

**КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НАБЕРЕЖНОЧЕЛНИНСКИЙ ИНСТИТУТ**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ
ПОСТУЛАТОВ Н. БОРА.
ОПЫТ Д. ФРАНЦА И Г. ГЕРЦА**

Учебно – методическое пособие

Набережные Челны

2023

УДК 530 (076)

ББК 22 и 73–4

*Печатается по рекомендации учебно–методической
комиссии
отделения информационных технологий и энергетических
систем Набережночелнинского института (филиала)
Казанского (Приволжского) федерального университета
(протокол № 1.3.2.37.2.2-01/1 от 24.04.2023г.)*

Рецензенты:

канд. техн. наук, доцент Илюхин А.Н.

канд. техн. наук, доцент Тазмеев Х. К.

Экспериментальное подтверждение постулатов Н. Бора. Опыт Д. Франка и Г. Герца: Учебно – методическое пособие / Р.М. Шайхулина, А.Т. Галиакбаров, И.К. Хафизов. – Набережные Челны: Изд.–полигр. Центр Набережночелнинского института К(П)ФУ, 2023. – 18 с.

Учебно–методическое пособие предназначено для выполнения лабораторных работ студентами направлений подготовки 09.03.04 «Программная инженерия», 08.03.01 «Строительство», 21.03.02 «Землеустройство и кадастры», 20.03.01 «Техносферная безопасность» и других направлений, в рабочей программе которых предусмотрены занятия по изучению дисциплины физика, физические методы исследования материалов.

УДК 530 (077)

ББК 22.371.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ

1.1 Постулаты Н. Бора

Анализ спектров излучения разреженных газов показал, что каждый газ имеет свой линейчатый спектр, состоящий из отдельных спектральных линий. В начале XX века наиболее изученным был спектр атома водорода.

Все экспериментально наблюдаемые частоты ν (длины волн λ) спектральных линий атома водорода могут быть описаны одной формулой – *обобщенной формулой И. Бальмера*:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = R \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (1)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость распространения света в вакууме, $R = 3.29 \cdot 10^{15} \text{с}^{-1}$ – постоянная Ридберга. $n=1,2,3\dots$ имеет постоянное значение, определяет серию спектральных линий, $m = n+1, n+2, \dots$ определяет отдельные линии спектральной серии. Серию спектральных линий, отвечающую $n=1$, называют *серией Лаймана*. Линии этой серии расположены в ультрафиолетовой области спектра электромагнитного излучения. При $n=2$ различные значения m дают серию линий в видимой области спектра. Эту серию называют *серией Бальмера*. Линии остальных серий ($n=3,4$) находятся в инфракрасной области, их называют соответственно *сериями Пашена, Брэкета*.

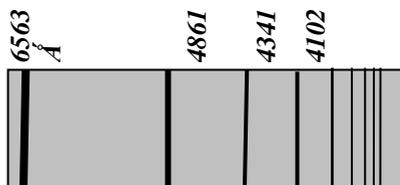


Рис.1. Спектр атома водорода

На рис. 1 показана часть спектра атомарного водорода в видимой и близкой ультрафиолетовой области. Расстояние между линиями закономерно убывает по мере перехода от более длинных волн к более коротким (обозначены видимые линии).

Эмпирически подобранная формула (1) хорошо описывала экспериментальные спектры, однако, не имела теоретического обоснования. Вскрыть физический смысл найденных закономерностей в рамках классической физики оказалось невозможным.

Первая попытка построить качественно новую квантовую теорию атома была предпринята в 1913 г. датским физиком Нильсом Бором. В основе этой теории была идея связать в единое целое эмпирические закономерности линейчатых спектров, ядерную модель атомов Резерфорда и квантовый характер излучения и поглощения света. Основу теории Н.Бора составляют два постулата.

Первый постулат (постулат стационарных состояний).

Существуют стационарные состояния атома, находясь в которых он не излучает и не поглощает энергию. Стационарным состояниям атома соответствуют стационарные орбиты, по которым движутся электроны. Движение электронов по стационарным орбитам не сопровождается излучением или поглощением электромагнитных волн.

Правило квантования орбит Н.Бора утверждает, что в стационарном состоянии атома, электрон, двигаясь по круговой орбите, должен иметь дискретные квантованные значения момента импульса L_n , кратные постоянной Планка \hbar :

$$L_n = m_e \cdot v \cdot r_n = n \cdot \hbar \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (2)$$

m_e – масса электрона, v – скорость электрона по n -й орбите радиуса r_n , $\hbar = h/2\pi$ – постоянная М.

Планка.

Второй постулат (правило частот).

При переходе атома из одного состояния стационарного в другое стационарное состояние испускается или поглощается фотон с энергией

$$h \cdot \nu_{nm} = E_n - E_m, \quad (3)$$

равной разности энергий соответствующих стационарных состояний. E_n и E_m – энергии стационарных состояний атома до и после излучения (поглощения) фотона соответственно. При $E_m < E_n$ происходит излучение фотона, при $E_m > E_n$ – его поглощение. Набор возможных дискретных частот

$$\nu_{nm} = \frac{E_n - E_m}{h}$$

квантовых переходов и определяет линейчатый спектр атома.

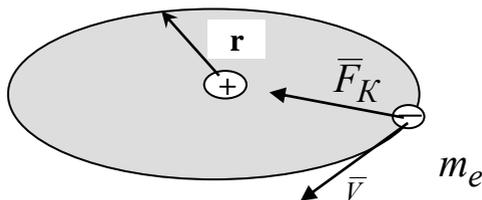


Рис.2. Движение электрона в атоме

Постулаты Н.Бора позволили рассчитать спектр атома водорода и водородоподобных систем – систем, состоящих из ядра с зарядом Ze и одного электрона (ионы He^+ , Li^{2+}). Согласно теории Бора движение электрона происходит по круговым стационарным орбитам.

Кулоновская сила взаимодействия ядра и электрона сообщает электрону нормальное ускорение:

$$\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} = \frac{m_e v^2}{r_n}, \quad (4)$$

m_e – масса электрона, v – скорость электрона по n -й орбите радиуса r_n (Рис.2), ϵ_0 – электрическая постоянная.

Решая совместно уравнения (2) и (4) получаем выражение для радиуса n -й стационарной орбиты:

$$r_n = n^2 \cdot \frac{\hbar^2 4\pi\epsilon_0}{m_e Z e^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (5)$$

Энергия электрона в атоме складывается из его кинетической энергии ($m_e v^2/2$) и потенциальной энергии в

электростатическом поле ядра $\left(-\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right)$:

$$E = \frac{m_e v^2}{2} - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (6)$$

Используя уравнения (4–6) получаем следующее выражение для энергии электрона в атоме:

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \cdot \frac{Z^2 m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (7)$$

Таким образом, энергетические состояния атома образуют дискретную последовательность энергетических уровней, изменяющихся в зависимости от значения n (рис.3).

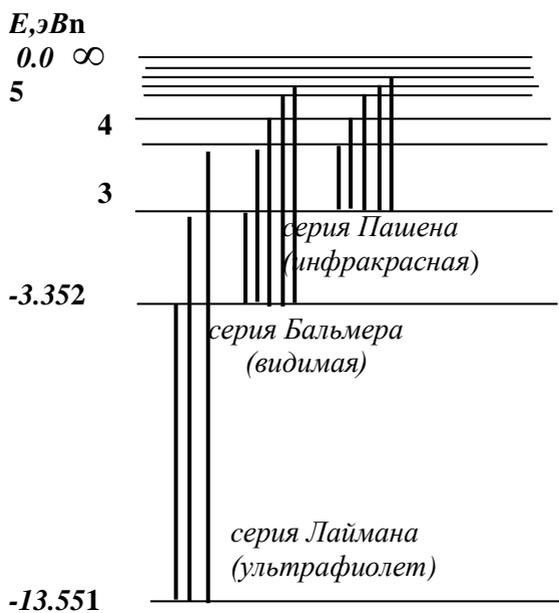


Рис.3. Энергетические уровни и спектральные серии атома

Целое число n в формуле (7), определяет энергетические уровни атома и называется *главным квантовым числом*. Энергетическое состояние с $n=1$ является *основным (нормальным) состоянием*.

Состояния с $n > 1$ являются *возбужденными*. Энергия атома с увеличением n возрастает и энергетические уровни сближаются к границе, соответствующей значению $n=\infty$. Следовательно, атом водорода обладает минимальной энергией $E_1 = -13.55 \text{ эВ}$ при $n = 1$ и максимальной $E_\infty = 0$ при $n = \infty$. Значение энергии $E_\infty = 0$ соответствует *ионизации* атома, т.е. отрыву от него электрона.

Согласно второму постулату Н. Бора (3) при переходе атома водорода ($Z=1$) из стационарного состояния m в стационарное состояние n меньшей энергией испускается квант

$$h\nu_{mn} = E_m - E_n = -\frac{m e^4}{8h^2 \varepsilon_0^2} \cdot \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (8)$$

с частотой излучения

$$\nu_{mn} = \frac{m e^4}{8h^3 \varepsilon_0^2} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (9)$$

$R = \frac{m e^4}{8h^3 \varepsilon_0^2}$ – постоянная Ридберга. Полученная формула

(9) хорошо согласуется с эмпирически полученной формулой И. Бальмера (1) и позволяет определить значение постоянной Ридберга.

Таким образом, подтверждается правильность полученной Бором формулы (9) для энергетических уровней водородоподобного атома.

2.2. Опыт Д. Франка и Г. Герца

Постулат Бора о существовании стационарных состояний атомов и правило частот нашли свое экспериментальное подтверждение в опыте Д. Франка и Г. Герца (1914 г.).

В опыте изучалось столкновение электронов с атомами газов методом задерживающего потенциала. Схема

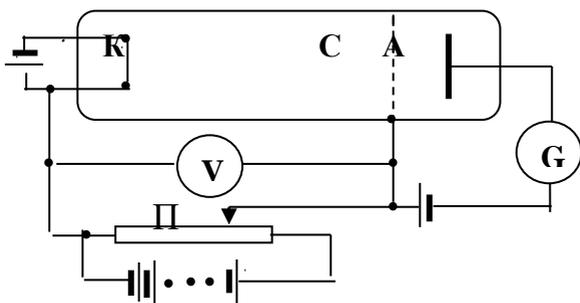


Рис. 4. Схема опыта Д. Франка и Г. Герца

установки приведена на рис.4.

Трубка, заполненная парами ртути под небольшим давлением (~ 13 Па) содержала три электрода: катод (K), сетка (C) и анод (A). Электроны, эмитируемые катодом, ускорялись разностью потенциалов $\Delta\varphi$ (напряжением U), приложенным между катодом и сеткой. Значение напряжения можно плавно изменять с помощью потенциометра П. Между сеткой и анодом приложен небольшой (~ 0.5 В) задерживающий потенциал, тормозящий движение электронов к аноду. Исследовалась зависимость силы тока I в цепи анода от напряжения U между катодом и сеткой. Сила тока измерялась гальванометром (G), напряжение вольтметром (V). Полученная зависимость

представлена на рис.5. При увеличении ускоряющего

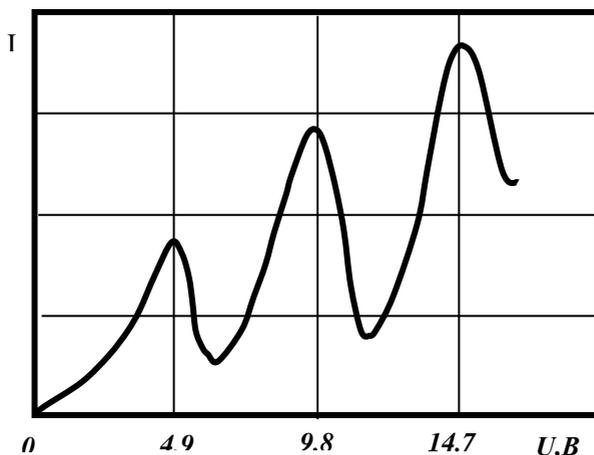


Рис.5. Вольтамперная характеристика

напряжения U до 4.86 В анодный ток I монотонно возрастает. Значение I_a проходит через максимум при $U = 4.86$ В, затем резко уменьшается и возрастает вновь. Дальнейшие максимумы наблюдаются при $U = 2 \cdot 4.86$ В и $3 \cdot 4.86$ В.

Электроны, ускоренные в области между катодом и сеткой, испытывают соударения с атомами паров ртути. Электроны, которые после соударения имеют достаточную энергию для преодоления задерживающего потенциала между сеткой и анодом, достигают анода. При неупругих соударениях электронов с атомами ртути, последние могут возбуждаться. Согласно теории Бора, каждый из атомов ртути может принять лишь вполне определенную энергию, переходя при этом в одно из возбужденных состояний. Поэтому, если в атомах действительно существуют *стационарные состояния*, то электроны, сталкиваясь с

атомами ртути, должны терять энергию дискретно, определенными порциями, равными разности энергий соответствующих стационарных состояний атома.

Первым возбужденным состоянием атома ртути является энергетическое состояние, отстоящее от основного по энергетической шкале на 4.86 эВ. До тех пор пока электроны, ускоряемые полем, не приобретут энергию $e \cdot \Delta\varphi = 4.86 \text{ эВ}$ ($U = 4.86 \text{ В}$), они испытывают лишь *упругие столкновения* (без изменения энергии) и анодный ток монотонно возрастает.

Как только кинетическая энергия электронов достигает 4.86 эВ, начинают происходить *неупругие столкновения*. Электрон с таким значением энергии полностью отдает ее атому ртути, вызывая переход одного из электронов атома ртути из нормального энергетического состояния на возбужденный энергетический уровень. Ясно, что такой электрон, потерявший свою кинетическую энергию, не сможет преодолеть задерживающее его поле и не достигнет анода. Поэтому при разности потенциалов между катодом и сеткой, равной 4.86 В должно происходить резкое падение анодного тока. Аналогичное явление будет при энергиях $e \cdot \Delta\varphi = 2 \cdot 4.86 \text{ эВ}$, $3 \cdot 4.86 \text{ эВ}$, ... $n \cdot 4.86 \text{ эВ}$, когда электроны могут испытывать два, три, ... и т.д. неупругих соударения с атомами ртути, потеряв при этом полностью свою энергию и не достигнуть анода. С этим и связано неоднократное резкое падение анодного тока при значениях напряжения U , равных $2 \cdot 4.86 \text{ В}$, $3 \cdot 4.86 \text{ В}$, ... $n \cdot 4.86 \text{ В}$ (рис.5).

Таким образом, опыты Франка и Герца показали, что атомы изменяют свою энергию *дискретно*, принимая только определенную порцию энергии – *квант энергии*. При этом осуществляется переход в одно из возбужденных

энергетических состояний. Ближайшим к основному состоянию атома ртути является возбужденное состояние, отстоящее по энергетической шкале на 4.86 эВ. Следовательно, эксперимент Франка и Герца подтверждает **первый постулат Бора** о существовании в атомах *стационарных энергетических состояний*.

Атомы ртути, получившие при соударении с электронами энергию ΔE , переходят в возбужденное состояние из которого они спустя время порядка 10^{-8} с возвращаются в основное состояние, излучая при этом, согласно **второму постулату Бора** (3) световой квант с частотой $\nu = \frac{\Delta E}{h}$.

По известному значению $\Delta E = 4.86$ эВ можно вычислить

длину волны излучения $\lambda = \frac{hc}{\Delta E} = 253.7 \text{ нм}$ Поэтому,

если теория верна, то атомы ртути, бомбардируемые электронами с энергией 4.86 эВ должны являться источниками ультрафиолетового излучения. Эксперимент, действительно, обнаруживает эту ультрафиолетовую линию с $\lambda \approx 254$ нм. Следовательно, опыты Франка и Герца подтверждают первый и второй постулаты Бора.

Теория Бора сыграла огромную роль в создании атомной физики. Особенно велика ее роль в развитии атомной и молекулярной спектроскопии, где обширный экспериментальный материал был систематизирован и сведен к определенным полуэмпирическим закономерностям благодаря теории Бора.

В дальнейшем, с развитием квантовой физики, стало очевидным, что теория Бора является необходимым переходным этапом на пути создания и развития квантовой теории атомных и ядерных процессов.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Описание установки

Цели работы:

- изучение основных положений квантовой модели атома теории Н. Бора,
- выполнение опыта Д. Франка и Г. Герца,
- определение первого потенциала возбуждения атомов газа.

Данная лабораторная установка обеспечивает возможность изучения зависимости анодного тока I_a газонаполненной лампы (триода с подогреваемым катодом) от напряжения катод–сетка $U_{кс}$ при фиксированном напряжении анод–сетка. На экране осциллографа наблюдается характерная для опыта Франка–Герца кривая с максимумами и минимумами.

Установка содержит объект исследования (1) (рис.6)

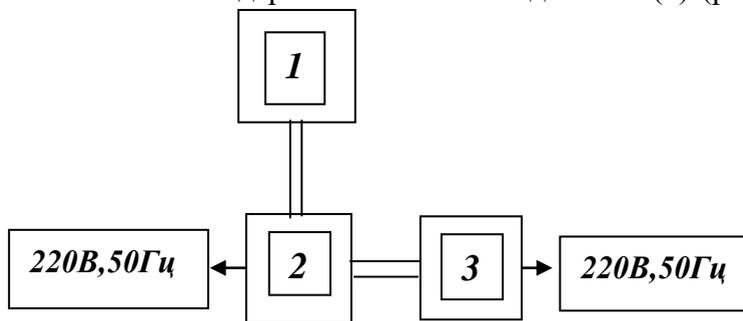


Рис. 6. Схема лабораторной установки опыта Д. Франка и Г. Герца

на базе манометрической лампы, заполненной криптоном, измерительное устройство (2) с ручками управления (*НАКАЛ, ГРУБО, ТОЧНО*), индикации напряжения анод–

сетка на передней панели. На задней стенке измерительного устройства имеются разъем для подключения объекта исследования, клемма заземления и сетевой шнур. На передней панели находятся выходы для подключения осциллографа (3) и его синхронизации.

Установка работает следующим образом. С генератора пилообразного напряжения на объект исследования подаются импульсы амплитудой около 40 В. Наряду с этим, на объект исследования подается регулируемое напряжение накала и запирающее напряжение, которые обеспечивают нормальный режим работы лампы. Анодный ток лампы I_a измерительного устройства преобразуется в напряжение, пропорциональное току и подается на вход осциллографа. На экране осциллографа отображается зависимость I_a от напряжения $U_{кс}$. При этом измерительное устройство формирует на экране осциллографа маркер, который можно перемещать при помощи ручек *ГРУБО* и *ТОЧНО*. При наведении маркера на интересующие точки отображаемого графика происходит совпадение опорного напряжения и мгновенного пилообразного напряжения, что позволяет измерять напряжение $U_{кс}$ с помощью цифрового измерителя напряжения.

2.2. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

Соедините отдельные блоки установки (объект исследования, измерительное устройство, осциллограф), согласно схемы подключения (рис.6). Перед включением в сеть все кнопки включения должны быть выключены, ручки регулирования должны быть выведены в крайнее левое положение.

1. Установите на осциллографе развертку 5ms/дел и усиление 2В/см . Включите осциллограф и с помощью ручек « \leftrightarrow » и « \updownarrow » установите развертку луча в центре экрана.
2. Включите измерительное устройство. При этом должен засветиться объект исследования. Выдержите лампу во включенном состоянии в течение времени не менее 10 мин. для установления рабочего режима лампы.
3. Отрегулируйте синхронизацию осциллографа для получения устойчивой картины на экране.
4. Зарисуйте осциллограмму – зависимость анодного тока I_a от ускоряющего напряжения $U_{кс}$ – на миллиметровой бумаге. (В случае искажения осциллограммы отрегулируйте ее при помощи регулятора *НАКАЛ* измерительного устройства).
5. С помощью ручек *ГРУБО* и *ТОЧНО* перемещайте маркер по осциллограмме, совмещая его с характерными точками (максимумами и минимумами), и произведите измерения $U_{кс}$ (значения резонансного потенциала) по индикатору измерительного устройства. Отмеченные маркером значения $U_{кс}$ отметьте на графике зависимости $I_a = f(U_{кс})$.
6. Пункт 6 повторите три раза. Вычислите среднее значение резонансного потенциала.
7. Используя формулу (3) и, полученное в пункте 7, среднее значение резонансного потенциала вычислите значение частоты ν (длины волны λ) излучения данного газа (криптона).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие спектральные серии (линии) в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной области определяют спектр атома водорода?

2. Разъясните смысл постулатов Н. Бора. Как с их помощью объясняется линейчатый спектр атома водорода?
3. Какой смысл имеют числа m и n в обобщенной формуле Бальмера?
4. Какие основные выводы можно сделать на основании опытов Франка и Герца?
5. Почему на рис.5 наблюдают максимумы при $U=9.8$ В, $U=14.7$ В? Что изменится, если вместо ртути в трубке будет другой газ? Другое тормозящее поле?
6. На каких участках кривой зависимости $I_a = f(U_{кс})$ наблюдаются упругие и на каких – неупругие столкновения электронов с атомами криптона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ландсберг, Г. С. Оптика: учебное пособие для вузов / Г. С. Ландсберг. – 7-е изд., стер. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2017. – 852 с. – ISBN 978–5–9221–1742–5. – Текст: электронный. – URL: <https://znanium.com/catalog/product/1223523> (дата обращения: 07.04.2023).
2. Малышев, Л. Г. Избранные главы курса физики: волновая и квантовая оптика: учебное пособие / Л. Г. Малышев, А. А. Повзнер. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2018. – 224 с. – ISBN 978–5–7996–2285–5. – Текст: электронный. – URL: <https://znanium.com/catalog/product/1957547> (дата обращения: 07.04.2023).
3. Фриш, С. Э. Оптические спектры атомов: учебное пособие / С. Э. Фриш. — 2-е изд., испр. — Санкт-Петербург: Лань, 2022. — 640 с. — ISBN 978–5–8114–1143–6. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL:

<https://e.lanbook.com/book/210515> (дата обращения: 07.04.2023).

4. Савельев, И. В. Курс физики. В 3 томах. Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц / И. В. Савельев. – 8-е изд., стер.– Санкт–Петербург: Лань, 2023.– 308 с.– ISBN 9785– 507– 46177– 6.– Текст: электронный // Лань: электронно– библиотечная система.– URL: <https://e.lanbook.com/book/302249> (дата обращения: 07.04.2023).
5. Сивухин, Д. В. Общий курс физики: учебное пособие: в 5 томах / Д. В. Сивухин.– 3-е изд., стереот.– Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2020– Том 5 : Атомная и ядерная физика– 2020.– 784 с.– ISBN 978–5–9221–0645–0.– Текст : электронный // Лань : электронно библиотечная система.– URL: <https://e.lanbook.com/book/185730> (дата обращения: 07.04.2023)

Оглавление

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ	3
1.1 Постулаты Н. Бора.....	3
2.2. Опыт Д. Франка и Г. Герца	8
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	13
2.1. Описание установки	13
2.2. Порядок выполнения работы и	14
обработка результатов измерений	14
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	15
ЛИТЕРАТУРА.....	16
Оглавление.....	18