

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра общей и технической физики

ФИЗИКА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ ПО КОЛЬЦАМ НЬЮТОНА

*Методические указания к лабораторной работе
для студентов всех специальностей и направлений подготовки*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2023

ФИЗИКА. Определение радиуса кривизны линзы по кольцам Ньютона: Методическое указание к лабораторной работе / Сост.: *А.С. Мустафаев, А.Ю. Грабовский, И.А. Аверин*. Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 2023. 17 с.

В методических указаниях к лабораторной работе «Определение радиуса кривизны линзы по кольцам Ньютона» сформулированы: теоретические вопросы, методические указания и алгоритм выполнения работы. Рассмотрены вопросы интерференции света, анализа кривизны плосковыпуклой линзы при наблюдении колец Ньютона в монохроматическом свете известной длины волны; определения неизвестных длин волн монохроматического света при заданном радиусе кривизны линзы. Основная задача - овладеть техникой и методикой проведения эксперимента, а также приемами обработки его результатов и оформления заключительного отчета.

Методическое указание к лабораторной работе предназначены для студентов, бакалавров и магистров всех специальностей и форм обучения Санкт-Петербургского горного университета.

Научный редактор к.п.н., доцент *Е.С. Ломакина*

Рецензент профессор *А.А. Кудрявцев* (ИТФ РАН)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ ПО КОЛЬЦАМ НЬЮТОНА

Цель работы

Изучить явление интерференции света. Определить радиус кривизны плоско-выпуклой линзы при наблюдении колец Ньютона в монохроматическом свете известной длины волны; определить неизвестную длину волны монохроматического света при заданном радиусе кривизны линзы.

Теоретическое введение

Согласно волновой теории, свет представляет собой электромагнитные волны, причем составляющая электромагнитной волны - напряженность электрического поля \vec{E} (световой вектор) - ответственна за большинство наблюдаемых оптических явлений.

В электромагнитной волне вектор напряженности \vec{E} зависит от координат и времени согласно выражению:

$$\vec{E} = E_0 \cdot \cos(\omega t - \vec{k}r + \varphi), \quad (1)$$

где $\omega = \frac{2\pi}{T}$ - циклическая частота, \vec{k} - волновой вектор

($k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число), φ - начальная фаза, T - период, λ - длина волны.

Если амплитуда, частота, длина волны и начальная фаза не меняются со временем, то вышеприведенное выражение описывает монохроматическую волну. Реально эти условия не выполняются, т.е. монохроматическая волна является идеализацией. Электрическая составляющая световой волны \vec{E} заметно изменяется при распространении света в различных средах, при прохождении через препятствие и при сложении волн.

При распространении в пространстве нескольких волн результирующее колебание в любой точке представляет собой геометрическую сумму колебаний, т.е. суперпозицию волн.

Особый интерес представляет сложение волн, при котором

наблюдается явление интерференции света, когда происходит перераспределение энергии светового потока в пространстве, в результате чего в одних местах возникают максимумы, а в других – минимумы интенсивности. Эта картина называется интерференционной.

При суперпозиции двух волн, интерференционная картина возникает при выполнении следующих условий: волны когерентны (разность начальных фаз $\varphi_2 - \varphi_1 = \text{const}$); волны имеют одинаковую циклическую частоту ($\omega_1 = \omega_2 = \omega$); волны имеют одинаковую поляризацию вектора \vec{E} ($\vec{E}_1 \parallel \vec{E}_2$).

Результирующее колебание в точке P в данный момент времени t , возникающее при сложении двух световых волн, приходящих их разных точек P_1 и P_2 , есть:

$$\vec{E}(P, t) = \vec{E}_1(P, t) + \vec{E}_2(P, t). \quad (2)$$

Введем понятие оптической разности фаз:

$$\Delta\varphi = k(r_2 - r_1) + (\varphi_1 - \varphi_2) \quad (3)$$

и оптической разности хода:

$$\Delta l = n_2 r_2 - n_1 r_1, \quad (4)$$

где n_1 и n_2 – показатели преломления сред, в которых распространяются первая и вторая волны. Если среда – воздух, $n_1 = n_2 \approx 1$, тогда $\Delta l = r_2 - r_1$.

В дальнейшем положим, что $\varphi_2 - \varphi_1 = 0$. В этом случае оптическая разность фаз между двумя волнами будет:

$$\Delta\varphi = k\Delta l = \frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1). \quad (5)$$

Интенсивность световой волны I пропорциональна квадрату ее амплитуды E_0 , т.е. $I \sim E_0^2$. Возводя (2) в квадрат, будем иметь, с учетом (1):

$$\begin{aligned} E_0^2 \cos^2(\omega t - kP + \varphi) &= \\ &= (E_{01}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos \Delta\varphi + E_{02}^2) \cos^2(\omega t - \delta), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{где } \text{tg} \delta = \frac{E_{01} \sin(k_1 r_1 - \varphi_1) + E_{02} \sin(k_2 r_2 - \varphi_2)}{E_{01} \cos(k_1 r_1 - \varphi_1) + E_{02} \cos(k_2 r_2 - \varphi_2)},$$

а $\Delta\varphi$ задается выражением (3).

Наблюдаемая (регистрируемая) в опыте интенсивность света представляет собой среднее значение I , взятое за промежуток времени $\Delta t \gg T$ ($T = \frac{2\pi}{\omega}$ - период световой волны). Усредняя выражение (6) по времени, получим:

$$E_0^2 = E_{01}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos \Delta\varphi + E_{02}^2$$

или

$$I = I_1 + \sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\varphi + I_2. \quad (7)$$

В данном месте пространства получаем условие максимальной интенсивности (условие максимума), если $\cos \Delta\varphi = 1$, откуда

$$\Delta\varphi = \pm m\pi, m=0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

и условие минимальной интенсивности (условие минимума), если $\cos \Delta\varphi = -1$, откуда:

$$\Delta\varphi = \pm(2m+1)\pi, m=0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

Но $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l$, следовательно оптическая разность хода, со-

ответствующая максимуму интенсивности:

$$\Delta l_{\max} = \pm m\lambda, m=0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

а оптическая разность хода, соответствующая минимуму интенсивности:

$$\Delta l_{\min} = \pm(2m+1)\frac{\lambda}{2}, m=0, 1, 2, \dots \quad (11)$$

Существуют различные способы получения интерференционной картины. Частный случай - интерференционные полосы равной толщины (геометрическое место точек, в которых имеет место интерференция), примером которых являются кольца Ньютона.

В данной работе наблюдается интерференционная картина, возникающая при отражении световой волны от верхней и нижней поверхностей тонкого клина. Таким клином служит воздушная прослойка, образованная поверхностью плоской стеклянной пластины и соприкасающейся с ней выпуклой сферической поверхностью линзы большого радиуса кривизны R (рис. 1, 2).

При нормальном падении монохроматического света на пло-

скую поверхность линзы в отраженном свете наблюдаются полосы равной толщины в виде чередующихся концентрических темных и светлых колец, называемых кольцами Ньютона. Зазор между линзой и плоской пластиной равен $(d+d_0)$, если идеальный контакт отсутствует и равен d в случае плотного прилегания (так как $d_0 = 0$).

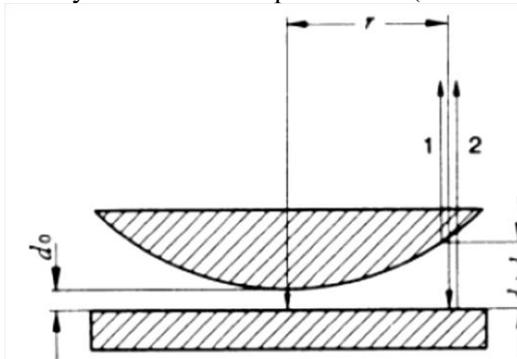


Рис 1. Ход лучей в отраженном свете при получении колец Ньютона

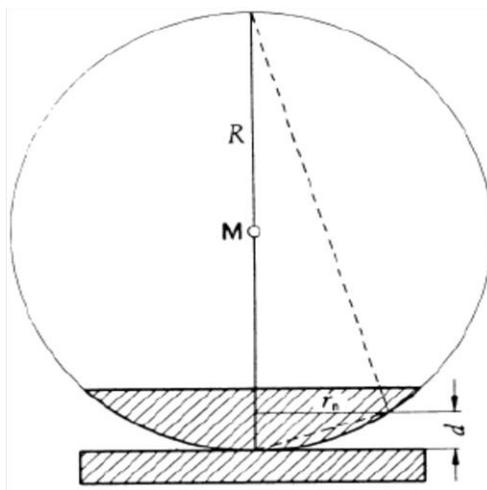


Рис 2. Геометрические построения при определении толщины d ($d_0 = 0$)

В результате мы имеем две интерферирующие волны: первая возникает при отражении падающей волны от нижней поверхности линзы, вторая — при прохождении волны внутрь воздушного клина и последующего отражения от плоской пластины. Эти две волны имеют оптическую разность хода:

$$\Delta l' = 2(d + d_0).$$

Следует учесть, что при отражении от оптически более плотной среды фаза отраженной электрической составляющей волны скачком изменяется на π , что равносильно дополнительной разности хода $\frac{\lambda}{2}$.

При отражении от оптически менее плотной среды фаза отраженной электрической составляющей волны не изменяется.

Таким образом, полная оптическая разность хода волн 1 и 2 (рис. 1) равна:

$$\Delta l = (2d + 2d_0) + \frac{\lambda}{2}. \quad (12)$$

Условие максимума интерференции (10) запишется в виде:

$$\Delta l_{\max} = (2d + 2d_0) + \frac{\lambda}{2} = \pm m\lambda. \quad (13)$$

Соответственно, условие минимума интерференции (11) – в виде:

$$\Delta l_{\min} = (2d + 2d_0) + \frac{\lambda}{2} = \pm \left(m + \frac{1}{2} \right) \lambda. \quad (14)$$

В дальнейшем будем обозначать радиус колец Ньютона через r_m , радиус линзы - R . Из рис. 2 видно, что r_m перпендикулярен диаметру $2R$, r_m опущен из вершины прямоугольного треугольника, т.е. $r_m^2 = (2R - d) \cdot d = 2Rd - d^2$. Т.к. $d \ll R$, $r_m^2 = 2Rd$; $d = \frac{r_m^2}{2R}$.

Отсюда:

$$\Delta l = \left(\frac{r_m^2}{R} + 2d_0 \right) + \frac{\lambda}{2}.$$

Условие максимума (13) приобретает вид:

$$\frac{r_{\max}^2}{R} + 2d_0 + \frac{\lambda}{2} = \pm m\lambda, \quad (15)$$

$$r_{\max}^2 = \left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda R - 2d_0 R, m=0, 1, 2, \dots \quad (16)$$

Соответственно, условие минимума (14) приобретает вид:

$$\frac{r_{\min}^2}{R} + 2d_0 + \frac{\lambda}{2} = \pm \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \quad (17)$$

$$r_{\min}^2 = m\lambda R - 2d_0 R, m=0, 1, 2, 3, \dots \quad (18)$$

В данной лабораторной работе рассматривается случай идеального контакта, когда $d_0=0$.

Если интерференционная картина наблюдается в проходящем свете, то она будет обратной по отношению к картине в отраженном свете: там, где наблюдались темные кольца, будут наблюдаться светлые, и наоборот.

Описание экспериментальной установки

Общий вид установки представлен на рис. 3.

Источником света служит гелий-неоновый лазер (2) с длиной волны $\lambda=632,8$ нм, питаемый от источника тока (1).

Плосковыпуклая линза большого радиуса кривизны и стеклянная пластина, с которой соприкасается линза, помещены в корпус и образуют единое устройство для получения интерференционной картины (кольца Ньютона) (5). На полупрозрачном экране (7) с помощью линзы (6) проектируется интерференционная картина и измерительная линейка.

Световой поток, выходя из лазера, падает на отражатель (3). Отражатель меняет направление распространения потока, в результате чего свет, проходя через диафрагму (4), падает на устройство, дающее интерференционную картину в отраженном свете. Затем, отраженный поток, пройдя линзу (6), попадает на экран (7), где формируется интерференционная картина в виде колец. Эта картина

формируется на экране (7). Все элементы установки монтируются на столике (8) с магнитным покрытием.

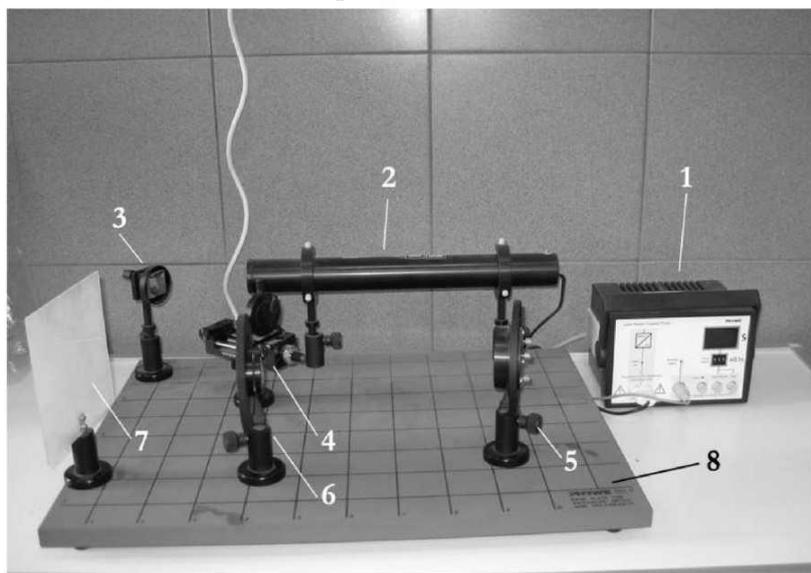


Рис 3. Общий вид экспериментальной установки

Порядок проведения эксперимента

При выполнении работы следует строго соблюдать правила техники безопасности и охраны труда, установленные на рабочем месте студента в лаборатории.

1. Разместите все элементы установки на предметном столике.
2. Включите лазерную установку.
3. Произведите юстировку оптической системы и получите изображение интерференционной картины на экране.

4. На полученной интерференционной картине измерьте диаметры D_l темных (или светлых, согласно индивидуальному заданию) колец и соответствующие им номера m . Кольц должно быть не менее десяти. Результаты измерения диаметров D_l (мм), радиусов колец r_1 (мм), r_1^2 (мм²) занесите в таблицу 2.

5. Повторите измерения согласно пункту 4 диаметров D_2 (мм), темных (или светлых, согласно индивидуальному заданию) колец и соответствующие им номера m при положении измерительной линейки, перпендикулярном первоначальному. Результаты измерений D_2 (мм), r_2 (мм), r_2^2 (мм²) занесите в таблицу 2.

Таблица 1

№ m кольца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D_1 (мм)										
r_1 (мм)										
r_1^2 (мм ²)										
R (м)										
D_2 (мм)										
r_2 (мм)										
r_2^2 (мм ²)										
λ (нм)										

Обработка результатов эксперимента

1. Расчет радиуса кривизны линзы R (м).

1) Постройте график зависимости $r_1^2 = f(m)$.

2) Рассчитайте тангенс угла наклона прямой, воспользовавшись одним из соотношений (16) или (18) в зависимости от полученного индивидуального задания.

3) Выразите из полученного в предыдущем пункте соотношения радиус кривизны и посчитайте его.

4) Рассчитайте погрешность определения радиуса кривизны. Для расчета используйте данные таблиц 1 и 2. Относительная погрешность определения R :

$$\delta_R = \frac{\Delta R}{R} 100\% = \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda} + \frac{2\Delta r_m}{r} \right) 100\%.$$

Абсолютная погрешность ΔR :

$$\Delta R = \frac{\delta_R \cdot \bar{R}}{100} \text{ (м)}.$$

5) Ответ запишите в СИ в виде:

$$\begin{aligned} (\bar{R} \pm \Delta R) &= \text{ (м)}, \\ \delta_{\bar{R}} &= \text{ (}\% \text{)}. \end{aligned}$$

2. Расчет длины волны λ (м).

1) Постройте график зависимости $r_2^2 = f(m)$.

2) Рассчитайте тангенс угла наклона прямой, воспользовавшись одним из соотношений (16) или (18) в зависимости от полученного индивидуального задания.

3) Выразите из полученного в предыдущем пункте соотношения длину волны и посчитайте её.

4) Рассчитайте погрешность определения длины волны. Для расчета используйте данные таблиц 1 и 2. Относительная погрешность определения λ :

$$\delta_{\bar{\lambda}} = \left(\frac{2\Delta r_{\min 2}}{r_{\min}} + \frac{\Delta R}{R} \right) 100\%.$$

Абсолютная погрешность $\Delta\lambda$:

$$\Delta\lambda = \frac{\delta_{\bar{\lambda}} \cdot \bar{R}}{100} \text{ (м)}.$$

Ответ запишите в СИ в виде:

$$\begin{aligned} (\bar{\lambda} \pm \Delta\lambda) &= \text{ (м)}, \\ \delta_{\bar{\lambda}} &= \text{ (}\% \text{)}. \end{aligned}$$

3. Выполните полученное от преподавателя индивидуальное задание.

Контрольные вопросы

1. Что такое когерентность?
2. Когда наблюдаются интерференционные полосы равной толщины? Приведите пример.
3. Что такое оптическая разность хода и оптическая раз-

ность фаз? Какова связь между ними?

4. В каких случаях при интерференции света в тонких пленках оптическая разность хода меняется на $\lambda/2$?

5. Каковы условия максимума и минимума при наблюдении интерференционной картины?

6. Чем отличается интерференционная картина при наблюдении колец Ньютона в отраженном и проходящем свете?

7. Как меняются радиусы колец Ньютона при изменении длины волны света и показателя преломления среды при изменении заполнения среды между линзой и плоскопараллельной пластиной?

Индивидуальные задания

Задание 1

1. Сформулировать условия интерференции от двух когерентных источников света.

2. Определить радиус кривизны линзы R , считая длину волны падающего света равной $\lambda=(632,8\pm 0,1)$ нм. Необходимо измерить диаметр D_1 и D_2 темных колец при двух взаимно перпендикулярных положениях измерительной линейки. В качестве радиуса кривизны линзы взять среднее арифметическое полученных значений.

3. Произвести расчет согласно разделу «Обработка результатов эксперимента». Как меняется интерференционная картина, если излучение источника лежит в диапазоне от оранжевого до фиолетового цвета?

Задание 2

1. Рассмотреть схему получения полос равного наклона. Интерференционная картина в отраженном и проходящем свете при нормальном падении света.

2. Определить радиус кривизны линзы R , считая длину волны падающего света равной $\lambda=(632,8\pm 0,1)$ нм. Необходимо измерить диаметр D_1 и D_2 светлых колец при двух взаимно перпендикулярных положениях измерительной линейки. В качестве радиуса кривизны линзы взять среднее арифметическое полученных значений.

3. Произведите расчет согласно разделу «Обработка результатов эксперимента». Проанализируйте влияние на интерференционную картину увеличения длины волны источника света.

Задание 3

1. Рассмотреть схему получения полос равной толщины. Интерференционная картина в отраженном и проходящем свете.

2. Определить радиус кривизны линзы R , считая длину волны падающего света равной $\lambda=(632,8\pm 0,1)$ нм. Необходимо измерить диаметр D_1 светлых колец при одном положении измерительной линейки и диаметра D_2 темных колец при повороте линейки перпендикулярно первоначальному положению. В качестве радиуса кривизны линзы взять среднее арифметическое полученных значений.

3. Произведите расчет согласно разделу «Обработка результатов эксперимента». Проанализируйте влияние на интерференционную картину радиуса кривизны линзы.

Задание 4

1. Рассмотреть схему получения полос равного наклона. Интерференционная картина в отраженном и проходящем свете при падении света под углом.

2. Определите длину волны падающего света λ при использовании плосковыпуклой линзы радиуса R , величина указана на рабочем месте. Необходимо измерить диаметр D_1 и D_2 темных колец при двух взаимно перпендикулярных положениях измерительной линейки. В качестве длины волны взять среднее арифметическое

полученных значений.

3. Произвести расчет согласно разделу «Обработка результатов эксперимента». Проанализируйте влияние на интерференционную картину среды заполнения между линзой и пластиной, например, если заполнить воздушный зазор жидкостью с показателем преломления n .

РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Савельев И.В.* «Курс общей физики» Кн. 4. М.: ООО «Издательство АСТ», 93 - 96с, 119-121с.
2. *Капуткин Д.Е.* Физика: Обработка результатов измерений при выполнении лабораторных работ/Капуткин Д.Е., Шустиков А.Г.М.: МИСиС, 2007. 108 с. (№805).
3. *Батулин Б.Н.* Правила электробезопасности при выполнении лабораторных работ. Учебное пособие. М.: МИСиС. 1995.

ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ ОТЧЁТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Отчёт оформляется в печатном виде на листах формата А4 в соответствии с указанными ниже требованиями.

Помимо стандартного титульного листа в содержании отчёта должны быть раскрыты пункты, перечисленные ниже.

1. Цель работы.

2. Краткое теоретическое содержание.

- 1) Явление, изучаемое в работе.
- 2) Определения основных физических понятий, объектов, процессов и величин.
- 3) Законы и соотношения, описывающие изучаемые процессы, на основании которых, получены расчётные формулы.
- 4) Пояснения к физическим величинам и их единицы измерений.

3. Схема установки.

4. Расчётные формулы.

5. Формулы для расчёта погрешностей косвенных измерений.

6. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
(Таблицы должны иметь номер и название. Единицы измерения физических величин должны быть указаны в отдельной строке таблицы под строкой с обозначениями физических величин.)

7. Пример вычисления (для одного опыта).

- 1) Исходные данные.
- 2) Вычисления.
- 3) Окончательный результат.

8. Графический материал.

- 1) Записать аналитическое выражение функциональной зависимости, которая представлена на графике.
- 2) На осях координат указать масштаб, физические величины и единицы измерения.
- 3) На координатной плоскости должны быть нанесены экспериментальные точки.
- 4) По результатам эксперимента, представленным на координатной плоскости, провести плавную линию, аппроксимирующую

функциональную теоретическую зависимость в соответствии с методом наименьших квадратов.

9. Анализ полученного результата. Выводы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЗАЩИТЕ ОТЧЕТА

К защите допускаются студенты, подготовившие отчет в соответствии с требованиями к его содержанию в установленные сроки. После проверки преподавателем содержания отчёта, при наличии ошибок и недочетов, работа возвращается студенту на доработку. При правильном выполнении лабораторной работы, соблюдении всех требований к содержанию и оформлению отчёта, студент допускается к защите.

Для успешной защиты отчета необходимо изучить теоретический материал по теме работы, а также освоить математический аппарат, необходимый для вывода расчётных формул работы.

При подготовке к защите, помимо данного методического пособия, необходимо использовать учебники и другие учебные пособия, рекомендованные к учебному процессу кафедрой ОТФ.

Во время защиты студент должен уметь ответить на вопросы преподавателя в полном объёме теоретического и методического содержания данной лабораторной работы, уметь самостоятельно вывести необходимые расчётные формулы, выполнить анализ полученных зависимостей и прокомментировать полученные результаты.

СОДЕРЖАНИЕ

Определение радиуса кривизны линзы по кольцам ньютона....	3
Теоретическое введение	3
Описание экспериментальной установки	8
Порядок проведения эксперимента	9
Обработка результатов эксперимента.....	10
1. Расчет радиуса кривизны линзы R (м).....	10
2. Расчет длины волны λ (м).	11
Индивидуальные задания	12
Рекомендуемый библиографический список	14

ФИЗИКА
ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ
ПО КОЛЬЦАМ НЬЮТОНА

*Методические указания к лабораторной работе
для студентов всех специальностей и направлений подготовки*

Сост.: *А.С. Мустафаев, А.Ю. Грабовский, И.А. Аверин*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
общей и технической физики

Ответственный за выпуск *А.С. Мустафаев*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 09.02.2023. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 1,0. Усл.кр.-отт. 1,0. Уч.-изд.л. 0,8. Тираж 50 экз. Заказ 100.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2