

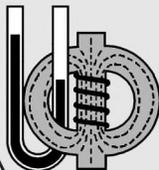
ISSN 2307-5457

*Primum
inter pares*

Материалы XXVIII Всероссийской
научно-практической конференции

„Учебный физический эксперимент:
Актуальные проблемы. Современные
решения“

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ОБРАЗОВАНИЯ



**УЧЕБНАЯ
ФИЗИКА**

Январь - март 2023 №1

Издается с января 1997 года

СОДЕРЖАНИЕ

Хроника

XXVIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ «УЧЕБНЫЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ:
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ. СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ» 3

Основная школа

В. В. Майер УЧЕБНАЯ МОДЕЛЬ ПУШКИ НА ПАРАХ СПИРТА.... 13
А. Н. Четкарев

Старшая школа

М. А. Фаддеев МНОГОУРОВНЕВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
Ю. В. Масленникова ЗАДАЧИ КАК СРЕДСТВО ПОДГОТОВКИ
 К ОБУЧЕНИЮ В ПЕРЕДОВЫХ
 ИНЖЕНЕРНЫХ ШКОЛАХ 19

В. В. Майер ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ
И. А. Васильев НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ОПЫТОВ
Ю. А. Корнев ПО ЭЛЕКТРОСТАТИКЕ 25

В. В. Майер ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ПРАКТИКУМА:
А. А. Перминов УЧЕБНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕЦ НЬЮТОНА 33

Высшая школа

В. В. Майер ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
Е. И. Вараксина ЭЛЕКТРОФОРНОЙ МАШИНЫ 43
Ю. А. Корнев

Исследования

И. В. Гребенев	МЕТОДИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТИРУЮЩЕГО МЫШЛЕНИЯ	45
П. В. Зуев	ДИДАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ ЦИТАТЫ АКАДЕМИКА П. Л. КАПИЦЫ О ПОДГОТОВКЕ ИНЖЕНЕРА	55
В. В. Майер А. А. Перминов	ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ: ПРОВЕРКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НОВОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ В ПРАКТИКУМЕ	59
АВТОРЫ ЖУРНАЛА		67
ABSTRACTS		68

Редакция журнала:

В. В. Майер (главный редактор), Р. В. Акатов, Е. И. Вараксина, Л. С. Кропачева

Редакционный совет:

И. В. Гребенев д.п.н., профессор, Нижний Новгород
М. Д. Даммер д.п.н., профессор, Челябинск
П. В. Зуев д.п.н., профессор, Екатеринбург
Ю. А. Сауров д.п.н., профессор, член-корр. РАО, Киров

Оргкомитет конференции:

Н. Я. Молотков д.п.н., профессор, Тамбов
Г. Г. Никифоров к.п.н., доцент, ИСРО РАО, Москва
А. Ю. Пентин к.ф.-м.н., доцент, ИСРО РАО, Москва
Ф. А. Сидоренко д.ф.-м.н., профессор, Екатеринбург
Я. А. Чиговская-Назарова к.филол.н., доцент, ректор ГГПИ, Глазов
Т. Н. Шамало д.п.н., профессор, Екатеринбург

Адрес редакции, издателя и типографии: 427621, Удмуртия, Глазов,
Первомайская, 25, Педагогический институт, Телефон: (341 41) 5-32-29.

E-mail: kropa@bk.ru

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Глазовский государственный педагогический институт имени В. Г. Короленко»

Журнал «Учебная физика» зарегистрирован Комитетом Российской Федерации по печати 4 февраля 1997 года, регистрационный № 015686, перерегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 2 мая 2017 года, ПИ № ФС77-69506.

Использование и перепечатка материалов допускаются только по договоренности с редакцией журнала.

Сдано в набор 21.03.23. Подписано в печать 27.03.23. Дата выхода в свет: 29.03.23. Формат 60 × 90 1/16. Усл. печ. л. 4,25.

Заказ 157. Тираж 200 экз. Цена свободная.

Первая страница обложки: Модель электрофорной машины (Майер В. В., Вараксина Е. И., Корнев Ю. А. Физическое моделирование электрофорной машины // Учебная физика. — 2023. — № 1. — С. 43–44).

УДК 372.853

В. В. Майер, А. А. Перминов
**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ПРАКТИКУМА:
УЧЕБНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕЦ НЬЮТОНА**

В статье представлено пособие по лабораторной работе школьного физического практикума повышенного уровня по исследованию колец Ньютона.

Ключевые слова: физический практикум, повышенный уровень, лабораторная работа, кольца Ньютона, учебное исследование.

1. Введение

Исаак Ньютон был первым, кто экспериментально исследовал картину из concentрических светлых и темных колец, возникающую при наложении выпуклой линзы на плоскую стеклянную пластинку. Своими опытами он доказал присущую свету периодичность, но не сумел понять, что обнаружил явление интерференции световых волн. Спустя более ста лет после Ньютона это сделал его соотечественник Томас Юнг.

Пособие к лабораторной работе, которое вы держите в своих руках, имеет своей целью формирование понятия интерференции света методом самостоятельного экспериментального исследования знаменитых колец Ньютона. Чтобы это исследование стало успешным, необходимо в течение недели перед лабораторным занятием: 1) изучить основы физической теории; 2) вывести расчетные формулы для радиусов колец Ньютона; 3) представить порядок сборки экспериментальной установки; 4) уяснить последовательность выполнения эксперимента; 5) усвоить метод математической обработки результатов исследования; 6) познакомиться с заданиями и контрольными вопросами по лабораторной работе.

2. Интерференция света и когерентность световых волн

Интерференция света — явление наложения двух или нескольких световых пучков, при котором результирующая интенсивность не равна сумме интенсивностей каждого из пучков

по отдельности. Напомним, что интенсивность прямо пропорциональна квадрату амплитуды волны.

Атомы естественного источника испускают свет независимо друг от друга короткими отрезками волн, которые называются *цугами*. Начальные фазы цугов волн, идущих от источника света, беспорядочно меняются. Поэтому интенсивности световых пучков, падающих на белый экран от двух разных источников, просто складываются.

Вы знаете, что при наложении механических волн наблюдается явление интерференции, если эти волны *когерентны*, то есть имеют одинаковую частоту, и их фазы остаются неизменными за время, достаточное для наблюдений.

Чтобы выполнить это условие для света от естественного источника, нужно каждый цуг волн разделить на две когерентные части и затем свести их вместе так, чтобы образовавшиеся при делении цуги наложились друг на друга хотя бы частично. В этом случае интенсивность света в области наложения пучков, вообще говоря, не будет равна сумме интенсивностей каждого из пучков по отдельности.

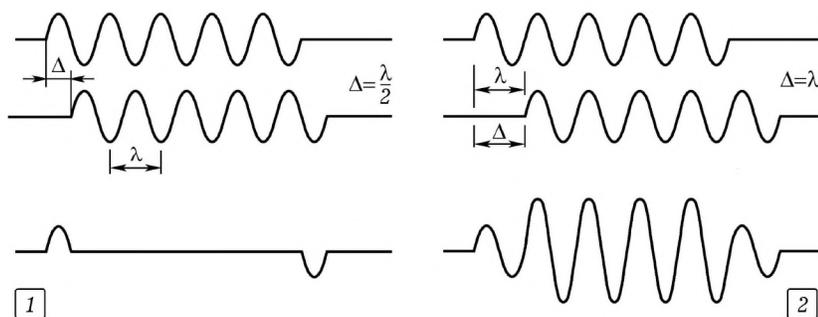


Рис. 1. Интерференция цугов волн, идущих от одного атома. Оптическая разность хода Δ равна: 1 — половине длины волны $\lambda/2$ — минимум; 2 — целой длине волны λ — максимум интенсивности

Результат интерференции зависит от *оптической разности хода* Δ между волнами. Из рис. 1.1 видно, что если разность хода между когерентными цугами волн равна нечетному числу длин полуволн, то при интерференции получается минимум интенсивности света. Сложите соответствующие одинаковым моментам времени значения *элонгаций* цугов, и вы увидите, что от нуля отличаются элонгации только начала и конца результирующего цуга.

Другое дело, если оптическая разность хода Δ между когерентными цугами равна целому числу длин волн или четному

числу длин полуволн: при наложении таких цугов их амплитуды складываются (рис. 1.2).

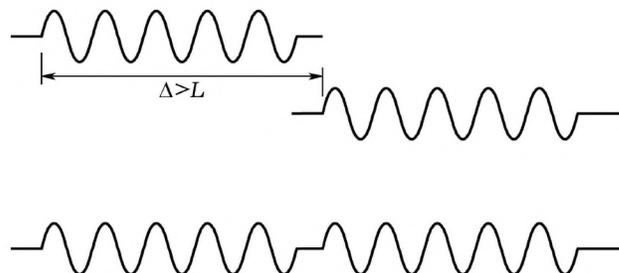


Рис. 2. Интерференция отсутствует, если оптическая разность хода Δ между когерентными цугами больше длины L цугов: $\Delta > L$

Очевидно, что интерференции нет, если оптическая разность хода Δ между когерентными цугами больше длины цугов L , проходящих через точку их наложения (рис. 2).

3. Как получаются кольца Ньютона

Кольца Ньютона — интерференционная картина, которая возникает при наложении двух световых пучков, отраженных от соприкасающихся поверхностей стеклянной пластинки и лежащей на ней выпуклой линзы (рис. 3). Интерференция света происходит на тонком слое воздуха, заключенном между стеклянной пластинкой и линзой. Так как радиус кривизны R выпуклой поверхности линзы велик, то изменением направления распространения при отражении и преломлении света можно пренебречь и для расчета использовать показанный на рисунке приближенный ход лучей.

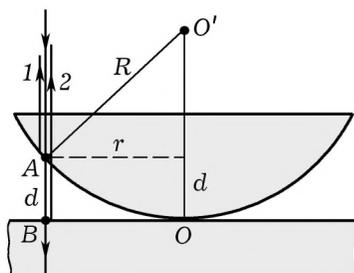


Рис. 3. Оптическая схема образования колец Ньютона: лучи показывают направления распространения цугов световых волн

Каждый луч света, падающий на тонкий слой воздуха нормально, на его верхней границе в точке A разделяется на два луча. Отраженный луч 1 идет вверх, а преломленный луч сначала идет вниз, отражается от поверхности стеклянной пластинки в точке B и затем тоже идет вверх так, что луч 2 практически совпадает с лучом 1 .

Лучи 1 и 2 получились из одного падающего на слой воздуха луча в точке A и затем соединились в этой же точке вместе. Значит, этим лучам соответствуют когерентные цуги волн, которые могут интерферировать. Но для этого нужно, чтобы оптическая разность хода между когерентными цугами была меньше их длины.

Оптическая разность хода между лучами 1 и 2 равна

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

где d — толщина воздушного слоя. В этой формуле учтено, что при отражении от *оптически более плотной* среды происходит *потеря полуволны* $\lambda/2$ (иначе говоря, фаза волны изменяется на противоположную).

Применяя теорему Пифагора, получаем: $R^2 = r^2 + (R - d)^2 = r^2 + R^2 - 2Rd + d^2$. Поскольку $R \gg d$, то d^2 по сравнению с другими членами этой формулы можно пренебречь, поэтому толщина d воздушного слоя приближенно равна:

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

Максимум интенсивности при интерференции наблюдается, если оптическая разность хода между когерентными волнами равна целому числу длин волн или четному числу длин полуволн:

$$\frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2} = k\lambda \quad \text{или} \quad \frac{r^2}{R} = (2k - 1)\frac{\lambda}{2}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (3)$$

Минимум интенсивности при интерференции получается, если оптическая разность хода между когерентными волнами равна нечетному числу длин полуволн:

$$\frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2} = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}, \quad \text{или} \quad \frac{r^2}{R} = k\lambda, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

Из последней формулы следует, что в центре интерференционной картины в отраженном свете расположено темное пятно.

4. Сборка экспериментальной установки

Прибор для наблюдения колец Ньютона состоит из плоскопараллельной стеклянной пластинки и стеклянной плоско-выпуклой линзы, которые установлены в металлической обойме и скреплены тремя винтами. Обращаться с ним, как и с любым оптическим прибором, нужно аккуратно: брать в руки только за края обоймы, не касаться стеклянных поверхностей, не вращать винты.

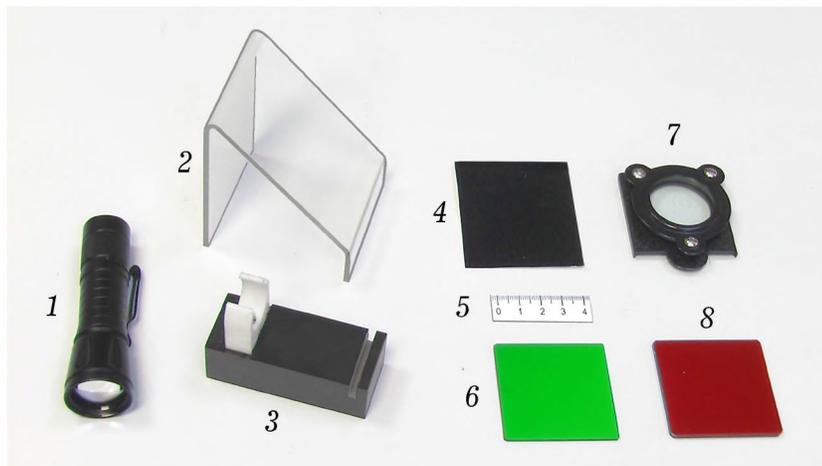


Рис. 4. Элементы экспериментальной установки для наблюдения и исследования колец Ньютона

На рис. 4 приведена фотография элементов экспериментальной установки: 1 — светодиодный фонарь; 2 — рассеивающий экран с прозрачным отражателем, сделанный из оргстекла; 3 — подставка для фонаря; 4 — листок из черной бумаги; 5 — специальная линейка с ценой деления 0,5 мм; 6 — зеленый светофильтр; 7 — прибор для наблюдения колец Ньютона; 8 — красный светофильтр.

Соберите установку следующим образом. На стол положите листок черной бумаги 4 и на него поместите прибор для наблюдения колец Ньютона 7 (рис. 5). Сверху на прибор положите специальную линейку 5. Поставьте сделанный из оргстекла рассеивающий экран с прозрачным отражателем 2 так, чтобы идущий сбоку свет отражался вниз на прибор. На рассеивающий экран направьте световой пучок от светодиодного фонаря 1 и перекройте падающий пучок зеленым светофильтром 6. Изменяя

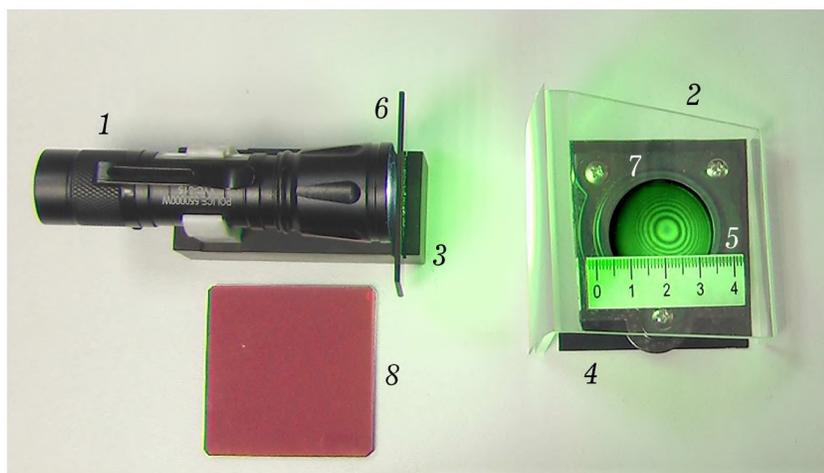


Рис. 5. Экспериментальная установка для изучения колец Ньютона

фокусировку фонаря и расстояние от него до матового экрана, добейтесь, чтобы при наблюдениях сверху через прозрачный отражатель была резко видна равномерно освещенная интерференционная картина.

5. Выполнение эксперимента

Интерференционная картина, которую вы увидите, будет представлять собой, скорее всего, не круглые кольца, а систему замкнутых кривых, похожих на эллипсы. Это свидетельствует о том, что выпуклая поверхность линзы, строго говоря, не совсем сферическая. Ваша задача определить максимальный и минимальный радиусы кривизны выпуклой поверхности линзы.

Включите смартфон, переведите его в режим фотографирования и держите его сверху над прозрачным отражателем экспериментальной установки. Настройте смартфон так, чтобы на его дисплее получилось изображение колец Ньютона не хуже того, которое вы видите непосредственно глазом. Чтобы картина не была искажена, смартфон нужно расположить горизонтально так, чтобы объектив его камеры находился на вертикали, проходящей через центр колец Ньютона. Несколько раз сфотографируйте кольца в белом свете.

На прибор для наблюдения колец Ньютона положите линейку так, чтобы она оказалась параллельна наибольшему диаметру колец. Световой пучок, идущий от фонаря, перекройте красным

светофильтром и вновь несколько раз сфотографируйте интерференционную картину. Поверните линейку так, чтобы она стала параллельна наименьшему диаметру колец, и повторите фотографирование.

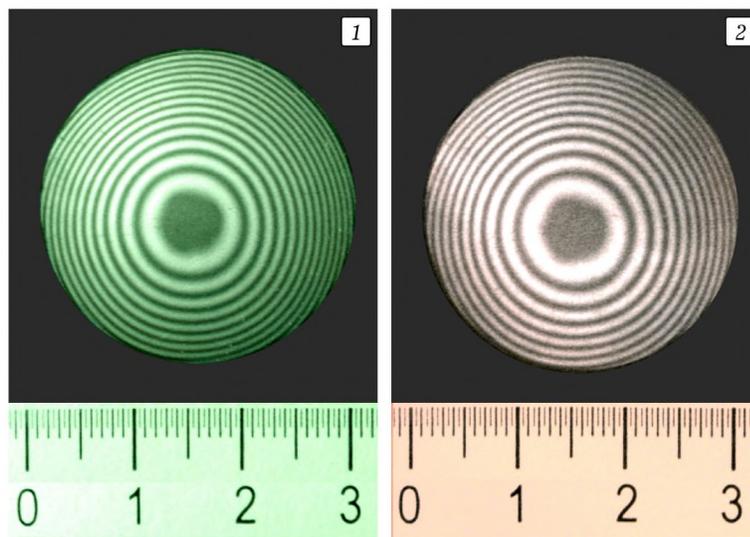


Рис. 6. Фотографии колец Ньютона: 1 — в зеленом свете; 2 — в красном свете

Выясните, как изменяется интерференционная картина при замене красного светофильтра зеленым. На рис. 6 приведены фотографии, подобные тем, какие вы должны получить.

6. Обработка результатов эксперимента

Непосредственные результаты эксперимента необходимо математически обработать, проанализировать и интерпретировать. Напомним, как это можно сделать.

1. Оценка по среднему значению случайной погрешности измерения. Вычислите, например, *максимальный радиус кривизны* R выпуклой поверхности линзы.

По фотографии, сделанной в красном свете, определите радиусы r темных колец Ньютона. Для этого с помощью фотографии линейки найдите координаты левой x_1 и правой x_2 границ выбранного темного кольца. Радиус этого кольца вычислите по формуле

$$r = \frac{x_2 - x_1}{2} \quad (5)$$

и получившееся значение занесите табл. 1. Таким же способом найдите радиусы всех темных колец Ньютона и вычислите их квадраты r^2 . Из формулы (4) выразите радиус кривизны линзы

$$R = \frac{r^2}{k\lambda} \quad (6)$$

и, взяв для красного света длину волны $\lambda = 645 \pm 10$ (нм), определите соответствующие значения минимального радиуса кривизны линзы R . Найдите среднее арифметическое значение радиуса $R_{\text{ср}}$, абсолютную погрешность ΔR каждого измерения и среднее значение этой погрешности $\Delta R_{\text{ср}}$. Результаты измерений и расчетов занесите в табл. 1.

Таблица 1
Результаты измерений и вычислений

k	x_1 , мм	x_2 , мм	r , мм	r^2 , мм ²	R , м	ΔR , м
0						
1						
2						
Средние значения						

Запишите получившееся значение максимального радиуса кривизны линзы с оценками по средним значениям абсолютной и относительной погрешностей:

$$R = R_{\text{ср}} \pm \Delta R_{\text{ср}}, \quad \varepsilon = \frac{\Delta R_{\text{ср}}}{R_{\text{ср}}}. \quad (7)$$

Оценка, сделанная по среднему значению погрешностей нескольких измерений, дает грубое представление о точности измерения физической величины. В физических исследованиях применяются более строгие методы определения случайной погрешности [1], но они, к сожалению, значительно сложнее.

2. Погрешность косвенного измерения. Радиус кривизны R выпуклой поверхности линзы измерен не непосредственно, а вычислен по формуле. Непосредственно измерялись физические величины, входящие в формулу. Такое измерение называется косвенным. Чтобы определить точность косвенного измерения, проще всего вначале вычислить его относительную погрешность. Действовать нужно так.

Прологарифмируйте выражение (6) для радиуса кривизны R линзы и найдите дифференциал получившегося выражения:

$$\ln R = 2 \ln r - \ln k - \ln \lambda, \quad \frac{dR}{R} = 2 \frac{dr}{r} - \frac{dk}{k} - \frac{d\lambda}{\lambda}.$$

Теперь замените бесконечно малые дифференциалы небольшими, но конечными абсолютными значениями приращений:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R} = 2\frac{\Delta r}{r} + \frac{\Delta k}{k} + \frac{\Delta \lambda}{\lambda}. \quad (8)$$

Вы получили формулу для вычисления относительной погрешности результата вычисления радиуса кривизны, если известны абсолютные погрешности измерительных приборов. Понятно, что погрешность линейки не превышает цену деления, то есть $\Delta r = 0,5$ мм, k — это просто номер кольца, значит, $\Delta k = 0$. Погрешность измерения длины волны определяется записью ее значения $\Delta \lambda = 10$ нм.

Подставив в формулу (8) найденные в эксперименте значения непосредственно измеренных величин с их абсолютными погрешностями, определите относительную погрешность ε и вычислите абсолютную погрешность ΔR :

$$\Delta R = \varepsilon R. \quad (9)$$

3. Анализ и интерпретация полученных результатов. Попробуйте ответить на такой вопрос: что именно доказывает выполненное вами экспериментальное исследование? Дайте подробное обоснование ответу.

7. Экспериментальные задания

Цель этого этапа работы состоит в том, чтобы извлечь из результатов эксперимента максимальное знание об изучаемом физическом явлении. Попробуйте сделать это самостоятельно, в полной мере используя материал пособия для выполнения следующих заданий.

1. Нарисуйте и заполните таблицу по результатам проведенного эксперимента.

2. Запишите результат измерения радиуса кривизны линзы с абсолютной погрешностью, вычисленной по среднему значению. Определите относительную погрешность найденной величины.

3. По результатам эксперимента постройте график зависимости радиуса темного кольца r от его номера k : $r = r(k)$. Какой вывод следует из анализа построенного графика? Запишите его на свободном поле графика.

4. По результатам эксперимента постройте график зависимости квадрата радиуса темного кольца r^2 от его номера k : $r^2 = r^2(k)$. Что доказывает полученный график? По графику проверьте найденное значение радиуса кривизны линзы.

5. По формулам (8) и (9) пособия вычислите относительную и абсолютную погрешности радиуса кривизны и запишите полученные результаты. Сравните со значением, полученным в задании 2, и сделайте выводы.

8. Контрольные вопросы

Ответы на эти простые вопросы показывают, насколько серьезно при подготовке к эксперименту вы отнеслись к учебной физической теории интерференции света.

1. Какое физическое явление называется интерференцией света?
2. Почему интерференция света не наблюдается при большой толщине воздушного слоя между стеклянной пластинкой и линзой?
3. Почему в центре интерференционных колец Ньютона в отраженном свете получается темное пятно?
4. Почему в теории колец Ньютона не учитывается отражение света от верхней поверхности линзы?
5. Как изменится интерференционная картина, если радиус кривизны линзы увеличить в 4 раза?

* * *

Методика проведения рассмотренной лабораторной работы проверена в педагогическом эксперименте [2, 3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Майер В. В., Перминов А. А. Изучение колец Ньютона в физическом практикуме прикладного бакалавриата // Учебная физика. — 2019. — № 2. — С. 35–47.
2. Майер В. В., Вараксина Е. И., Иванов Ю. В. Современные достижения науки, техники и технологии в физическом практикуме // Учебная физика. — 2020. — № 4. — С. 50–55.
3. Майер В. В., Перминов А. А. Педагогический эксперимент: проверка возможности использования новой лабораторной работы в практикуме // Учебная физика. — 2023. — № 1. — С. 59–66.

Глазовский государственный
педагогический институт

Поступила в редакцию 14.03.23.

ABSTRACTS

XXVIII All–Russia scientific and practical conference «The Educational Physics Experiment: Topical problems. Modern solutions». A report on XXVIII All–Russian scientific and practical conference «The Educational Physics Experiment: Topical problems. Modern solutions» is presented. The conference was organized in Glazov on 27–28 January 2023. The names and abstracts of the reports are given. *Keywords:* didactics of physics, educational physics experiment, scientific and practical conference.

Mayer V. V., Chetkarev A. N. Educational model of a gun on alcohol vapor. For students of the 9th grade of the basic school, an engineering and physical project is proposed. The purpose of the project is to develop and manufacture a working model of a gun intended for experimental study in the 10th grade of high school of the recoil of the gun when fired. *Keywords:* student project, gun model, recoil when fired, experimental study.

Faddeev M. A., Maslennikova Yu. V. Solving multilevel experimental problems in physics as one of the ways to prepare students for training in advanced engineering schools. The article considers an approach to the development and use of multilevel experimental problems in physics in the educational process, which contributes to the effective preparation of students for training in advanced engineering schools. *Keywords:* school physics experiment, multilevel experimental tasks, advanced engineering schools.

Mayer V. V., Vasiliev I. A., Kornev Yu. A. High-voltage converter for experiments in electrostatics. The article describes the schematic diagram, design, manufacturing technology and the results of an experimental study of a high-voltage converter on a field-effect transistor. *Keywords:* electrostatics, educational experiments, high voltage, electronic converter.

Mayer V. V., Perminov A. A. Laboratory work of the workshop: an educational study of Newton's rings. The article presents a manual on the laboratory work of a high-level school physics workshop on the study of Newton's rings. *Keywords:* physical workshop, advanced level, laboratory work, Newton rings, educational research.

Mayer V. V., Varaksina E. I., Kornev Yu. A. Physical modelling of an electrophorical machine. A working physical model of an electrophorical machine is proposed, intended for a lecture demonstration in the course of general and experimental physics of a pedagogical university. *Keywords:* electrophor, electric spark gap, high voltage capacitor.

Grebenev I. V. The methodological significance of experimental thinking. Some aspects of the influence of experimental thinking on the development of methods of teaching physics are considered. *Keywords:* experimental thinking, modeling, school physical experiment.

Zuev P. V. Didactic value of academician P. L. Kapitsa's quote about engineer training. Methodological techniques are offered to prepare students for engineering and technical activities. *Keywords:* engineer, engineering activity, activity approach, experiment, theory, model, level of training.

Mayer V. V., Perminov A. A. Pedagogical experiment: testing the possibility of using new laboratory work in a workshop. The article presents the conditions, results and analysis of a pedagogical experiment to test the possibility of using laboratory work «Educational study of Newton's rings» in the workshop of the physics and mathematics lyceum. *Keywords:* physics and mathematics lyceum, workshop, laboratory work, Newton rings, pedagogical experiment.