

Министерство образования и науки Республики Казахстан

ВОСТОЧНО-КАЗАХСТАНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. Д. СЕРИКБАЕВА

А.А. Жаксылыкова

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ
ПРИ ПОМОЩИ КОЛЕЦ НЬЮТОНА**

Методические указания к лабораторной работе № 3.11 по дисциплине
«Физика» для студентов всех технических специальностей

Усть-Каменогорск
2020

УДК 530

Жаксылыкова А.А. Определение радиуса кривизны линзы при помощи колец Ньютона: Методические указания к лабораторной работе №3.11 по дисциплине «Физика» для студентов всех технических специальностей / А.А. Жаксылыкова / ВКТУ. - Усть-Каменогорск, 2020.- 12с.

Методические указания содержат краткие теоретические сведения об интерференции света в тонких плёнках и, в частности, образование линий равной толщины. Приведено описание устройства и принципа действия прибора Ньютона. Изложена методика определения с помощью колец Ньютона радиуса кривизны линзы. Приведены порядок выполнения работы, обработки результатов измерений и требования к оформлению результатов эксперимента.

Утверждено методическим советом факультета «Базовой инженерной подготовки»

Протокол № ____ от _____ 2020г.

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомиться с явлением интерференции в тонких прозрачных изотропных плёнках, в частности, когда интерференционная картина локализована на поверхности тонкого воздушного клина (полосы равной толщины); определить радиус кривизны линзы и оценить точность измерений.

2 УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

R – радиус кривизны линзы;

d_0 – диаметр центрального светлого пятна

d_1, d_2, \dots, d_m – диаметры соответствующих концентрических темных и светлых колец;

Δ – оптическая разность хода интерферирующих лучей;

Δr – геометрическая разность хода интерферирующих лучей;

r – радиусы светлых и темных колец в приборе Ньютона;

λ – длина световых волн, образующих кольца Ньютона;

m – порядок интерференционных линий, т.е. номера светлых и темных колец Ньютона;

h – величина зазора между линзой и пластиной, толщина воздушного клина между линзой и пластиной;

n, m – индексы (номера) светлых или темных колец;

a_1 – расстояние от центра объектива до экрана;

a_2 – расстояние от центра объектива до прибора Ньютона;

$\Delta a, \Delta d$ – максимальная систематическая погрешность, допускаемая при измерении миллиметровой линейкой величин a_1, a_2 и d .

ΔR – погрешность в определении радиуса кривизны линзы.

3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

3.1 Интерференция света

Интерференцией называется явление наложения когерентных волн. Когерентными называются волны, у которых частоты равны, а разность фаз постоянна или равна нулю. Наложение когерентных волн сопровождается перераспределением энергии волны в пространстве: в одних точках волны взаимно усиливают друг друга (наблюдаются максимумы интенсивности волн), в других – взаимно ослабляют (наблюдаются минимумы интенсивности волн).

Пусть в некоторую точку пространства M приходят гармонические световые волны с длиной λ и частотой ω от двух когерентных источников S_1 и S_2 , пройдя соответственно расстояния r_1 и r_2 (рисунок 1). Если

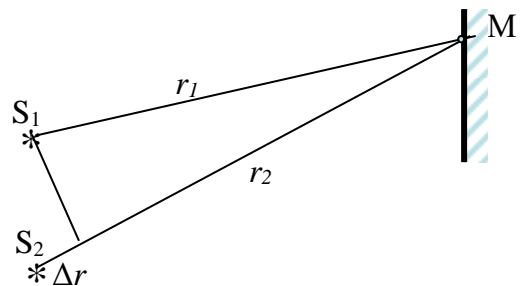


Рисунок 1

точка М достаточно удалена от источников волн, то волны, приходящие в точку М, можно считать плоскими и колебания электрического вектора Е, вызываемые в этой точке каждой волной, можно выразить уравнениями:

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{01}\cos(\omega t - kr_1) = E_{01}\cos\varphi_1, \\ E_2 &= E_{02}\cos(\omega t - kr_2) = E_{02}\cos\varphi_2, \end{aligned}$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

Результирующие колебания являются также гармоническими. Их амплитуда определяется выражением:

$$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02}\cos\Delta\varphi, \quad (1)$$

где $\Delta\varphi$ – разность фаз складываемых волн. Разность фаз связана с геометрической разностью хода Δr соотношением:

$$\Delta\varphi = |\varphi_2 - \varphi_1| = k |r_2 - r_1| = 2\pi\Delta r / \lambda. \quad (2)$$

Так как интенсивность волны (в данном случае световой) пропорциональна квадрату амплитуды, то выражение (1) можно представить в виде:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\Delta\varphi \quad (3)$$

Для каждой точки пространства $\Delta\varphi = const$ и, в зависимости от её значения, $\cos\Delta\varphi$ может принимать значения от -1 до +1. Следовательно, в зависимости от $\Delta\varphi$ интенсивность света в разных точках пространства будет различна. В тех точках пространства, для которых выполняется условие

$$\Delta\varphi = 0, 2\pi, 4\pi, 6\pi, \dots, \text{ т.е. } 2m\pi \quad (4)$$

или

$$\Delta r = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots, \text{ т.е. } m\lambda, \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots)$$

интенсивность света будет больше, чем сумма интенсивностей складываемых волн :

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} > (I_1 + I_2),$$

поэтому выражения (4) называются **условием максимума при интерференции.**

В тех точках пространства, для которых выполняется условие

$$\Delta\varphi = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots, \text{ т.е. } (2m+1)\pi \quad (5)$$

или

$$\Delta r = \lambda/2, 3\lambda/2, \dots, \text{ т.е. } (2m+1)\lambda/2, \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots)$$

интенсивность света будет минимальна:

$$I = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} < (I_1 + I_2),$$

и выражения (5) называются **условием минимума при интерференции**.

Если интерферирующие лучи до наложения проходят свои пути r_1 и r_2 в средах с различными показателями преломления n_1 и n_2 , то в формуле (2) вместо геометрической разности хода $|r_2 - r_1| = \Delta r$, необходимо брать оптическую разность хода $\Delta = |n_2 r_2 - n_1 r_1|$, учитывающую изменение длины волны при распространении в средах с $n > 1$. Соответственно в формулах (4) и (5) Δr следует заменить на Δ .

$$\text{или} \quad \left. \begin{array}{l} \Delta\varphi = 2m\pi \\ \Delta = m\lambda, \end{array} \right\} - \text{ условия максимума,} \quad (6)$$

$$\text{или} \quad \left. \begin{array}{l} \Delta\varphi = (2m + 1)\pi \\ \Delta = (2m + 1)\lambda / 2 \end{array} \right\} - \text{ условия минимума,} \quad (7)$$

где $m = 0, 1, 2, 3,$

Важным с практической точки зрения случаем интерференции света является интерференция в тонких плёнках. Расчёты показывают, что оптическая разность хода интерферирующих лучей (а следовательно результат интерференции) зависит от толщины плёнки, угла падения лучей на плёнку, показателя преломления плёнки и длины волны света. Если все указанные величины, кроме толщины плёнки, постоянны, то в области интерференции света наблюдаются так называемые линии равной толщины.

3.2 Методика эксперимента и расчётные формулы

Классическим примером полос равной толщины являются кольца Ньютона. Они наблюдаются с помощью прибора Ньютона, который представляет собой плосковыпуклую линзу большого радиуса кривизны, соприкасающуюся выпуклой поверхностью с хорошо отполированной плоско-параллельной пластинкой (рисунок 2). При этом толщина воздушной прослойки, остающейся между линзой и пластинкой, увеличивается по мере удаления от центра линзы. Если на линзу (или пластинку) нормально падает пучок монохроматического света, то световые волны, отраженные от верхней и нижней границ воздушной прослойки (лучи 1

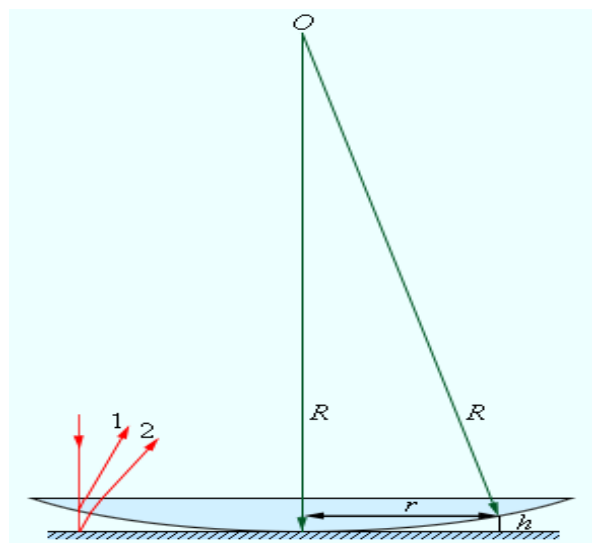


Рисунок 2

и 2 на рис.2), будут интерферировать между собой. При достаточно большом радиусе кривизны (R) линзы можно пренебречь неизбежными небольшими наклонами лучей 1 и 2 (рис.2), проходящих в воздушном зазоре. Поэтому за геометрическую разность хода между интерферирующими лучами (1, 2) следует принять величину $2h$, где h – толщина зазора в данном месте. Следует учесть, что луч 2, отражаясь от стеклянной пластинки, т.е. от более плотной среды, меняет свою фазу на π (говорят, происходит «потеря полволны»). Таким образом оптическая разность хода лучей 1 и 2 при их наложении равна:

$$\Delta = 2h + \lambda/2 \quad (8)$$

В данной работе кольца Ньютона наблюдаются в проходящем свете, поэтому проанализируем этот случай более подробно.

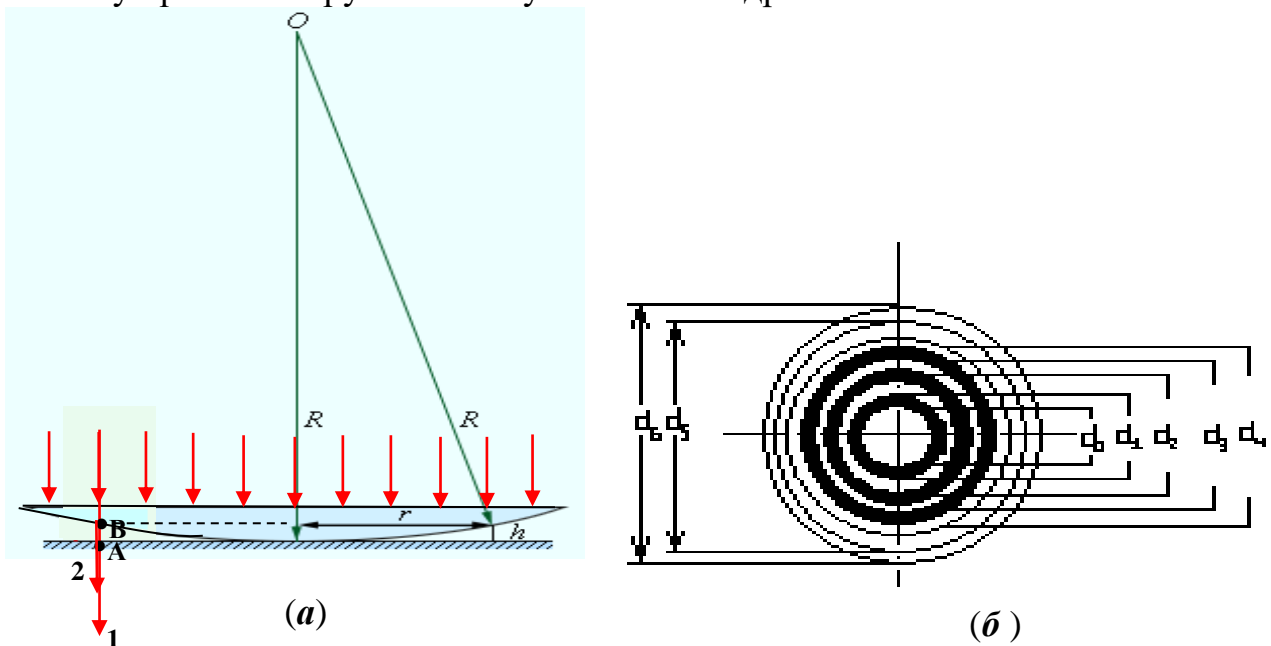


Рисунок 3

На линзу падает нормально к её поверхности монохроматический свет (рис.3 (a)). Рассмотрим ход одного из лучей. Частично он пройдёт через линзу, воздушный клин толщиной $AB = h$ и через стеклянную пластинку. Обозначим этот луч «1». Часть луча (луч 2) испытывает отражение сначала в точке А затем в точке В и, выйдя из прибора Ньютона, наложится на луч 1. Геометрическая разность хода лучей 1 и 2, как и в случае отражённых лучей равна $2h$. При нахождении оптической разности хода следует учесть, что луч 2 дважды отражается от более плотной среды: в точке А – от стеклянной пластинки и в точке В от – линзы. Суммарное изменение фазы равно 2π . Это приводит к дополнительной разности хода λ между лучами 1 и 2. Однако разность хода величиной λ не может повлиять на результат интерференции этих лучей, поэтому в оптической разности хода она не учитывается. Следовательно, геометрическая разность хода в данном случае совпадает с оптической разностью хода:

$$\Delta = 2h \quad (9)$$

Интерференционная картина, локализованная у поверхности стеклянной пластинки, имеет следующий вид: в центре - световое пятно, окруженное рядом концентрических темных и светлых колец убывающей ширины (рисунок 3(б)). Из сравнения формул (8) и (9) следует, что интерференционная картина в отраженном свете будет обратная: в центре – тёмное пятно, все темные кольца заменяются светлыми, а светлые - темными.

При заданном значении волны λ разность хода Δ зависит только от толщины воздушного зазора (см. формулу (9)). Таким образом, интерференционные полосы являются полосами равной толщины.

Произведем расчет радиусов колец Ньютона в проходящем свете.

Выразим зависимость оптической разности хода лучей 1 и 2 (Δ) от расстояния этих лучей до точки соприкосновения линзы и пластинки (r). Из рисунка 3(а) имеем:

$$r^2 = R^2 - (R - h)^2 = 2R h - h^2 = (2R - h) h.$$

Учитывая, что $2R \gg h$, получим:

$$h = \frac{r^2}{2R}.$$

Таким образом, оптическая разность хода лучей 1 и 2 определяется следующим выражением:

$$\Delta = 2h = \frac{r^2}{R} \quad (10)$$

Согласно формуле (6), если Δ равно целому числу длин волн (чётному числу полуволен), то наблюдаются светлые кольца. С учётом формулы (6) из формулы (10) можно получить выражение для радиусов светлых колец:

$$r = \sqrt{R m \lambda} \quad (11)$$

Используя формулу (7) хода (условие минимума) и формулу (10), получим выражение для радиусов тёмных колец:

$$r = \sqrt{R(2m+1)\frac{\lambda}{2}}. \quad (12)$$

Можно объединить формулы (11) и (12) в одну, записав выражение для радиусов светлых и тёмных колец Ньютона в виде:

$$r = \sqrt{R m \frac{\lambda}{2}}, \quad (13)$$

В этой формуле чётным значениям m соответствуют радиусы светлых колец,

нечётным m – радиусы тёмных колец. Значению $m = 0$ соответствует $r = 0$, т.е. точка в месте касания пластинки и линзы. В этой точке наблюдается максимум интенсивности, обусловленный нулевой разностью хода интерферирующих лучей.

Целью данной работы является определение радиуса кривизны линзы R по измеренным значениям радиусов колец Ньютона. Казалось бы, что эту задачу можно решить с помощью формулы (13). Однако эта формула не может быть использована для определения радиуса кривизны линзы, поскольку на поверхности даже очищенного стекла всегда присутствуют пылинки, которые вызывают появление дополнительного зазора (δ) между стеклянной пластинкой и линзой. Вследствие этого возникает дополнительная разность хода 2δ . Величина δ не может быть измерена непосредственно, но её можно исключить, если измерить, например, n -ый и m -ый радиусы светлых (или темных) колец, а затем найти разность квадратов радиусов:

$$r_n^2 - r_m^2 = R \lambda (n - m),$$

где $n > m$. Таким образом, получаем формулу для определения радиуса кривизны линзы:

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

Для расчетов её удобно переписать в таком виде:

$$R = \frac{(d_n - d_m) \cdot (d_n + d_m)}{4(n - m)\lambda}, \quad (14)$$

где d_n и d_m - диаметры соответствующих светлых колец. Аналогичное выражение получается и для темных колец.

Для вычисления погрешности результата измерения следует воспользоваться стандартными методами /9.4/:

$$\Delta R = \frac{\Delta d}{2(n - m)\lambda} \cdot \sqrt{d_n^2 + d_m^2}, \quad (15)$$

где Δd - систематическая погрешность измерения диаметра колец Ньютона.

4 ПЕРЕЧЕНЬ ПРИБОРОВ И ПРИНАДЛЕЖНОСТЕЙ

В работе используются: аппарат проекционный с оптической скамьей ФОС-67, прибор Ньютона (система, состоящая из плоско - выпуклой линзы и плоско-параллельной стеклянной пластинки), светофильтр, экран и миллиметровая линейка.

5 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Прибор Ньютона представляет собой систему, состоящую из плоско-выпуклой линзы и плоско параллельной стеклянной пластинки (см. рис.2, 3а). Устройство проекционного универсального аппарата с оптической скамьей ФОС-67 описано в руководстве по эксплуатации аппарата, которое прилагается к прибору. Проекционный аппарат включается в сеть переменного однофазного напряжения величиной 220 В при помощи вилки и тумблера, расположенного на корпусе фонаря. Аппарат должен быть заземлен. Если во время выполнения работы появится специфический запах, напоминающий запах горелой краски, свидетельствующий о чрезмерном нагреве корпуса фонаря, аппарат следует отключить. После охлаждения фонаря аппарат может быть включен для продолжения выполнения работы.

Схема расположения приборов на оптической скамье представлена на рисунке 4.

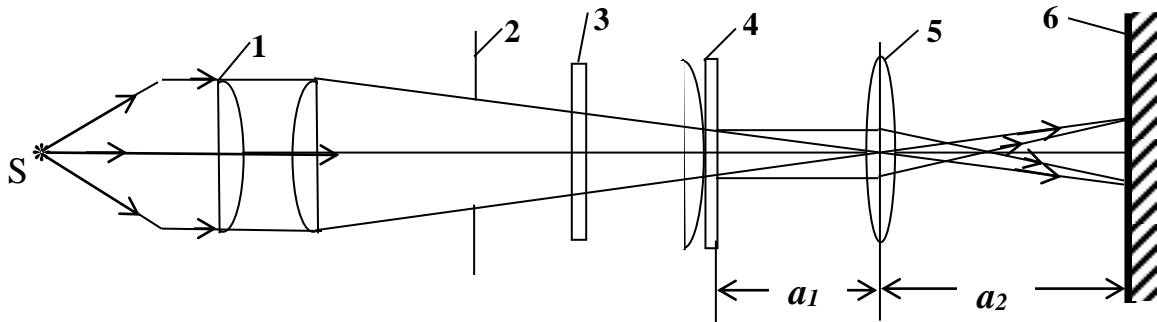


Рисунок 4

S – источник света; 1 – конденсор; 2 – круглая диафрагма; 3 – светофильтр; 4 – прибор Ньютона; 5 – объектив; 6 – экран.

6 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

6.1 Техническая характеристика измерительных приборов

Внести технические данные об используемых измерительных приборах в таблицу 1.

Таблица 1

Прибор	Диапазон измерения	Цена деления	Класс точности	Приборная погрешность
Миллиметровая линейка				

6.2 Подготовка установки к работе

6.2.1 Ознакомиться с устройством проекционного универсального аппарата с оптической скамьей ФОС-67, используя для этой цели руководство по эксплуатации.

6.2.2 Проверить исправность заземления аппарата. Если заземление отсутствует, работать на аппарате запрещается. Ответственным за исправность действующего аппарата во время его работы является лаборант, ответственный на лабораторию «Оптика».

6.2.3 Установить на оптической скамье дисковую диафрагму, светофильтр, прибор Ньютона, объектив и экран согласно схеме, изображенной на рис.4.

6.2.4 Включить при помощи выключателя, расположенного на корпусе осветителя, источник света (включение аппарата в розетку питания производит дежурный лаборант или преподаватель).

6.2.5 Юстировкой приборов, установленных на оптической скамье, добиться резкого изображения на экране колец Ньютона (юстировку осветителя производит лаборант).

6.3 Проведение измерений и расчётов

6.3.1 Измерить диаметры колец (d_3). Следует иметь в виду, что кольца, полученные на экране, увеличены по сравнению с кольцами в приборе Ньютона. Поэтому для получения истинных размеров колец, необходимо определить линейное увеличение оптической системы прибора.

6.3.2 Определить линейное увеличение оптической системы прибора. Для этого необходимо измерить расстояние от центра объектива до экрана a_1 и расстояние от центра объектива до прибора Ньютона a_2 (смотри рисунок 4), а затем вычислить их отношение a_1/a_2 .

6.3.3 Вычислить истинные диаметры (d) колец Ньютона. Для этого диаметры (d_3) колец, полученных на экране, необходимо умножить на коэффициент, равный a_1/a_2 .

6.3.4 Вычислить по формуле (14) значения радиусов кривизны линзы (R_1, R_2, R_3, R_4), используя при этом соответственно 1, 3, 5 – радиусы темных и 2, 4, 6 – радиусы светлых колец.

Примечание

Радиусы кривизны линзы сначала определяются для темных колец:

$$R_1 = \frac{(d_3 - d_1) \cdot (d_3 + d_1)}{4(3-1)\lambda}, \quad R_2 = \frac{(d_5 - d_1) \cdot (d_5 + d_1)}{4(5-1)\lambda};$$

а затем для светлых колец:

$$R_3 = \frac{(d_4 - d_2) \cdot (d_4 + d_2)}{4(4-2)\lambda}, \quad R_4 = \frac{(d_6 - d_2) \cdot (d_6 + d_2)}{4(6-2)\lambda}.$$

6.3.5 Определить среднее значение радиуса кривизны $\langle R \rangle$ как среднее арифметическое значений R_1, R_2, R_3, R_4 :

$$\langle R \rangle = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}{4}$$

6.3.6 Проанализировать формулу (15) и рассчитать ΔR для такого R из полученных четырёх значений, чтобы подстановка величин m , n , d_m и d_n в формулу (15) позволило получить наибольшее значение абсолютной погрешности измерений.

6.3.7 Ответ представить в виде: $R = \langle R \rangle \pm \Delta R$

6.3.8 Вычислить относительную погрешность измерения:

$$\delta = \frac{\Delta R}{\langle R \rangle} \cdot 100\%.$$

6.3.9 Все результаты измерений и вычислений записать в таблицу 2.

Таблица 2

Тип колец	№ кольца	d_3 , мм	a_1 , мм	a_2 , мм	d , мм	R , мм
Темные кольца	1					
	3					
	5					
Светлые кольца	2					
	4					
	6					
$\langle R \rangle =$		$\Delta R =$		$\delta =$		

6.3.10 Отчет оформить в соответствии с требованиями ГОСТов /9.5/, /9.6/.

7 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

$$\Delta d = 0,5 \text{ мм}$$

$$\lambda = 673 \text{ нм}$$

$m = 1$; $n = 3, 5$ – индексы темных колец

$m = 2$; $n = 4, 6$ – индексы светлых колец.

8 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

8.1 Что называется интерференцией волн?

8.2 Получить выражения, описывающие условия усиления и ослабления двух когерентных волн при их наложении.

8.3 В чём отличие наложения двух когерентных волн от наложения двух некогерентных волн?

8.4 При каких условиях возникают полосы равного наклона и равной толщины?

8.5 Чем объясняется противоположность условий максимума и минимума интерференции проходящих и отражённых волн?

8.6 Объяснить причины возникновения интерференционной картины в приборе Ньютона.

9 ЛИТЕРАТУРА

9.1 Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики, - М.: Высшая школа, 1989. С. 347 – 357 .

9.2 Трофимова Т.А. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1985. С.256 – 262 , 278 – 281.

9.3 Гольдин Л. Л. и др. Руководство к лабораторным занятиям по физике. - М.: Наука. 1973. С. 361 – 366.

9.4 Кузнецов В. П. Методические указания по лабораторному практикуму по общей физике (обработка результатов наблюдений).- Алма - Ата, Минвуз Каз.ССР. 1983.

9.5 ГОСТ 2.105-95 ЕСКД. Общие требования к текстовым документам.

9.6 ГОСТ 2.106-96 ЕСКД. Текстовые документы.