

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
ФАКУЛЬТЕТ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Лабораторная работа 4.2.1
Кольца Ньютона

Рогозин Владимир
Группа Б03-106

Цель работы: познакомиться с явлением интерференции в тонких плёнках (полосы равной толщины) на примере колец Ньютона и с методикой интерференционных измерений кривизны стеклянной поверхности.

Оборудование: измерительный микроскоп с opak-иллюминатором; плосковыпуклая линза; пластинка из чёрного стекла; ртутная лампа ДРШ; щель; линзы; призма прямого зрения; объектная шкала.

Теоретические сведения:

Интерференция монохроматических волн. Пусть в пространстве распространяются две монохроматические волны одинаковой частоты с амплитудами a_1 и a_2 , и пусть в некоторой точке наблюдения их фазы равны φ_2 и φ_1 соответственно.

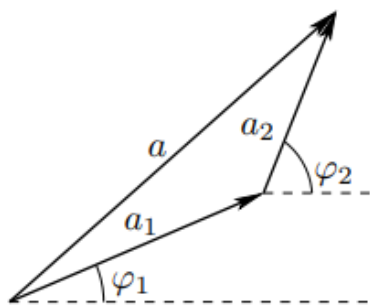


Рис. 1: Сложение колебаний

Согласно принципу суперпозиции, результирующий колебательный процесс в точке наблюдения представляет собой сумму колебаний, создаваемых каждой из волн, т. е. гармоническое колебание той же частоты ω . Интенсивность результирующего колебания можно найти используя правило сложения векторов.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\varphi,$$

где $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ – разность фаз, $I_1 = a_1^2$ и $I_2 = a_2^2$ – интенсивности слагаемых волн.

Интенсивность – величина, пропорциональная плотности потока энергии в волне. В пространстве, где налагаются две волны, происходит *перераспределение потоков энергий*: в некоторых точках пространства результирующая интенсивность больше суммы интенсивностей слагаемых волн, в других точках, наоборот, результирующий поток энергии меньше суммы потоков энергии в слагаемых волнах. Это явление называется **интерференцией**. При наложении волн одинаковой интенсивности $I_1 = I_2 = I_0$ имеем

$$I = 2I_0(1 + \cos \Delta\varphi).$$

Чередующиеся максимумы I_{\max} и минимумы I_{\min} результирующей интенсивности образуют интерференционные полосы.

Двухлучевая интерференция. В любой двухлучевой интерференционной схеме свет от одного источника приходит в точку наблюдения по двум различным путям r_1 и r_2 с разностью фаз $\Delta\varphi = k_2 r_2 - k_1 r_1$, где $k_1 = n_1 \omega / c$ и $k_2 = n_2 \omega / c$ (частота волны при переходе из одной среды в другую остаётся неизменной). Таким образом,

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{\omega}{c}(n_2 r_2 - n_1 r_1) = \frac{\omega}{c} \cdot \Delta,$$

где n_1 и n_2 – показатели преломления среды вдоль путей r_2 и r_1 соответственно.

$$\Delta = n_2 r_2 - n_1 r_1$$

есть разность *оптических путей* двух плеч интерферометра (*оптическая разность хода*).

Если амплитуды волн в точке наблюдения одинаковы, то получаем

$$I = 2I_0(1 + \cos \frac{\omega}{c} \Delta).$$

Эта формула справедлива при интерференции любых монохроматических волн одинаковой частоты и интенсивности.

Видность. Контраст интерференционной картины принято характеризовать величиной *видности* ν , определяемой равенством

$$\nu = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}.$$

Интенсивность максимальна и равна $I_{max} = (a_1 + a_2)^2$ при $\Delta\varphi = 2m\pi$, где m – целое число, называемое порядком интерференции. Геометрическое место точек, удовлетворяющих этим условиям, образует максимумы (светлые интерференционные полосы) m -го порядка. $\Delta\varphi = (2m + 1)\pi$ возникают минимумы (тёмные интерференционные полосы). Видность максимальна (и равна единице) при равных амплитудах волн, при этом $I_{max} = 4I_0$ вдвое больше суммы интенсивностей слагаемых волн, а $I_{min} = 0$.

Кольца Ньютона. Этот классический опыт используется для определения *радиуса кривизны* сферических поверхностей линз. В этом опыте наблюдается интерференция волн, отражённых от границ тонкой воздушной прослойки, образованной сферической поверхностью линзы и плоской стеклянной пластиной. При нормальном падении света интерференционные полосы локализованы на сферической поверхности и являются полосами равной толщины.

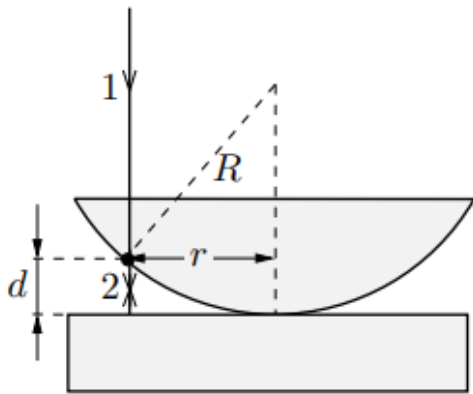


Рис. 2: Схема наблюдения колец Ньютона

Геометрическая разность хода между интерферирующими лучами равна удвоенной толщине воздушного зазора $2d$ в данном месте. Для точки на сферической поверхности, находящейся на расстоянии r от оси системы, имеем $r^2 = R^2 - (R - d)^2 = 2Rd - d^2$, где R – радиус кривизны сферической поверхности. При $R \gg d$ получим $d = r^2/2R$. С учётом изменения фазы на π при отражении волны от оптически более плотной среды (на границе воздух–стекло) получим оптическую разность хода интерферирующих лучей:

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2} = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2}.$$

Условие интерференционного минимума есть $\Delta = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}$ ($m = 0, 1, 2, \dots$), откуда получаем для радиусов тёмных колец

$$r_m = \sqrt{m\lambda R}.$$

Аналогично для радиусов r'_m светлых колец

$$r'_m = \sqrt{(2m - 1)\lambda R/2}.$$

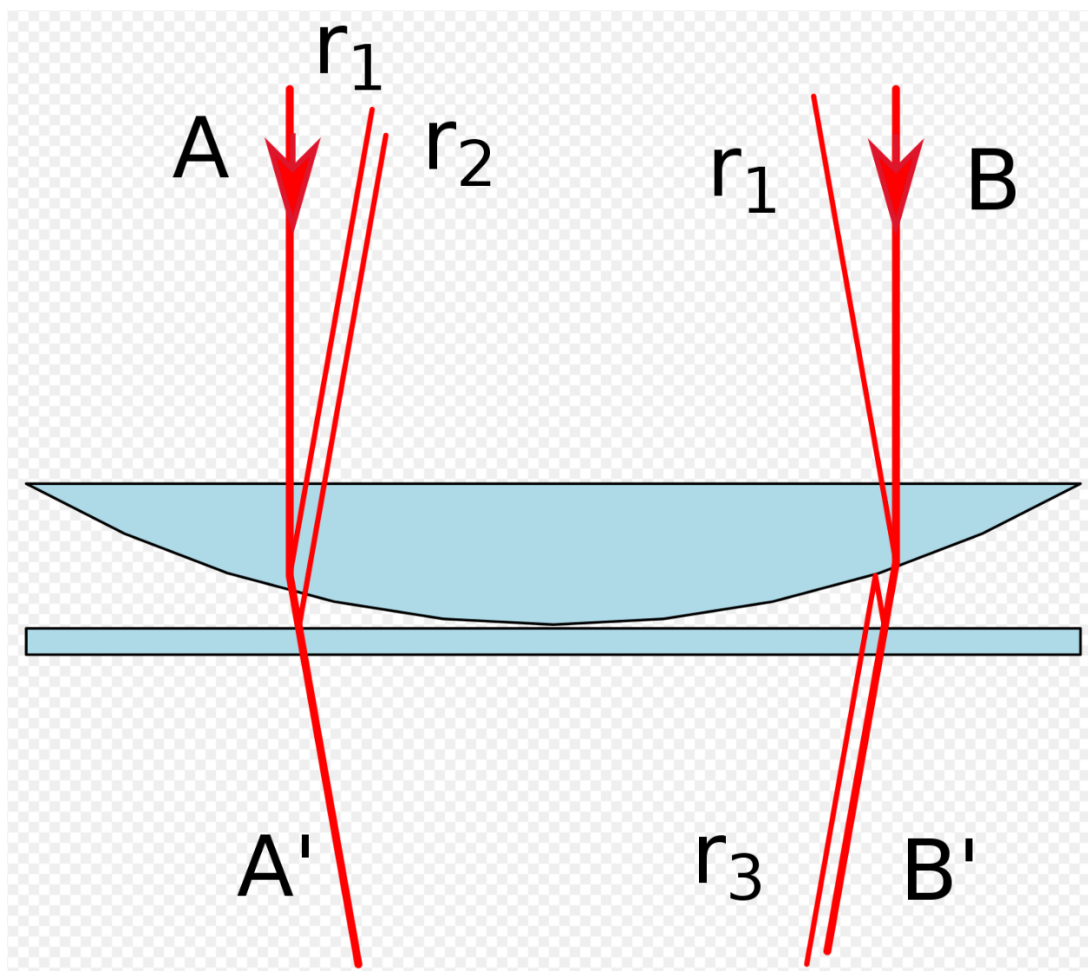


Рис. 3: Образование колец Ньютона в отражённом (слева) и в проходящем свет (справа)

Экспериментальная установка:

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 4. Опыт выполняется с помощью измерительного микроскопа. На столике микроскопа помещается держатель с пластинкой чёрного стекла. На пластинке лежит исследуемая линза.

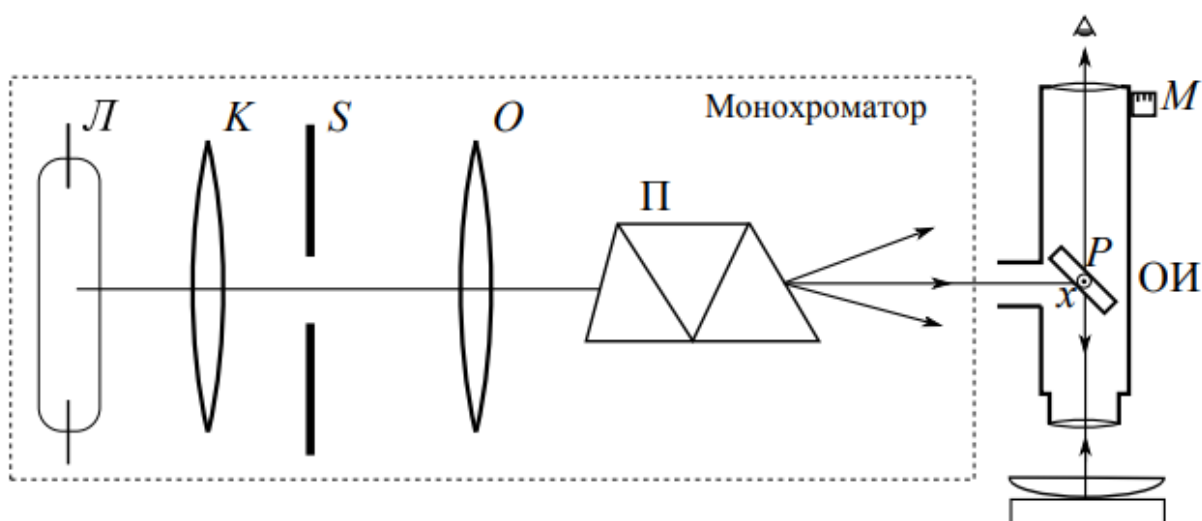


Рис. 4: Схема установки для наблюдения колец Ньютона

Источником света служит ртутная лампа, находящаяся в защитном кожухе. Для получения монохроматического света применяется призмный монохроматор, состоящий из конденсора K , коллиматора (щель S и объектив O) и призмы прямого зрения Π . Свет от монохроматора попадает на опак-иллюминатор (ОИ), расположенный между окуляром и объективом микроскопа – специальное устройство для освещения объекта при работе в отражённом свете. Внутри опакиллюминатора находится полупрозрачная пластинка P , наклоненная под углом 45° к оптической оси микроскопа. Свет частично отражается от этой пластинки, проходит через объектив микроскопа и попадает на исследуемый объект.

Столик микроскопа может перемещаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях с помощью винтов препаратоводителя. Отсчетный крест окулярной шкалы перемещается перпендикулярно оптической оси микроскопа с помощью микрометрического винта M .

Оптическая схема монохроматора позволяет получить в плоскости входного окна опак-иллюминатора достаточно хорошо разделённые линии спектра ртутной лампы. Изображение щели S фокусируется на поверхность линзы объективом микроскопа, и в том же месте находится плоскость наблюдения микроскопа, т. е. точка источника и точка наблюдения интерференции совпадают. Картина интерференции как и в случае расположения пластинки сверху, так и в данном случае не зависит от коэффициента преломления линзы и определяется величиной зазора между нижней поверхностью линзы и стеклянной пластинкой.

Обработка данных:

1. Рассчитаем цену деления окулярной шкалы. Для этого сверху на линзу положим калиброванную объектную шкалу, найдём её изображение и совместим его с окулярной шкалой. Объектная шкала размером 1 мм разбита на 100 делений, т.е. её цена деления равна 0,01 мм. Теперь совместим две шкалы так, чтобы штрихи объектной шкалы лучше всего совпадали со штрихами окулярной шкалы. Запишем значение и рассчитаем коэффициент k перевода делений окулярной шкалы в миллиметры:

$$(4,90 - 3,88) \text{ дел.} = 0,1 \text{ мм (10 делений.)}$$

$$k = \frac{10^{-1}}{1,02} \frac{\text{мм}}{\text{дел.}} \approx 9,8 \cdot 10^{-2} \frac{\text{мм}}{\text{дел.}}$$

Абсолютная погрешность измерения радиусов колец равна половине наименьшего расстояния между соседними полосами, т.е.

$$\sigma_x = 9,8 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{7}{200} \text{ мм} \approx 3,43 \cdot 10^{-3} \text{ мм.}$$

2. Далее будем идти от одного достаточно удалённого кольца к центру и снимать по окулярной шкале значения положений центров колец. Дойдя до центра центрального пятна, запишем его положение и будем продолжать измерение координат центров колец с другой стороны от пятна. Результаты измерений приведены в таблице ниже.

Радиус кольца можно рассчитать тремя способами: 1) используя координаты концов кольца; 2) используя координаты левого конца и центра центрального пятна; 3) используя координаты правого конца и центра центрального пятна. В данной работе радиус кольца рассчитывается каждым из способов, затем берётся среднее арифметическое по трём значениям. При этом абсолютная погрешность значения радиуса вычисляется по формуле

$$\sigma_r = \sqrt{2} \cdot \sigma_x \approx 4,85 \cdot 10^{-3} \text{ мм.}$$

Таблица 1: Координаты левого и правого концов колец

Номер кольца m	Цвет кольца	Левый край, дел.	Правый край, дел.
1	Светлый	4,19	5,49
	Темный	3,99	5,73
2	Светлый	3,72	5,92
	Темный	3,57	6,10
3	Светлый	3,41	6,23
	Темный	3,29	6,36
4	Светлый	3,18	6,49
	Темный	3,08	6,63
5	Светлый	3,00	6,72
	Темный	2,86	6,82
6	Светлый	2,77	6,92
	Темный	2,68	6,99

Координата центра центрального пятна: $X_c = 4,84$ дел.

Ниже в таблице представлены значения радиусов для каждого из колец.

Таблица 2: Радиусы колец

Номер кольца m	1	2	3	4	5	6	Центральное пятно
r_m , дел.	0,87	1,27	1,54	1,78	1,98	2,16	0,50
r'_m , дел.	0,65	1,10	1,41	1,66	1,86	2,08	

По данным из таблицы построим графики зависимости r_m^2 и $(r'_m)^2$ от номера m кольца. Также, на графике отметим границы центрального тёмного пятна.

По данным из графика, зная коэффициенты наклона прямых, определим радиус кривизны линзы по формуле

$$k = \lambda R \Rightarrow R = \frac{k}{\lambda}$$

где λ – длина волны зелёного света, k – среднее арифметическое коэффициентов наклона для темных и светлых колец.

$$R = \frac{k}{\lambda} = \frac{74,3}{5,46} \text{ мм} \approx 13,61 \text{ мм}.$$

- В третьем пункте будем освещать линзу сразу двумя различными спектральными компонентами ртути (жёлтым и зелёным). В микроскоп будет видна картина «биений»: чёткость интерференционных колец периодически изменяется, за чёткими кольцами следуют более размытые, за которыми потом снова следуют чёткие и т.д. Это объясняется наложением двух систем интерференционных колец, возникающих для разных длин волн λ_1 и λ_2 . Чёткие кольца в результирующей картине образуются при наложении светлых колец на светлые и тёмных на тёмные. Размытые кольца получаются при наложении светлых колец одной картины на тёмные кольца другой.

Рассчитать период возникших биений можно используя тот факт, что если в промежутке между двумя центрами соседних чётких участков укладывается Δm колец для спектральной линии с длиной волны λ_1 , то в этом промежутке должно располагаться $(\Delta m - 1)$ колец

для спектральной линии с длиной волны λ_2 (при $\lambda_2 > \lambda_1$). Тогда, для периода биений Δm получаем формулу

$$\begin{aligned}r^2 &= \lambda_1 m_1 R = \lambda_2 m_2 R, \\(r')^2 &= \lambda_1 m'_1 R = \lambda_2 m'_2 R, \\ \lambda_1 \cdot (\Delta m + 1) &= \lambda_2 \cdot \Delta m, \\ \Delta m &= \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}.\end{aligned}$$

где λ_1 – длина волны зелёного света. Отсюда получаем выражение для разности длин волн.

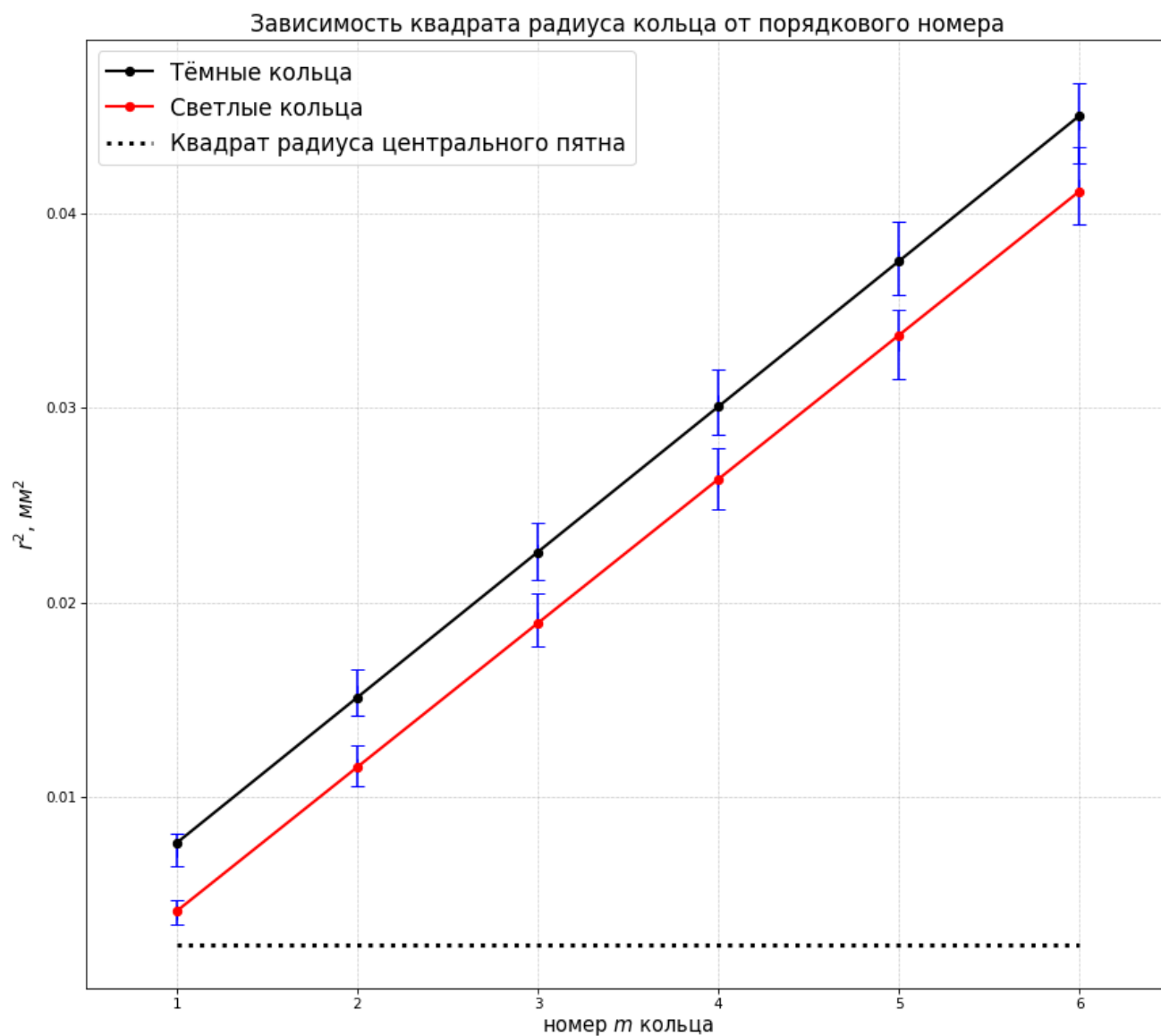
$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{\lambda_1}{\Delta m}.$$

Считая темные кольца, находим: $\Delta m = 14$. Теперь найдём разность длин волн, сравним результат с табличным.

Таблица 3: Результат измерения разности длин волн

Номер кольца m	Табличное значение	Экспериментальное значение
$\lambda_2 - \lambda_1$, нм	1 - 50	39,0

Вывод: В данной работе было изучено явление интерференции электромагнитных волн видимого диапазона на примере колец Ньютона. С помощью интерференции волн рассчитали радиус кривизны линзы ($R \approx 13,61$ мм), а также вычислили и сравнили с табличным значение разности длин волн для желтого и зеленого света ($\Delta\lambda_{\text{эсп.}} = 39,0$ нм; $\Delta\lambda_{\text{теор.}}$ находится в диапазоне 1 – 50 нм). Получившийся результат лежит в диапазоне теоретической оценки.



Относительная погрешность r^2 вычисляется по формуле

$$\varepsilon_{r^2} = 2 \cdot \varepsilon_r,$$

тогда абсолютная погрешность получается равной

$$\sigma_{r^2} = 2r \cdot \sigma_r.$$

Коэффициенты наклона прямых и их погрешности представлены ниже:

$$k_{\text{темн.}} = (7,467 \pm 0,063) \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2, \quad \varepsilon_{k_{\text{темн.}}} \approx 0,84\%;$$

$$k_{\text{светл.}} = (7,391 \pm 0,057) \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2, \quad \varepsilon_{k_{\text{светл.}}} \approx 0,77\%;$$