

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа прикладной математики и информатики

# Отчёт о выполнении лабораторной работы

## 2.2/2.3

Изучение спектров атома водорода и молекулы  
йода

Соболевский Федор Александрович  
Старокожко Иван Георгиевич  
Б05-111

Сентябрь 2023

# Теоретические сведения

При нагреве частицы вещества начинают излучать электромагнитную энергию разных частот, совокупность которых называется *спектром излучения* соответствующих частиц. Зависимость показателя поглощения вещества от длины волны проходящего через него излучения, соответственно, называется *спектром поглощения* составляющих его частиц. В данной работе исследованы спектры некоторых атомов, а также двухатомных молекул йода.

## Излучение водородоподобных атомов

Атом водорода является простейшей атомной системой, в связи с чем его спектральные свойства были тщательно изучены экспериментально и теоретически. Длины волн спектральных линий водородоподобного атома описываются формулой

$$\frac{1}{\lambda_{mn}} = RZ^2 \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (1)$$

где  $n$  — номер серии,  $m$  — целое число от  $n+1$  до  $+\infty$ , а  $R$  — константа, называемая *постоянной Ридберга*. Экспериментально установленное значение данной постоянной —  $R = 109677,6 \text{ см}^{-1}$ .

## Спектр поглощения двухатомной молекулы йода

Молекулы обладают более сложным спектром возбуждённых состояний, так как в них могут возбуждаться дополнительные степени свободы — вращательные, колебательные. При температуре, близкой к комнатной, спектр поглощения паров йода практически состоит из двух серий электронно-колебательного спектра — 0-й и 1-й *серий Деландра*. Вид спектра и составляющих его серий изображён на рис. 1.

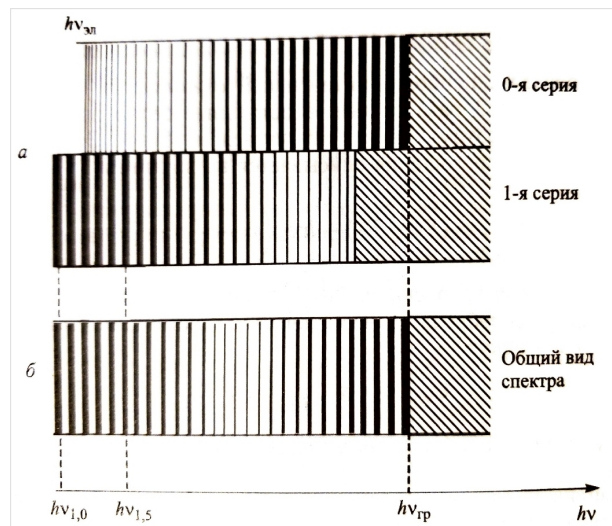


Рис. 1: Спектр поглощения паров йода при  $T \approx 300 \text{ К}$

Энергетическое положение начальных линий поглощения  $n_1$ -й серии определяется выражением

$$h\nu_{n_1, n_2} = h\nu_{эл} + h\nu_2 \left( n_2 + \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{2} h\nu_1, \quad (2)$$

где  $n_2$  — номер линии,  $\nu_2$  — соответствующая ей частота,  $h\nu_1$  — энергия колебательного кванта основного состояния,  $h\nu_{эл}$  — энергия электронного перехода. Расстояние между соседними линиями равно

$$h\nu_{n_1, n_2} - h\nu_{n_1, (n_2-1)} \approx h\nu_2. \quad (3)$$

Здесь  $n_2$  — номер линии,  $\nu_2$  — соответствующая ей частота. Обозначим границу схождения спектра, то есть энергию возбуждения, при которой происходит переход молекулы в область непрерывного спектра, обозначим через  $h\nu_{\text{гр}}$ . Тогда энергии  $D_1$  и  $D_2$  диссоциации молекулы из состояний  $n_1 = 0$  и  $n_2 = 0$  соответственно выражаются как

$$D_1 = h\nu_{\text{гр}} - E_a, \quad D_2 = h\nu_{\text{гр}} - h\nu_{\text{эл}}, \quad (4)$$

где  $E_a$  — энергия возбуждения атома.

## Экспериментальная установка

Для измерения длин волн спектральных линий в работе используется стеклянно-призменный монохроматор-спектрометр УМ-2 (универсальный монохроматор), предназначенный для исследований в диапазоне от 0,38 до 1,00 мкм.

Схема прибора изображена на рис. 2. Ее центральная часть — сложная призма, состоящая из нескольких пирамидальных призм с высокими диспергирующими свойствами. Волны, проходя через нее, поворачиваются на  $90^\circ$  и разлагаются в спектр. Призма расположена на вращающемся столе, угол поворота которого изменяется при помощи барабана 7 со шкалой. Микрометрический винт 8 позволяет настроить четкость изображения спектра, регулируя положение коллиматорного объектива 2. На выходе расположена зрительная труба, состоящая из объектива 4 и окуляра 5. За ней указатель, подсвечиваемый отдельной лампой 10. Перед попаданием в систему пучок проходит сквозь щель 1, ширина которой регулируется микрометрическим винтом 9.

Данная установка предназначена для изучения спектра излучения лампы, устанавливаемой на оптическую скамью. Разложение происходит по стандартной призматической схеме. Множество настроечных элементов позволяют смещать и фокусировать изображение, получаемое в окуляре. Также использовался специальный штатив, позволяющий снимать изображение из окуляра на камеру смартфона.

В смартфоне были использованы расширенные настройки выдержки, ручной и автофокусировки, а также глубины экспозиции. Регулирование этих параметров позволило наблюдать линии, слишком тусклые для невооруженного глаза, при этом не расширяя щель, жертвуя точностью.

В качестве излучателей использовались:

- Неоновая лампа, далее Ne,
- Ртутная лампа, далее Hg,
- Водородная лампа, далее H,
- Лампа накаливания широкого (полного) спектра, свет которой направлялся в кювету с парами йода. ДЛЯ исследования спектра его поглощения, далее I.

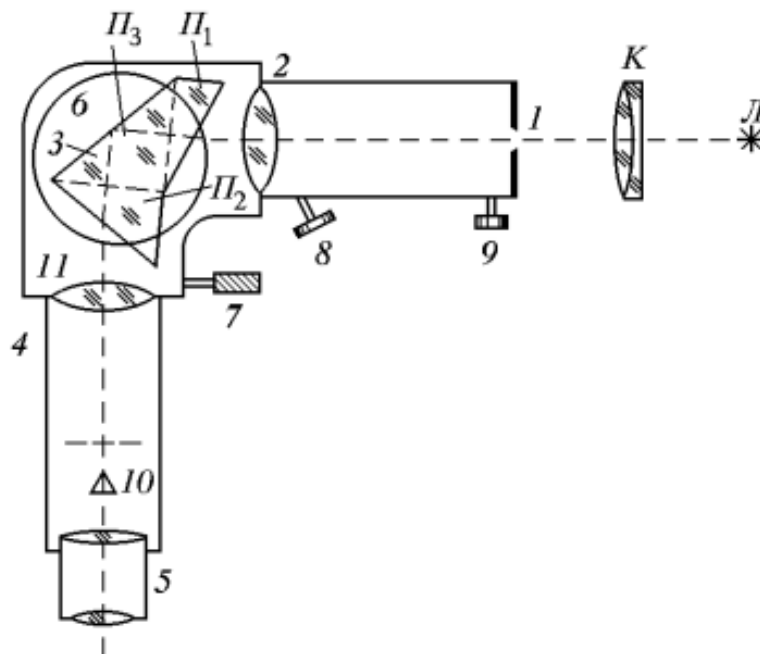


Рис. 2: Схема установки

## Выполнение, результаты

Установка съюстирована при помощи микрометрических винтов, отвечающих за фокусировку конденсатора и настройку ширины щели. Настройка производилась на излучении неоновой лампы.

## Калибровка

Спектрометр, используемый в работе, требует калибровки, которая была произведена по спектрам излучения неона (длинноволновый диапазон) и ртути (коротковолновый диапазон). Для этого были сопоставлены длины волн табличных линий спектра данных элементов и соответствующие им показания барабана спектрометра (в градусах поворота). Данные можно найти в таблицах 1 и 2 приложения.

По данным построена аппроксимация двумя линейными зависимостями. Рассчитаны коэффициенты методом наименьших квадратов. Соответствующие графики приведены ниже. Инструментальная погрешность каждого измерения достаточно мала и составляла около 2-3 градусов оборота барабана. Дисперсионная, случайная погрешность:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}{n - 1}} \approx 220A,$$

что соответствует примерно 4%.

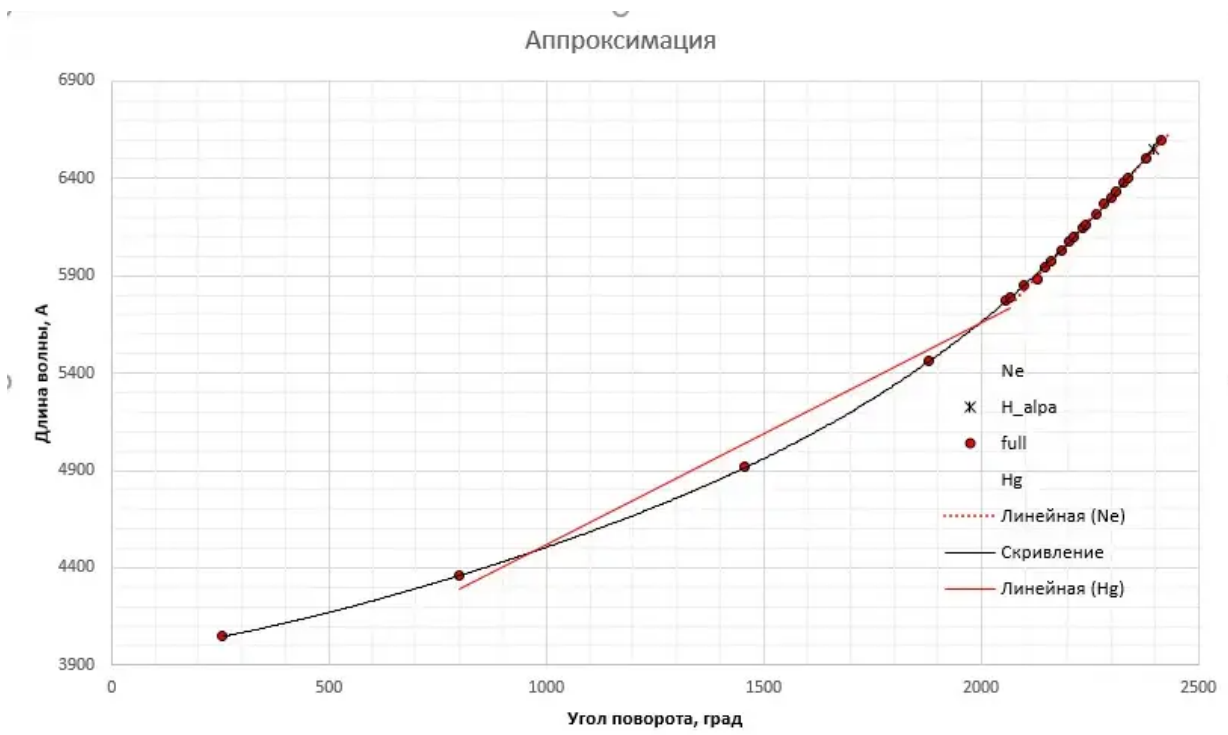


Рис. 3: Полная зависимость, аппроксимация

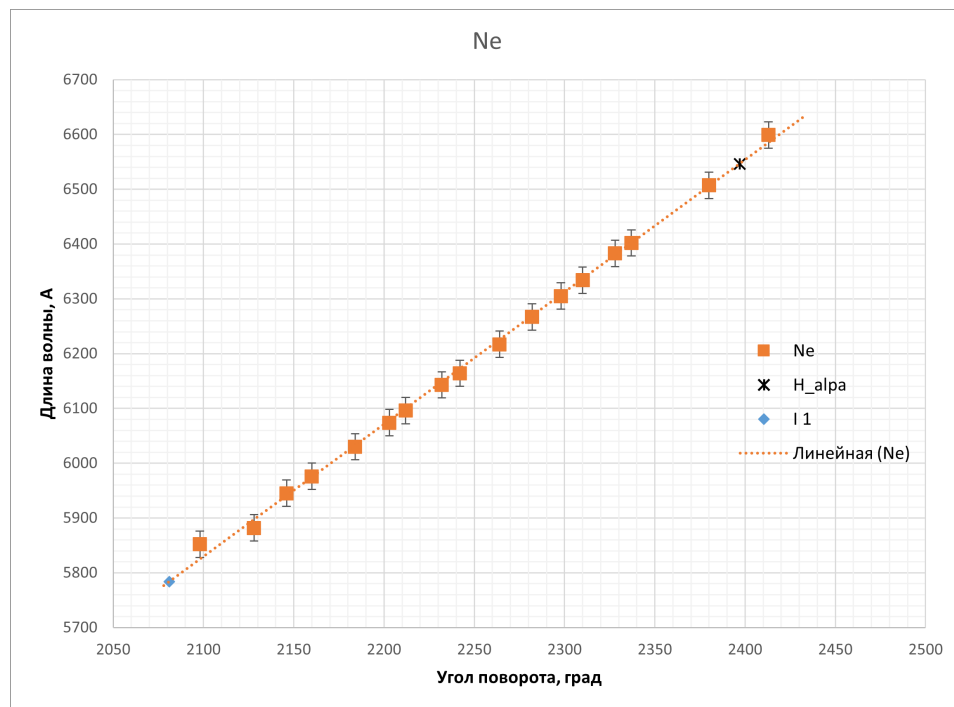


Рис. 4: Калибровка на Ne

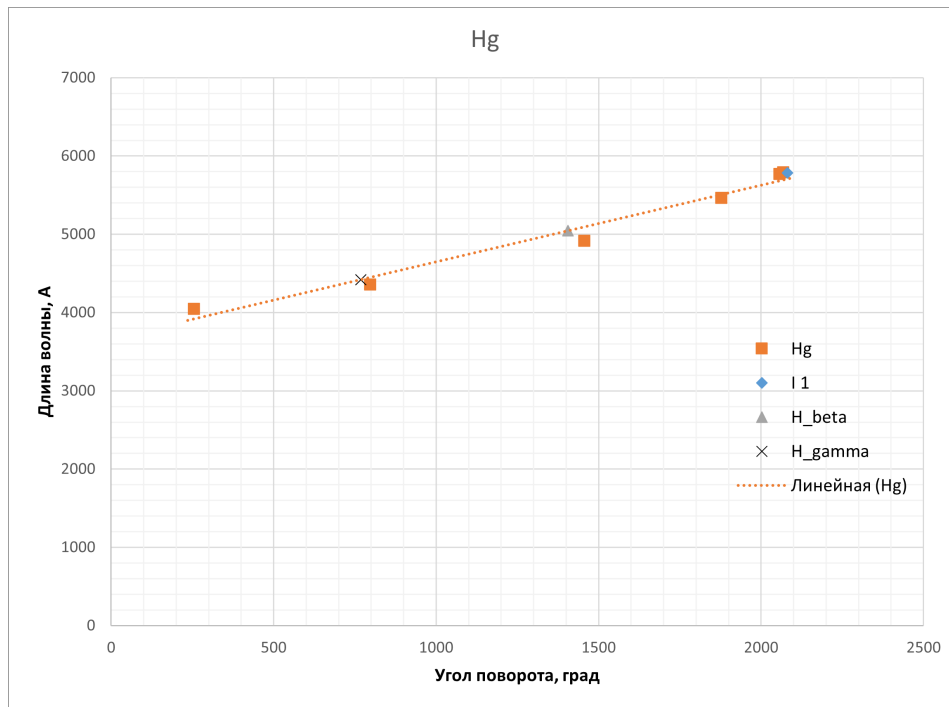


Рис. 5: Калибровка на Hg

## Спектр атомарного водорода

Далее были измерены координаты (в единицах угла поворота барабана спектрометра) спектральных линий излучения атомарного водорода. Измерения проводились для первых трёх линий *серии Бальмера* ( $n = 2$ ). Линии с номерами  $m = 3, 4, 5$  обозначаются как  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$  и  $H_\gamma$  соответственно. При помощи рассчитанных ранее коэффициентов, получены оценки для длины волн в спектральном разложении водорода. Линию  $H_\delta$  снять не удалось, так как она находится вне диапазона измерений УМ-2. Результаты и отклонения приведены в таблице ниже:

Линия	Результат, Å	Табличное, Å	Отклонение
$H_\gamma$	4420	4341	1,8%
$H_\beta$	5044	4862	4%
$H_\alpha$	6546	6563	0,3%

Результаты укладываются в оценку погрешности. Отношение длин волн соответствует формуле серийной закономерности (1). Найдём значение постоянной Ридберга из полученных результатов: Относительные погрешности определения  $R$  при расчёте из значений  $\lambda$  совпадают

Эксперимент	$H_\alpha$	$H_\beta$	$H_\gamma$	Среднее
$R$ , см <sup>-1</sup>	109990,8	105736,2	107735,3	107820,8
Отклонение от табличного, %	0,3	3,6	1,8	1,7

с погрешностями определения  $\lambda$  (т. к.  $Z, n, m$  — константы). Погрешность определения среднего значения:

$$\Delta_{\bar{R}} = \frac{1}{3} \sqrt{\sum_{i=1}^3 (R_i - \bar{R})^2} = 1468,3 \text{ см}^{-1} = 0,013 \bar{R}. \quad (5)$$

## Спектр поглощения йода

Аналогично предыдущему пункту были измерены длины волн, соответствующие энергетическим уровням  $h\nu_{1,0}$ ,  $h\nu_{1,5}$  и  $h\nu_{\text{гр}}$ . Результаты измерений представлены. Так как  $h$  и скорость

света  $c$  — константы, то относительные погрешности определения  $\lambda$  и  $h\nu$  совпадают.

Оценку погрешностей расчета энергии колебательного кванта возбуждённого состояния молекулы йода можно по следующей формуле:

$$\Delta(h\nu_2) = \frac{1}{5} \sqrt{\Delta(h\nu_{1,5})^2 + \Delta(h\nu_{1,0})^2}.$$

Оценим погрешность измерения частоты:

$$\Delta(\nu) = \nu \frac{\Delta(\lambda)}{\lambda} \approx \nu \cdot 0.01$$

Итого, получаем оценку:

$$\Delta\nu_{1,5} \approx 0.03 \text{ эВ} = \Delta(h\nu_{1,0}),$$

$$\Delta(h\nu_{\text{гр}}) \approx 0.04 \text{ эВ},$$

$$\Delta(h\nu_2) \approx 0.005 \text{ эВ}.$$

Таким образом, энергии уровней йода представлены в таблице ??.

Энергетический уровень	$h\nu_{1,0}$	$h\nu_{1,5}$	$h\nu_{\text{гр}}$
$\lambda, \text{ \AA}$	5817	5622	4950
$h\nu, \text{ эВ}$	2,14	2,21	2,51
$\Delta(h\nu), \text{ эВ}$	0.03	0.03	0.04

Таблица 1: Результаты для энергетических уровней йода

С использованием табличных величин  $h\nu_1 = 0,027 \text{ эВ}$  и  $E_a = 0,94 \text{ эВ}$  по формулам (2)-(4) найдены следующие величины:

- $h\nu_2 = (h\nu_{1,5} - h\nu_{1,0})/5 = 0,014 \pm 0,005 \text{ эВ};$
- $h\nu_{\text{эл}} = h\nu_{1,0} - \frac{1}{2}h\nu_2 + \frac{3}{2}h\nu_1 = 2,17 \pm 0,20 \text{ эВ};$
- $D_1 = h\nu_{\text{гр}} - E_a = 1,57 \pm 0,10 \text{ эВ};$
- $D_2 = h\nu_{\text{гр}} - h\nu_{\text{эл}} = 0,34 \pm 0,20 \text{ эВ}.$

## Выводы

В данной работе нам удалось пронаблюдать спектры излучения атомарных газов и спектр поглощения паров йода. Качественно все полученные результаты подтверждают предложенные теоретические модели. С достаточно большой точностью удалось определить постоянную Ридберга в опытах с атомарным водородом. Результаты в опыте с парами йода менее точны из-за плохой различимости спектральных линий в молекулярном спектре поглощения, а также из-за приближенности используемой модели.

## Приложение, экспериментальные данные

В таблице ?? указаны снятые показания для ртути (Hg) и неона (Ne), а также рассчитанные длины волн спектров водорода (H) и йода (I).

Спектр	Номер линии	Угол барабана, deg	Длина волны, А
Hg	6	255	4047
	5	798	4358
	4	1457	4916
	3	1878	5461
	2	2057	5770
	1	2068	5791
Ne	22	2098	5852
	21	2128	5882
	20	2146	5945
	19	2160	5976
	18	2184	6030
	17	2203	6074
	16	2212	6096
	15	2232	6143
	14	2242	6164
	13	2264	6217
	12	2282	6267
	11	2298	6305
	10	2310	6334
	9	2328	6383
	8	2337	6402
	7	2380	6507
	6	2413	6599
H	$\gamma$	768	4420
	$\beta$	1405	5044
	$\alpha$	2397	6546
I	1	2081	5784
	1,5	1996	5622
	гр	1310	3972

Таблица 2: Экспериментальные данные