

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
филиал МГУ в г. Севастополе
факультет естественных наук
кафедра физики и геофизики

УТВЕРЖДЕНО
на 20 21-20 22 учебный год
Методическим советом Филиала
Протокол № 8 от «18» 06 20 21 г.
Заместитель директора по учебной работе:
[подпись]
Заведующий кафедрой:



УТВЕРЖДАЮ

Директор
Филиала МГУ в г. Севастополе
[подпись]
О.А. Шпырко
«31» августа 20 21 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Наименование дисциплины (модуля):

Б-ПД Общий физический практикум

код и наименование дисциплины (модуля)

Уровень высшего образования:

бакалавриат

Направление подготовки:

03.03.02 Физика

(код и название направления/специальности)

Направленность (профиль) ОПОП:

общий

(если дисциплина (модуль) относится к вариативной части программы)

Форма обучения:

очная

очная, очно-заочная

Рабочая программа рассмотрена
на заседании кафедры физики и геофизики
протокол №4 от «27» августа 2021 г.

Заведующий кафедрой

[подпись]
(подпись)

(К.В. Показеев)

Рабочая программа одобрена
Методическим советом
Филиала МГУ в г. Севастополе
Протокол №8 от «31» августа 2021 г.

[подпись]
(подпись)

(С.А. Наличаева)

Севастополь, 2021

Рабочая программа дисциплины (модуля) разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки «Физика» в редакции приказа МГУ от 30 декабря 2016 г.

Год (годы) приема на обучение 2016, 2017, 2018, 2019.

курс – 1, 2, 3

семестры – 1, 2, 3, 4, 5

зачетных единиц – 18

академических часов – 442, в т.ч.

лекций – нет

практических занятий – 442 часа

Форма промежуточной аттестации:

зачет в 1, 2, 3, 4, 5 семестрах

1. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО.

«Общий физический практикум», как важнейшая составная часть курса общей физики является одной из основных дисциплин в общей системе современной подготовки физиков - профессионалов.

Она изучается на младших курсах параллельно чтению лекций курса общей физики и ее главной задачей является создание фундаментальной базы знаний, на основе которой в дальнейшем можно развивать более углубленное и детализированное изучение всех разделов физики в рамках цикла курсов по теоретической физике и специализированных курсов.

Курс начинается с теоретического введения, далее следуют циклы лабораторных работ по соответствующим разделам курса общей физики.

2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (если есть).

Базовые знания по общей физике, высшей математике и технике проведения экспериментов.

3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников.

Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю):

Знать:

- методики постановки физических экспериментов;
- основные элементы техники безопасности при проведении экспериментальных исследований.

Уметь:

- подготовить и выполнить физический эксперимент;
- применять теоретические познания к анализу конкретных физических ситуаций;
- работать с современной измерительной аппаратурой.

Владеть:

- методами измерений физических величин и принципы действия современной аппаратуры;
- методами обработки и анализа полученных данных, а также методы представления результатов, с использованием как традиционных, так и современных компьютерных подходов.

Иметь опыт:

- проведения физического эксперимента с использованием электронно-механических средств контроля.

4. Формат обучения – контактный.

5. Объем дисциплины (модуля) составляет 18 з.е., в том числе 442 академических часа, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (аудиторная нагрузка), 206 академических часов на самостоятельную работу обучающихся.

6. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

6.1. Структура дисциплины (модуля) по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Наименование разделов и тем дисциплины (модуля), Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Номинальные трудозатраты обучающегося		Всего академических часов	Форма текущего контроля успеваемости (наименование)	
	Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) Виды контактной работы, академические часы				Самостоятельная работа обучающегося, академические часы
	Занятия лекционного типа*	Занятия семинарского типа*			
Введение в технику эксперимента					
Введение.	-	Консультации, 2	5	7	-
Измерение линейных размеров и плотности образца. Нониус и микрометрические шкалы.	-	Лабораторные работы, 10	4	14	Отчет по лаб. раб.
Мультиметры. Измерение силы тока, напряжения и активных сопротивлений.	-	Лабораторные работы, 10	4	14	Отчет по лаб. раб.
Метод наименьших квадратов. Графическое представление данных.	-	Лабораторные работы, 10	4	14	Отчет по лаб. раб.
Электронно-лучевой осциллограф.	-	Лабораторные работы, 10	4	14	Отчет по лаб. раб.
Изучение работы термостата. Градуировка медного термометра.	-	Лабораторные работы, 10	4	14	Отчет по лаб. раб.
Изучение нормального распределения. Применение гистограмм для обработки данных.	-	Лабораторные работы, 10	4	14	Отчет по лаб. раб.

Изучение статистики фотоотсчетов ФЭУ.	-	Лабораторные работы, 10	4	14	Отчет по лаб. раб.
Механика					
Изучение простейших видов движения при помощи машины Атвуда	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Определение ускорения свободного падения при помощи обратного маятника.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Определение коэффициента трения качения.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Определение момента инерции колеса	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Проверка теоремы Гюйгенса-Штейнера	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Изучение деформации растяжения и определение модуля Юнга	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Изучение деформаций изгиба и определение модуля Юнга	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Изучение деформации кручения.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Изучение изгиба балки	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Изучение свободных и вынужденных колебаний	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Изучение собственных колебаний связанных маятников	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Молекулярная физика и термодинамика					

Изучение распределения термоэлектронов по энергии и скорости.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Моделирование идеального газа. Изучение случайных блужданий броуновской частицы.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Измерение скорости звука в воздухе.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Определение отношения удельных теплоемкостей $\gamma=c_p/c_v$ в воздухе.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Определение теплоемкости воздуха при постоянном давлении.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Изучение фазового перехода первого рода. Определение теплоемкости с помощью эталонного образца.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Моделирование работы газовой турбины.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Определение коэффициента температуропроводности твердого тела.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Определение коэффициента теплового расширения материалов.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Электричество и магнетизм					
Моделирование электростатических полей.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Изучение электростатическ	-	Лабораторные	3	11	Отчет по лаб. раб.

их полей с помощью электролитической ванны.		работы, 8			
Определение удельного заряда электрона.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Изучение катушек Гельмгольца.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Изучение магнитного поля в соленоиде.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Изучение сегнетоэлектриков.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Определение точки Кюри ферромагнетика.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Изучение резонанса в цепях переменного тока.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Изучение переходных процессов в цепях переменного тока.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Изучение фазовых соотношений в цепях переменного тока.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Оптика					
Определение фокусного расстояния собирающей линзы.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы. Изучение aberrаций в оптических системах.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Изучение интерференции ультразвуковых волн.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Изучение	-	Лаборатор	3	11	Отчет по лаб.

интерференции на примере колец Ньютона.		ные работы, 8			раб.
Изучение дифракции Френеля.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Изучение дифракции Фраунгофера.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Изучение оптической фильтрации.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Изучение формул Френеля.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Изучение поляризации света.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Изучение фотоэффекта.	-	Лабораторные работы, 8	3	11	Отчет по лаб. раб.
Атомная физика					
Опыт Франка и Герца	-	Лабораторные работы, 10	5	15	Отчет по лаб. раб.
Изучение спектра атома водорода	-	Лабораторные работы, 10	4	14	Отчет по лаб. раб.
Изучение эффекта Холла в полупроводниках	-	Лабораторные работы, 10	5	15	Отчет по лаб. раб.
Гамма-спектрометр с сцинтилляционным датчиком	-	Лабораторные работы, 10	4	14	Отчет по лаб. раб.
Исследование эффекта Комптона	-	Лабораторные работы, 10	5	15	Отчет по лаб. раб.
Другие виды самостоятельной работы (при наличии): например, курсовая работа, творческая работа (эссе)	-	-	-	-	-
	-	442		176	
Промежуточная аттестация (зачеты)			30	30	
Итого				648	

6.2. Содержание разделов (тем) дисциплины.

Дисциплина «Общий физический практикум» не имеет в своем составе тем (разделов) как таковых. Практикум проходит параллельно с соответствующими дисциплинами по общей физике – механике, молекулярной физике, электромагнетизму, оптике и атомной физике – и содержит от 5 до 12 лабораторных работ по каждой дисциплине.

Теоретические знания.

В рамках раздела «Введение в технику эксперимента» студенты получают теоретические знания по следующим темам:

- Совместные измерения. Идея метода наименьших квадратов. Обработка результатов совместных измерений.
- Погрешности измерений и их классификация. Правила оценки ошибок. Оформление результатов измерений.
- Гистограммы и понятие о плотности распределения вероятности. Доверительные интервалы. Выбор стратегии выполнения измерений.

Осуществляя выполнение лабораторных работ по другим разделам «Общего физического практикума» студенты закрепляют знания, полученные в рамках дисциплин курса «Общей физики» и имеют дополнительную возможность к самостоятельному изучению теоретических основ общефизических дисциплин.

Проведение лабораторных занятий.

Методика проведения практических занятий.

Практические занятия состоят в выполнении студентами лабораторных работ согласно тематическому плану.

Каждая работа обеспечена описанием, включающим

- цель работы;
- теоретические основы работы;
- описание лабораторной установки и (или) компьютерной программы;
- план проведения измерений;
- указания по обработке и представлению результатов;
- контрольные вопросы;
- список рекомендованной литературы.

Выполнение лабораторной работы студентом состоит из следующих частей:

- подготовка к работе на основе описания;
- получение допуска к работе в результате устного тестирования преподавателем по учебному материалу, изложенному в описании и рекомендованной литературе;
- выполнение упражнений на лабораторной установке или компьютере;
- обработка данных и подготовка отчета;
- финальная защита выполненной работы перед преподавателем.

Каждому студенту заблаговременно выдается описание лабораторной работы для самостоятельного изучения и подготовки к выполнению, в конце описания каждой работы приводится список литературы по теме данной работы для более детального изучения материала.

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ

Цель работы - измерение скорости звука в воздухе методом акустического интерферометра. При выполнении лабораторной работы студенты ознакомятся со звуковыми волнами, полем скоростей и давлений в акустическом резонаторе, с понятием скорости звука как термодинамической характеристикой среды.

Теоретические основы работы

Звуковые волны, скорость звука и термодинамические характеристики. В жидкостях и газах возможны лишь сжатия и растяжения, поэтому в них могут распространяться только продольные волны. Пусть x - координата, вдоль которой распространяется волна, а $\xi(x, t)$ - смещения частиц среды. Рассмотрим трубку тока сечением S и выпишем уравнение движения для ее элемента длиной Δx :

$$\rho \Delta x S \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = S(p(x, t) - p(x + \Delta x, t)), \quad (1)$$

где $p = p_0 + \Delta p$ - давление, $\rho = \rho_0 + \Delta \rho$ - плотность среды, представленные в виде суммы их равновесных значений и возмущений, связанных с волной. Переходя к пределу $\Delta x \rightarrow 0$

$$(p(x + \Delta x, t) - p(x, t)) = \Delta p(x + \Delta x, t) - \Delta p(x, t) \approx \Delta x \partial(\Delta p(x, t)) / \partial x,$$

получим из уравнения (1)

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = -\frac{\partial \Delta p}{\partial x}, \quad (2)$$

где использовано предположение о малости амплитуды волны – малости возмущений плотности $\Delta \rho \ll \rho_0$. В этом случае

$$\Delta \rho = \rho - \rho_0 = \rho_0 \left(\frac{\Delta x}{\Delta x + \xi(x + \Delta x) - \xi(x)} - 1 \right) \approx \rho_0 \left(\frac{1}{1 + \partial \xi / \partial x} - 1 \right) \approx -\rho_0 \frac{\partial \xi}{\partial x}. \quad (3)$$

Для малых возмущений плотности можно также написать

$$\Delta p = \left(\frac{dp}{d\rho} \right)_{\rho=\rho_0} \Delta \rho = c^2 \Delta \rho, \quad (4)$$

где введено обозначение

$$c = \sqrt{\left(\frac{dp}{d\rho} \right)_{\rho=\rho_0}}. \quad (5)$$

Подставив (3) и (4) в (2), получим волновое уравнение $\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}$, из которого видно, что

величина c является скоростью волны – скоростью звука в среде.

Определим скорость звука для идеального газа, используя формулу (5). Ньютон предполагал, что звуковые колебания происходят изотермически. Тогда c определяется из уравнения состояния $p = \rho RT / \mu$:

$$c = \sqrt{\frac{RT}{\mu}} = \sqrt{\frac{p_0}{\rho_0}}. \quad (6)$$

Лаплас предположил, что звуковые колебания происходят адиабатически. Тогда c определяется из уравнения адиабаты $p = p_0 (\rho / \rho_0)^\gamma$ (где $\gamma = C_p / C_v$ - показатель адиабаты):

$$c = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}} = \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho_0}}. \quad (7)$$

Из-за явного различия между числовыми величинами, рассчитанными по формулам (6) и (7), нетрудно сделать выбор, проведя измерения скорости звука. Эксперимент показывает справедливость формулы (7). Более того, формула (7) дает один из наиболее точных способов измерения показателя адиабаты:

$$\gamma = \mu c^2 / (RT), \quad (8)$$

т.е. для определения γ достаточно измерить скорость звука и температуру газа (при известной молекулярной массе газа μ).

Величину скорости звука, полученную путем измерения, используют для вычисления термодинамических характеристик, которые трудно измерить непосредственно. Например, как

следует из формулы (5), коэффициент адиабатической сжимаемости $\beta_s = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_s$ можно найти

по измерениям скорости звука и плотности:

$$\beta_s = \frac{1}{\rho c^2}. \quad (9)$$

Этот коэффициент связан с изотермическим коэффициентом сжимаемости $\beta_T = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T$

формулой $\beta_s = \beta_T / \gamma$. Определив для некоторой жидкости значение адиабатической сжимаемости из измерений скорости звука, а также определив из статических измерений величины изотермической сжимаемости и теплоемкости при постоянном давлении, можно найти γ и теплоемкость при постоянном объеме $C_v = C_p / \gamma$. Далее, используя

термодинамическую формулу $C_p - C_v = Tc^2 \varepsilon^2$, можно найти коэффициент теплового

расширения $\varepsilon = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$.

Вынужденные звуковые колебания в трубе. Рассмотрим звуковые колебания в трубе длиной L , один из торцов которой ($x = L$) закрыт твердой крышкой, а другой торец ($x = 0$) совершает гармонические колебания с частотой ω .

Скорости частиц газа в плоской звуковой волне описываются

формулой $v_1 = \frac{\partial \xi}{\partial t} = A_1 \cos(kx - \omega t - \varphi_1)$, где волновое число k и частота ω связаны

соотношением $k = \omega / c$, A_1 и φ_1 - произвольные постоянные. Если пренебречь влиянием вязкости, то бесконечно длинная труба, расположенная вдоль оси x , не будет возмущать звуковую волну, и скорости частиц будут описываться той же формулой. Если в трубу добавить твердую крышку, расположенную перпендикулярно стенкам при $x = L$, то в дополнение к падающей волне появится отраженная волна со скоростями частиц $v_2 = A_2 \cos(kx + \omega t - \varphi_2)$.

Скорости частиц на твердой крышке должны обращаться в нуль: $v = v_1 + v_2 = 0$ при $x = L$ для любого момента времени. Этого можно добиться, наложив следующие условия на свободные константы: $A_2 = -A_1$, $\varphi_2 = \varphi_1 + kL$. Тогда полная скорость частиц будет равна

$$v = A_1 (\cos(k(x - L) - \omega t) - \cos(k(x - L) + \omega t)) = 2A_1 \sin(k(x - L)) \sin(\omega t).$$

В то же время при $x = 0$ скорость частиц должна совпадать со скоростью колеблющегося торца:

$v = v_0 \sin(\omega t)$. Отсюда находим $A_1 = -\frac{v_0}{2 \sin(kL)}$, а окончательное решение для поля скоростей

в трубе принимает вид: $v = v_0 \frac{\sin(k(L - x))}{\sin(kL)} \sin(\omega t)$. Таким образом, амплитуда колебаний

скорости $a = v_0 \left| \frac{\sin(k(L - x))}{\sin(kL)} \right|$ неоднородна вдоль трубы - см. пример на рис. 1. Максимальные значения амплитуды, достигаемые в пучностях стоячей волны, превышают амплитуду скорости колеблющегося торца в $1/\sin(kL)$ раз.

Если величина $\left| \sin(kL) \right|$ стремится к нулю, амплитуда колебаний неограниченно возрастает - возникает явление резонанса. В этом случае, как и при резонансе гармонического осциллятора, приобретают важность потери энергии в системе (которыми мы в проведенном рассмотрении пренебрегали). Именно они ограничивают рост амплитуды колебаний. В результате скорости частиц в пучностях достигают максимальных значений v_m , а поле скоростей представляется в виде

$$v \approx \pm v_m \sin(kx) \sin(\omega t). \quad (10)$$

Тогда, как следует из формулы (2), поле акустических давлений есть

$$\Delta p \approx \mp \rho_0 c v_m \cos(kx) \cos(\omega t). \quad (11)$$

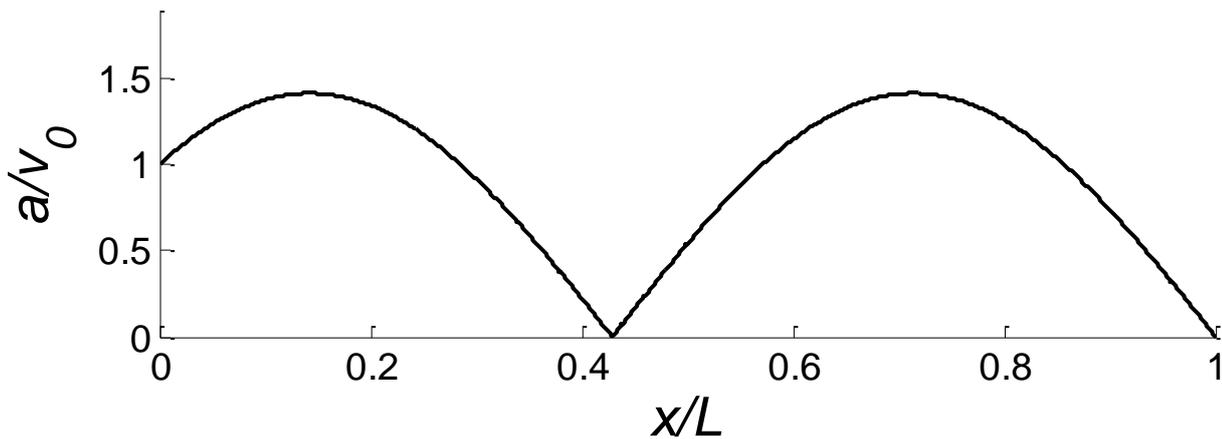


Рис.1. Распределение амплитуды колебаний скорости вдоль трубы для случая $kL = 7\pi/4$.

Поле амплитуды давлений сдвинуто относительно поля амплитуды скорости частиц вдоль оси x на четверть длины волны, т.е. узлам скоростей частиц соответствуют пучности давлений и наоборот, пучностям скоростей соответствуют узлы давлений. Согласно (10, 11) при приближении к излучающему торцу трубы ($x \rightarrow 0$) амплитуда скорости стремится к нулю, а амплитуда давления – к максимальному значению. Отметим, что формула (10) является приближенной. В действительности амплитуда скорости при $x = 0$ равна заданной величине v_0 , но при резонансе эта величина много меньше, чем v_m .

Из соотношения $|\sin(kL)| = 0$ получаем условия резонансов: $kL = \pi, 2\pi, 3\pi, \dots, n\pi, \dots$

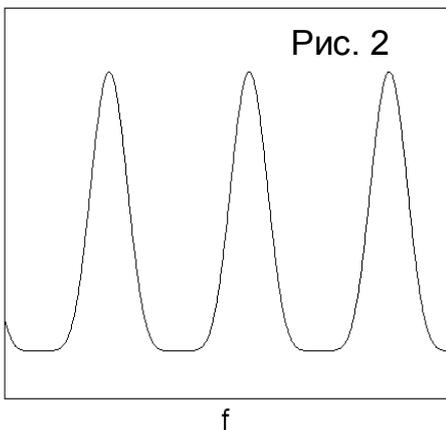
Выражая условия через длину волны $\lambda = 2\pi/k$, получим

$$\frac{L}{(\lambda/2)} = 1, 2, \dots, n, \dots, \quad (12)$$

т.е. n - это число половин длин звуковых волн, укладывающихся на длине трубы.

Если изменять частоту, с которой происходит возбуждение звука, то резонансы будут возникать на частотах $f = c/(2L), 2c/(2L), 3c/(2L), \dots, nc/(2L)$,

где $f = \omega/(2\pi)$. Характерная зависимость интенсивности колебаний от частоты внешнего воздействия показана на рис.2. В общем случае акустический резонатор имеет



набор собственных частот, при которых интенсивность звуковых колебаний достигает локальных максимумов. Колебания, соответствующие локальным максимумам, называются собственными модами резонатора, а число n - номером моды.

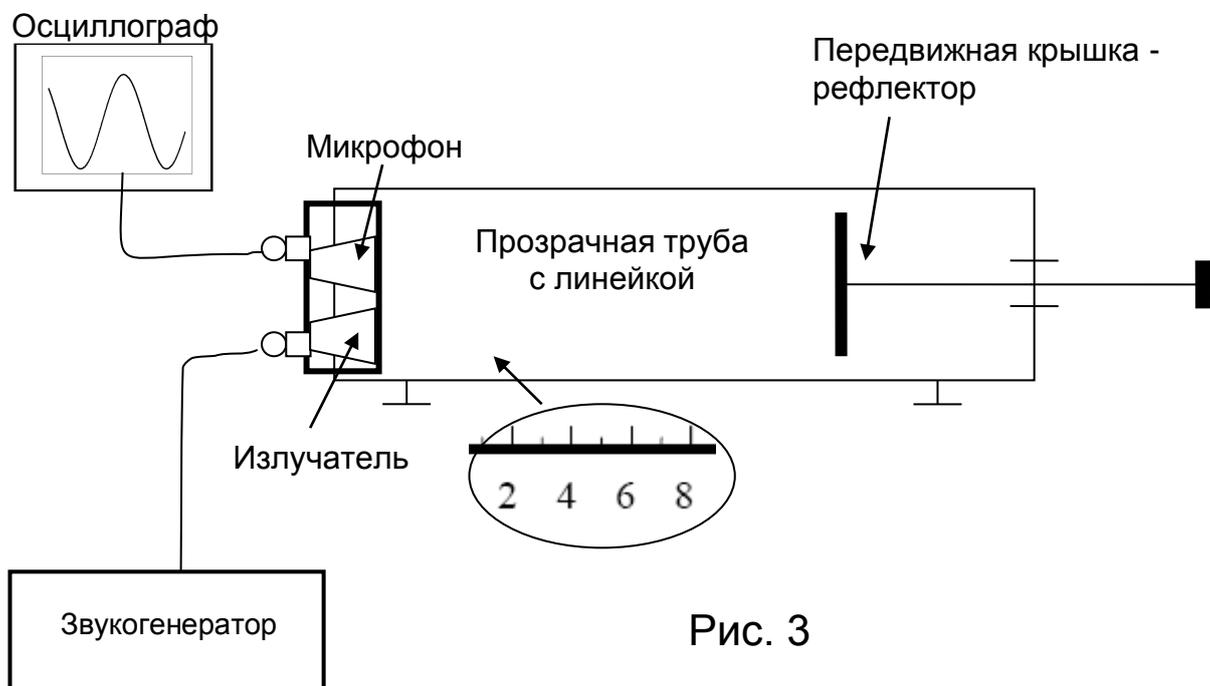
Если при фиксированной частоте f изменять расстояние между торцами резонатора, то резонансы, т.е. максимумы интенсивности колебаний, будут последовательно возникать при изменении L на половину длины волны (см. (12)). Таким способом может быть измерена длина волны. Приборы, измеряющие этим способом длины волн различной природы, называются интерферометрами.

Экспериментальная часть

Идея эксперимента. В эксперименте используется акустический интерферометр в виде трубы с твердыми крышками, одну из которых можно перемещать. При заданной частоте звуковой волны f в трубе имеет место резонанс, если на длине трубы укладывается целое число полуволн. Наблюдение последовательных резонансов при перемещении крышки позволяет найти длину звуковой волны λ . Тогда фазовая скорость волны рассчитывается по формуле $c = \lambda f$.

Экспериментальная установка. На рис.3 показана схема экспериментальной установки. Звуковые волны в трубе с твердыми крышками возбуждаются акустической головкой - пьезоэлектрическим излучателем. На излучатель от звукогенератора подается синусоидальное электрическое напряжение, стабилизированное по частоте и амплитуде, которое вследствие обратного пьезоэффекта преобразуется в деформацию излучающей поверхности. Диапазон рабочих частот излучающей головки – 1500-3000 Гц. На том же торце трубы установлена приемная акустическая головка (микрофон). В этом месте при резонансе возникает пучность давления (см. формулу (11)). Давление вызывает деформации приемной поверхности микрофона, которые вследствие прямого пьезоэффекта преобразуются в электрическое напряжение. Сигнал с приемной головки подается на пластины Y осциллографа.

Расстояние L между излучателем и рефлектором изменяется плавным перемещением крышки, и при этом изменяется величина амплитуды регистрируемого сигнала. Максимумы следуют при изменении положения рефлектора на расстояние $\lambda/2$. По положениям максимумов определяется длина волны и, так как частота генерируемой волны известна, находится скорость звука в среде.



Проведение измерений

1. Включив генератор и осциллограф, дайте им прогреться 10 мин. Установите рефлектор на расстоянии 10-15 см от акустической головки. Установите частоту звукогенератора в пределах диапазона рабочих частот головки.
2. Запишите значение частоты, установленное на звукогенераторе. Запишите значение частоты, измеренное с помощью осциллографа.
3. Плавно перемещая рефлектор, добейтесь максимальной амплитуды сигнала на экране осциллографа и запишите положение рефлектора X_1 , определенное по шкале. Продолжайте перемещать рефлектор в одном направлении насколько позволяет размер трубы, записывая каждое его положение X_N , соответствующее резонансу.
4. Повторите цикл измерений (пункты 2 и 3) не менее пяти раз, выбирая другие частоты из рабочего диапазона.

Для расчета термодинамических характеристик нужно измерить температуру воздуха.

Обработка данных

1. Для каждого цикла измерений нужно построить график зависимости положения рефлектора X_N от величины $N/2$, где N – номер последовательных наблюдений резонанса. Поскольку каждое

перемещение соответствовало смещению рефлектора на $\lambda/2$, то $X_N = \lambda \frac{N}{2} + const$. Поэтому

наклон графика дает величину λ . Определите ее методом наименьших квадратов.

2. По известным частоте и длине волны вычислите скорость звука.
3. В качестве конечного результата примем величину скорости звука, среднюю по всем циклам измерений. Определите для нее доверительные интервалы.
4. Рассчитайте для воздуха термодинамические характеристики γ , β_s и ε , взяв плотность

воздуха из таблиц и приняв $C_p = 1.007 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}$.

Контрольные вопросы

1. Считая, что смещения частиц в плоской гармонической звуковой волне имеют амплитуду a , определите амплитуды скорости частиц, акустического давления и волновых флуктуаций плотности.
2. Как соотносятся акустическое давление и атмосферное?
3. Как соотносятся скорость частиц в звуковой волне и скорость звука?
4. Можно ли по формуле (5) определить скорость звука в твердом теле?
5. Нарисуйте, как будет изменяться сигнал микрофона, если его перемещать от одного торца трубы к другому? Рассмотрите случаи нерезонансных и резонансных колебаний в трубе.
6. Как соотносятся скорость звука и скорость молекул в газе?
7. Чему равны коэффициенты изотермической сжимаемости и теплового расширения для идеального газа?

Литература

- Алешкевич В.А., Деденко Л.Г., Караваев В.А. Механика. Университетский курс общей физики. М.: Издательский центр «Академия», 2004.
- Стрелков С.П. Механика. Общий курс физики. М.: «Наука», 2004.
- Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М.: «Высшая школа», 1987.
- Булкин П.С., Попова И.И. Общий физический практикум. Молекулярная физика. М.: Издательство МГУ, 1988.

Лабораторная работа

ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРА АТОМА ВОДОРОДА

Цель работы – исследование спектральных закономерностей в оптическом спектре водорода. Вычисление по результатам измерений постоянной Ридберга. При выполнении лабораторной работы студенты ознакомятся с основами спектроскопии, закономерностями в спектре водородоподобных атомов, формализме описания Бальмеровской серии атома водорода.

Теоретические основы работы

Квантово-механическая задача о движении электрона в кулоновском поле ядра. Атом водорода является простейшей атомной системой; для него уравнение Шредингера может быть решено точно. Поэтому спектр атома водорода является предметом тщательного экспериментального и теоретического исследования.

Объяснение структуры спектра излучения атомов требует знания схемы атомных энергетических уровней, что, в свою очередь, требует решения задачи о движении электрона в эффективном поле атома. Для атома водорода и водородоподобных (одноэлектронных) атомов определение энергетических уровней значительно упрощается, так как квантовомеханическая задача об относительном движении электрона (заряд $-e$, масса m_e) и ядра (заряд Ze , масса M) сводится к задаче о движении частицы с эффективной массой $\mu = m_e M / (m_e + M)$ в кулоновском поле $-Ze^2/r$. Однако даже для водородоподобных атомов это решение не является простым.

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 R - константа, называемая постоянной Ридберга, а m и n - целые числа.

Формула (1) известна в спектроскопии с 1885 г. Она была найдена эмпирически и получила название обобщенной формулы Бальмера. Эта формула достаточно правильно описывает экспериментальные значения линий водорода при $R=109\,677,6 \text{ см}^{-1}$. Однако физический смысл формулы в то время был непонятен.

Для объяснения спектра атома водорода Нильс Бор в 1913 г. предложил теорию атома, в основу которой положил три постулата:

- 1) из всех возможных с точки зрения классической физики орбит в атоме существуют только некоторые стационарные орбиты, при движении по которым, вопреки представлениям классической электродинамики, электрон не излучает энергии;
- 2) из всех возможных орбит в атоме осуществляются только те, для которых момент количества движения L равен целому кратному величины постоянной Планка:

$$L = n\hbar$$

3) излучение или поглощение энергии происходит при переходе атома из одного стационарного состояния в другое, а частота излучаемого (поглощаемого) света связана с разностью энергий атома в стационарных состояниях соотношением

$$\hbar\nu = E_2 - E_1, \quad (3)$$

где ν - частота излучаемой линии.

Использование этих постулатов с учетом кулоновского взаимодействия между ядром и электроном позволяет легко определить возможные энергетические состояния водородоподобного атома. Если считать ядро неподвижным, то эти энергетические состояния определяются выражением

$$E_n = -\frac{2\alpha\pi^2 m_e e^4 Z^2}{\hbar^2} \frac{1}{n^2}. \quad (4)$$

В свою очередь, знание энергетических состояний атома позволяет в соответствии с формулой (4) определить возможные частоты его излучения и объяснить наблюдаемые спектральные закономерности (см. рис.1). Отметим, что квантовомеханический расчет дает тот же результат, однако число n в этих двух подходах имеет различный смысл.

Из рис.1 видно, что линии в спектре водорода можно разложить по сериям: для всех линий серии значение n остается постоянным, а m может принимать любые значения от $n+1$ до ∞ .

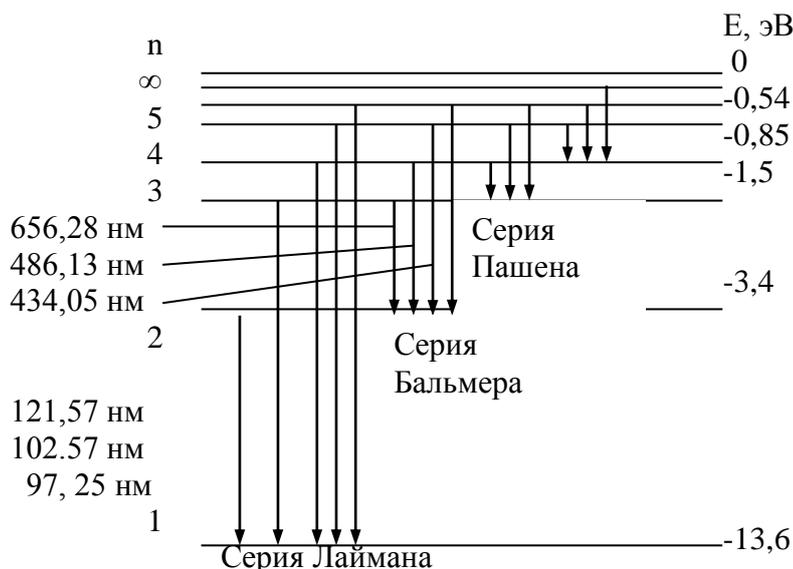


Рис.1. Уровни энергии атома водорода и образование спектральных серий

В данной работе изучается серия Бальмера, линии которой лежат в видимой области. Для серии Бальмера $n=2$. Величина m для первых четырех линий этой серии принимает значения 3, 4, 5, 6. Эти линии обозначаются символами H_α , H_β , H_γ , H_δ .

Рассмотрим, как можно оценить основное и возбужденное состояния водородоподобного атома. Чтобы найти основные состояния квантовой системы, надо минимизировать, с учетом соотношения неопределенностей, полную энергию. Потенциальная энергия электрона равна кулоновской энергии электрона в поле ядра с зарядом Z . Так как электрон локализован в области размером r (радиус его орбиты), то по соотношению неопределенностей его импульс $p \propto \hbar/r$, и следовательно полная энергия определяется выражением

$$E = -\frac{Ze^2}{r} + \frac{\hbar^2}{2m_e r^2} \quad (5)$$

Дифференцирование этого выражения по r приводит к следующему условию для минимального значения энергии:

$$\frac{Ze^2}{r} - \frac{\hbar^2}{m_e r^3} = 0 \quad (6)$$

или

$$r_B = \frac{\hbar^2}{Zm_e e^2} \quad (7)$$

Мы получили значение боровского радиуса (радиуса первой орбиты) для электрона в поле ядра с зарядом Z . Энергию основного состояния получим, подставляя (7) в (5):

$$E = -\frac{m_e e^4}{2\hbar^2} Z^2 = -RZ^2 \quad (8)$$

Аналогичным образом могут быть найдены энергии возбужденных состояний. Дискретные значения энергии электрона в атоме получаются из того условия, что на длине орбиты, по которой движется электрон, должно укладываться целое число волн де Бройля. Если радиус орбиты r , то n -му состоянию электрона соответствует условие

$$2\pi r = \lambda n \quad (n=1,2,3,\dots), \text{ или } m_e v_n = \frac{nh}{2\pi r} \quad (9)$$

Полученное соотношение полностью совпадает со вторым постулатом Бора.

Высшие квантовые состояния имеют n узлов, так как на длине электронной орбиты укладывается n волн де Бройля. Поэтому характерная длина волны λ такого состояния (неопределенность в координате частицы) будет равна r/n , что приводит к увеличению кинетической энергии этих состояний.

Действительно, импульс $p \propto \hbar/\lambda = \frac{nh}{r}$ (10), а кинетическая энергия $T \propto \frac{n^2 \hbar^2}{2m_e r^2}$ (11), что соответствует

боровскому радиусу состояния частицы с квантовым числом n : $r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{Zm_e e^2}$ (12) и энергии

$$E_n = -\frac{m_e Z^2 e^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2} = -R \frac{Z^2}{n^2}. \quad (13)$$

Мы предположили, что радиус орбиты r имеет фиксированное значение. Однако, согласно квантовой механике, радиусы орбит “разбросаны” в окрестности классически устойчивой орбиты. Поэтому здесь в качестве оценки радиуса взято вполне определенное значение r , соответствующее минимуму энергии $E(r)$.

В действительности электрон может находиться с разной вероятностью на любом расстоянии от ядра. Поэтому числовой множитель в формуле (13), несмотря на то, что он получился правильным, достаточно условен, а вот зависимость от квантового числа n принципиально верна.

Полученное решение справедливо для любой “водородоподобной” системы – системы из двух частиц с противоположными зарядами, связанных лишь электростатическими силами. Это однократно ионизованный гелий He^+ , двукратно ионизованный Li^{++} , трехкратно ионизованный бериллий Be^{+++} и т.д. Сюда же относится и позитроний – система e^+e^- , мюонные атомы – атомы с электроном, замещенным на отрицательный мюон μ^- (масса мюона $\sim 200 m_e$).

Ранее мы предполагали, что электрон в атоме движется в кулоновском потенциале неподвижного ядра. На самом деле движение электрона происходит вокруг центра масс системы, а потому энергия состояния атом зависит от приведенной массы μ системы, состоящей из электрона и ядра. Поэтому положение серий спектра водорода и дейтерия слегка отличаются. Это различие носит название изотопического сдвига. Легко показать, что величина относительного сдвига между линиями водорода и дейтерия определяется выражением

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{m_e}{m_p} \frac{A_D - A_H}{A_D A_H} \cong \frac{m_e}{2M_H}, \quad (14)$$

где m_e , m_p , M_H – масса электрона, протона и атома водорода, а $A_H=1$, $A_D=2$ – массовые числа водорода и дейтерия.

Экспериментальная часть

Идея эксперимента. С помощью градуировки спектрометра по известным спектральным линиям гелия и неона строится градуировочная кривая спектрометра, которая затем используется для визуального выявления закономерностей в спектре атома водорода. Используя эти экспериментальные данные определяется постоянная Ридберга R_H и сравнивается с расчетным значением R_H .

Экспериментальная установка. В эксперименте используется экспериментальная установка, предназначенная для исследования спектра излучения водорода. Ее схема размещения приведена на рис.2.

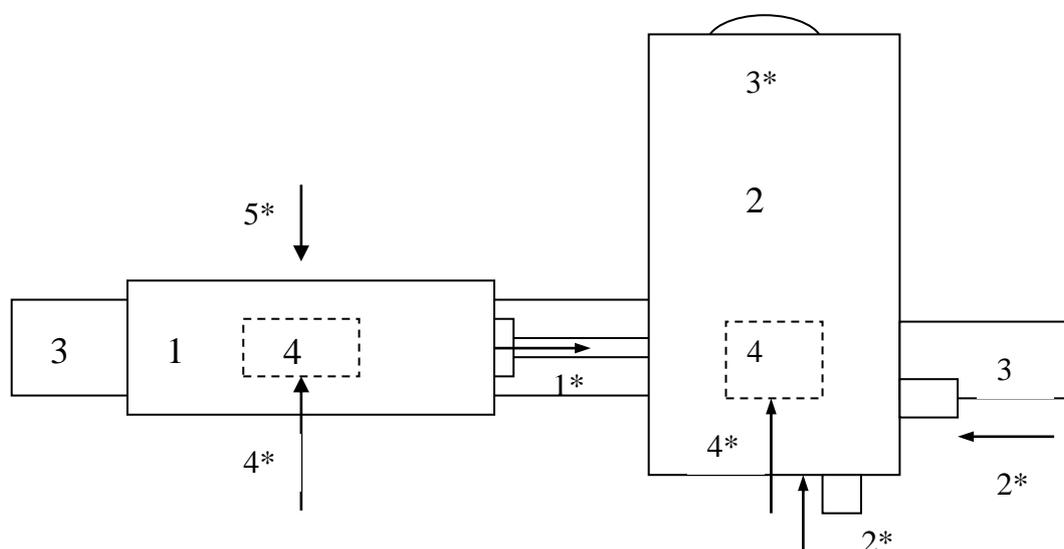


Рис.2. Схема размещения устройств установки в рабочем состоянии (вид сверху). 1 – облучатель, 2 – монохроматор, 3 – рельс, 4 – рейтеры.

Проведение измерений

Спектрометр нуждается в предварительной градуировке. Для градуировки в коротковолновой части спектра удобно применять гелиевую лампу, а в длинноволновой и средней части спектра – неоновую лампу.

Градуировочную кривую следует строить в крупном масштабе. По оси x откладываются градусные деления барабана, а по оси y – длины волн соответствующих линий. Иногда при построении графика некоторые экспериментальные точки оказываются смещенными от плавной кривой. Чаще всего такие выбросы свидетельствуют о неправильной расшифровке наблюдаемой картины спектральных линий (главным образом для неона). В этом случае необходимо более внимательно сопоставить картину с таблицей и внести в градуировочный график необходимые исправления.

В опытах по определению длин волн бальмеровской серии источником света служит водородная лампа Н-образной формы. Для увеличения яркости интересующих нас линий атомарного водорода в состав газа, которым заполняют трубку при ее изготовлении, добавляют пары воды. Молекулы воды в электрическом разряде разлагаются, образуя атомарный водород. Трубка заполняется газом при давлении 5-10 Тор.

Следует отметить, что в спектре водородной лампы наряду с линиями атомного спектра наблюдается также спектр молекулярного водорода. Однако интенсивность молекулярных линий значительно слабее, и отождествление ярких атомных линий на фоне молекулярного спектра не представляет большого труда. Начинать поиск атомных линий нужно с наиболее интенсивной красной линии H_α . Вторая линия, H_β

зелено-голубая. В промежутке между этими линиями располагается несколько красно-желтых и зеленых сравнительно слабых молекулярных полос. Третья линия, H_{γ} - фиолетово – синяя. Четвертая линия, H_{σ} -фиолетовая, и найти ее удастся не всегда.

Обработка данных

1. Проградуируйте спектрометр по спектрам гелия и неона. Постройте градуировочный график.
2. Измерьте положение линий H_{α} , H_{β} , H_{γ} и H_{σ} (если эта линия видна) и спомощью калибровочного графика определите их длины волн.
3. Убедитесь в том, что отношение длин волн водородных линий соответствует формуле (4).
4. Для каждой из наблюдаемых линий водорода вычислите значение постоянной Ридберга R_H , определите ее среднее значение по всем измерениям и оцените погрешность измерений. Сравните результаты опыта с расчетным значением R_H .

Контрольные вопросы

1. Поясните устройство и назначение призменного монохроматора и монохроматора с дифракционной решеткой.
2. Поясните образование спектральных серий атома водорода?
3. Что такое изотопический сдвиг?
4. Что такое тонкое расщепление?
5. Что такое лэмбовский сдвиг?

7. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю)

7.1. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

Текущая аттестация осуществляется путем выполнения лабораторных работ в 3 этапа: теоретический допуск, непосредственное выполнение экспериментальной части со снятием данных, защита отчета по работе.

Выполнение каждой лабораторной работы оценивается по четырехбалльной системе: «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично».

Студент получает зачет при наличии положительных оценок по всем запланированным в семестре лабораторным работам.

Список оценок по лабораторным работам предоставляется в качестве дополнительной информации при сдаче экзамена по соответствующему разделу курса «Общей физики».

Промежуточная аттестация – зачет в 1, 2, 3, 4 и 5-м семестрах.

7.2 Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.

- для зачета

Зачет проставляется студенту по факту выполнения (положительной защиты) всех лабораторных работ, предусмотренных практикумом к данной дисциплине по общей физике.

ШКАЛА И КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ результатов обучения (РО) по дисциплине (модулю)				
РО и соответствующие виды оценочных средств	Оценка		Зачтено	
	Не зачтено			
Знания (теоретические допуски к лабораторным работам)	Отсутствие знаний	Фрагментарные знания	Общие, но не структурированные знания	Сформированные систематические знания
Умения	Отсутствие	В целом	В целом успешное, но	Успешное и

<i>(защита лабораторных работ)</i>	умений	успешное, но не систематическое умение	содержащее отдельные пробелы умение (допускает неточности непринципиального характера)	систематическое умение
Навыки (владения, опыт деятельности) <i>(зачет)</i>	Отсутствие навыков (владений, опыта)	Наличие отдельных навыков (наличие фрагментарного опыта)	В целом, сформированные навыки (владения), но используемые не в активной форме	Сформированные навыки (владения), применяемые при решении задач

8. Ресурсное обеспечение:

– Перечень основной и дополнительной литературы.

1. Шпольский Э.В. Атомная физика: в 2 т. Т 1 / Э.В. Шпольский. – 8-е изд. стер. – М.: Лань, 2010.
2. Фриш С.Э. Оптические спектры атомов / С.Э. Фриш – 2-е изд. испр. – М.: Лань, 2010. – 640 с.
3. Сивухин Д.В. Курс общей физики: в 5 т. Т 5, ч. 1 / Д.В. Сивухин. – 2-е изд. стер. – М.: Физматлит, 2002. – 784 с.

– Описание материально-технического обеспечения.

Аудитории практикума по физике (лабораторное оборудование: 10 мест – механика; лабораторное оборудование: 10 мест – молекулярная физика; лабораторное оборудование: 10 мест – электромагнетизм; лабораторное оборудование: 10 мест – оптика), №№124, №137, №139, №140 УНЛК

9. Соответствие результатов обучения по данному элементу ОПОП результатам освоения ОПОП указано в общей характеристике ОПОП.

10. Язык преподавания русский.

11. Преподаватель (преподаватели).

Старший преподаватель кафедры физики и геофизики, руководитель образовательной программы по направлению подготовки 03.03.02 «Физика» Андрей Валерьевич Сулимов.

12. Автор (авторы) программы.

Старший преподаватель кафедры физики и геофизики, руководитель образовательной программы по направлению подготовки 03.03.02 «Физика» Андрей Валерьевич Сулимов.