от тех, в которых находятся молекулы внутри жидкости. В глубине жидкости каждая молекула окружена со всех сторон такими же молекулами. Поэтому силы притяжения, действующие на нее со стороны всех ее соседей, скомпенсированы. Напротив, всякая молекула на поверхности окружена молекулами не со всех сторон, поэтому сумма сил притяжения со стороны соседей не равна нулю – их равнодействующая направлена внутрь жидкости (рис. 3.1). Благодаря этому молекулы поверхностного слоя обладают большей потенциальной энергией, чем молекулы в глубине жидкости. Именно поэтому при отсутствии каких-либо сил, кроме сил межмолекулярного взаимодействия, жидкость принимает такую форму, при которой ее площадь минимальна при данном объеме, то есть форму сферы. В реальных условиях на жидкость действует также сила тяжести и сила взаимодействия между молекулами жидкости и молекулами твердого тела, с которым контактирует жидкость (например, стенки сосуда). Действительная форма жидкости определяется “игрой” этих трех сил. Плоская форма поверхности жидкости объясняется тем, что сила тяжести превосходит остальные действующие на молекулы силы. Искривление поверхности около краев сосуда, содержащего жидкость (мениск), объясняется влиянием сил взаимодействия молекул жидкости и твердого тела.

Так как молекулы поверхностного слоя обладают повышенной потенциальной энергией (поверхностной энергией), то всякое изменение площади поверхности связано с совершением работы. Если поверхность жидкости уменьшается, то работу совершает жидкость. Наоборот, для увеличения площади поверхности должна быть совершена работа внешних сил. Очевидно, что совершенная работа должна быть равна изменению поверхностной энергии, а последнее пропорционально изменению площади. Если площадь поверхности изменяется на величину  $\Delta S$ , то изменение энергии  $\Delta W$  и равная

ей по модулю работа  $\Delta A$  равны

$$|\Delta A| = |\Delta W| = \sigma \Delta S \quad (3.1)$$

Коэффициент пропорциональности  $\sigma$ , входящий в это выражение, называется *коэффициентом поверхностного натяжения жидкости*, имеющего смысл работы, совершающейся при изменении площади поверхности на единицу.



Формула (3.1) может быть представлена и в другом, не энергетическом, а силовом виде. Для этого представим себе некоторую поверхность жидкости площадью, ограниченной прямоугольным контуром – линией раздела (рис. 3.2 вид сбоку). Пусть одна из сторон контура – сторона  $AB$ , длиной  $l$  подвижна и под действием силы  $F$  перемещается на расстояние  $\Delta h$ , так, что поверхность увеличивается на величину  $\Delta S = l\Delta h$ . Сила, сместившая границу раздела  $AB$  совершила работу  $\Delta A = F \cdot \Delta h$ . Так как  $\Delta A = \Delta W$ , то, приравняв правые части, получаем  $F \cdot \Delta h = \sigma \cdot \Delta S = \sigma \cdot l \cdot \Delta h$ . Следовательно, коэффициент

поверхностного натяжения жидкости равен

$$\sigma = \frac{F}{l} \quad (3.2)$$

Таким образом, коэффициент поверхностного натяжения представляет собой силу, действующую на каждую единицу длины любой линии раздела на поверхности жидкости. В СИ коэффициент поверхностного натяжения измеряется в джоулях на метр квадратный ( $\text{Дж}/\text{м}^2$ ) или в ньютонах на метр ( $1 \text{ Н}/\text{м} = 1 \text{ Дж}/\text{м}^2$ ).

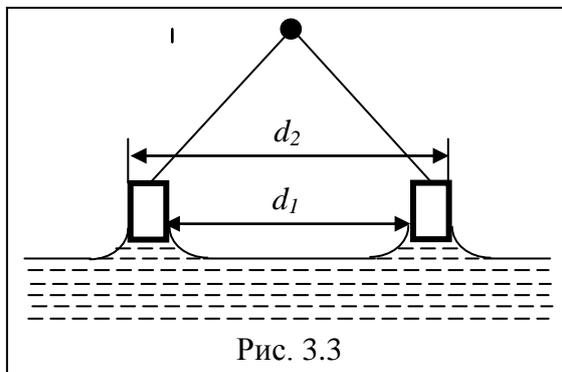
Поверхностный слой ведет себя так, как будто бы он представляет собой упругую пленку, натянутую на жидкость, на которую действует сила, касательная поверхности, перпендикулярно линии раздела на ней. Эта сила называется силой поверхностного натяжения. Из формулы (3.2) следует, что она равна

$$F = \sigma \cdot l \quad (3.3)$$

Коэффициент поверхностного натяжения является важной константой жидкости, поскольку он связан с межмолекулярными силами. Знание его необходимо для расчета всевозможных капиллярных явлений, он важен для оптимизации таких технологических процессов, как флотация руд. Поэтому измерение коэффициента поверхностного натяжения имеет важное научное и техническое значение.

### Методика измерений

В работе используется метод, основанный на измерении силы, нужной для отрыва кольца от поверхности жидкости, с которой оно приведено в соприкосновение. Измерение силы производится с помощью динамометра (метод Жюли).



Если кольцо, изготовленное из материала, который смачивается жидкостью, отрывать от контактирующей с ним поверхности, то можно считать, что отрыв происходит по двум линиям – по линиям внешней и внутренней окружности кольца. Если внутренний диаметр  $d_1$ , а внешний  $d_2$ , то сила, удерживающая у кольца равна  $F$  (рис. 3.3, вид сбоку). В момент отрыва кольца внешней силой выполняется очевидное условие

$$F = \pi d_1 \sigma + \pi d_2 \sigma = \pi (d_1 + d_2) \cdot \sigma$$

Зная значения внутреннего  $d_1$  и внешнего  $d_2$  диаметров кольца, а также, измерив силу  $F$ , отрывающую кольцо от жидкости, значение  $\sigma$  можно рассчитать по следующей формуле

$$\sigma = \frac{F}{\pi(d_1 + d_2)}. \quad (3.4)$$

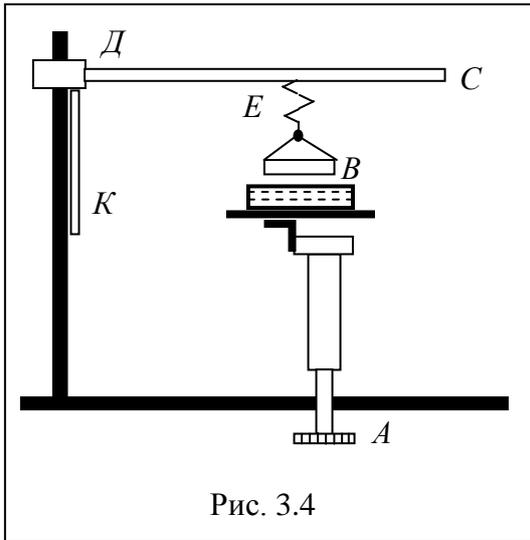


Рис. 3.4

Схематическое изображение установки для измерения коэффициента поверхностного натяжения жидкости  $\sigma$  по методу Жюли приведено на рис. 3.4. На подъемном столике, укрепленном на подвижной колодке микрометра  $A$ , который, в свою очередь, установлен на основании штатива, находится плоский сосуд с жидкостью. Кольцо  $B$  подвешено на пружине, верхний конец которой закреплен на стержне  $C$ . Он может перемещаться при помощи винта  $D$  вдоль стойки штатива. К стойке штатива против нижней части пружины укреплена зеркальная пластина  $K$  с миллиметровыми делениями. В нижнем конце пружины имеется крючок для

подвески кольца и указатель  $E$  в виде тонкой проволоочки. К крючку может быть подвешена тарелочка, на которую помещаются гири при градуировке.

Для определения силы, отрывающей кольцо от жидкости, выполняют следующие измерения. На крючок подвешивается кольцо, под которым размещается сосуд с водой. Вращая барабан микрометра  $A$ , поднимают столик до соприкосновения поверхности жидкости с кольцом и снимают показание микрометра  $l_1$ . Правила снятия показаний с микрометра описаны *во введении, п.1.9*. Затем столик начинают опускать, вращая барабан микрометра в противоположенную сторону. Пружина растягивается и в определенный момент происходит отрыв кольца. Сняв показание микрометра при отрыве кольца  $l_2$ , можно определить удлинение пружины  $L=|l_1-l_2|$ .

Сила, которая действовала со стороны жидкости на кольцо и, значит, на пружину, вычисляется по формуле  $F=kL$ , где  $k$  – жесткость пружины.

Чтобы пользоваться пружинной как динамометром, нужно определить коэффициент ее жесткости  $k$ , то есть проградуировать пружину. Для этого поступают так – к нижнему концу пружины подвешивают тарелочку и по зеркальной шкале определяют нулевое положение указателя. Для этого нужно так посмотреть на нижнюю границу тарелочки, чтобы она совпала с изображением этой части тарелочки на зеркальной шкале, после чего снять значение с пластины  $K$ . Затем на тарелочке последовательно помещают гири массой 0.5г, 1г, 1.5г и т.д. (до 3-х грамм) и каждый раз производят отсчет положения тарелочки. Разделив значение нагрузки на соответствующее ей удлинение, получают значение коэффициента жесткости

$$k_i = \frac{m_i \cdot g}{L_i} \quad (3.5)$$

### Порядок выполнения работы

#### ***I. Измерение внешнего ( $d_1$ ) и внутреннего ( $d_2$ ) диаметров кольца с помощью штангенциркуля с ценой деления нониуса в .....мм.***

1.1. Измерить штангенциркулем внешний диаметр ( $d_1$ ) кольца не менее 5 раз. Правила использования штангенциркуля описаны *во введении, п.1.9*. Результаты измерений диаметров внести в таблицу 1.

Таблица 1. Измерение внешнего диаметра ( $d_1$ ) кольца с помощью штангенциркуля с ценой деления нониуса --- мм:

Таблица 1.

№ п/п	$d_{1i}$ , мм	$(d_{1i} - \bar{d}_1)$ , мм $\bar{d}_1 = \text{---} \text{ мм}$	$(d_{1i} - \bar{d}_1)^2$ , мм <sup>2</sup>
1			
2			
3			
4			
5			
	$\Sigma$		

Рассчитать среднее значение внешнего диаметра  $d_1$  и полную погрешность его определения, используя алгоритм, описанный **во введении, п.1.5 и п.1.6**. Записать результат по форме  $d_1 = (\bar{d}_1 \pm \Delta d_1)$  мм,  $p=0,95$ .

1.2. Аналогичные измерения см. п.1.1 и вычисления провести для внутреннего диаметра ( $d_2$ ). Записать результат по форме  $d_2 = (\bar{d}_2 \pm \Delta d_2)$  мм,  $p=0,95$ .

## II. Определение коэффициента жесткости пружины $k$ .

2.1. К нижнему концу пружины подвесить тарелочку. Определить по зеркальной шкале нулевое положение указателя  $N_n$ . Результаты внести в таблицу 2.

Таблица 2.

№ п/п	$m_i$ , гр	$N_n$ , мм	$N_k$ , мм	$k_i = \frac{m_i \cdot g}{ N_n - N_k }$ , $\frac{H}{M}$	$(k_i - \bar{k})$ , $H/M$ $\bar{k} = \text{---} H/M$	$(k_i - \bar{k})^2$ , $(H/M)^2$
0	0		-	-	-	-
1	0,5	-				
2	1,0	-				
3		-				
4		-				
...		-				
				$\Sigma$		

2.2. Поместить на тарелочке гирьку массой  $m_1=0.5g$ . Произвести отсчет положения указателя  $N_k$  заполнить соответствующую ячейку в таблице. Рассчитать коэффициент жесткости по формуле

$$k_1 = \frac{m_1 \cdot g}{|N_n - N_{k1}|} \quad (3.6)$$

2.3. Увеличивая на  $0.5g$  массу гирек (до 3-х грамм), повторить пункт 2.2.

2.4. Провести обработку результатов вычисления коэффициента жесткости пружины (рассчитать среднее значение), а также его погрешности вычисления (см. во введении п. 1.5-1.7. и формулу 3.9 для определения систематической погрешности в разделе «Обработка результатов»). Записать результат по форме  $k = (\bar{k} \pm \Delta k) \frac{H}{M}$ ,  $p=0,95$ .

### III. Определение удлинения пружины $L$ с помощью микрометра с ценой деления барабана $0,01$ мм.

3.1. Подвесить к нижнему концу пружины кольцо. Установить на столик сосуд с дистиллированной водой. Ослабив винт  $D$  (см. рис.3.4), опустить стержень  $C$  настолько, чтобы нижняя часть кольца отстояла от поверхности воды в сосуде на 5-6 мм. Установить кольцо по возможности параллельно поверхности воды.

3.2. Поднять столик (винтом  $A$ ) так, чтобы кольцо коснулось поверхности жидкости. Записать первое показание микрометра  $l_1$ . Медленно опускать столик. Как только произойдет отрыв кольца записать второе показание микрометра  $l_2$ . Рассчитать значение удлинения пружины  $L$ . Результаты внести в таблицу 3.

Таблица 3.

№ п/п	$l_{1i}, мм$	$l_{2i}, мм$	$L_i = (l_{2i} - l_{1i}), мм$	$(L_i - \bar{L}), мм$ $\bar{L} = \underline{\hspace{1cm}} мм$	$(L_i - \bar{L})^2, мм^2$
1					
2					
3					
4					
5					
			$\Sigma$		

3.3. Повторить, согласно пункту 3.2, измерения удлинения пружины 5 раз. Рассчитать среднее значение  $L$  и погрешности его определения (см. во введении п. 1.5-1.7. и формулу 3.10 для определения систематической погрешности в разделе «Обработка результатов»). Записать результат по форме  $L = (\bar{L} \pm \Delta L) м$ ,  $p=0,95$ .

### IV. Вычисление коэффициента поверхностного натяжения и его погрешности

4.1. Используя средние значения полученных величин  $\bar{d}_1, \bar{d}_2, \bar{k}, \bar{L}$ , рассчитать величину коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma$  по формуле

$$\sigma = \frac{\bar{k}\bar{L}}{\pi(\bar{d}_1 + \bar{d}_2)} \quad (3.7)$$

а также рассчитать погрешности определения этой величины (см. формулу 3.11 для определения систематической погрешности в разделе «Обработка результатов»). Записать

результат по форме  $\sigma = (\bar{\sigma} \pm \Delta\sigma) \frac{H}{м}$ ,  $p=0,95$ .

#### Обработка результатов измерений

Величины, входящие в формулу (3.7) являются результатами измерений разных типов. Измерения  $d_1$  и  $d_2$  есть результаты *прямых* измерений. Они обрабатываются стандартным способом, то есть рассчитываются среднеарифметические значения, случайные погрешности и систематические погрешности, равные точности нониуса штангенциркуля. Величины  $k$  и  $L$  – результаты *косвенных* измерений. При расчете погрешности  $k$  можно считать, что значения  $m$  и  $g$  известны точно. Тогда формула для расчета погрешности каждого отдельного значения  $k$  будет иметь вид

$$\Delta k = \bar{k} \frac{\sqrt{(\Delta N_n)^2 + (\Delta N_k)^2}}{|N_n - N_k|} \quad (3.8)$$

Здесь  $\Delta N_n = \Delta N_k = \Delta N = 0,5$  мм погрешности отсчета по зеркальной шкале, равные половине цены деления шкалы. Тогда формула (3.8) примет вид

$$\Delta k = k \sqrt{2} \Delta N / |N_n - N_k| \quad (3.9)$$

Очевидно, что погрешности  $\Delta k_i$  будут разными для различных  $k_i$ . Очевидно также очевидно, что максимальное значение погрешности будет в опыте с минимальной массой, так как значение  $|N_n - N_k|$  в этом случае самое маленькое. Именно эту погрешность будем считать систематической погрешностью измерения  $k$ , то есть  $\Delta_c k = (\Delta k)_{\max}$ . Тем самым измерения  $k$  искусственно сделаны равноточными. Далее рассчитывается среднеарифметическое значение  $k$  и случайная погрешность по правилам обработки равноточных измерений (см. введение, п.1.5 и 1.6).

Измерение  $L$  тоже косвенное. Учитывая, что  $\Delta l_1 = \Delta l_2 = \Delta l$ , где  $\Delta l$  – погрешность показания микрометра, равная  $\pm 1 \cdot 10^{-2}$  мм, формула для расчета погрешности отдельного измерения удлинения принимает простой вид  $\Delta L = \sqrt{2} \cdot \Delta l$ . Эта погрешность есть систематическая погрешность определения удлинения, то есть

$$\Delta_c L = \sqrt{2} \cdot \Delta l \quad (3.10)$$

Среднее значение  $L$  и случайная погрешность его рассчитывается обычным образом (см. введение, п.1.5 и 1.6).

Имея информацию о величинах, входящих в формулу (3.7), и их погрешностях, можно рассчитать среднее значение  $\sigma$ , подставив в (3.7) средние значения  $\bar{d}_1, \bar{d}_2, \bar{k}, \bar{L}$ , и погрешности  $\sigma$  по формуле

$$\Delta \sigma = \bar{\sigma} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta k}{\bar{k}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{\bar{L}}\right)^2 + \frac{(\Delta d_1)^2 + (\Delta d_2)^2}{(\bar{d}_1 + \bar{d}_2)^2}} \quad (3.11)$$

Подставив в эту формулу случайные, а затем систематические погрешности измеренных ранее величин, определяют случайные и систематические погрешности  $\sigma$ . Далее рассчитывается полная погрешность коэффициента поверхностного натяжения, записывается результат и проводится сравнение со справочными данными.

### Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление поверхностного натяжения жидкости?
2. Что такое коэффициент поверхностного натяжения? В каких единицах он выражается?
3. Как измеряется коэффициент поверхностного натяжения методом Жюли?.

## Лабораторная работа №4

### ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

#### Цель работы:

- определение значения коэффициента вязкости глицерина методом Стокса.

#### Краткая теория

Вязкость – важная физико-химическая характеристика веществ. Величина, обратная вязкости, называется текучестью. Её необходимо учитывать, например, при перекачке жидкостей и газов по трубопроводам, разливке расплавленных металлов, смазке машин и механизмов. В медицине вязкость крови определяет состояние организма – в норме или

при патологии. Вязкость крови повышается при [гипертонической болезни](#), [инфаркте миокарда](#) и др.; вязкость понижается при [анемиях](#).

Вязкостью или внутренним трением называется явление возникновения силы трения между слоями текущей жидкости или газа, параллельными направлению течения. Трение это возникает благодаря переносу импульса молекул от слоя к слою в направлении, перпендикулярном направлению течения.

При течении жидкости слой ее, прилегающий к твердому телу, например, к стенке трубы, как бы «прилипает» к ней, так что его скорость равна нулю. Составляющая суммарного импульса в направлении движения жидкости молекул, принадлежащих этому слою равна нулю. Из-за хаотичности движения некоторые молекулы из первого слоя попадают во второй слой, перенося в него свой нулевой импульс и, тем самым, тормозя его. Молекулы этого слоя имеют суммарную составляющую импульса в направлении движения уже отличную от нуля. Аналогичным образом второй слой замедление движения третьего и т.д. В результате наибольшей скоростью обладают те слои жидкости, которые наиболее удалены от твердого тела (стенки). Скорости всех остальных слоев уменьшаются по мере приближения к твердому телу.

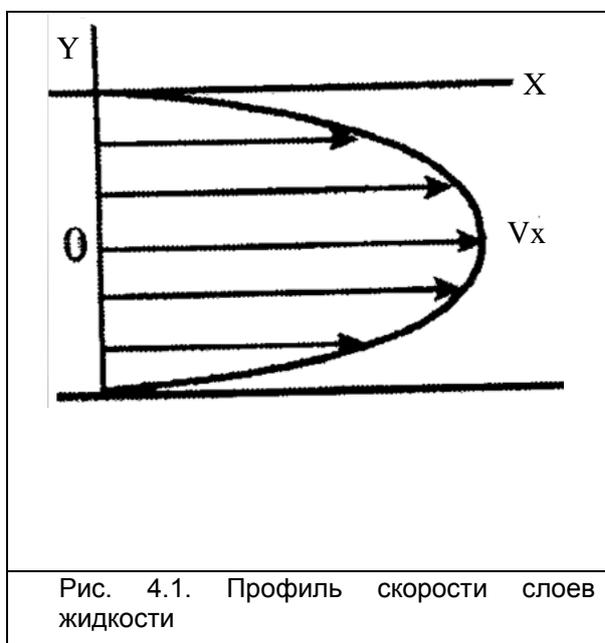


Рис. 4.1. Профиль скорости слоев жидкости

Изменение импульса от слоя к слою возможно только при наличии силы, которая называется силой внутреннего трения и определяется формулой, предложенной Ньютоном

$$F = \eta \frac{\partial V_x}{\partial y} S \quad (4.1)$$

Здесь производная  $\partial V_x / \partial y$  есть, так называемый, градиент скорости в направлении, перпендикулярном движению жидкости, то есть величина, равная изменению скорости в направлении Y, когда жидкость течет в направлении X. S – площадь слоя, к которой приложена сила. Множитель  $\eta$  – так называемый коэффициент внутреннего трения или коэффициент вязкости (иногда

говорят просто – вязкость).

Величина вязкости определяется только характером межмолекулярных взаимодействий и поэтому ее измерение важно для определения параметров потенциала взаимодействия молекул. Кроме того, измерение вязкости важно и прикладном плане, поскольку для расчетов течения газов и жидкостей по трубопроводам, для расчетов сил сопротивления, действующих на тела при их движении в различных средах и т.п. необходимо знание коэффициентов вязкости.

Сила внутреннего трения возникает как при движении жидкости относительно покоящегося твердого тела, так и при движении твердого тела относительно покоящейся жидкости. Последняя ситуация и используется при измерении вязкости по методу Стокса.

Вязкость среды наряду с другими факторами (форма тела, условия обтекания и т.д.) определяет силу сопротивления, действующую на движущееся в этой среде тело. Простые соображения подсказывают, что на шар, движущийся в жидкости, будет действовать сила сопротивления, зависящая от вязкости жидкости –  $\eta$ , радиуса шара –  $r$  и скорости его движения –  $V$ . Другими словами,  $F \approx \eta^A \cdot r^B \cdot V^C$ . Конкретный вид зависимости (с

точность до постоянного коэффициента), то есть величины  $A$ ,  $B$  и  $C$ , можно установить из так называемых соображений размерности, которые говорят о том, что размерности правой и левой части любого уравнения должны быть одинаковы. Следовательно,

$$[F] \approx [\eta]^A \cdot [r]^B \cdot [V]^C \quad (4.2)$$

Размерность силы  $[F]=H=k_2 \cdot m \cdot c^{-2}$ , размерность радиуса  $[r]=m$ , размерность скорости  $[V]=m \cdot c^{-1}$ , а размерность вязкости, согласно уравнению (4.1), есть  $[\eta]=k_2 \cdot m^{-1} \cdot c^{-1}$ . Тогда в соответствии с уравнением (2) должно быть

$$k_2 \cdot m \cdot c^{-2} = (k_2 \cdot m^{-1} \cdot c^{-1})^A (m)^B (m \cdot c^{-1})^C = k_2^A \cdot m^{-A+B+C} \cdot c^{-A-C}$$

Это возможно, если

$$\begin{cases} A = 1 \\ -A + B + C = 1 \\ -A - C = -2 \end{cases} \text{ Решая эту систему уравнений, получаем } A=1, B=1 \text{ и } C=1.$$

Итак, соображения размерности дают такую зависимость -  $F \approx \eta \cdot r \cdot V$ . Строгая формула для силы сопротивления, действующей на шар, движущийся в безграничной жидкости, была получена Стоксом и имеет вид

$$F = 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot V \quad (4.3)$$

Важно понимать, что эта формула получена при условии так называемого *ламинарного* обтекания шара, то есть такого, при котором слои жидкости можно считать параллельными друг другу. Такие условия практически выполняются при достаточно малых скоростях движения шара. Если это условие не выполнено, то в жидкости образуются вихри (*турбулентное* течение) и тогда о вязкости, как о свойстве вещества, говорить нельзя.

Для оценки ламинарности существует специальный критерий, называемый числом Рейнольдса –  $Re$ . Для каждого вида течения существует такое критическое значение числа Рейнольдса ( $Re_{кр}$ ), что при условии  $Re \leq Re_{кр}$  возможно только ламинарное течение. В частности, при движении в жидкости шаров формула для расчета числа Рейнольдса и его критическое значение следующие

$$Re = \frac{\rho_{ж} \cdot V \cdot r}{\eta}, \quad Re_{кр} = 10. \quad (4.4)$$

### Методика эксперимента

Метод Стокса для определения вязкости состоит в измерении установившейся скорости падения шарика в исследуемой жидкости. Очевидно, что на шарик, падающий в

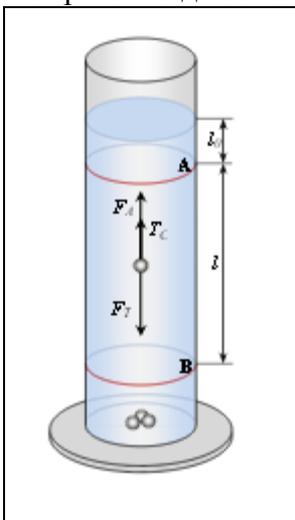


Рис. 4.2. Схема экспериментальной установки

жидкости, действуют три силы: сила тяжести ( $\vec{F}_T$ ), сила Стокса ( $\vec{F}_c$ ) и сила Архимеда ( $\vec{F}_A$ ). Сила Стокса задается формулой (4.3). Учитывая, что объем шарика вычисляется по формуле  $V = \frac{4}{3} \pi r^3$  ( $r$  – радиус шарика), то силу тяжести и силу Архимеда можно записать так

$$F_T = mg = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{ш} g, \quad F_A = \rho_{ж} V g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{ж} g$$

где  $\rho_{ш}$  и  $\rho_{ж}$  – плотности материала шарика и жидкости соответственно.

Сила Стокса зависит от скорости, поэтому она будет возрастать при падении шарика, а значит, будет возрастать и сила сопротивления. Этот рост будет продолжаться до тех пор, пока сила Стокса не уравновесит сумму силы тяжести и Архимеда. В случае такого равновесия скорость шарика перестанет изменяться и он

будет двигаться с некоторой установившейся скоростью.

Итак, при установившемся движении выполняется равенство

$$\vec{F}_T = \vec{F}_A + \vec{F}_c \text{ или } \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{ш} g = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{ж} g + 6\pi\eta Vr.$$

Тогда, если измерена установившаяся скорость, значение вязкости может быть вычислено как

$$\eta = \frac{2}{9} r^2 g \frac{\rho_{ш} - \rho_{ж}}{V} \quad (4.5)$$

В эксперименте используется стеклянный сосуд (Рис. 4.2) диаметром около 40 мм, заполненный глицерином ( $\rho_{ж}=1,26 \text{ г/см}^3$ ), имеющий миллиметровую шкалу. Цилиндр закрыт пробкой с воронкой, в которую опускается стальной шарик ( $\rho_{ш}=7,85 \text{ г/см}^3$ ). На цилиндре имеются две метки. Положения верхней ( $h_в$ ) и нижней ( $h_н$ ) метки отсчитываются по шкале. Таким образом, систематическая погрешность  $\Delta h_в = \Delta h_н = \Delta h = 1 \text{ мм}$ .

Если измерить время  $t$  прохождения шарика от верхней метки до нижней, нетрудно определить скорость установившегося движения

$$V = l/t = \frac{|h_в - h_н|}{t} \quad (4.6)$$

Теперь формулу (4.5) можно записать через результаты прямых измерений:

$$\eta = \frac{2}{9} g (\rho_{ш} - \rho_{ж}) \frac{d^2}{4} \frac{t}{|h_в - h_н|} \quad (4.7)$$

В этой формуле  $d$  – диаметр шарика, который измеряется микрометром. Правила измерения с помощью микрометра описаны во **введении, п.1.9**.

Для измерения времени  $t$  в эксперименте используется секундомер, систематическую погрешность которого можно оценить по формуле

$$\Delta t = 0,01(1+t) \quad (4.8)$$

### Порядок выполнения работы

1. Измерить с помощью микрометра диаметр шарика ( $d$ ). Полученное значение записать в таблицу.

2. Выбрать верхнюю метку на несколько сантиметров ниже уровня жидкости, чтобы к тому моменту, когда шарик будет проходить мимо нее, движение его было установившимся. По шкале определить положение верхней метки  $h_в$ . Выбрать положение нижней метки. По шкале определить положение нижней метки  $h_н$ . Записать полученные значения в таблицу.

3. Опустить шарик в цилиндр через воронку. В случае образования пузырьков воздуха на поверхности шарика необходимо взять другой шарик и повторить данный опыт. В момент прохождения шарика мимо верхней метки включите секундомер и остановите его в момент прохождения шариком нижней метки. В процессе наблюдения за шариком, в момент прохождения им метки, глаз должен находиться на одном уровне с меткой. Измерить время прохождения  $t$  между метками. Результаты измерения времени занесите в таблицу.

4. Рассчитать скорость установившегося движения по формуле (4.6). Результат внести в таблицу.

5. Рассчитать величину вязкости глицерина по формуле (4.7). Результат внести в таблицу.

6. Определить погрешность вязкости, как погрешность косвенного измерения (см. во введении п. 1.5-1.7).

7. Согласно пунктам 1-6 повторить измерения с несколькими шариками разных диаметров. Результаты измерения занести в таблицу:

Таблица.

N	d, мм	h <sub>в</sub> , мм	h <sub>н</sub> , мм	t, с	Δt, с	V, м/с	η, нс/м <sup>2</sup>	Δη, нс/м <sup>2</sup>	Re
1									
2									
n									

### Обработка результатов измерения

Так как среди шариков, используемых в опыте, могут оказаться такие, у которых скорость движения настолько велика, что для них  $Re$  может превысить  $Re_{кр}$ , то следует вычислить значение  $Re$  для всех шариков и занести их в таблицу. Результаты, для которых значение  $Re$  больше критического значения, в дальнейшем при вычислении среднего учитывать не следует.

Значение вязкости, рассчитанное по формуле (4.7) есть результат косвенного измерения. Поэтому погрешность  $\Delta\eta$  определяется как погрешность косвенного измерения, считая, что величины  $g$ ,  $\rho_{ш}$  и  $\rho_{ж}$  известны точно и рассчитывается по формуле

$$\Delta\eta = \eta \sqrt{4\left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 + \frac{(\Delta h_e)^2 + (\Delta h_n)^2}{(h_e - h_n)^2}} \quad (4.9)$$

В результате такой обработки получится несколько значений  $\eta$  и  $\Delta\eta$ . Причем величины  $\Delta\eta$  будут разные. Максимальную из всех погрешностей возьмем за систематическую погрешность данного метода определения  $\eta$ . То есть будем считать  $\Delta_c\eta = (\Delta\eta)_{\max}$ .

Далее необходимо рассчитать среднее значение коэффициента вязкости, случайную погрешность, используя алгоритм, описанный во введении.

№ п/п	η, нс/м <sup>2</sup>	(η <sub>i</sub> - $\bar{\eta}$ ), нс/м <sup>2</sup> $\bar{\eta} = \text{--- нс/м}^2$	(η <sub>i</sub> - $\bar{\eta}$ ) <sup>2</sup> , (нс/м <sup>2</sup> ) <sup>2</sup>
1			
2			
3			
	$\Sigma$		

Такой прием (не очень обоснованный) позволяет считать в дальнейшем, что все величины  $\eta$  равнозначны и применять известные формулы для определения наилучшей оценки  $\eta$  и его погрешности. Другими словами наилучшей оценкой  $\eta$  будет среднеарифметическое отдельных измерений. Случайная погрешность определяется по формуле

$$\Delta\eta = t_{N,p} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\eta_i - \bar{\eta})^2}{N(N-1)}}$$

Наконец, полная погрешность есть  $\Delta\eta = \sqrt{((\Delta_c\eta)^2 + (\Delta^0\eta)^2)}$ . Окончательный результат обработки данных одной таблицы можно представить в виде:

$$\eta = (\bar{\eta} \pm \Delta\eta) \frac{hc}{M^2}, p=0,95.$$

Теперь можно провести сравнение полученного результата с табличными данными.

Контрольные вопросы

1. Дайте понятие вязкости жидкости.
2. Какие виды течений жидкости Вы знаете? Что такое число Рейнольдса?
3. Что такое сила Стокса? Какова область применения формулы для расчёта силы Стокса?
4. Вывести формулу для определения значения вязкости жидкости.
5. Как вязкость жидкости зависит от температуры?

### Лабораторная работа №5.

#### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСВЕЛЛА МОЛЕКУЛ ПО СКОРОСТЯМ.

##### **Цель работы:**

- знакомство с компьютерной моделью, описывающей поведение молекул идеального газа;
- экспериментальное подтверждение распределения Максвелла молекул идеального газа по скоростям;
- экспериментальное определение массы молекул в рамках данной модели.

##### **Краткая теория**

Молекулы газа вследствие теплового движения испытывают многочисленные столкновения друг с другом. При каждом столкновении скорости молекул изменяются как по величине, так и по направлению. В результате в сосуде, содержащем большое число молекул, устанавливается некоторое статистическое распределение молекул по скоростям, зависящее от температуры  $T$ . При этом все направления векторов скоростей молекул оказываются равноправными (равновероятными), а величины скоростей подчиняются определённой закономерности.

Распределение молекул газа по величине скоростей называется **распределением Максвелла**.

Если одновременно измерить скорости большого числа  $N$  молекул газа и выделить некоторый малый интервал скоростей от  $v$  до  $v + \Delta v$ , то в выделенный интервал  $\Delta v$  попадает некоторое число  $\Delta N$  молекул. На графике удобно изображать зависимость величины  $\frac{\Delta N}{\Delta v}$  от скорости  $v$ .

При достаточно большом числе  $N$  эта зависимость изображается плавной кривой, имеющей максимум при  $v = v_{\max} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$  - **наиболее вероятная скорость**. Здесь  $m$  - масса молекулы,  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К - постоянная Больцмана.

Характерным параметром распределения Максвелла является так называемая **среднеквадратичная скорость**  $v_{\text{кв}} = \sqrt{\langle v^2 \rangle}$ , где  $\langle v^2 \rangle$  - среднее значение квадрата модуля скорости. В молекулярной физике доказывается, что

$$v_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}, \text{ где } \mu - \text{ молярная масса.}$$

Из выражения для среднеквадратической скорости следует, что **средняя кинетическая энергия поступательного движения** молекул газа есть

$$\langle W \rangle = \frac{m \langle v^2 \rangle}{2} = \frac{3}{2} kT.$$

Распределение Максвелла является одной из важнейших статистических закономерностей молекулярной физики.

ВЕРОЯТНОСТЬЮ  $P_i$  получения некоторого результата измерения называется предел отношения количества измерений, давших этот результат, ( $N_i$ ) к полному числу измерений  $N$ , когда  $N \rightarrow \infty$ .

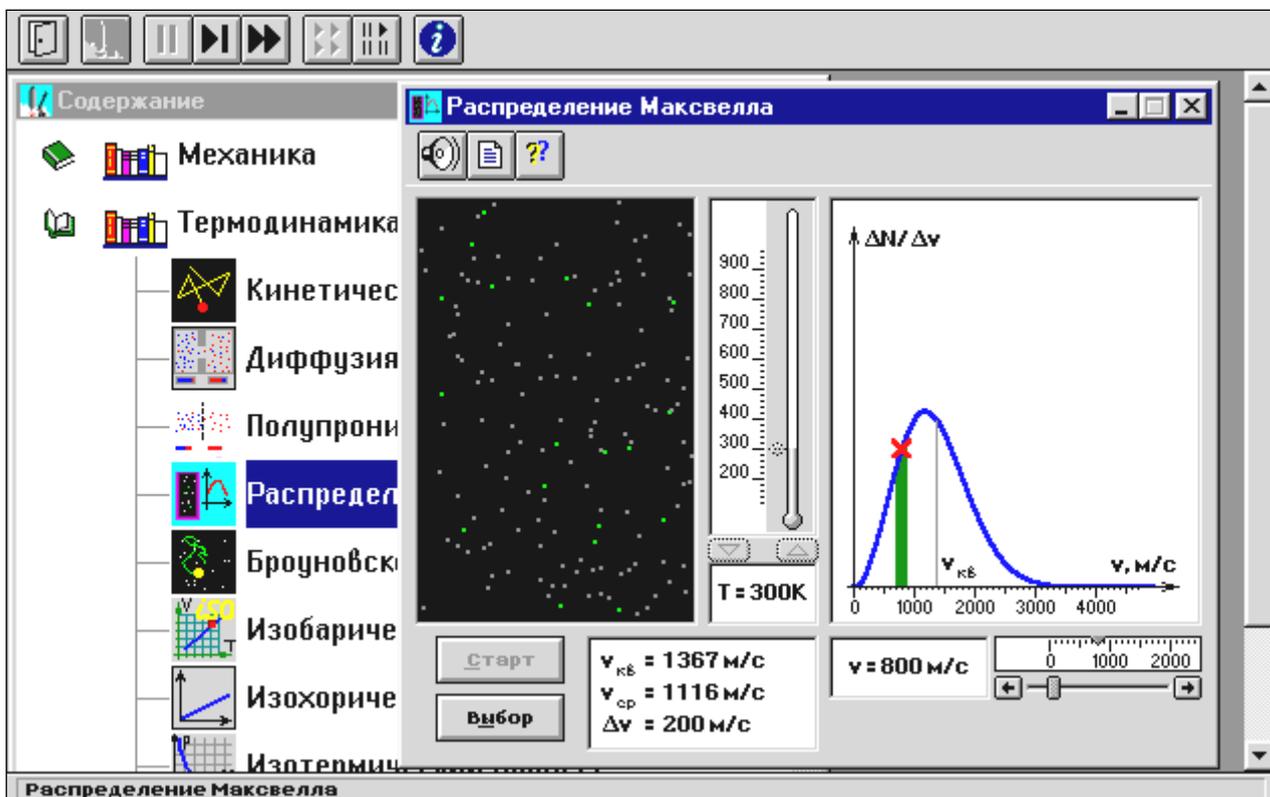
ЭЛЕМЕНТАРНОЙ вероятностью  $dP_v$  при измерении величины скорости  $v$  называется вероятность наличия скорости величиной от  $v$  до  $v + dv$ . Эта вероятность пропорциональна приращению скорости  $dv$ :  $dP_v = F(v) dv$ , где коэффициент пропорциональности  $F(v)$  называется ФУНКЦИЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ молекул по величине скорости.

Можно доказать, что распределение Максвелла молекул по скоростям описывается функцией

$$F(v) = \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\left( \frac{mv^2}{2kT} \right)} 4\pi v^2.$$

$$\langle v \rangle = \int_0^{\infty} v F(v) dv = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} - \text{ средняя арифметическая скорость молекул.}$$

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ.



1. Внимательно рассмотрите изображение на экране монитора компьютера. Обратите внимание на систему частиц, движущихся в замкнутом объеме слева во внутреннем окне. Они абсолютно упруго сталкиваются друг с другом и со стенками сосуда. Их количество около 100, и данная система является хорошей «механической» моделью идеального газа. В процессе исследований можно останавливать движение всех молекул (при нажатии кнопки «||» вверху) и получать как бы «мгновенные фотографии», на которых выделяются более ярким свечением частицы (точки), скорости которых лежат в заданном диапазоне  $\Delta v$  вблизи заданной скорости  $v$  (то есть имеющие скорости от  $v$  до  $v + \Delta v$ ). Для продолжения наблюдения движения частиц надо нажать кнопку «▶▶». Запишите значение  $\Delta v$ , указанное на экране.

2. Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

### ИЗМЕРЕНИЯ

1. Нажмите кнопки «▶▶», «СТАРТ» и «ВЫБОР» и установите температуру  $T_1$ , указанную в Табл. 1 для вашей подгруппы. Запишите для нее значение наивероятнейшей скорости.

2. Установите скорость выделенной группы молекул вблизи минимального заданного в Табл. 2 значения.

3. Нажмите клавишу «||» и подсчитайте на «мгновенной фотографии» количество молекул  $\Delta N$ , скорости которых лежат в заданном диапазоне  $\Delta v$  вблизи заданной скорости молекул  $v$  (они более яркие). Результат запишите в Табл. 2.

4. Нажмите кнопку «▶▶» и через 10-20 секунд получите еще одну мгновенную фотографию (нажав кнопку «||»). Подсчитайте количество частиц с заданной скоростью. Результат запишите в Табл. 2.

5. Повторите еще один раз измерения для данной скорости, и результаты запишите в Табл. 2.

6. Проведите аналогичные измерения для 10-12 значений скорости в диапазоне их изменения (чаще вблизи наивероятнейшей скорости).

7. Установите (как в п. 1) вторую температуру  $T_2$  из Табл. 1. Запишите для нее значение наивероятнейшей скорости.

8. Повторите измерения (по пунктам 2, 3, 4, 5), записывая результат в Табл. 3, аналогичную Табл. 2.

**ТАБЛИЦА 1. Примерные значения температуры (не перерисовывать)**

подгруппа	1	2	3	4	5	6	7	8
$T_1$	160	200	260	300	360	400	460	500
$T_2$	700	740	760	800	840	860	900	960

**ТАБЛИЦЫ 2,3 Результаты измерений при  $T = \text{___ K}$**

$v, \text{м/с}$	200											
$\Delta N_1$												
$\Delta N_2$												
$\Delta N_3$												
$\Delta N_{\text{СР}}$												

## Обработка результатов измерений.

1. Вычислите и запишите в таблицы средние значения количества частиц  $\Delta N_{\text{СР}}$ , скорости которых лежат в данном диапазоне от  $v$  до  $v + \Delta v$ .
2. Постройте на одном рисунке графики экспериментальных зависимостей  $\Delta N_{\text{СР}}(v)$ .
3. Для каждой температуры определите экспериментальное значение наивероятнейшей скорости молекул  $v_{\text{ВЕР}}$ .
4. Из формулы  $v_e = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$  определите значение массы молекулы газа, используя экспериментальное и теоретическое значения  $v_{\text{В}}$ .
5. Подберите газ, масса молекулы которого достаточно близка к измеренной массе молекулы.
6. Сделайте вывод по работе.

### Табличные значения

Газ	Водород	Гелий	Неон	Азот	Кислород
Масса молекулы, $\times 10^{-27}$ кг	3,32	6,64	33,2	46,5	53,12

### Контрольные вопросы

1. Что такое функция распределения?
2. Каковы особенности графика функции распределения величины скорости молекул идеального газа?
3. Как график функции распределения скоростей молекул газа зависит от температуры?
4. Напишите формулу для вычисления среднего значения скорости молекул.
5. Напишите формулу для вычисления средней квадратичной скорости молекул.
6. Напишите условие для вычисления наивероятнейшей скорости молекул.
7. Вычислите, на сколько процентов отличаются средняя и средняя квадратичная скорости молекул идеального газа.
8. Вычислите, на сколько процентов отличаются средняя и наивероятнейшая скорости молекул идеального газа.

## Лабораторная работа №6.

### ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА. КОЛЬЦА НЬЮТОНА.

#### Цель работы:

- знакомство с моделированием явления интерференции света в тонких плёнках;
- изучение интерференции полос равной толщины на примере 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).

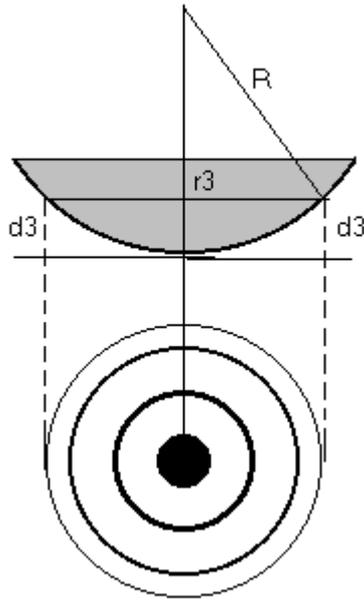


Рис.1

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 концентрических 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

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

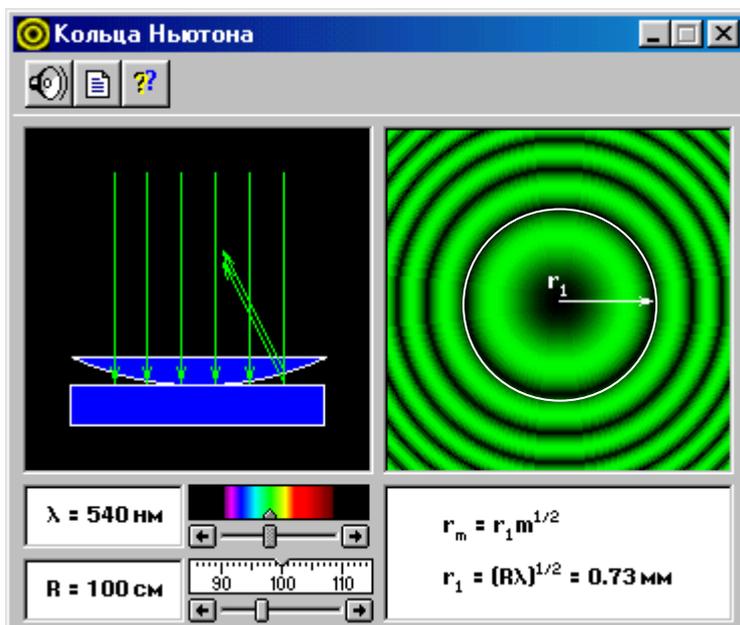
Вследствие деформации стекла, а также наличия на стекле пылинок невозможно добиться плотного примыкания линзы и пластины в одной точке. Поэтому при определении радиуса кривизны линзы пользуются другой формулой, в которую входит комбинация из двух значений радиусов интерференционных колец  $r_m$  и  $r_n$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

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

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ.

1. Внимательно рассмотрите окно опыта, показанное на рисунке 2.
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.**

Подгруппы	$\lambda_1$ , 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.**

$\lambda_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ $R_1 = \underline{\hspace{2cm}}$				$\lambda_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ $R_2 = \underline{\hspace{2cm}}$			
$r_3$	$r_5$	$r_4$	$r_6$	$r_3$	$r_5$	$r_4$	$r_6$
$R_1^* =$		$R_2^* =$		$R_3^* =$		$R_4^* =$	

### Контрольные вопросы

1. Что такое интерференция света?
2. Какие волны называются когерентными?
3. Каковы условия максимума и минимума интенсивности при интерференции света?
4. Проведите расчёт интерференционной картины в тонкой плёнке.
5. Что такое полосы равной толщины и равного наклона?
6. Как изменится картина колец Ньютона, если воздушный зазор между линзой и пластиной заполнить водой?
7. Как изменится картина колец Ньютона, если наблюдение проводить в проходящем свете?
8. Почему масляное пятно на поверхности жидкости имеет радужную окраску?
9. Объясните, как явление интерференции света используется в интерферометрах?

### Лабораторная работа №7.

#### ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ДИФРАКЦИИ.

##### **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.**

В основе современной квантовой физики лежит представление о двойственной природе всех материальных объектов: они обладают как волновыми, так и корпускулярными свойствами. Согласно гипотезе французского физика Луи де Бройля каждому телу массой  $m$ , движущемуся со скоростью  $v$ , соответствует волновой процесс с длиной волны

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p}, \quad \text{где } h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с} - \text{постоянная Планка.}$$

Наиболее ярко волновые свойства проявляются у микрообъектов (элементарных частиц). Вследствие малой массы длина волны де Бройля оказывается сравнимой с межатомными расстояниями в кристаллах. В этих условиях при взаимодействии пучка частиц с кристаллической решёткой возникают дифракционные явления. Электронам с энергией 150 эВ соответствует длина волны  $\lambda \approx 10^{-10}$  м. Такого же порядка межатомные расстояния в кристаллах. Если пучок таких электронов направить на кристалл, то будет наблюдаться их дифракция. Зафиксированная на фотоплёнке дифракционная картина (электроннограмма) содержит информацию о строении трёхмерной кристаллической решётки.

Моделью дифракции электронов на кристаллах может служить виртуальный эксперимент по дифракции электронов на одномерной решётке. С волновой точки зрения этот эксперимент полностью эквивалентен оптическому опыту с дифракционной решёткой. Положения главных дифракционных максимумов определяются формулой решётки

$$d \sin \Theta_m = m \lambda,$$

где  $d$  – период решётки,  $\Theta_m$  – угол дифракции,  $m$  – целое число (порядок дифракционного максимума),  $\lambda$  – длина волны де Бройля.

При малых углах дифракции

$$\Theta_m \approx m \lambda / d.$$

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

$$x_m \approx L \Theta_m \approx m L \left( \frac{\lambda}{d} \right)$$

В квантовой физике распределение интенсивности в дифракционной картине интерпретируется как распределение вероятности попадания электрона в различные точки экрана. Каждый электрон взаимодействует с решёткой как волна (т.е. со всей решёткой в целом), но на экране он локализуется в определённой точке. Таким образом, дифракционная картина на экране возникает как результат вероятностного процесса.

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.

## ДОПОЛНЕНИЕ.

**ЭЛЕКТРОНОГРАФИЯ** – метод исследования структуры кристаллических веществ, основанный на дифракции ускоренных электрическим полем электронов. Он применяется для изучения атомной структуры кристаллов, аморфных тел и жидкостей, молекул газов и паров. Сильное взаимодействие электронов с веществом ограничивает толщину просвечиваемых образцов десятками долями микрометра. Поэтому методами электронографии изучают атомную структуру мелкокристаллических веществ, структуру поверхностей твёрдых тел, например, при исследовании явлений коррозии металлов, адсорбции и катализа.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

Запустите программу «Квантовая физика». Выберите: «Дифракция электронов». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения.

Внимательно рассмотрите схему опыта на экране монитора.

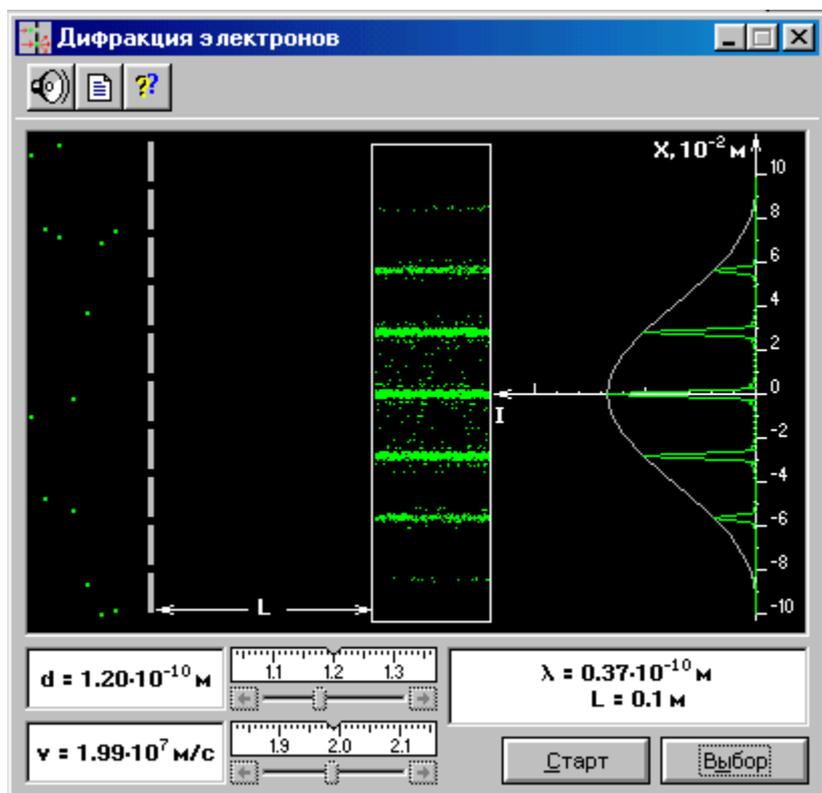


Рис.1

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 подгруппы.
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 подгруппы и повторите эти измерения ещё раз.

6. Рассчитайте для каждого значения  $x_m$  по формуле (6) период дифракционной решётки  $d$ , запишите эти данные в Табл.2 и сравните полученное среднее значение с установочным.

7. Проведите оценку погрешности измерений.

**Таблица 1. Значения скорости электронов**

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

**Таблица 2. Результаты измерений и расчётов**

$v_1 =$					$v_2 =$				
$\lambda$	$x_{m1}$	$x_{m2}$	$x_{m3}$	$d_{\text{э сред}}$	$\lambda$	$x_{m1}$	$x_{m2}$	$x_{m3}$	$d_{\text{э сред}}$
$d_{\text{э}}$					$d_{\text{э}}$				

### Контрольные вопросы

1. В чём заключается явление дифракции волн?
2. Сформулируйте принцип Гюйгенса-Френеля.
3. Рассмотрите дифракцию световых волн на одной щели в параллельных лучах.
4. Что такое дифракционная решётка?
5. Приведите схему наблюдения дифракции света на дифракционной решётке.
6. Запишите условия для главных максимумов и минимумов дифракционной решётки.
7. Назовите основные отличия кристаллических тел от аморфных.
8. Что такое кристаллическая решётка?
9. Чем отличаются монокристаллы от поликристаллов?
10. Как можно классифицировать кристаллы?
11. Сформулируйте условие Вульфа-Брэгга.
12. Какую информацию можно получить из анализа электронограммы?

### Лабораторная работа №8.

### ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

#### Цель работы:

- : изучить природу явления поляризации света;
- ; рассмотреть принципы действия поляризаторов;
- экспериментально изучить закон Малюса.

## Краткая теория.

Свет представляет собой совокупность электромагнитных волн определённого диапазона. Электромагнитные волны поперечны: колебания векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  происходят во взаимно перпендикулярных плоскостях перпендикулярно направлению распространения волны.

В *естественном* свете колебания этих векторов происходят во всевозможных направлениях, хаотически. Если колебания векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  каким-либо образом упорядочены, то такой свет называют *поляризованным*. Вектор  $\vec{E}$  иногда называют световым вектором. Плоскость, проходящая через световой вектор и направление распространения волны, называется плоскостью поляризации линейно поляризованной волны.

В случае, когда колебания светового вектора в электромагнитной волне происходят в одной определенной плоскости, свет называют *плоско поляризованным* или *линейно поляризованным*.

Плоско поляризованный свет можно получить из естественного, в частности, при отражении от границы двух диэлектриков или при двойном лучепреломлении в некоторых кристаллах.

Последнее явление лежит в основе устройства призмы Николя. Для получения и исследования поляризованного света используют и поляриды – целлулоидную плёнку, в которую введено большое количество одинаково ориентированных кристалликов сульфата йодистого хинина (в этих кристаллах один из лучей поглощается на пути примерно 0.1мм из-за явления дихроизма).

Если естественный свет проходит через два последовательно установленных поляризатора (второй в этом случае называют анализатором), то интенсивность прошедшего света зависит от угла  $\Delta\varphi$  между главными плоскостями поляризатора и анализатора – теми плоскостями поляризации света, которые пропускает поляризатор и анализатор, т.е.:

$$I = \frac{I_0}{2} \cos^2 \Delta\varphi, \text{ где } I_0 - \text{интенсивность падающего на поляризатор естественного света.}$$

Это соотношение известно как *закон Малюса*.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ.

Запустите программу «Оптика». Выберите: «Поляризаторы». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения.

Рассмотрите схему опыта на экране монитора.

1. Установите угол  $\varphi_1$ , соответствующий положению главной плоскости поляризатора, в положение  $\varphi_1 = 0$ .

2. Аналогичным образом установите первое значение угла  $\varphi_2$  главной плоскости анализатора.

3. Определите значение отношения  $\frac{I}{I_0}$  и запишите его в таблицу 1.

4. Повторите измерения для следующих значений  $\varphi_2$ , увеличивая угол на  $10^\circ$  от  $0$  до  $360^\circ$ .

5. Постройте диаграмму зависимости  $\frac{I}{I_0}$  от  $\Delta\varphi$ .

6. Определите графически  $\frac{I}{I_0}$  для значения  $\Delta\varphi$ , заданного преподавателем.

7. Проанализируйте полученные результаты.

Таблица.

$\Delta\varphi(^{\circ})$	0	10	20	30	40	50	60	70	...
$\frac{I}{I_0}$									

### Контрольные вопросы.

1. Какой свет называется естественным?
2. Какой свет называется поляризованным?
3. Дайте определение плоско поляризованному свету.
4. Что такое частично поляризованный свет?
5. Сформулируйте закон Брюстера.
6. Объясните природу двойного лучепреломления.
7. Начертите ход лучей в призме Николя.
8. Что такое поляроид?
9. Сформулируйте закон Малюса.

### Лабораторная работа №9.

#### КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ КОЛОРИМЕТРИЯ

##### Цель работы:

- познакомиться с методом определения концентрации окрашенных растворов с помощью концентрационного колориметра.

##### Краткая теория

Интенсивность света, распространяющегося в среде, уменьшается в результате поглощения и рассеяния его молекулами и атомами вещества.

Поглощением света называют ослабление интенсивности света при прохождении через любое вещество вследствие превращения световой энергии в другие виды.

Закон поглощения в однородной среде для параллельного пучка монохроматического света был установлен экспериментально П. Бугером и гласит:

*в каждом последующем слое среды одинаковой толщины поглощается одинаковая часть потока энергии падающей на него световой волны независимо от его абсолютной величины.*

Теоретически закон поглощения был выведен И. Ламбертом и записывается в следующем виде:

$$I_d = I_0 \cdot e^{-k_\lambda d},$$

где  $I_0$  и  $I_d$  – интенсивности света на входе и выходе из слоя среды толщиной  $d$ ,  $k_\lambda$  – натуральный показатель поглощения среды, который зависит от химической природы,

состояния поглощающей среды и от длины волны падающего света. Показатель поглощения  $k_\lambda$  – величина, обратная расстоянию, на котором интенсивность плоской монохроматической волны уменьшается в  $e = 2.718$  раза.

Для разбавленного раствора поглощающего вещества в непоглощающем растворителе выполняется **закон Бера**:

$$k_\lambda = \chi_\lambda c,$$

где  $\chi_\lambda$  – показатель поглощения для раствора единичной концентрации,  $c$  – концентрация окрашенного раствора.

В растворах большой концентрации закон Бера нарушается из-за влияния взаимодействия между близко расположенными молекулами поглощающего вещества.

В лабораторной практике обобщённый закон поглощения (**закон Бугера-Ламберта-Бера**) часто выражают показательной функцией с основанием 10:

$$I_d = I_0 \cdot 10^{-\chi_\lambda c d}.$$

Отношение  $\tau = I_d/I_0$  – называют коэффициентом пропускания, а величину  $D = \lg \frac{1}{\tau} = \lg \frac{I_0}{I_d}$  – оптической плотностью раствора.

Из закона Ламберта-Бугера Бера следует, что

$$D = \chi_\lambda c d.$$

На законе Бугера-Бера основан метод определения концентрации растворов, для этой цели используют: визуальные колориметры, фотоколориметры, фотоэлектроколориметры.

В визуальных колориметрах, свет, проходящий через измеряемый раствор, освещает одну часть поля зрения, в то время как на другую часть падает свет, прошедший через раствор того же вещества, концентрация которого известна. Изменяя толщину ( $d$ ) слоя одного из сравниваемых растворов или интенсивность  $I$  светового потока, наблюдатель добивается, чтобы цветовые тона двух частей поля зрения были неотличимы на глаз.

На основании закона Бугера-Ламберта-Бера можно показать, что при этом уравниваются и их оптические плотности  $D_0$  и  $D_x$ . Поскольку коэффициент поглощения у растворов один и тот же, то

$$c_0 d_0 = c_x d_x, \text{ где } d_0 - \text{толщина стандартного раствора,} \\ d_x - \text{толщина измеряемого раствора}$$

Следовательно

$$\frac{c_x}{c_0} = \frac{d_0}{d_x}$$

$$\text{и } c_x = c_0 \frac{d_0}{d_x}$$

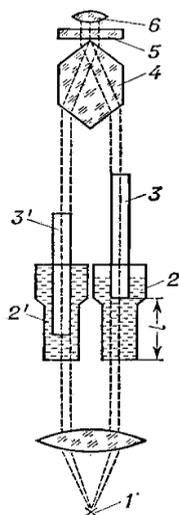


Рис. 1. Оптическая схема визуального колориметра типа КОЛ-1М. Уравнивание по цвету двух полей, соответствующих измеряемому и стандартному растворам и наблюдаемых в окуляр 6, осуществляется изменением толщины 1 слоя измеряемого раствора при перемещении плунжера (стеклянного столбика) 3, с которым связана шкала прибора. 1 — источник света, 2 и 2' — кюветы с измеряемым и стандартным растворами; 3, 3' — плунжеры; 4 — призма; 5 — сменные цветные светофильтры.

Различные колориметры применяют для диагностических, гигиенических и экспериментальных исследований.

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ.

В виртуальной работе изменение освещённости поля (т.е. оптической плотности) происходит не за счёт изменения толщины слоя раствора искомой концентрации, а с помощью диафрагмы, изменяющей освещённость таким образом, чтобы оптическая плотность менялась по линейному закону.

Виртуальный колориметр измеряет оптическую плотность  $D$  (в относительных единицах) в зависимости от вводимых значений концентрации.

1. В папке **Лабораторные работы** откройте файл **Фотометрия**.
2. Получите задание (значение оптической плотности для определения концентрации) от преподавателя или щёлкнув мышью по кнопке **Задание**.
3. В окне **М** введите значение концентрации в десятичных долях.
4. Щёлкните мышью на кнопке **Ввести** и, передвигая мышью движок на клавише **Диаграмма**, добейтесь одинаковой яркости двух полей зрения в левом углу открытого окна.
5. Щёлкните мышью на кнопке **Добавить**. На экране появится соответствующее значение оптической плотности.
6. Задавая ряд значений концентрации, получите соответствующие значения оптической плотности. Результаты занесите в таблицу.
7. Постройте график зависимости  $D = f(c)$ .

8. Определите по графику концентрацию раствора для предложенной Вам оптической плотности.
9. Определите по графику значение погрешности измерения концентрации.
10. Запишите результат измерения с учётом погрешности.
11. Сделайте вывод по работе.

#### **Контрольные вопросы**

1. Явление поглощения света (определение).
2. Что называют интенсивностью света?
3. Приведите вывод закона поглощения света Бугера.
4. Натуральный показатель поглощения, его физический смысл.
5. Закон Бера, условия его применимости.
6. Сформулируйте закон Бугера-Ламберта-Бера.
7. Суть метода концентрационной колориметрии.
8. Что называют коэффициентом пропускания раствора?
9. Что такое оптическая плотность раствора?
10. Как зависит оптическая плотность раствора от концентрации?

## Список литературы

1. Яковлев Г.П. Краткие сведения по обработке результатов физических измерений. Методические указания для студентов физического факультета // Издательство Уральского университета, Екатеринбург, **2001**
2. [dic.academic.ru/dic.nsf/bse/163659/колориметр](http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/163659/колориметр)
3. Ю.В. Тихомиров. Лабораторные работы по курсу физики с компьютерными моделями. Москва. 2002г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Введение.....	2
2. Определение спектра излучения паров и газов.....	15
3. Определение показателя преломления жидкости.....	19
4. Измерение коэффициента поверхностного натяжения.....	25
5. Измерение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса.....	30
6. Распределение Максвелла молекул по скоростям.....	35
7. Интерференция света. Кольца Ньютона.....	38
8. Изучение явления дифракции.....	41
9. Поляризация света.....	44
10. Концентрационная колориметрия.....	46

Светлана Геннадьевна Колчанова  
Маргарита Алексеевна Шмелёва

Учебно-методическое пособие к лабораторным работам по физике для  
студентов фармацевтического факультета.

Подписано в печать  
Тираж

Заказ №

Формат 60x80 1/16  
Цена договорная

---

Адрес: г. Екатеринбург, Репина, 3, УГМА

---

Отпечатано в типографии ГОУЗ МИАТ, г. Екатеринбург

