

Лабораторная работа №10, Евгений Павлов, группа РЭ-22

Цель работы: ознакомление с принципом действия и работой спектрального аппарата - монохроматора УМ-2, построение градуировочного графика монохроматора, определение его дисперсионных характеристик и длины волны неизвестной спектральной линии с помощью формулы Гартмана.

Принадлежности: монохроматор УМ-2 с блоком питания ЭПС-11, ртутная лампа.

Краткая теория:

Спектральные аппараты служат для пространственного разделения лучей различных длин волн. Принципиальная схема спектрального аппарата представлена на рис.10.1. Схема состоит из трех основных частей: коллиматора 2-4, служащего для получения параллельного пучка лучей, диспергирующей системы 5 (призмы, дифракционной решетки, интерферометра Фабри-Перо и др.), разлагающей немонахроматический свет в пространственно разделенный спектр, зрительной трубы 6-8 для наблюдения спектра (или другого регистрирующего устройства кроме глаза).

Ход лучей в данной схеме следующий. Свет от источника 1 проходит через конденсатор 2 (источник 1 и конденсатор 2 могут быть совмещены в корпусе осветителя) и освещает щель 3, которая расположена в фокальной плоскости объектива коллиматора 4. Из объектива параллельный коллимированный пучок лучей направляется на диспергирующую систему 5.

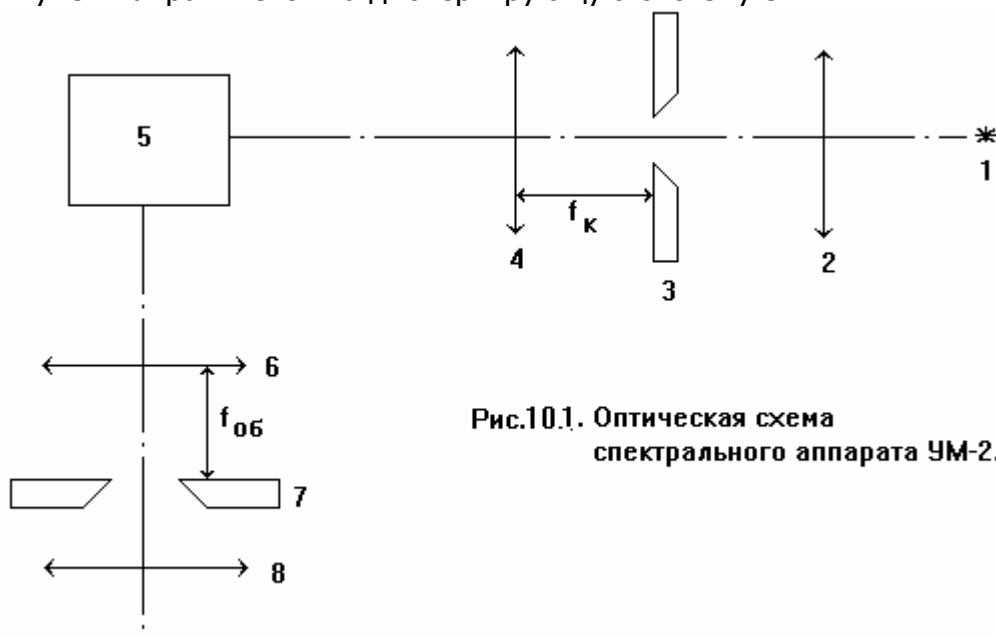


Рис.10.1. Оптическая схема спектрального аппарата УМ-2.

Если источник испускает не монохроматический свет, то вследствие того, что волны различных длин по-разному преломляются в призмах (в случае призмного диспергирующего элемента системы 5) из-за дисперсии показателя преломления, произойдет разложение света монохроматические составляющие и из системы призм 5 выйдут параллельные пучки лучей, соответствующие волнам определенной длины $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \dots$. Эти параллельные пучки соберутся в фокальной плоскости объектива 6 зрительной трубы в виде спектрального изображения щели 7.

В ряде приборов спектр может фотографироваться фотокамерой или регистрироваться каким-либо фотоприемником (термопара болометр, фотосопротивление, фотодиод, пироприемник, фотоэлектронный умножитель ФЭУ).

Основными характеристиками любого спектрального аппарата являются угловая и линейная дисперсии. Угловая дисперсия D зависит только от диспергирующего элемента 5. Линейная диспер-

сия D^* определяется, кроме того, геометрическими условиями фокусировки спектра. Как отмечалось в лабораторной работе №8, угловая дисперсия определяется отношением разности углов отклонения $\delta\varphi$ двух спектрально близких монохроматических пучков лучей к разности их длин волн $\delta\lambda$:

$$D = \frac{\delta\varphi}{\delta\lambda} = \frac{d\varphi}{d\lambda} \quad (10.1)$$

По величине угловой дисперсии D нетрудно получить значение линейной дисперсии $D^* = \frac{\delta S}{\delta\lambda}$, где δS - линейное расстояние в плоскости щели 7 изображения входной щели 3 для монохроматических пучков с разностью длин волн $\delta\lambda$. Учитывая геометрию спектрального аппарата, легко получить связь линейной дисперсии с угловой:

$$D^* = f_{об} \cdot D \quad (10.2)$$

Дисперсия спектральных аппаратов имеет различное значение в разных участках спектра. Поэтому угловое и линейное расстояния между спектральными линиями, отличающимися по длине волны на одну и ту же величину, будут также различными в разных участках спектра.

В данной работе предлагается снять градуировочную кривую простейшего призмного спектрального прибора УМ-2, определить линейную дисперсию в видимом диапазоне спектра, а также неизвестную спектральную линию.

Описание экспериментальной установки

Изучаемый в данной работе монохроматор УМ-2 работает в диапазоне длин волн 3800-10000 Ангстрем. Оптическая система его представлена на рисунке 10.1. В качестве диспергирующего элемента 5 используется призма Аббе, изготовленная из стекла ТФ-3, с преломляющимся углом 60° . Структура этой призмы Аббе представлена на рисунке 10.2. Она составлена из двух 30-градусных призм, полученных путем деления на две равносторонние призмы, изготовленные из стекла ТФ-3, и одной 45-градусной, служащей для отклонения луча на 90° . Все три призмы склеены канадским бальзамом. Поскольку 30-градусные призмы в конструкции призмы Аббе отклоняют луч в противоположных направлениях, общее отклонение луча равно 90° . Недостатком призмы такого типа является большая толщина материала, через который проходит луч, что резко увеличивает поглощение света. Это обстоятельство требует изготовления от призмы Аббе из материала с малым коэффициентом поглощения. Для этих целей может использоваться стекло марок: ТФ-1, ТФ-2, ТФ-3. Кроме того, такие призмы используются для видимого диапазона спектра. Призму Аббе небольшого размера изготавливают из одного куска стекла. Часто используется система, состоящая из двух 60-градусных призм и призмы Аббе между ними. Согласованным поворотом всех трех призм можно осуществить сканирование спектра. Такая призмная система используется в спектрометре ИСП-51 и некоторых других.

Следует отметить, что для обеих систем ход лучей таков, что угол отклонения является минимальным. Кроме этого, использование призмы Аббе дает возможность конструировать более компактный спектральный аппарат, в котором все лучи имеют одинаковый угол отклонения (90°).

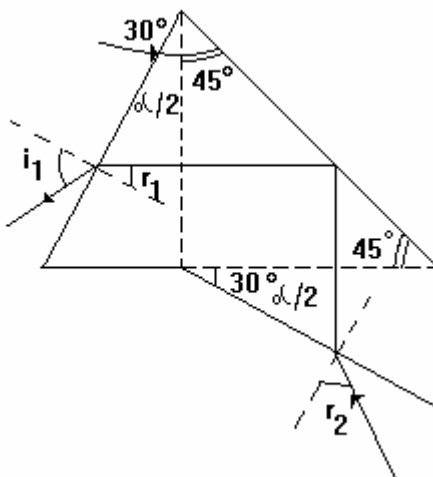


Рис. 10.2. Ход лучей в призме Аббе.

Для расчета угловой дисперсии спектрального аппарата, имеющего в качестве диспергирующего элемента трехпризменную систему или более сложную, можно использовать следующее выражение:

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \sum_{p=1}^m \frac{dn_p}{d\lambda} D_p \prod_{q=p+1}^m \omega_q, \quad (10.3)$$

где $D_p = \frac{\sin \alpha_p}{\cos r_{1p} \cos r_{2p}}$ - тригонометрический множитель призмы номером P , а углы r_{1p} и r_{2p} - углы преломления на первой и второй поверхностях призмы; ω_q - угловое увеличение призмы номера q , заключенной между поверхностями с номерами l и $l+1$, и равное

$$\omega_q = \frac{\cos i_l \cos i_{l+1}}{\cos r_l \cos r_{l+1}}. \quad (10.4)$$

Для одной призмы (либо для призмы Аббе) выражение (10.3) упрощается и имеет вид

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{dn}{d\lambda} \cdot \frac{\sin \alpha}{\cos r_1 \cos r_2}, \quad (10.5)$$

где r_1, r_2 - углы преломления на двух поверхностях призмы. Выражение для угловой дисперсии еще упростится при минимальном угле отклонения призмы для монохроматора УМ-2 60°

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{dn}{d\lambda} \operatorname{tg} i_1 \frac{2}{n} = \frac{2}{\sqrt{4-n^2}} \cdot \frac{dn}{d\lambda}. \quad (10.6)$$

Для системы, состоящей из двух 60-градусных призм, между которыми находится призма Аббе (трехпризменная система Фестерлинга), выполненной из одного оптического стекла (оптического материала), соотношение (10.3) дает простое выражение

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{3 \sin \alpha}{\cos r_1 \cos r_2} \cdot \frac{dn}{d\lambda} \quad (10.7)$$

при минимальном угле отклонения в каждой призме системы.

Ширина щели коллиматора входной щели устанавливается с помощью микрометра, и значение ее должно соответствовать нормальной ширине для желтой линии гелия 5790,9 Ангстрем a_n . Эта величина определяется следующей формулой:

$$a_n = \frac{\lambda}{D_0} f_k, \quad (10.8)$$

где λ - длина волны, D_0 - диаметр входящего в объектив коллиматорного пучка, f_k - фокусное расстояние коллиматора (для УМ-2 это расстояние равно 280 мм).

Объектив коллиматора может изменять свое положение с помощью микровинта со шкалой, расположенного в центре корпуса монохроматора возле поворотного барабана. Изменяя положение объектива коллиматора, мы формируем параллельный пучок лучей определенной длины волны, который должен падать на призмную систему 5. Для желтой линии гелия показание микровинта соответствует 10.8.

В фокальной плоскости объектива зрительной трубы расположена выходная щель монохроматора. Для установки положения спектральной линии в плоскости выходной щели имеется индекс (треугольной указатель), на который путем поворота призмы с помощью оцифрованного барабана выводят соответствующую спектральную линию. Окуляр 8 устанавливается по глазу наблюдателя на резкость изображения индекса и спектральных линий путем вращения.

Для градуировки оцифрованного поворотного барабана следует использовать ртутную лампу с известным спектральным составом.

Цвет	ЖЕЛТЫЙ		ЗЕЛЕНЫЙ		СИНИЙ			ФИОЛЕТОВЫЙ	
	I	II	I	II	I	II	III	I	II
Длина волны	5791	5769	5461	4916	4358	4348	4339	4078	4047

Таблица 1

Однако спектр излучения ртутной лампы, используемый в данной работе обладает ограниченным количеством хорошо наблюдаемых линий. Поэтому, чтобы построить градуированную кривую во всем видимом диапазоне спектра, необходимо использовать экстраполяцию. Более точное экстраполирование, особенно за пределами видимой области и при значительных удалениях от известных "опорных" точек, следует производить по формуле Гартмана:

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{C_0}{l - l_0}, \quad (10.9)$$

где l - отчет по шкале измерительного барабана для соответствующей волны; l_0, C_0, λ_0 - некоторые постоянные. Неизвестные постоянные l_0, C_0, λ_0 определяются из решения системы трех уравнений

для трех "опорных" известных спектральных линий: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$.

Выполнение работы:

Зажгли ртутную лампу и установили ширину входной щели 0.05 мм, добились четкого изображения желтого дублета.

Вращая измерительный оцифрованный барабан и наблюдая в окуляр трубы, находили спектральные линии и помещали их к острию указателя, устанавливая его на середину изображения линии. По индексу измерительного барабана производили отчет значения l , а затем переходили к следующим линиям с более короткой длиной волны. Всего произвели отчет для девяти линий. Пройдя от желтой линии до фиолетовой, повторили эту процедуру для тех же линий, но в обратном порядке, то есть от фиолетовой до желтой (см. данные).

Используя значения длин волн измеренных спектральных линий (см. таблицу 1) и полученные данные, построили зависимость угла поворота, выраженного в радианах, от длины волны в Ангстремах (см. график 1). При этом учли, что поворот барабана на 2° (то есть одно деление на барабане) соответствует повороту призмы Аббе на $20''$.

Полученные данные

Жёлтый		Зелёный		Синий			Фиолетовый	
I	II	I	II	I	II	III	I	II
3358	3287	3120	3062	2802	2741	2725	1497	1451
3356	3260	3110	3047	2747	2685	2670	1489	1449
3346	3280	3115	3040	2757	2695	2681	1481	1450

Погрешности

3353.33	3275.66	3115	3049.66	2768.66	2707	2692	1489	1450
---------	---------	------	---------	---------	------	------	------	------

$\Delta (t_{\text{ан}} = 2.3, \alpha = .95)$

15	34	12	27	72	74	72	19	2
----	----	----	----	----	----	----	----	---

Вычисления

Перевод в радианы

$$\varphi = l \cdot \frac{2\pi}{2 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 180}$$

0.1626	0.1588	0.151	0.1479	0.1342	0.1312	0.1305	0.0722	0.0703
--------	--------	-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

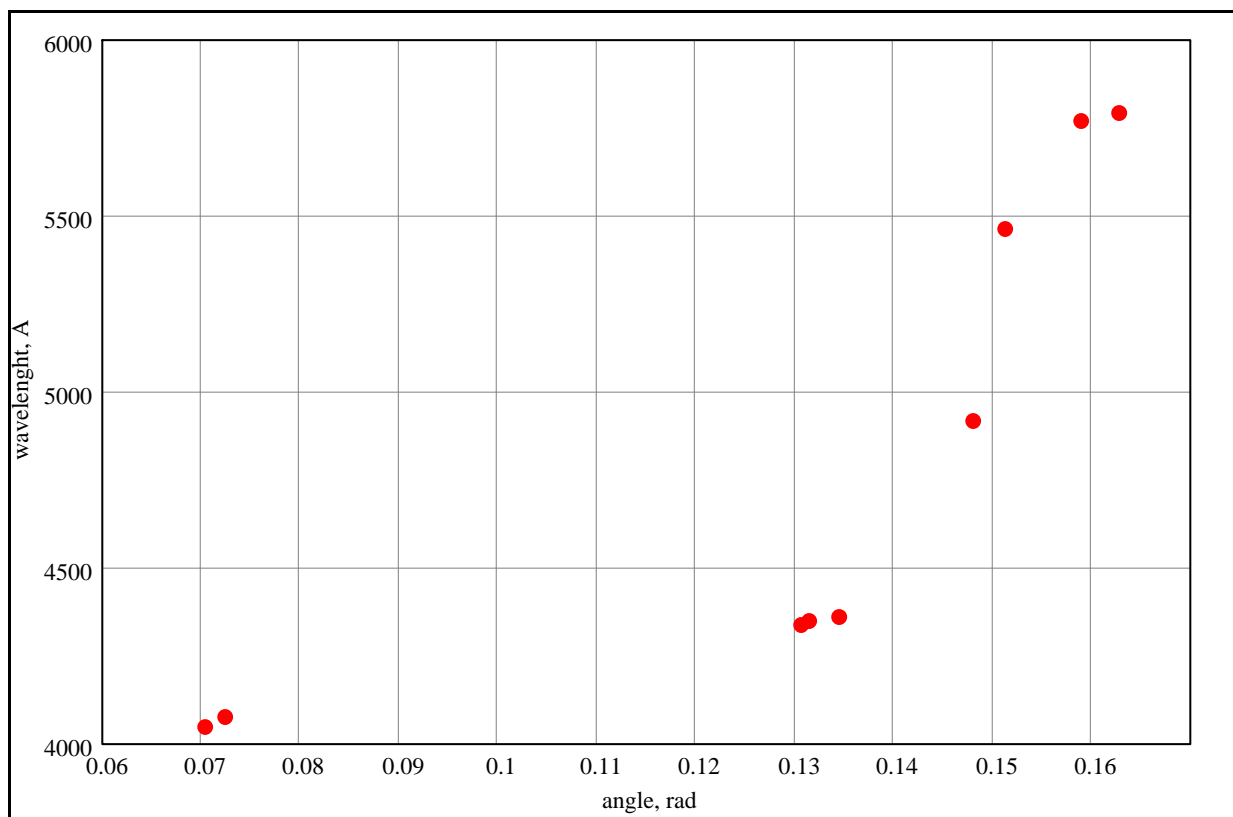


График 1

Произвели построение градуировочной кривой с экспериментальными и расчетными точками для области спектра 0.4 ÷ 0.7 мкм при помощи формулы Гартмана. Эту операцию проводили в программной среде пакета MathCAD (см. расчёты 1, см. график 2).

Расчёт коэффициентов для формулы Гартмана

$$\lambda = \lambda_0 - \frac{C_0}{l - l_0}$$

Для значений $\lambda = 5769$ при $l = 0.159$, $\lambda = 4916$ при $l = 0.148$ и $\lambda = 4078$ при $l = 0.072$, получились следующие коэффициенты:

$$\lambda_0 = 3797.69, C_0 = -28.42 \text{ и } l_0 = 0.1734$$

То есть формула Гартмана приняла вид

$$\lambda = 3797.69 - \frac{-28.42}{0.1734 - l_0}$$

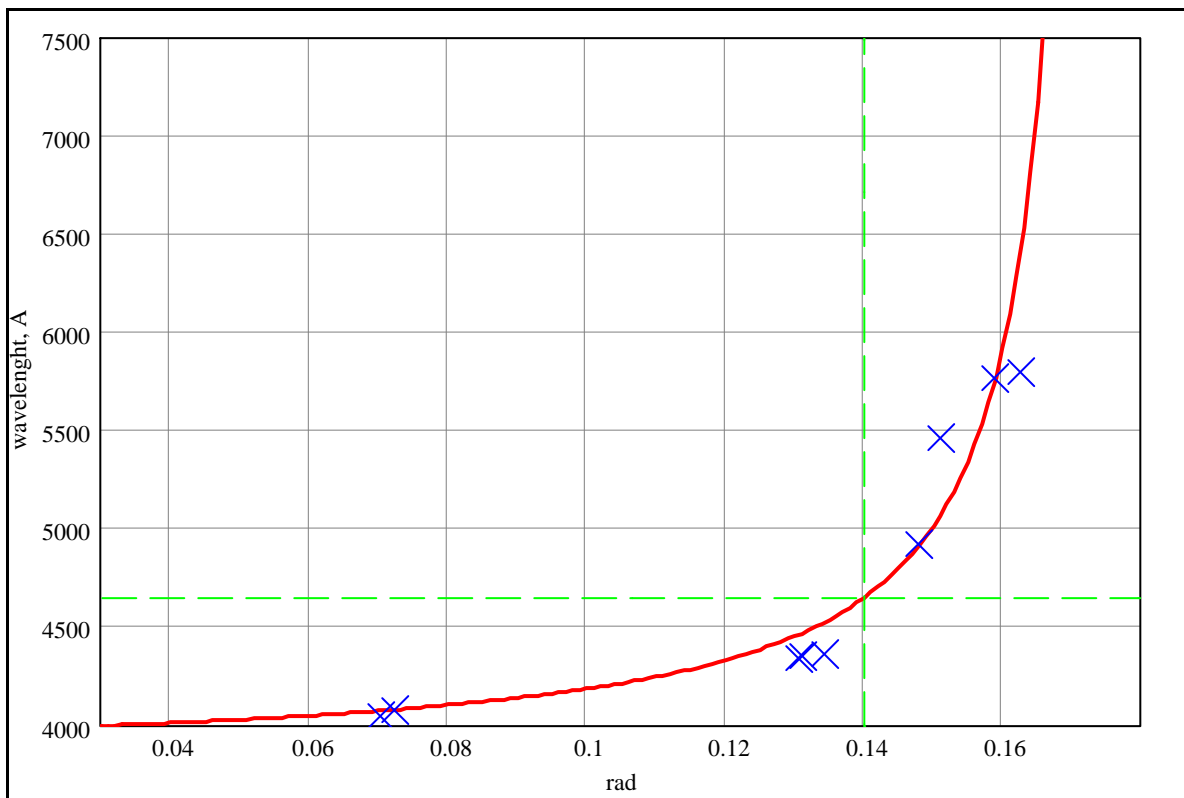


График 2

Определили угол длину волны для угла поворота в 0.14 рад

$$\lambda_0 = 4648.3 \text{ \AA} \text{ (см. график 2)}$$

Определили линейную дисперсию в области 0.4÷0.7 мкм для длин волн 400, 450, 550, 600, 650, 700 нм.

Угловая дисперсия (по формуле 10.1 и по графику 2)

λ , нм	400	450	550	600	650	700
D , рад/нм	0.00062141	0.00005598	0.00001122	0.00000586	0.00000419	0.00000279

Линейная дисперсия (по формуле 10.2)

λ , нм	400	450	550	600	650	700
D^* , рад, 10^6	1.7399	0.1567	0.0314	0.0164	0.0117	0.0078

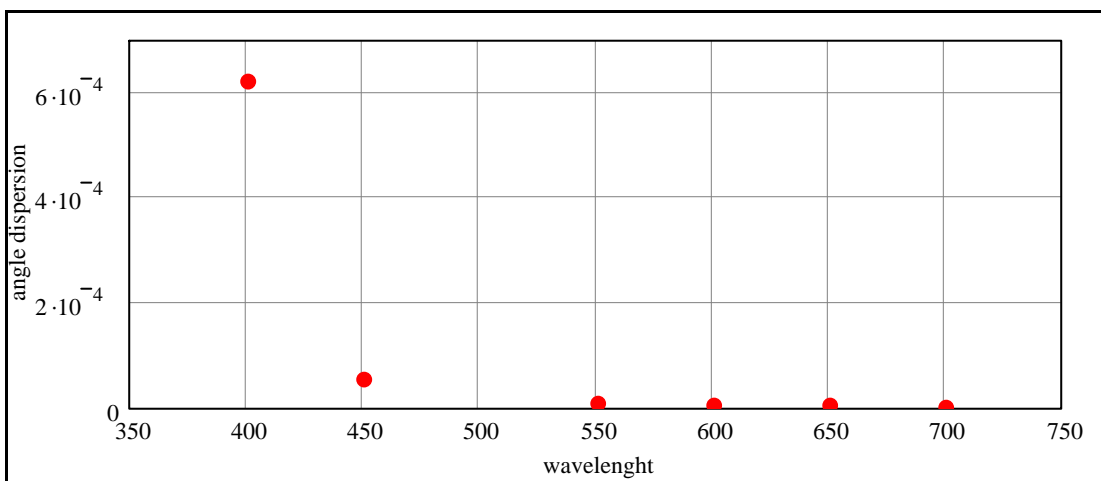


График 3

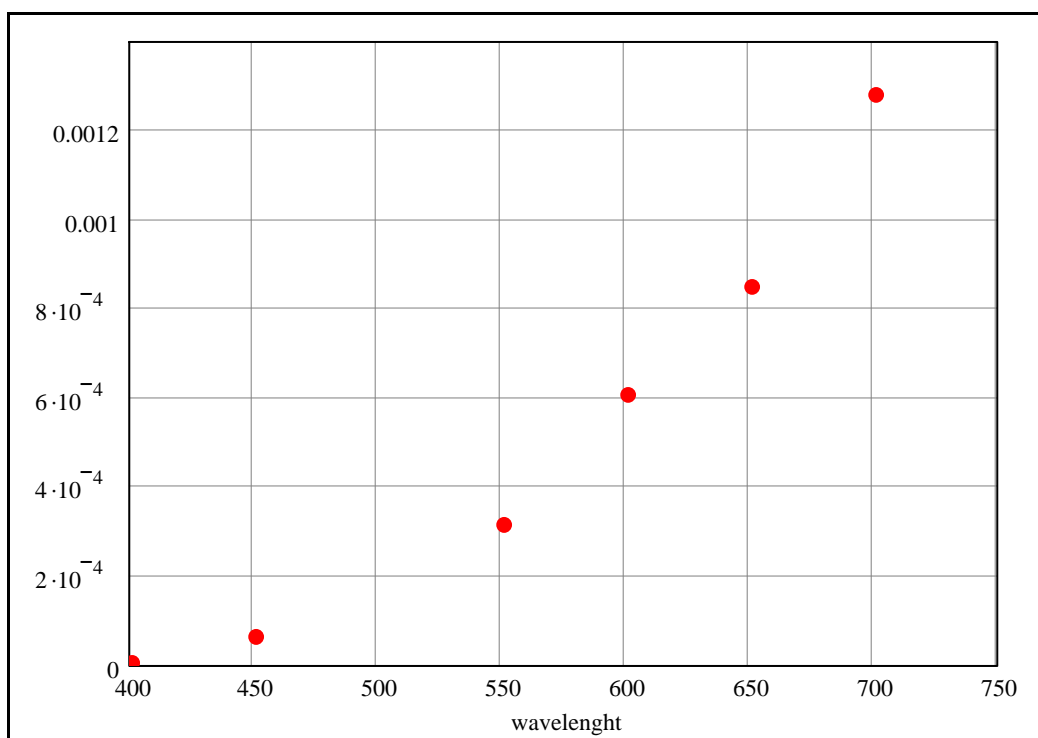


График 4

По полученным данным для угловой и линейной дисперсии построили графики:

график 3 – зависимость D от длины волны,

график 4 – зависимость $\frac{1}{D^*}$ от длины волны

Вывод:

1. В данной работе познакомились с принципами работы спектрального аппарата (монохроматора УМ-2), построили градуировочный график монохроматора, причём экстраполяцию проводили с помощью формулы Гартмана, для чего определили коэффициенты данной формулы.
2. Построили графики для угловой дисперсии и линейной дисперсии. По виду графика можно сделать анализ зависимости от длины волны. Например, по графику 3 видно, что угловая дисперсия и длина волны находятся в обратной зависимости.
3. По градуировочной кривой можно определить длину волны неизвестной спектральной линии.