

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ СВЕТА И ОЦЕНКА ПАРА-  
МЕТРОВ КОГЕРЕНТНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ  
КОЛЕЦ НЬЮТОНА**

*Методические указания к виртуальной лабораторной работе № 26  
по физике  
для студентов всех форм обучения всех направлений подготовки*

Екатеринбург  
УрФУ

УДК 535.32(075/8)

Составитель – Т. И. Папушина

Научный редактор – проф., д-р физ.-мат. наук А. А. Повзнер

Определение длины волны света и оценка параметров когерентности излучения при помощи колец Ньютона : методические указания к виртуальной лабораторной работе № 26 / сост. Т. И. Папушина. – Екатеринбург : УрФУ, – 17 с.

Данные методические указания предназначены для выполнения лабораторной работы № 26. Теоретическая часть содержит общие условия интерференции света. Экспериментальная часть включает описание лабораторной установки, конкретных задач, методик измерений и обработки результатов. Приведена форма отчета.

Подготовлено кафедрой физики

© Уральский федеральный  
университет

# 1. УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЫ

Световая волна обладает всеми свойствами электромагнитных волн, и для нее наблюдаются такие явления, как интерференция, дифракция и поляризация.

Интерференция – явление устойчивого во времени перераспределения энергии колебаний в пространстве, в результате чего интенсивность света в определенных точках пространства увеличивается, а в других уменьшается.

Интерференция, возникающая при наложении двух волн, называется двухлучевой, при наложении многих волн – многолучевой. Устойчивая интерференционная картина наблюдается при наложении когерентных волн. Когерентные волны – волны, разность фаз которых не изменяется со временем; это возможно только при одинаковой частоте складываемых колебаний.

Излучение любого реального источника не является строго монохроматическим, так как представляет собой совокупность излучений отдельных атомов. Испускание света отдельными атомами происходит хаотически. Каждое такое испускание можно представить как участок волны. Часть такой волны, сохраняющая примерное постоянство волновых характеристик, называется *цугом*. Длина цуга называется *длиной когерентности*  $L_{\text{ког}}$ , а время испускания цуга  $\tau_{\text{ког}}$  – *временем когерентности*. Очевидна связь этих величин:

$$L_{\text{ког}} = c\tau_{\text{ког}}, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме.

Для получения когерентных волн берется один источник, а излучаемую им волну делят на две или несколько частичных волн, используя явления отражения и преломления света. При этом налагающиеся волны не должны быть поляризованы в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

## 2. ДВУХЛУЧЕВАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ

Рассмотрим двухлучевую интерференцию, возникающую при наложении двух когерентных волн, у которых световой вектор колеблется в одном и том же направлении.  $S_1$  и  $S_2$  – источники этих волн (рис. 1). Пусть первая волна распространяется в среде с показателем преломления  $n_1$ , а вторая – в среде с показателем преломления  $n_2$ .

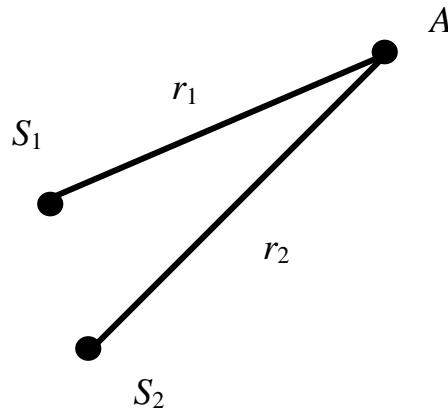


Рис. 1

Из теории колебаний известно, что в тех точках пространства, где разность фаз  $\varphi_2 - \varphi_1 = \Delta\varphi_{21}$  складываемых колебаний удовлетворяет условию  $\Delta\varphi_{21} = 2m\pi$  ( $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ), будет наблюдаться максимальное усиление колебаний; если же  $\Delta\varphi_{21} = (2m + 1)\pi$  ( $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ), то колебания будут максимально ослабляться.

Разность фаз складываемых колебаний в точке A (рис. 1):

$$\Delta\varphi_{21} = (\omega t - k_2 r_2) - (\omega t - k_1 r_1) = k_1 r_1 - k_2 r_2.$$

Учитывая, что  $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi n}{\lambda_0}$ , разность фаз можно выразить как

$$\Delta\varphi_{21} = \frac{2\pi}{\lambda_0} (r_1 n_1 - r_2 n_2) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta_{12}, \quad (2)$$

где

$$\Delta_{12} = (r_1 n_1 - r_2 n_2). \quad (3)$$

Скалярная величина  $\Delta_{12}$  называется оптической разностью хода волн 1 и 2.

Теперь условия усиления и ослабления света могут быть определены через оптическую разность хода двух когерентных волн:

$$1) \text{ условие усиления } \Delta_{12} = m\lambda_0 \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots); \quad (4)$$

$$2) \text{ условие ослабления } \Delta_{12} = (2m + 1)\frac{\lambda_0}{2} \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (5)$$

### 3. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА ПРИ ОТРАЖЕНИИ ОТ КЛИНООБРАЗНОЙ ПЛАСТИНКИ

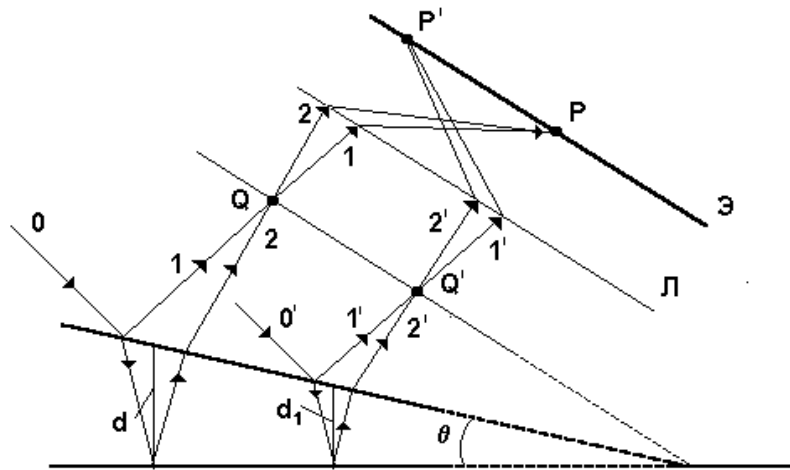


Рис. 2

Интерференционная картина, которая получается при освещении тонкой клинообразной пластинки пучком параллельных лучей, называется полосами равной толщины. На рис. 2 показан ход световых лучей. Падающая на поверхность световая волна (0) частично отражается (1), частично проходит внутрь клина и отражается от нижней поверхности (2). При небольшом угле  $\theta$  оптическую разность хода волн (2) и (1) можно с достаточной степенью точности вычислить по формуле

$$\Delta_{21} = 2dn \cos r + \frac{\lambda_0}{2}, \quad (6)$$

где  $d$  — толщина клина в месте падения луча;

$n$  — показатель преломления вещества клина;

$r$  – угол преломления света в клине;  
 $\lambda_0$  – длина световой волны, падающей на клин.

Присутствие последнего члена  $\frac{\lambda_0}{2}$  в (6) обусловлено «потерей полуволны» при отражении от оптически более плотной среды. Световые волны (1) и (2), отраженные от внешней и внутренней поверхностей клина, когерентны и интерферируют, пересекаясь в плоскости  $QQ'$ . Для наблюдения интерференционной картины вблизи клина помещают линзу Л, а за ней экран Э. Наиболее четкая интерференционная картина наблюдается в том случае, когда экран сопряжен с плоскостью  $QQ'$ . На экране видна система светлых и темных полос. Каждая из полос образуется за счет отражения от мест пластинки, имеющих одинаковую оптическую толщину, т. е. одинаковое произведение  $nd$ . Поэтому в данном случае интерференционные полосы называются полосами равной толщины.

#### 4. КОЛЬЦА НЬЮТОНА

Кольца Ньютона являются частным случаем полос равной толщины. Они получаются следующим образом. Плосковыпуклая линза с большим радиусом кривизны кладется на плоскопараллельную толстую стеклянную пластину (рис. 3). Тонкая кольцеобразная прослойка воздуха между линзой и пластиной является «клином» с малым преломляющим углом. Поэтому при освещении линзы параллельным пучком света, направленным перпендикулярно к ее плоской поверхности, в воздушном клине появляется интерференционная картина – в виде совокупности чередующихся темных и светлых концентрических колец, потому что места с одинаковой толщиной воздушного слоя образуют окружности с центром в точке соприкосновения линзы и пластины. Так как угол воздушного «клина» мал (на рис. 3 этот угол сильно преувеличен), то оптическую разность хода волн (2) и (1) (рис. 2) при их почти нормальном падении на «клин» можно с достаточной степенью точности найти по формуле (6) при  $\cos r = 1$ .

$$\Delta_{21} = 2dn + \frac{\lambda_0}{2} . \quad (7)$$

Учитывая общие условия усиления (4) и ослабления (5) света, можно получить условия максимумов и минимумов конкретно для интерференционных колец (рис. 3).

Светлые кольца будут соответствовать условию

$$2dn + \frac{\lambda_0}{2} = m\lambda_0 \quad (m=1, 2, \dots), \quad (8)$$

а темные

$$2dn + \frac{\lambda_0}{2} = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_0 \quad (m=0, 1, 2 \dots). \quad (9)$$

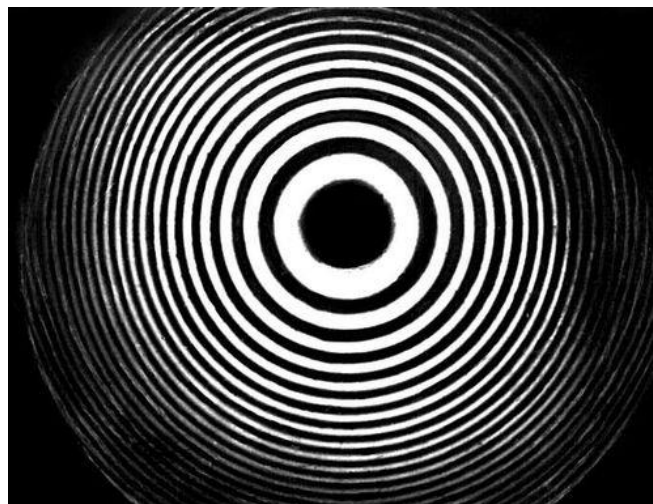
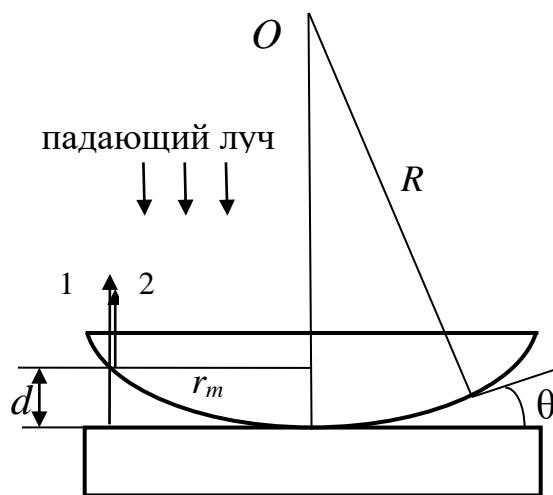


Рис. 3

В условиях (8) и (9)  $m$  обозначает номер кольца. Ближайшее к центру кольцо соответствует  $m = 1$ , следующее  $m = 2$  и т. д. При

этом нумерация для темных и светлых колец ведется раздельно. В центре должна образоваться темная точка, соответствующая  $m = 0$ . В действительности же в центре наблюдается темное пятно за счет образования воздушной прослойки толщиной меньше  $\frac{\lambda_0}{2}$ .

## 5. ВЫВОД РАСЧЕТНОЙ ФОРМУЛЫ

На рис. 3:  $O$  – центр сферы радиуса  $R$ , часть которой образует выпуклую поверхность линзы;  $d$  – толщина воздушного слоя в том месте, где находится кольцо с номером  $m$ . Радиус этого кольца обозначим  $r_m$ . Очевидно, что

$$(R - d)^2 + r_m^2 = R^2$$

или

$$R^2 - 2Rd + d^2 + r_m^2 = R^2.$$

Так как толщина  $d$  слоя мала по сравнению с  $r_m$  и  $R$ , то квадратом этой величины можно пренебречь и последнюю формулу записать в виде

$$2d = \frac{r_m^2}{R}. \quad (10)$$

Подставив значение величины  $2d$  в (8) и (9), получим для светлых колец

$$r_m^2 = \frac{(2m - 1)R\lambda_0}{2n}, \quad (11)$$

для темных колец

$$r_m^2 = \frac{mR\lambda_0}{n}. \quad (12)$$

Из этих формул видно, что, измерив радиус  $r_m$  какого-либо светлого или темного кольца (с номером  $m$ ), можно вычислить длину волны света  $\lambda_0$ . Отметим, что для воздушного клина  $n = 1$ .

Для большей точности в определении искомых величин преобразуем формулы (11) и (12) так, чтобы они были связаны с разностью диаметров колец, которые могут быть легко измерены. Пусть нам из-



вестны диаметры каких-либо колец с номерами  $k$  и  $l$  ( $l > k$ ). Тогда формула (11) для светлых колец дает

$$\frac{D_l^2}{4} = (2l-1)R\frac{\lambda_0}{2}, \quad \frac{D_k^2}{4} = (2k-1)R\frac{\lambda_0}{2},$$

где  $D_l$  и  $D_k$  – диаметры колец.

Вычитая из первого уравнения второе, получим

$$\frac{D_l^2 - D_k^2}{4} = (l-k)R\lambda_0. \quad (13)$$

Точно такое же равенство получится и для темных колец из формулы (12). Для величины  $\lambda_0$  из формулы (13) получаем основную расчетную формулу:

$$\lambda_0 = \frac{D_l^2 - D_k^2}{4R(l-k)}. \quad (14)$$

## 6. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ КОГЕРЕНТНОСТИ И МОНОХРОМАТИЧНОСТИ СВЕТОВЫХ ВОЛН

Рассмотрим взаимодействие вторичных цугов на примере воздушного зазора в установке для наблюдения колец Ньютона (рис. 4). Цуг  $\alpha_0$  отражается сначала в точке  $A_1$ , порождая цуг  $\alpha_1$ , а затем в точке  $A_2$ , порождая цуг  $\alpha_2$ . Так как отражения происходят не одновременно, то цуги  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  перекрываются.

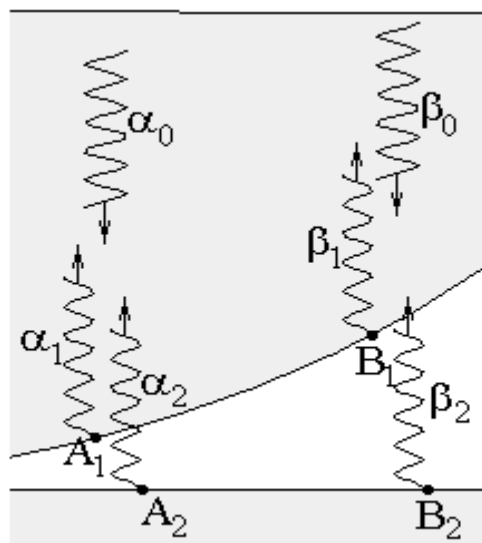


Рис. 4

Рассмотрим взаимодействие вторичных цугов на примере воздушного зазора в установке для наблюдения колец Ньютона (рис. 4). Цуг  $\alpha_0$  отражается сначала в точке  $A_1$ , порождая цуг  $\alpha_1$ , а затем в точке  $A_2$ , порождая цуг  $\alpha_2$ . Так как отражения происходят не одновременно, то цуги  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  перекрываются лишь частично. Интерференцию обеспечивают перекрывающиеся части цугов. Чем толще воздушный зазор, тем больше оптическая разность хода и тем меньше перекрытие цугов. При достаточно большой толщине воздушного зазора перекрытия цугов уже не происходит, как это видно на рис. 1 для цугов  $\beta$ . Поэтому число колец Ньютона ограничено. Интерференция наблюдается до тех пор, пока разность хода не превышает длину когерентности.

Пусть наблюдается  $m$  колец Ньютона. Так как каждому кольцу соответствует разность хода, равная длине волны  $\lambda$ , то

$$L_{\text{ког}} = m\lambda. \quad (15)$$

Число наблюдаемых колец можно связать со степенью монохроматичности света. Монохроматическая световая волна является физической идеализированной моделью. Любой реальный источник света не является монохроматическим. Кроме того, никаким образом невозможно выделить монохроматическую составляющую излучения. Пусть спектральный интервал излучения, создающего наблюдаемую интерференционную картину, ограничен длинами волн  $\lambda$  и  $\lambda + \Delta\lambda$ . Радиус колец Ньютона пропорционален  $\sqrt{\lambda}$ . Радиусы темных колец в отраженном свете с номером  $m$  для длин волн, ограничивающих спектральный интервал излучения, будут равны  $r_\lambda = \sqrt{mR\lambda}$  и  $r_{\lambda+\Delta\lambda} = \sqrt{mR(\lambda + \Delta\lambda)}$  соответственно. Свет с промежуточными длинами волн образует темные кольца с промежуточными радиусами. При некотором значении  $m$  кольцо, образованное волной с  $(\lambda + \Delta\lambda)$ , совпадет с кольцом, имеющим номер  $(m+1)$  и длину волны  $\lambda$ :  $\sqrt{m(\lambda + \Delta\lambda)R} = \sqrt{(m+1)\lambda R}$ , откуда получим

$$m = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}. \quad (16)$$

Величина  $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$  представляет собой *степень монохроматичности* излучения.

Все пространство за пределами кольца с номером  $m$ , удовлетворяющим формуле (16), имеет непрерывную освещенность, то есть формула (16) определяет номер последнего наблюдаемого кольца. Подставляя (16) в (15), получим формулу, связывающую длину когерентности со степенью монохроматичности света и длиной волны:

$$L_{\text{ког}} = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}. \quad (17)$$

Таким образом, подсчитав число видимых колец  $m$  и зная длину волны излучения  $\lambda$ , по формулам (15), (1), (16) и (17) можно оценить длину когерентности  $L_{\text{ког}}$ , время когерентности  $\tau_{\text{ког}}$ , степень монохроматичности  $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$  и ширину спектрального интервала  $\Delta\lambda$  излучения, используемого в данной лабораторной установке. Следует иметь в виду, что видимость колец убывает постепенно. Поэтому речь идет об оценках перечисленных величин.

## 7. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Для измерения положения колец следуйте указаниям, представленным в программе выполнения виртуальной лабораторной работы. Всего рекомендуется измерить диаметры десяти колец и представить результаты в табл. 1

Таблица 1

## Результаты измерения диаметров колец Ньютона

Кольцо	Положение конца диаметра кольца		Диаметр кольца $D = X_{\text{п}} - X_{\text{л}}$
1	Н	Н	
2	↑ а	а	
3	п о	п о	
4	р т	р т	
5	а с	а с	
6	в ч	в ч	
7	л е	л е	
8	е т	е т	
9	н а	↓ н а	
10	и	и	
	е	е	

2. Расчет длины волны  $\langle \lambda_0 \rangle$ .

По результатам измерений, представленных в табл. 1, вычисляют среднее значение  $\langle \lambda_0 \rangle$  длины волны. Для этого формулу (14) преобразуют к виду

$$\langle \lambda_0 \rangle = \frac{\langle A \rangle}{R}, \quad (18)$$

где  $\langle A \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n}$ ,  $A_i = \frac{D_l^2 - D_k^2}{4(l-k)} = \frac{(D_l - D_k)(D_l + D_k)}{4(l-k)}$ .

Значения  $D_l$ ,  $D_k$  и  $A$  заносят в табл. 2.

Таблица 2

Расчет значений  $D_k, D_l, A$ 

$l-k$	$D_l$ , мм <sup>2</sup>	$D_k$ , мм	$(D_l + D_k)$ , мм	$(D_l - D_k)$ , мм	$A$ , мм <sup>2</sup>	$(A_i - \langle A \rangle)$ , мм <sup>2</sup>	$(A_i - \langle A \rangle)^2$ , мм <sup>4</sup>
6-1							
7-2							
8-3							
9-4							

10 – 5							
-----------	--	--	--	--	--	--	--

$$\langle A \rangle = \dots \text{ мм}^2. \quad \sum_{i=1}^n (A_i - \langle A \rangle)^2 = \dots \text{ мм}^4.$$

При составлении табл. 2 значения  $(l - k)$  следует брать не менее четырех. При этом необходимо использовать все 10 измеренных колец. Из данных табл. 2 определяется средняя длина волны света (18) и доверительная граница  $\varepsilon_A$  случайной погрешности  $A$  по формулам:

$$\varepsilon_A = t_{p,n} S_{\langle A \rangle}, \quad (19)$$

$$S_{\langle A \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \langle A \rangle)^2}{n(n-1)}}, \quad (20)$$

где  $n$  – число комбинаций колец, внесенных в табл. 2;

$t_{p,n}$  – коэффициент Стьюдента для данного  $n$  и доверительной вероятности  $p$ . Расчет длины волны ( $\lambda_0$ ) может быть проведен по разработанной программе с привлечением компьютера.

Систематической погрешностью в определении  $A$  пренебрегаем вследствие ее малости, следовательно,

$$\Delta_A = \varepsilon_A.$$

Доверительная граница абсолютной погрешности  $\Delta_{\lambda_0}$  результата измерения длины волны  $\lambda_0$  определяется по формуле

$$\Delta_{\lambda_0} = \gamma \langle \lambda_0 \rangle, \quad (21)$$

где

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{\Delta_A}{\langle A \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_R}{\langle R \rangle}\right)^2}.$$

Величина  $\Delta_R$  задается в таблице, прилагаемой к установке. Окончательный результат записывается в виде

$$\lambda_0 = \langle \lambda_0 \rangle \pm \Delta_{\lambda_0}, \quad P = 0,95. \quad (22)$$

### 3. Графический метод определения длины волны $\lambda_0$ .

Формулу (12) для определения длины волны можно переписать в виде

$$D_1^2 - D_k^2 = 4R\lambda_0(1 - k), \quad (23)$$

если внести обозначения:  $y = D_1^2 - D_k^2$ ,  $x = 1 - k$ ,

то эта формула имеет вид:

$$y = ax. \quad (24)$$

Графиком, соответствующим формуле (24), является прямая линия. Для построения этого графика значения  $(1 - k), D_1, D_k$  заносятся в табл. 3.

Причем для расчета всех значений  $x, k$  берется равным 1, а  $l$  принимает значения последовательно от 2 до 10.

Таблица 3

Расчет значений  $x$  и  $y$

$x = l - k$	$D_1$ , мм	$D_k$ , мм	$(D_1 - D_k)$ , мм	$(D_1 + D_k)$ , мм	$y = (D_1^2 - D_k^2)$ , мм <sup>2</sup>
1 = 2-1					
2 = 3-1					
3 = 4-1					
4 = 5-1					
5 = 6-1					
6 = 7-1					
7 = 8-1					
8 = 9-1					
9 = 10-1					

Построить график зависимости  $y = f(x)$  (рис. 7). Выбрав на прямой две далеко отстоящие точки, найти коэффициент  $a$ :  $a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$ . Затем оценить длину волны  $\lambda_0$ :

$$\lambda_0 = \frac{(y_2 - y_1)}{4R(x_2 - x_1)}. \quad (25)$$

Первые точки на графике  $y = f(x)$  могут не попасть на прямую, так как первые кольца Ньютона несколько искажены. При проведении прямой эти точки не учитывать.

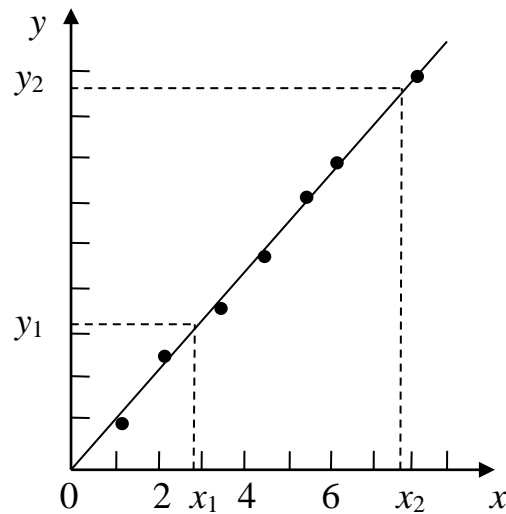


Рис. 7

## ***Задача 2. Определение параметров когерентности и монохроматичности световых волн***

### *Порядок измерений и расчетов*

1. Подсчитать число видимых темных колец Ньютона в поле зрения окуляра. Центральное темное пятно не учитывать. Номер последнего видимого кольца  $m$  по формуле (16) является степенью монохроматичности излучения:

$$m = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \dots$$

2. Используя значение длины волны  $\langle\lambda_0\rangle = \lambda$ , полученное в задаче 1, по формуле (15) рассчитать длину когерентности

$$L_{\text{ког}} = m\lambda = \dots$$

3. По формуле (1) рассчитать время когерентности

$$\tau_{\text{ког}} = \frac{L_{\text{ког}}}{c} = \frac{m\lambda}{c} = \dots$$

4. По формуле (16) рассчитать ширину спектрального интервала излучения  $\Delta\lambda$ , используемого в данной работе:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{m} = \dots$$

## **9. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Сформулируйте цель лабораторной работы.
2. В чем заключается явление интерференции света?
3. Какие волны называются когерентными?
4. Запишите общее условие ослабления и усиления света при двухлучевой интерференции.
5. Объясните возникновение интерференционной картины при отражении от клинообразной пластинки. Изобразите ход лучей.
6. Выведите расчетную формулу для определения длины световой волны с помощью колец Ньютона.
7. Как производится измерение диаметров колец Ньютона?



*Учебное издание*

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ СВЕТА И ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ КОГЕРЕНТНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

Составитель **Папушина** Татьяна Ивановна

Редактор *В.О. Корионова*  
Компьютерный набор *Н. Н. Суслиной*

Подписано в печать                      Формат 60×90 1/16.

Бумага писчая. Плоская печать. Усл. печ. л. 1,0.

Уч.-изд. л. 0,74. Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_\_.

Издательство Уральского университета  
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ  
620049, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 5  
Тел.: +7 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41  
E-mail: [rio@urfu.ru](mailto:rio@urfu.ru)

Отпечатано в Издательско-полиграфического центра УрФУ  
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4  
Тел.: +7 (343) 350-56-64, 350-90-13  
Факс: +7 (343) 358-93-06  
E-mail.: [press.info@usu.ru](mailto:press.info@usu.ru)