

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

Лабораторная работа по общему курсу физики  
Квантовая физика

### **5.1.3. Эффект Рамзауэра**

Глаз Роман Сергеевич  
Группа Б01-008а

Долгопрудный  
2022

# Содержание

1	Теоретическое введение	1
2	Экспериментальная установка	2
3	Ход работы	3
4	Заключение	9
5	Список используемой литературы	9

**Цель работы:** исследовать энергетическую зависимость вероятности рассеяния электронов атомами ксенона, определить энергии электронов, при которых наблюдается «просветление» ксенона, и оценить размер его внешней электронной оболочки, глубину потенциальной ямы и потенциал ионизации.

**Используемое оборудование:** тиратрон ТГЗ-01/1.3Б, осциллограф, стабилизированный блок накала электрода.

## 1. Теоретическое введение

В результате исследований зависимости поперечных сечений упругого рассеяния электронов (с энергией до 10 ЭВ) на атомах аргона было обнаружено явление, получившее название *эффекта Рамзауэра*.

С точки зрения квантовой теории атом по отношению к электронной волне ведет себя как преломляющая среда с относительным показателем преломления

$$n = \frac{\lambda}{\lambda'} = \sqrt{1 - \frac{U}{E}}, \quad (1)$$

где  $U$ ,  $E$  – соответственно потенциальная и полная энергии электрона внутри атома.

Будем считать, что электрон рассеивается на одномерной прямоугольной потенциальной яме конечной глубины. Такая модель является хорошим приближением для атомов тяжелых инертных газов, отличающихся наиболее компактной структурой и резкой внешней границей. Решение задачи о прохождении частицы с энергией  $E$  над потенциальной ямой шириной  $l$  и глубиной  $U_0$  не составит труда найти из уравнения Шредингера:

$$\psi'' + k^2\psi = 0, \text{ где } k^2 = \begin{cases} 2mE/\hbar^2 & x < 0, x > l \\ 2m(E + U_0)/\hbar^2 & 0 < x < l \end{cases}. \quad (2)$$

Коэффициент прохождения равен отношению квадратов амплитуд прошедшей и падающей волн и определяется выражением:

$$\frac{1}{D} = 1 + \frac{U_0^2}{4E(E + U_0)} \sin^2(k_2 l). \quad (3)$$

Минимум последнего выражения отвечает квантовому аналогу просветления оптики, так как при выполнении условия

$$\sqrt{\frac{2m(E + U_0)}{\hbar^2}} l = \pi n, \quad n \in \mathbb{N}, \quad (4)$$

коэффициент прохождения частицы над ямой становится равным единице, то есть достигает своего максимального значения.

Отметим, что условие (4) легко получить, рассматривая интерференцию электронов волн де Бройля в атоме:

Условие первого интерференционного максимума:

$$2l = \frac{h}{\sqrt{2m(E_1 + U_0)}}. \quad (5)$$

Условие первого интерференционного минимума:

$$2l = \frac{3}{2} \frac{h}{\sqrt{2m(E_2 + U_0)}}. \quad (6)$$

Решая совместно уравнения (5, 6) можно получить:

$$l = \frac{h\sqrt{5}}{\sqrt{32m(E_2 - E_1)}}. \quad (7)$$

Понятно, что энергии  $E_1$  и  $E_2$  соответствуют энергиям электронов, прошедших разность потенциалов  $V_1$  и  $V_2$ , то есть  $E_1 = eV_1$  и  $E_2 = eV_2$ .

По измеренным величинам  $E_1$  и  $E_2$ , используя формулы (5, 6), можно рассчитать эффективную глубину потенциальной ямы атома:

$$U_0 = \frac{4}{5}E_2 - \frac{9}{5}E_1 \quad (8)$$

## 2. Экспериментальная установка

В нашей работе для изучения эффекта Рамзауэра используется тиратрон ТГЗ-01/1.3Б, заполненный инертным газом. Принципиальная схема установки для изучения эффекта Рамзауэра и схематическое изображение тиратрона и его конструкция приведены на рис. 1.

На лампу Л подаётся синусоидальное напряжение частоты 50 Гц от источника питания ИП, С – стабилизированный блок накала катода; исследуемый сигнал подаётся на электронный осциллограф (ЭО); цифрами обозначены номера ножек лампы.

Лампа-тиратрон ТГЗ-01/1.3Б, заполненная инертным газом, расположена непосредственно на корпусе блока источника питания (БИП). Напряжение к электродам лампы подаётся от источников питания, находящихся в корпусе прибора. Регулировка напряжения и выбор режима работы установки производится при помощи ручек управления, выведенных на лицевую панель БИП.

Зависимость вероятности рассеяния электрона от его энергии можно определить, зная ВАХ тиратрона:

$$w(U) = -\frac{1}{C} \ln \frac{I_a(U)}{I_0}, \quad (9)$$

где  $I_0$  – ток катода, а  $C$  – некоторая постоянная.

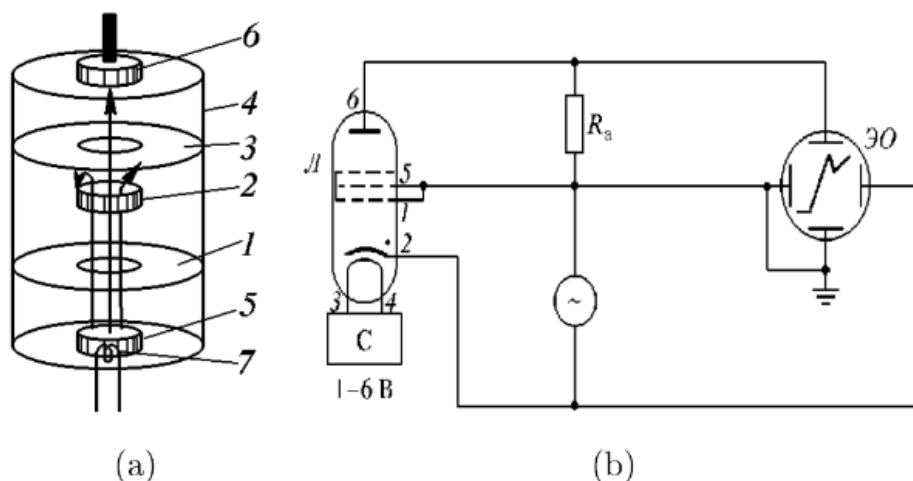
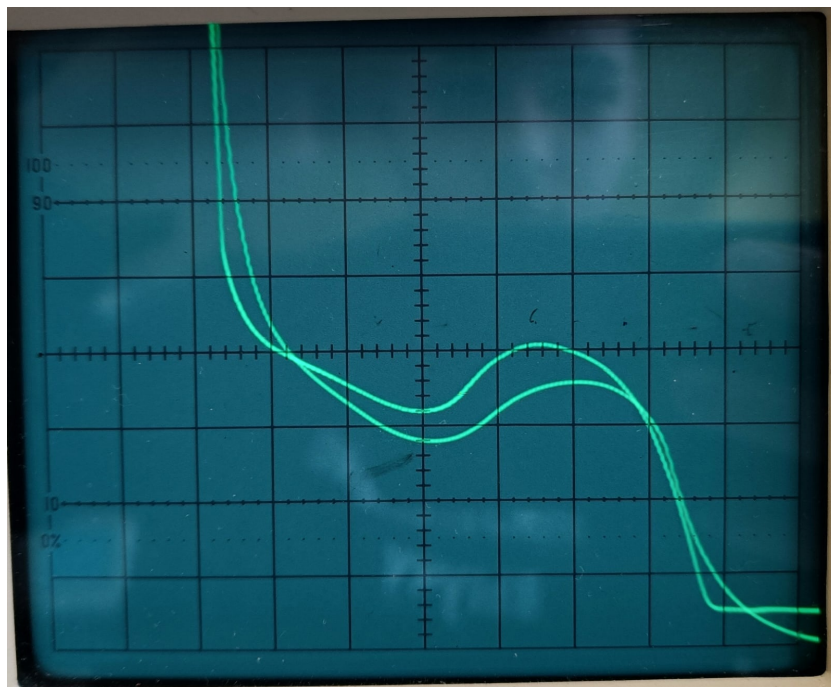
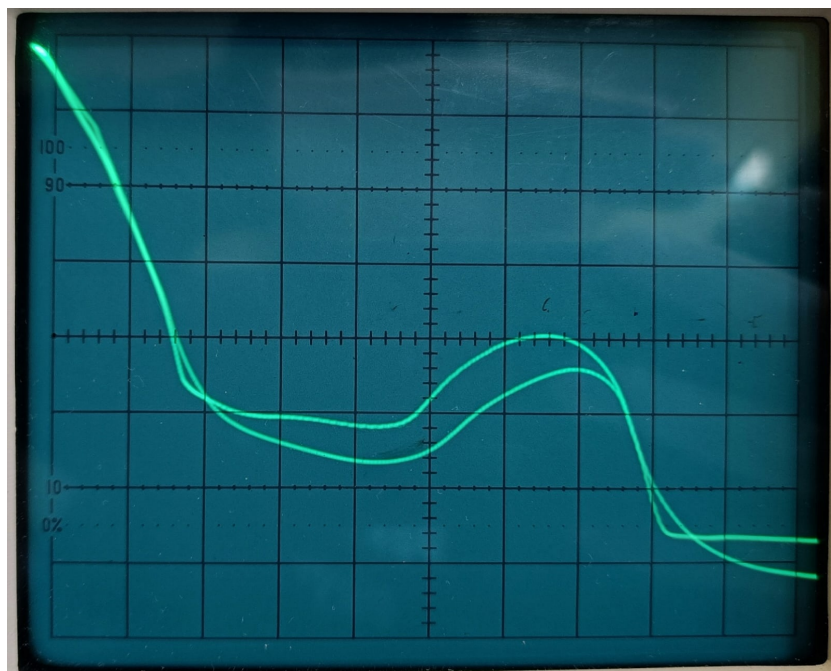


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

### 3. Ход работы

#### Динамический режим работы

1. Включим динамический режим и установим напряжение накала лампы равное  $(3.11 \pm 0.01)$  В.
2. Подкручивая ручкой фазу, сведём прямой и обратной ход характеристик.
3. Измерим напряжение между сеткой и катодом, которое соответствует максимуму, минимуму характеристик и пробоем тиратрона. Ноль напряжения определяем при заземлении входа.
4. Повторим измерения для напряжение накала лампы  $(2.81 \pm 0.01)$  В.

Рис. 2:  $U_{\text{нак}} = (3.11 \pm 0.01) \text{ В}$ Рис. 3:  $U_{\text{нак}} = (2.81 \pm 0.01) \text{ В}$

$U_{\text{нак}}, \text{В}$	$V_{\text{max}}, \text{В}$	$V_{\text{min}}, \text{В}$	$V_{\text{пробоя}}, \text{В}$
$3.11 \pm 0.01$	$6.0 \pm 0.4$	$10.0 \pm 0.4$	$14.4 \pm 0.4$
$2.81 \pm 0.01$	$4.6 \pm 0.4$	$10.0 \pm 0.4$	$14.4 \pm 0.4$

Таблица 1: Результаты измерений в динамическом режиме

5. По результатам измерений в динамическом режиме рассчитаем размер электронной оболочки атома инертного газа, заполняющего лампу, приняв  $U_0 = 2,5 \text{ В}$ , по формулам (5) и (6). Исключив  $U_0$ , рассчитаем размер электронной оболочки атома этого газа по формуле (7).

$$l_1 = \frac{h}{2\sqrt{2m(E_1 + U_0)}}, \quad \sigma_{l_1} = l_1 \frac{\sigma_{E_1}}{2(E_1 + U_0)}$$

$$l_2 = \frac{3h}{4\sqrt{2m(E_2 + U_0)}}, \quad \sigma_{l_2} = l_2 \frac{\sigma_{E_2}}{2(E_2 + U_0)}$$

$$l_3 = \frac{h\sqrt{5}}{\sqrt{32m(E_2 - E_1)}}, \quad \sigma_{l_3} = l_3 \frac{\sigma_{E_2} + \sigma_{E_1}}{2(E_2 - E_1)}$$

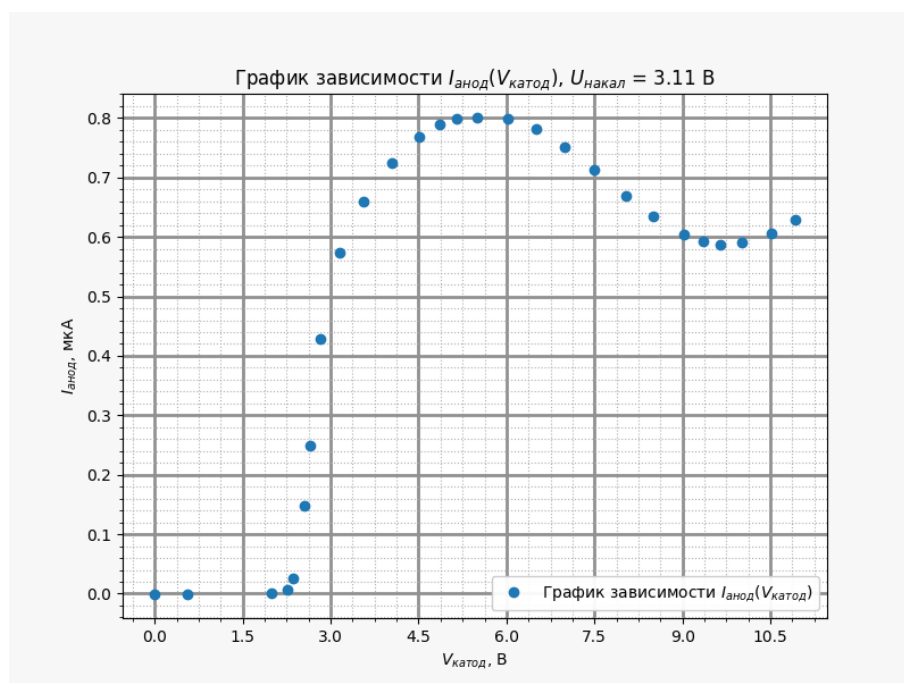
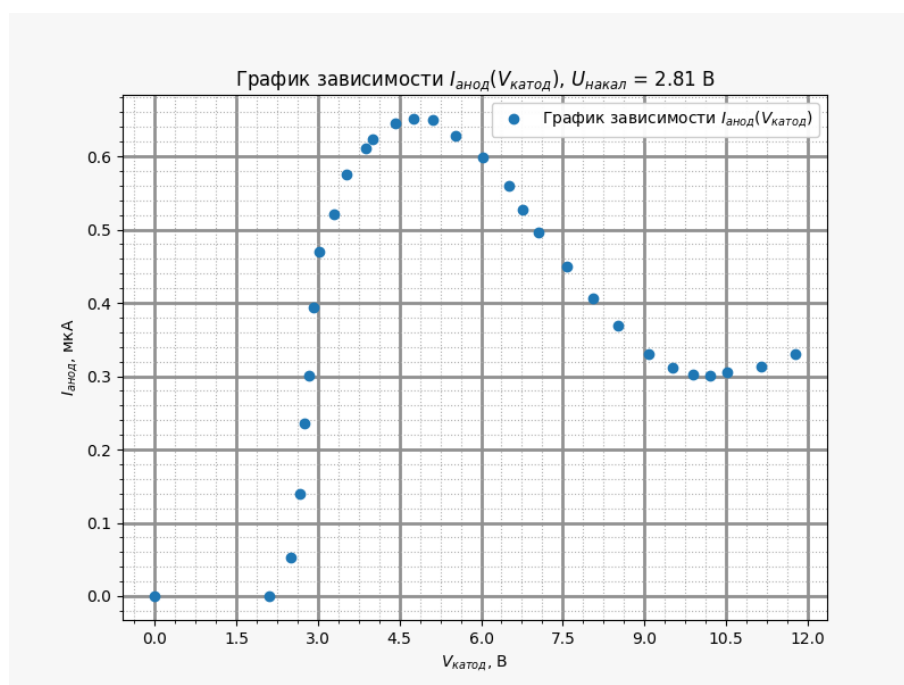
6. Оценим глубину потенциальной ямы по формуле (8). Видим, что полученные результаты отличаются от предложенной модели.
7. По результатам напряжения пробоя, оценим ионизации инертного газа, как  $U + U_0$ . Наиболее близкое значение у ксенона – 12.1 эВ.

$U_{\text{нак}}, \text{В}$	$l_1, \text{Å}$	$l_2, \text{Å}$	$l_3, \text{Å}$	$U_0, \text{эВ}$	$U, \text{эВ}$
$3.11 \pm 0.01$	$2,10 \pm 0,05$	$2,59 \pm 0,04$	$3,42 \pm 0,34$	$-2.8 \pm 1.0$	$11.6 \pm 1.4$
$2.81 \pm 0.01$	$2,30 \pm 0,07$	$2,59 \pm 0.04$	$2.94 \pm 0,22$	$-0.3 \pm 1.0$	$14.1 \pm 1.4$

Таблица 2: Результаты динамического способа

## Статический режим работы

1. Перейдем к измерению ВАХа в статическом режиме. Ток на аноде определяется по показанию вольтметра ( $V_{\text{анод}}$ ), делённому на сопротивление 100 кОм, которое включено в цепь анода.  $\sigma_{V_{\text{анод}}} = 0.01 \text{ мВ}$ .
2. Построим графики  $I_{\text{анод}} = f(V_{\text{катод}})$ .

Рис. 4:  $U_{\text{нак}} = (3.11 \pm 0.01) \text{ В}$ Рис. 5:  $U_{\text{нак}} = (2.81 \pm 0.01) \text{ В}$



3. По значениям графиков оценим следующие значения:

$U_{\text{нак}}, \text{ В}$	$V_{\text{max}}, \text{ В}$	$V_{\text{min}}, \text{ В}$
$3.11 \pm 0.01$	$5.5 \pm 0.3$	$9.7 \pm 0.3$
$2.81 \pm 0.01$	$4.7 \pm 0.3$	$10.2 \pm 0.3$

Таблица 3: Результаты измерений в статическом режиме

4. Вычисляем те же величины, что и динамическом режиме.

$U_{\text{нак}}, \text{ В}$	$l_1, \text{ \AA}$	$l_2, \text{ \AA}$	$l_3, \text{ \AA}$	$U_0, \text{ эВ}$
$3.11 \pm 0.01$	$2,16 \pm 0,04$	$2,62 \pm 0,03$	$3,34 \pm 0,24$	$-2.1 \pm 0.8$
$2.81 \pm 0.01$	$2,28 \pm 0,05$	$2,57 \pm 0.03$	$2.92 \pm 0,16$	$-0.3 \pm 0.8$

Таблица 4: Результаты статического режима

5. Оценим при каких напряжениях должны появляться максимумы в коэффициенте прохождения электронов для  $n = 2, 3$

$$k_2 l = \sqrt{\frac{2m(E_n + U_0)}{\hbar^2}} l = n\pi \Rightarrow E_n = -U_0 + \frac{\hbar^2 n^2}{8ml^2}$$

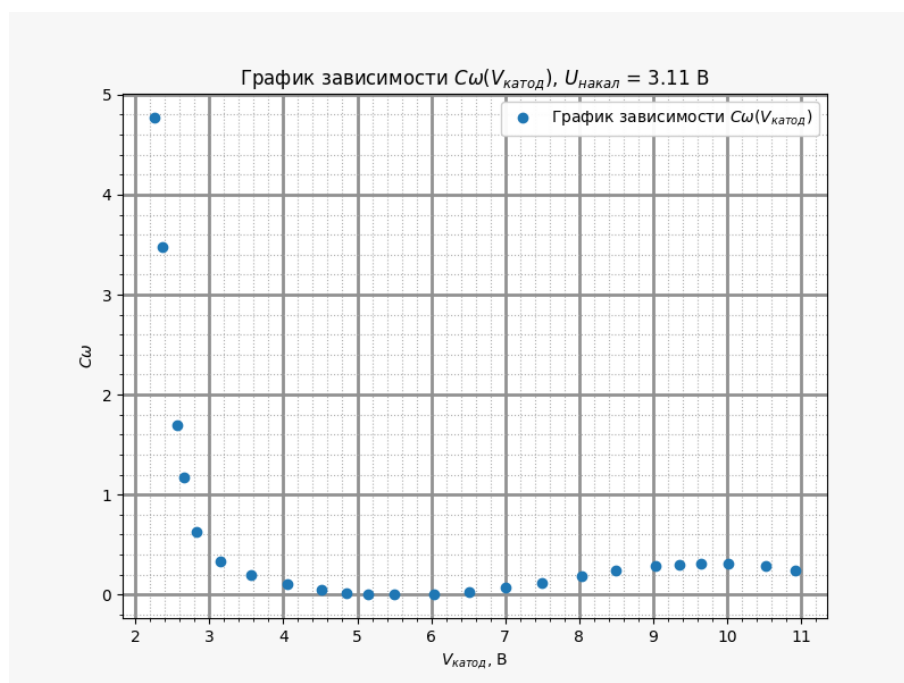
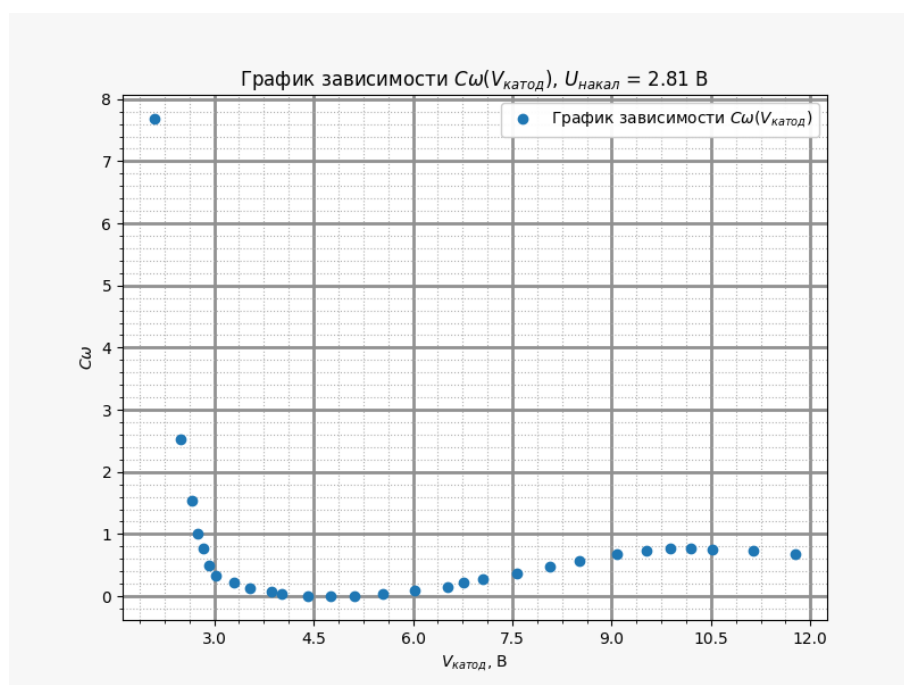
Для оценки возьмём, как  $U_0 = -1.4 \text{ эВ}$  и  $l = 2,65 \text{ \AA}$  – средние измеренные значения.

$$E_n = 1.4 + 5.3 \cdot n^2 \text{ эВ} \Rightarrow E_2 = 22,6 \text{ эВ}, E_3 = 49,1 \text{ эВ}$$

Следующие максимумы выше потенциала ионизации, поэтому мы не можем их наблюдать.

6. Найдём токи  $I_0$  из предыдущих графиков - они соответствуют найденным максимумам.  $I_0 = (803 \pm 2) \text{ пА}$  при  $U_{\text{нак}} = (3.11 \pm 0.01) \text{ В}$ .  $I_0 = (652 \pm 3) \text{ пА}$  при  $U_{\text{нак}} = (2.81 \pm 0.01) \text{ В}$ .

Найдём зависимость вероятности рассеяния электронов от энергии с коэффициентом в виде константы  $C$ :

Рис. 6:  $U_{\text{нак}} = (3.11 \pm 0.01)$  ВРис. 7:  $U_{\text{нак}} = (2.81 \pm 0.01)$  В

## 4. Заключение

В ходе работы был изучен ВАХ тиратрона в динамическом и статическом режимах при различных напряжениях накала. С помощью измерений ВАХа тиратрона удалось установить, какой инертный газ использовался в работе: по напряжению пробоя была получена энергия ионизация газа, которая оказалась примерно равна энергии ионизации ксенона – 12.1 эВ.

Также удалось оценить размер электронной оболочки разными методами, в среднем полученный результат  $l = (2.65 \pm 0.30) \text{ \AA}$ , что соответствует значению для ксенона  $l = 2.80 \text{ \AA}$ . А также глубину потенциальной ямы  $U_0 = (-1.4 \pm 0.8) \text{ эВ}$ . Полученное значение показывает, что для подсчёта истинного значения требуется применения другой модели.

$U_{\text{нак}}, \text{ В}$	$l_1, \text{ \AA}$	$l_2, \text{ \AA}$	$l_3, \text{ \AA}$	$U_0, \text{ эВ}$	$U, \text{ эВ}$
$3.11 \pm 0.01$	$2, 10 \pm 0, 05$	$2, 59 \pm 0, 04$	$3, 42 \pm 0, 34$	$-2.8 \pm 1.0$	$11.6 \pm 1.4$
$2.81 \pm 0.01$	$2, 30 \pm 0, 07$	$2, 59 \pm 0.04$	$2.94 \pm 0, 22$	$-0.3 \pm 1.0$	$14.1 \pm 1.4$

Таблица 5: Результаты динамического способа

$U_{\text{нак}}, \text{ В}$	$l_1, \text{ \AA}$	$l_2, \text{ \AA}$	$l_3, \text{ \AA}$	$U_0, \text{ эВ}$
$3.11 \pm 0.01$	$2, 16 \pm 0, 04$	$2, 62 \pm 0, 03$	$3, 34 \pm 0, 24$	$-2.1 \pm 0.8$
$2.81 \pm 0.01$	$2, 28 \pm 0, 05$	$2, 57 \pm 0.03$	$2.92 \pm 0, 16$	$-0.3 \pm 0.8$

Таблица 6: Результаты статического режима

## 5. Список используемой литературы

- Лабораторный практикум по общей физике. Квантовая физика
- [Описание лабораторных работ на кафедре общей физики МФТИ](#)